



Università degli Studi di Siena

Dipartimento di Chimica

Direttore Prof. Riccardo Basosi

Dottorato di Ricerca in Scienze Chimiche XVI ciclo

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

Dottorando di Ricerca:
Dott. Mirco Federici

SUPERVISORE:
Prof. Riccardo Basosi

TUTOR:
Dott. Sergio Ulgiati

Coordinatore del Dottorato
Prof. Enzo Tiezzi

Se si insegnasse la bellezza alla gente, la si fornirebbe di un'arma contro la rassegnazione, la paura e l'omertà. All'esistenza di orrendi palazzi sorti all'improvviso, con tutto il loro squallore, da operazioni speculative, ci si abitua con pronta facilità, si mettono le tendine alle finestre, le piante sul davanzale, e presto ci si dimentica di come erano quei luoghi prima, ed ogni cosa, per il solo fatto che è così, pare dover essere così da sempre e per sempre. È per questo che bisognerebbe educare la gente alla bellezza: perché in uomini e donne non si insinui più l'abitudine e la rassegnazione ma rimangano sempre vivi la curiosità e lo stupore.

Peppino Impastato

Federici XVI

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
1.1	L'evoluzione del Trasporto negli ultimi 30 anni.	2
1.2	La scelta dei casi studio	4
2	METODOLOGIA	6
2.1	La definizione di Trasporto.	6
2.2	Analisi Termodinamica Multicriteriale	7
2.2.1	Bilancio di Massa (scala locale)	8
2.2.2	Analisi dei flussi di Materia, MFA (scala globale)	9
2.2.3	Analisi Energetica (scala locale)	10
2.2.4	Analisi Energetica (scala globale)	10
2.2.5	Analisi Exergetica (scala locale)	11
2.2.6	Analisi Exergetica su scala globale, EMIPS	13
2.2.7	Analisi Emergetica	13
3	LE RELAZIONI TRA L'EFFICIENZA DEI SISTEMI DI TRASPORTO LOCALI E LE VARIABILI MACROECONOMICHE.	17
3.1	L'applicazione ai sistemi di trasporto locali; la province di Siena e Brescia	17
3.2	Il sistema dei trasporti della Provincia di Brescia	18
3.3	L'approccio metodologico	19
3.3.1	Costruzione delle infrastrutture, dei mezzi d'opera e dei veicoli	20
3.3.2	Manutenzione	20
3.3.3	Uso	21
3.3.4	Allocazione degli input tra i sotto-sistemi	22
3.4	Discussione dei risultati	22
3.4.1	Ulteriori risultati: la scala globale	25
3.5	La complessità economica e il sistema dei trasporti	30
3.5.1	Il sistema produttivo e il traffico passeggeri.	31
4	L'EFFICIENZA E L'IMPATTO AMBIENTALE DELLE GRANDI VIE DI COMUNICAZIONE: L'ASSE MILANO-NAPOLI.	33
4.1	L'autostrada Milano-Napoli	34
4.1.1	Caratteristiche dell'Autostrada	35
4.1.2	L'approccio metodologico	35
4.1.3	Costruzione delle infrastrutture, dei mezzi d'opera e dei veicoli	36
4.1.4	Risultati	37
4.2	La Linea ad Alta Velocità Milano-Napoli (TAV)	51
4.2.1	Gli stati di avanzamento	51
4.2.2	L'approccio metodologico	53
4.2.3	Il bilancio di massa della TAV Mi-Na	55
4.2.4	Il bilancio delle emissioni locali e globali	57
4.2.5	L'analisi energetica locale	58
4.2.6	L'analisi energetica globale	59
4.2.7	L'EMIPS	62
4.2.8	L'analisi emergetica	63
4.3	La linea Ferroviaria Milano-Napoli	65
4.3.1	Risultati dell'Analisi Multicriteriale.	65
4.4	Confronto tra i sistemi ferroviari fin qui analizzati	67
4.5	Confronto dei risultati sull'Asse Milano-Napoli	67

4.5.1	Il confronto tra Autostrada e Treno.	68
5	L'INTEGRAZIONE DELLE ANALISI DI SECONDO PRINCIPIO: LA PERDITA EMERGETICA E L'AMPLIFICAZIONE EMERGETICA	74
5.1	La Perdita Emergetica	74
5.1.1	L'applicazione della Perdita Emergetica ai casi studio.	75
5.2	L'Amplificazione Emergetica	77
5.2.1	L'applicazione dell'EA al caso studio.	78
6	CONCLUSIONI	80
7	BIBLIOGRAFIA	83
8	ALLEGATI A	
9	ALLEGATI B	
9	ALLEGATI C TABELLE DI CALCOLO	CD ROM

Federici XVI

1 INTRODUZIONE

Il trasporto è una delle attività antropiche più energivore ed è il primo responsabile dell'inquinamento delle aree urbane. L'attività di trasporto influenza o "affligge" la quotidianità di un gran numero di persone sottraendo tempo per le altre attività (lavorative e non) e in più occupa e deturpa un'enorme quantità di spazio e di territorio: nel 2000 a Firenze, i veicoli occupavano il 4.1% dell'intera superficie urbana (Basosi et al. 2001). Il settore dei trasporti è inoltre caratterizzato da una crescita continua delle sue dimensioni ed i fenomeni di criticità e di allarme per la salute umana, dovuti all'intensificazione ed alla congestione del traffico, sono divenuti sempre più frequenti di anno in anno (CamCom Lombardia, 2000) in modo particolare nelle grandi città.

In seguito al recente avvento delle nuove tecnologie di comunicazione (internet, e-commerce etc.) la auspicata dematerializzazione dell'economia si è avverata in parte per ciò che riguarda lo scambio di informazione, ma a questo non ne è conseguita nessuna riduzione nell'uso delle risorse materiali ed energetiche negli altri settori economici. Il riscontro della mancata dematerializzazione dell'economia si ha nell'aumento del movimento (o dello scambio, se si preferisce) delle persone e delle cose, e nell'aumento annuale delle emissioni di gas serra.

Le nazioni necessitano con urgenza di sistemi di trasporto altamente organizzati, e che riescano a ridurre le intensità attuali dei consumi e delle emissioni. In molti paesi, tra cui l'Italia, si ritiene che gli interventi di ottimizzazione dei trasporti debbano essere basati in primo luogo sulla costruzione di nuove vie di comunicazione di più grande capacità. Esiste infatti una sorta di assunto in base al quale la congestione del traffico, e quindi la riduzione dei tempi di percorrenza, possa essere migliorata soltanto attraverso la costruzione di nuove strade e di nuove ferrovie. Se si analizzano le serie storiche, ci si accorge che la disponibilità di nuove linee agisce sul traffico nel modo esattamente contrario; quello che si è osservato negli ultimi trenta anni è stato un aumento continuo delle intensità del traffico collegato proprio all'aumento della disponibilità infrastrutturale. Questo fenomeno è particolarmente evidente a ridosso delle grandi città, dove il potenziamento dei raccordi stradali non ha ridotto il livello di traffico ma ha aumentato la capacità attrattiva della strada, spostando sempre di più le preferenze dei cittadini verso il trasporto individuale.

1.1 L'EVOLUZIONE DEL TRASPORTO NEGLI ULTIMI 30 ANNI.

Dal 1973 al 1988 il consumo energetico dovuto al trasporto di persone e merci nei paesi OECD è passato dal 26% al 32% dei consumi totali, rendendo il trasporto la prima causa del depauperamento delle risorse energetiche, seguito a ruota dal settore manifatturiero (27%) (Shipper, Meyers 1992). Dato che quest'ultimo settore include anche l'industria dell'auto e tutto il suo indotto, è evidente che il consumo totale di energia connesso al settore dei trasporti è in realtà molto più alto del 32% "nominale" e per il futuro ci si deve aspettare una crescita continua.

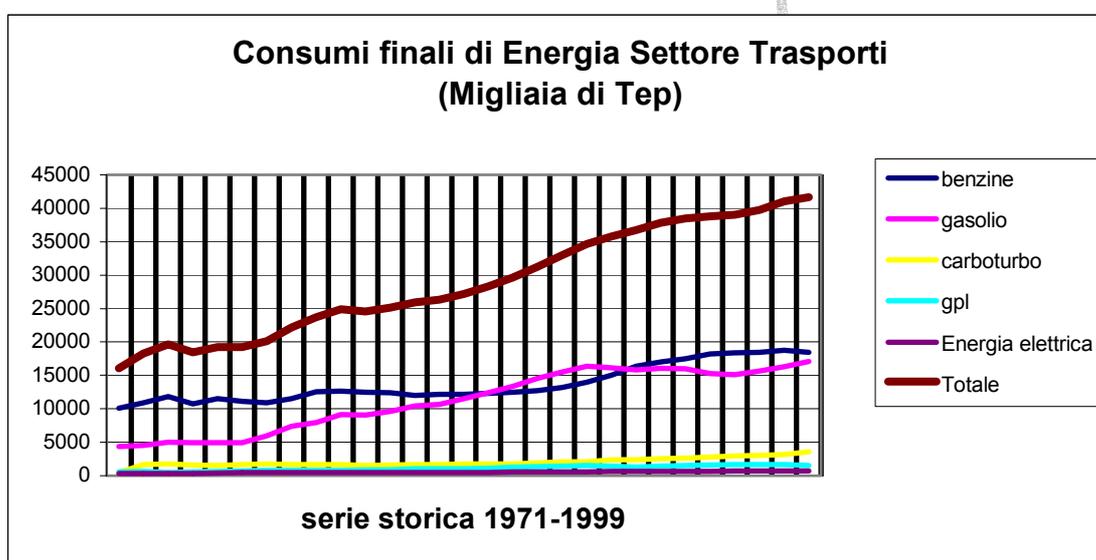


Figura 1. (Dati Enea, 2001)

Nello stesso periodo storico non è cambiato in modo sensibile l'uso quotidiano delle auto. Il grafico in Figura mostra, infatti, che a partire dal 1974 in poi le percorrenze giornaliere si sono assestate intorno ai 30 km/giorno per le auto a benzina e a 60 km/giorno per le auto diesel: i p-km¹ giornalieri (mostrati in Figura 3) hanno seguito lo stesso trend.

Nello stesso periodo storico il numero di automobili per abitante è triplicato: sembra quindi che l'utilizzo dell'auto sia scollegato da bisogni veri e propri di spostamento, ma che sia invece solo dipendente dal possesso di un mezzo proprio.

¹ Persone trasportate per km percorso

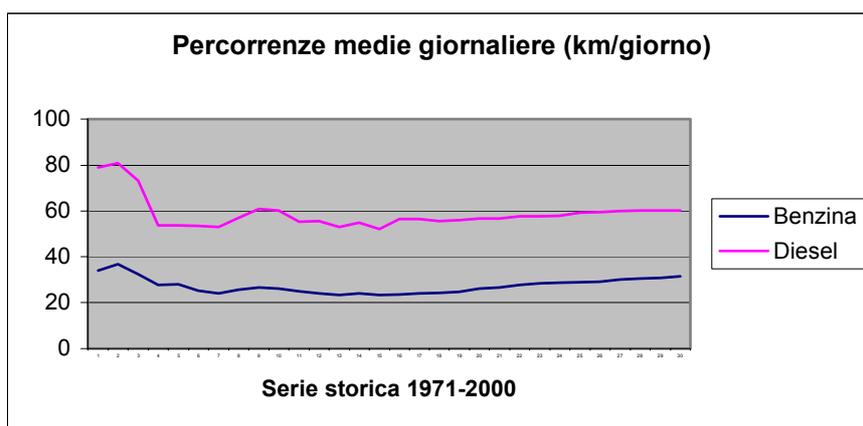


Figura 2. Percorrenze medie giornaliere per auto, serie storica 1971-2000. Elaborazione su dati Enea, 2001.

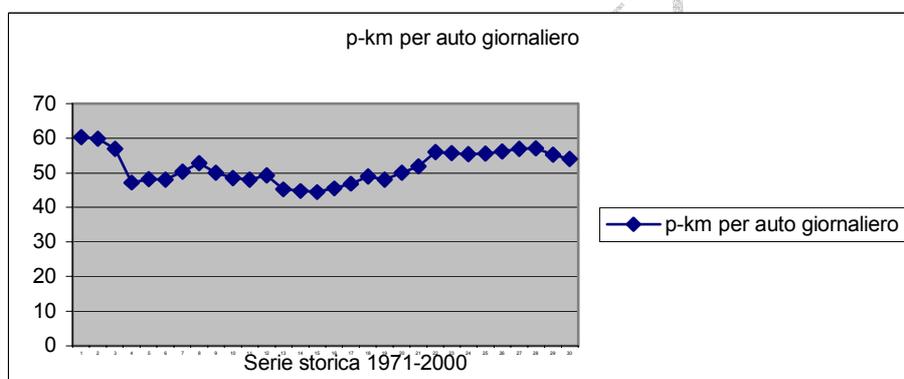


Figura 3. P-km giornalieri per auto. 1971-2000. Elaborazione su dati Enea, 2001.

Inoltre, sebbene l'efficienza termodinamica dei motori (espressa come il rapporto della potenza erogata su potenza assorbita) durante gli ultimi 30 anni sia aumentata mediamente del 5% (Quattroruote, 2000), non si è osservata nessuna riduzione dei consumi nei trasporti (IEA 1997), tanto che negli ultimi 5 anni il consumo di combustibili per trazione in Italia è aumentato mediamente di 2 punti percentuali l'anno (ENI, 2002). Nel caso particolare del trasporto merci, i recenti miglioramenti nell'efficienza dei piccoli camion (portata inferiore a 3.5 tonnellate) e quindi l'abbassamento del loro costo di esercizio, ne ha reso l'uso sempre più diffuso ed ha per contro ridotto l'utilizzo dei grandi camion: la graduale diminuzione del costo del viaggio, che rappresenta una esternalità negativa per le imprese, ha reso sempre più marginale il ruolo della logistica rallentandone quindi lo sviluppo.

Per cui, se da una parte l'efficienza dei singoli mezzi è aumentata, dall'altra l'efficienza del sistema considerato nel suo insieme è diminuita; il basso costo del viaggio legato all'alta efficienza ha portato ad un aumento delle percorrenze medie di viaggio e a minori fattori di carico. Lo stesso fenomeno si è osservato per il trasporto individuale automobilistico: le auto che consumano meno incoraggiano la gente a guidare di più (O. Hagman 2003).

Si dovrebbero preferire le auto meno efficienti? Forse, nessuno andrebbe a lavorare tutti i giorni con un'auto che consuma 0.2 l di benzina per chilometro. Tuttavia prima di scagliarsi in affermazioni ardite di dubbia efficacia ma empiricamente supportabili, concentriamoci sul problema più impellente che è invece capire meglio il vero significato di "efficienza" nella sua completezza.

1.2 LA SCELTA DEI CASI STUDIO

Da quanto esposto fin qui, è evidente che uno studio sistemico del trasporto non può essere portato a termine prescindendo dal contesto territoriale nel quale esso è inserito, e senza analizzare quali sono le relazioni esistenti tra "driving force" di tipo macroeconomiche e sociali e l'assetto del sistema di trasporto ed i relativi impatti ambientali.

L'analisi è stata applicata a due casi studio:

- Il sistema di trasporto nelle Province di Brescia e Siena;
- L'Asse di comunicazione Milano-Napoli;

Le province di Brescia e Siena sono state scelte perché, sebbene siano caratterizzate da differenze geografiche, morfologiche e da una diversa struttura e vocazione economica, mostrano delle similitudini per quanto riguarda le variabili macroeconomiche (come il reddito pro-capite). L'integrazione delle analisi energetiche con il quadro economico di ogni sistema, ed il confronto dei risultati ottenuti sui due territori, permettono di estrapolare indicazioni generali riguardanti le dinamiche dei sistemi di trasporto locali. I risultati di questa prima parte dimostrano inoltre che gli impatti di ciascuna modalità di trasporto variano in maniera sostanziale da luogo a luogo, in virtù dell'intensità di utilizzo e dall'accessibilità del territorio e in misura minore dalle prestazioni dai mezzi stessi.

L'Asse Milano-Napoli è stato scelto invece perché le dimensioni dell'infrastruttura, la tipologia dei viaggi (lunga percorrenza e velocità media sostenuta) e l'alta intensità di

utilizzo della linea, consentono di confrontare le modalità di trasporto ferroviario e autostradale, al limite delle loro performances. Per quel concerne il trasporto ferroviario l'analisi è stata svolta sia sulla linea attualmente in esercizio, che sulla futura TAV²; i risultati sono mostrati in modo particolarmente dettagliato proprio sull'alta velocità, perché sulla TAV e sui trasporti a lunga percorrenza si fonda il piano di rilancio strategico per il futuro delle ferrovie italiane.

La metodologia di indagine adottata consiste nell'utilizzo simultaneo di quattro analisi termodinamiche, Bilancio di Massa ed Analisi Energetica basate sul 1° Principio e Analisi Exergetica ed Emergetica basate invece sul 2° Principio. Tutte le analisi sono state svolte utilizzando due scale d'indagine spazio-temporali: la *scala locale* e la *scala globale*. Nel lavoro è stato infine proposta ed applicata una metodologia basata sull'integrazione delle Analisi Emergetica ed Exergetica: la Perdita Emergetica e il fattore di Amplificazione Emergetica.

² Treno ad Alta Velocità

2 METODOLOGIA

2.1 LA DEFINIZIONE DI TRASPORTO.

Il trasporto avviene in seguito all'esigenza dello spostamento di persone o cose. Tale necessità può avere diverse motivazioni che vanno dal lavoro, allo svago, all'approvvigionamento e altro ancora. In generale possiamo dire che esso è un'attività determinante per l'interazione sociale tra soggetti di varia natura e non rappresenta in generale un fine in se stesso (domanda derivata).

E' possibile razionalizzare il trasporto in termini di domanda ed offerta: l'offerta di trasporto è costituita dalle infrastrutture, dal parco veicoli, dalle reti ecc., la domanda è invece rappresentata dall'utenza del servizio trasporti. La forma della domanda è funzione oltre che delle esigenze degli utenti, anche della loro sensibilità, delle loro possibilità e dall'offerta di trasporto disponibile nel loro territorio.

Offerta e domanda interagiscono definendo, in un dato sistema territoriale, quello che viene chiamato split modale.

Le varie forme di trasporto o split non si equivalgono né in termini di servizio (velocità, puntualità, costo, etc.), né in termini d'impatto ambientale (consumo energetico, emissioni tossiche, inquinamento acustico etc.).

Unità di misura del trasporto

Il trasporto è un fenomeno di movimento espresso dallo spostamento nello spazio e nel tempo di persone o cose; per quantificarlo bisogna prima scegliere una scala territoriale e temporale di studio, si passa poi a studiare gli spostamenti utilizzando le seguenti unità di misura:

- km (distanza percorsa)
- p-km (persone trasportate per km di spostamento)
- t-km (tonnellate di merci trasportate per km di spostamento)

p-km e t-km rappresentano la domanda di trasporto ovvero ciò che è stato realmente trasportato; se invece ci si riferisce alla capacità teorica di spostamento impegnata su una strada o altro si utilizzano:

- p-km offerti (es. posti su un autobus moltiplicati per i km percorsi)

- t-km offerte (es. capacità massima di un cargo per i km percorsi)

Il rapporto tra domanda e offerta (espresso in percentuale) dà il coefficiente o grado di occupazione.

Quando questo rapporto è uguale ad 1 si dice che il sistema è saturo.

Per arrivare al consumo energetico viene seguito il seguente approccio:

- $p\text{-km} = v\text{-km}$ (veicoli x km) x C_m (coefficiente di occupazione medio di un dato veicolo per un dato tragitto).
- $t\text{-km} = v\text{-km}$ x L_m (coefficiente di carico medio per un dato veicolo e per un dato tragitto).
- $c\text{-km}$ = Consumo medio del veicolo tipo per km di percorrenza;

Per ottenere il consumo di energia per T o P trasportata (J_p o J_t) si procede così:

- $J_p = c_{km} \times v\text{-km} / p\text{-km}$.

2.2 ANALISI TERMODINAMICA MULTICRITERIALE

L'approccio che è stato utilizzato nella valutazione dei diversi casi studio presentati confronta ed integra metodologie differenti basate sui principi della termodinamica. In questo lavoro sono stati studiati i sistemi di trasporto terrestri presenti nelle province di Brescia e Siena e sull'Asse di comunicazione Milano-Napoli.

La scala temporale adottata è quella annuale e i sistemi sono stati considerati aperti e in stato stazionario.

Tutti i casi studio sono stati analizzati seguendo lo schema logico mostrato in Figura ad eccezione dell'asse Mi-Na per il quale la scala globale ingloba anche il MFA e l'EMIPS.

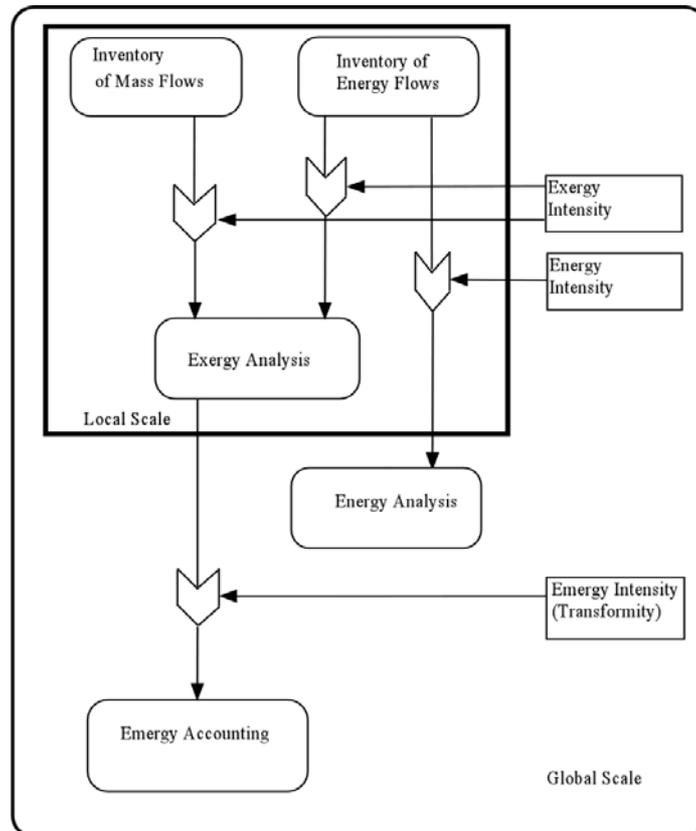


Figura 4. Approccio metodologico. (Federici et al 2003): il primo passo consiste nello stimare il bilancio di massa dei sistemi: la necessità di ciò è legata al fatto che il bilancio di massa consente di valutare tutti gli input e gli output di materia che attraversano il confine del sistema in studio, per poi associare ad ogni voce un contenuto o un consumo di Energia, di Exergia e di Emergia

2.2.1 Bilancio di Massa (scala locale)

Nessun processo può essere descritto senza una valutazione preliminare dei flussi di massa; le trasformazioni che avvengono nel sistema a carico della materia possono essere sia meccaniche che chimiche e la quantificazione dei flussi in input ed in output rappresenta uno step preliminare per una accurata valutazione. Il Primo Principio stabilisce che per un sistema in stato stazionario il rapporto di massa output/input deve essere uguale a 1; la massa dei co-prodotti (spesso inquinanti come i gas di scarico) rilasciati per unità di servizio o di prodotto, e la massa totale utilizzata dal sistema (kg/unit) sono entrambi indicatori utili che danno un'idea quantitativa delle risorse messe in gioco e consumate dal sistema. In tutti i casi studio del presente lavoro si è tenuto conto di tutti i materiali utilizzati nella costruzione e nella manutenzione delle infrastrutture, dei mezzi, e dei combustibili; i flussi su scala annuale sono stati ottenuti

tenendo conto della vita media di ciascun componente (vedi Appendice, tabelle “Note di calcolo Autostrada” e “Note di calcolo TAV Mi-Na” su CD-ROM).

2.2.2 Analisi dei flussi di Materia, MFA (scala globale)

Il Material Flow Accounting è una estensione del bilancio di massa locale e consiste nel valutare tutta la materia usata, movimentata e trasportata per la produzione di un prodotto o di un servizio. La differenza sostanziale con il bilancio su scala locale, è la possibilità di tener conto di tutta la materia che non forma direttamente il bene ma che è stata utilizzata indirettamente nel suo ciclo di vita: in altre parole consente di valutare quelli che vengono chiamati i *flussi nascosti* di materia. Per rendersi conto dell'importanza della scala globale nell'analisi di massa basta prendere in considerazione la produzione dell'oro: un anello di 5 g richiede l'utilizzo di ben 27 quintali di materia! La quantità totale dei materiali utilizzati in modo diretto e “nascosto” per ottenere un prodotto costituisce lo “zaino ecologico” (ecological rucksack).

Lo zaino ecologico viene calcolato quindi sull'intero ciclo di vita del prodotto come somma di tutti gli inputs materiali; il risultato è il Material Input Per unit of Product (MIPP) o nel caso di servizi il MIPS (Material Input Per Service). L'intensità materiale viene espressa generalmente come kg di materiali su kg di prodotto o per unità di servizio.

Nella MFA, le intensità materiali vengono divise in 5 categorie; questo serve a correlare il processo alla tipologia materiale dal quale dipende e al disturbo ambientale da esso indotto. Le categorie più usate sono:

- Materiale abiotico: questa categoria ingloba tutti i minerali estratti, i materiali di scavo, i materiali dei mezzi, i combustibili etc.;
- Acqua: viene considerata tutta l'acqua utilizzata, deviata e stoccata per gli impianti di raffreddamento, irrigazione, nonché l'acqua deturpata da contaminazione;
- Aria: tutta l'aria coinvolta che ha subito un cambiamento fisico (condensazione, pressurizzazione ecc) e chimico (es. combustione);

Le altre due categorie sono meno utilizzate a causa della difficoltà nel reperire dati e nella difficoltà di calcolo dovuta alla complessità dei processi:

- Materiale biotico: tutta la biomassa mobilizzata e consumata (anche se non consumata, es. deforestazione);
- Erosione del suolo; la perdita del suolo fertile dovuta al processo (es. agricoltura, estrazione mineraria, costruzioni edili ecc).

Nel caso dell'Asse Mi-Na il MIPS verrà espresso come kg/p-km o kg/t-km, e servirà per confrontare il consumo di materia dovuto all'uso dell'Autosole, della TAV e del treno classico.

2.2.3 Analisi Energetica (scala locale)

Per l'Energia si distinguono due livelli d'indagine: quello locale basato sui flussi di Energia che attraversano fisicamente i confini del sistema, e quello globale che stima l'Energia spesa globalmente nella biosfera per ottenere i beni e i servizi citati nei bilanci locali.

L'energia diretta utilizzata nei casi studio presentati si riferisce alla quantità di combustibili utilizzati nella costruzione, manutenzione ed utilizzo dei sistemi di trasporto moltiplicati per il Potere Calorifico Inferiore, e alla quantità di energia elettrica utilizzata dal sistema ferroviario. La procedura di calcolo consente di stimare la quantità di energia utilizzata direttamente per unità di trasporto (MJ/p-km e MJ/t-km) dalle varie tipologie di mezzi nei diversi contesti territoriali.

2.2.4 Analisi Energetica (scala globale)

La scala locale è ovviamente una misura incompleta del costo energetico dei trasporti perché è in grado di fornire informazioni riguardanti solo la fase finale di utilizzo. Quando invece la scala di indagine si allarga per tener conto dell'estrazione dei minerali, la produzione dell'acciaio, la raffinazione dei combustibili, la produzione dell'energia elettrica e di tutti i materiali utilizzati nel sistema, i costi energetici aumentano in accordo con la formula seguente (embodied energy; Herendeen, 1998):

$$E = \sum_j E_j = \sum_j m_j * c_j$$

Dove:

E è il costo energetico totale, E_j è l'energia associata alla voce j , c_j è il costo energetico di produzione (J/kg) del j -iesimo flusso di massa m_j (kg).

2.2.5 Analisi Exergetica (scala locale)

L'analisi Exergetica è stata sviluppata come risultato dell'applicazione dei processi termici industriali. Non tutte le forme di energia sono equivalenti rispetto alla loro capacità di fornire lavoro utile; mentre il calore si conserva la sua abilità nel supportare un processo od una trasformazione deve decrescere in accordo al Secondo Principio della Termodinamica (incremento dell'Entropia). In accordo con Szargut (1988) l'exergia è definita come "la quantità di lavoro utile ottenibile quando un componente materiale viene portato in uno stato di equilibrio termodinamico con i componenti comuni dell'ambiente circostante per mezzo di processi reversibili". L'exergia di un sistema si può dividere in quattro componenti fondamentali:

$$E = E_k + E_p + E_{ph} + E_{ch}$$

ed introducendo l'exergia specifica, definita come $\varepsilon = E/m$, può essere scritta come

$$\varepsilon_{TOT} = \varepsilon_K + \varepsilon_P + \varepsilon_{PH} + \varepsilon_{CH}.$$

E_k è l'exergia cinetica calcolata come $E_k = m \cdot C^2 / 2$

E_p è l'exergia potenziale calcolata come $E_p = mgZ$

dove con m indichiamo la portata in massa, C la velocità relativa alla superficie terrestre, Z altezza sopra il livello del mare, g l'accelerazione gravitazionale terrestre.

Le altre due componenti sono l'exergia fisica E_{ph} e l'exergia chimica E_{ch} che insieme danno l'exergia termica $E_{th} = E_{ph} + E_{ch}$.

Exergia fisica: massimo lavoro ottenibile quando la sostanza contenuta nel volume di controllo viene portata dal suo stato iniziale definito dalla temperatura termodinamica T e dalla pressione P allo stato ambientale definito da T_0 e P_0 . Alla sostanza è però impedito di miscelarsi o reagire chimicamente con le altre sostanze dell'ambiente, come se essa fosse trattenuta da una membrana che permette variazioni di temperatura e di pressione. Quindi la sostanza si può portare in *equilibrio termico e meccanico* con l'ambiente. Se dallo stato di equilibrio termomeccanico T_0 P_0 togliamo le limitazioni imposte dalla membrana ideale, permettendo il contatto con le sostanze contenute nell'ambiente, ogni specie chimica ha la possibilità di compiere un ulteriore lavoro. Il massimo lavoro ottenibile in questo ulteriore passaggio, rappresenta il termine chimico dell'exergia. Lo stato di completo equilibrio così raggiunto viene chiamato "*dead state*" ed è caratterizzato dal fatto che i potenziali chimici dei componenti della sostanza, nel

volume di controllo considerato, sono uguali a quelli degli stessi componenti nell'ambiente. Per il calcolo di quest'ultimo contributo exergetico, occorre conoscere la composizione dell'ambiente nel dead state:

$$\varepsilon_{CH} = \sum x_k (\mu_{k0} - \mu_k^{00}), \quad \text{dove per un gas perfetto}$$

$$\mu_{k0} = g_k(T_0, p_0) + R_k T_0 \ln(y_k)$$

$$\mu_k^{00} = g_k(T_0, p_0) + R_k T_0 \ln(y_k^{00}), \quad \text{per cui:}$$

$$\varepsilon_{CH} = \sum x_k R_k T_0 \ln(y_k / y_k^{00}),$$

dove g è la funzione di Gibbs, μ il potenziale chimico della specie e x la frazione in massa della sostanza.

Per gli scopi di questo lavoro, l'analisi exergetica su scala locale, è stata ridotta alla semplice valutazione dell'exergia chimica ed elettrica consumata dai veicoli per unità trasportata. In questo studio la valutazione delle performance exergetiche delle varie tipologie di trasporto è stata fatta utilizzando il Rendimento di Secondo Ordine. Questo ultimo differisce dal rendimento termodinamico classico perché è definito come rapporto tra l'exergia minima necessaria allo scopo e quella realmente utilizzata (parametro che stabilisce anche l'uso razionale di una fonte energetica). Nonostante la tecnologia dei veicoli stia vivendo un grande sviluppo, sia per quello che concerne i veicoli alimentati con fonti alternative (solare, biodiesel etc.) che per quelli aventi propulsori ibridi (a scoppio ed elettrico), essendo questi ancora dei prototipi, si è ritenuto opportuno scegliere come riferimento per ciascuna categoria di veicolo quello più efficiente attualmente sul mercato.

Per le autovetture, è stata scelta come riferimento la Volkswagen Lupo 1.2 TDI (che viaggia però con quattro passeggeri a bordo), dato che quest'auto riesce a percorrere, a regime di guida extraurbano, 37 km con un litro di gasolio (valore dichiarato). Per gli autobus il riferimento è invece l'Iveco 8360,46 che viaggia con 55 passeggeri a bordo; questo mezzo può percorrere 3.3 km con un litro di gasolio.

Per il trasporto ferroviario locale di Brescia e Siena è stata scelta come riferimento la locomotiva Aln663 (80 passeggeri); per l'Asse Mi-Na il riferimento scelto è la locomotiva E 444.

Un metodo alternativo per valutare il rendimento exergetico dei mezzi consiste nel valutare la minima exergia richiesta teoricamente per lo spostamento delle persone e delle merci, tenendo conto esclusivamente dell'energia cinetica e della resistenza aerodinamica del mezzo considerato (J.Dewulf, H.Van Langenhove, 2002). Si è ritenuto non opportuno applicare questo metodo perché poco ragionevole e poco utile ai fini dello scopo di questa tesi. In effetti il rendimento exergetico calcolato come rapporto tra la suddetta minima exergia richiesta e la reale exergia consumata presenta i seguenti svantaggi: a) l'exergia minima così calcolata non tiene conto nella giusta misura della dipendenza del trasporto dalla distanza percorsa: la stessa massa trasportata per 10000 km richiederebbe, secondo questo modello, solo il 7.8% di exergia in più rispetto ad uno spostamento di 100 km!!, inoltre b) se si volesse tener conto di tutti gli altri tipi di attrito che provocano la dissipazione exergetica nel processo di trasferimento dell'energia meccanica dall'albero motore fino al battistrada, ci troveremmo automaticamente fuori dalla definizione di "minima exergia richiesta" e si sfocerebbe di nuovo in un'analisi di efficienza di primo ordine, utile al fine di progettare le autovetture ma non utile per scopi di pianificazione territoriale.

2.2.6 Analisi Exergetica su scala globale, EMIPS

Analogamente a quanto visto nel paragrafo 2.2.4, anche per l'exergia è possibile utilizzare una scala di indagine più vasta. In questo caso quello che si stima è la quantità totale di exergia consumata nel sistema sia in modo diretto che indiretto, tenendo conto anche dell'exergia dei materiali delle infrastrutture e dei mezzi. La formula utilizzata è:

$$Ex = \sum_j Ex_j = \sum_j m_j * x_j$$

Dove:

Ex è la quantità totale di exergia consumata, Exj è l'exergia associata della voce j, e xj è l'exergia specifica (J/kg) associata al j-iesimo flusso di massa mj (kg). Il consumo di exergia per unità trasportata viene misurato in MJ/p-km e MJ/t-km.

2.2.7 Analisi Emergetica

L'analisi emergetica è stata introdotta da H.T.Odum negli anni settanta. Essa consiste nella valutazione del supporto ambientale richiesto dai flussi di risorse che attraversano i confini del sistema studiato in una certa scala temporale. L'Emergia è definita da Odum come *l'energia utile di un unico tipo precedentemente usata direttamente o*

indirettamente per generare un prodotto o un servizio, essa rappresenta quindi una sorta di “memoria energetica” dell’oggetto di studio. Per comodità tutte le forme di energia vengono espresse in unità di energia solare in modo di poter disporre di una sorta di “equivalente energetico” comune. L’unità di misura dall’Emergia è il solar emjoule (seJ). La grandezza fondamentale dell’analisi emergetica è la Transformity: essa è definita come l’emergia solare richiesta per ottenere un joule del prodotto o servizio considerato ed è misurata in seJ/J. L’importanza della Transformity risiede nel fatto che essa può essere utilizzata per stabilire una gerarchia tra forme di energia e sistemi diversi. Un processo di trasformazione che abbia come output una forma di energia deve avere necessariamente in input una quantità di energia maggiore; utilizzando la Transformity come discriminante della qualità, è l’energia in output quella gerarchicamente superiore. Tipicamente, nei sistemi complessi, feedback quantitativamente esigui, da strutture gerarchiche superiori, controllano strutture più grandi a livelli inferiori. L’emergia di un flusso energetico k è uguale al prodotto della sua Transformity (Trk) per l’intensità energetica J : $E = Trk * J$; nel caso in cui il flusso sia risultato da una convergenza di più flussi, la sua emergia sarà:

$$E = \sum_k Trk * J_k$$

In un sistema esistono diversi tipi di intersezioni e di trasformazioni energetiche, perciò è necessario stabilire delle regole che consentano di evitare confusione o errori:

- a) in presenza di un solo prodotto il costo emergetico degli input viene assegnato al 100% ad esso;
- b) se il flusso-prodotto si suddivide in due o più flussi (che mantengono la stessa natura chimico-fisica) l’emergia viene assegnata ai flussi in misura proporzionale all’energia libera che li caratterizza;
- c) in presenza di co-prodotti (cioè flussi caratterizzati da diversa natura chimico-fisica) non è possibile suddividere l’emergia tra essi. Si assegna perciò a ciascun flusso l’emergia totale degli input; la conseguenza è che le transformity dei co-prodotti saranno, in genere, differenti;
- d) quando due co-prodotti vanno ad alimentare un secondo processo, il loro valore non deve essere sommato; sarà considerato solo il più grande dei due.

Gli input vengono classificati secondo la loro natura:

R: energia rinnovabile da fonti naturali (sole, vento, maree, etc.) ;

N: energia da fonti non rinnovabili locali (suolo, legname, minerali consumati più velocemente di quanto vengono prodotti);

M: energia esterna acquisita in minerali, combustibili, e altre materie prime o manufatti;

S: energia acquistata in lavoro e servizi (lavoro umano retribuito);

F: $M+S$ è la somma dei flussi energetici forniti al sistema dall'economia esterna al processo.

Per quanto riguarda l'analisi energetica del nostro caso studio, si è fatto riferimento ad un lavoro simile svolto dal gruppo di ricerca di H.T. Odum, riguardante il sistema autostradale del Texas (Odum e Odum 1987).

Dai diagrammi di flusso (fig. 5 e 6), si vede come i due sistemi di trasporto siano costituiti a loro volta da altre subunità identificate (1) nel sistema di costruzione delle infrastrutture, (2) nelle infrastrutture che fungono da magazzini di energia e (3) dall'utilizzo annuale. Quest'ultimo è caratterizzato dall'aver al suo interno ulteriori unità costituite (i) dal sistema di manutenzione delle infrastrutture e dei veicoli, (ii) dai veicoli che rappresentano anch'essi un magazzino di energia, e per ultime (iii) gli utenti delle varie modalità individuale,collettivo,merci).

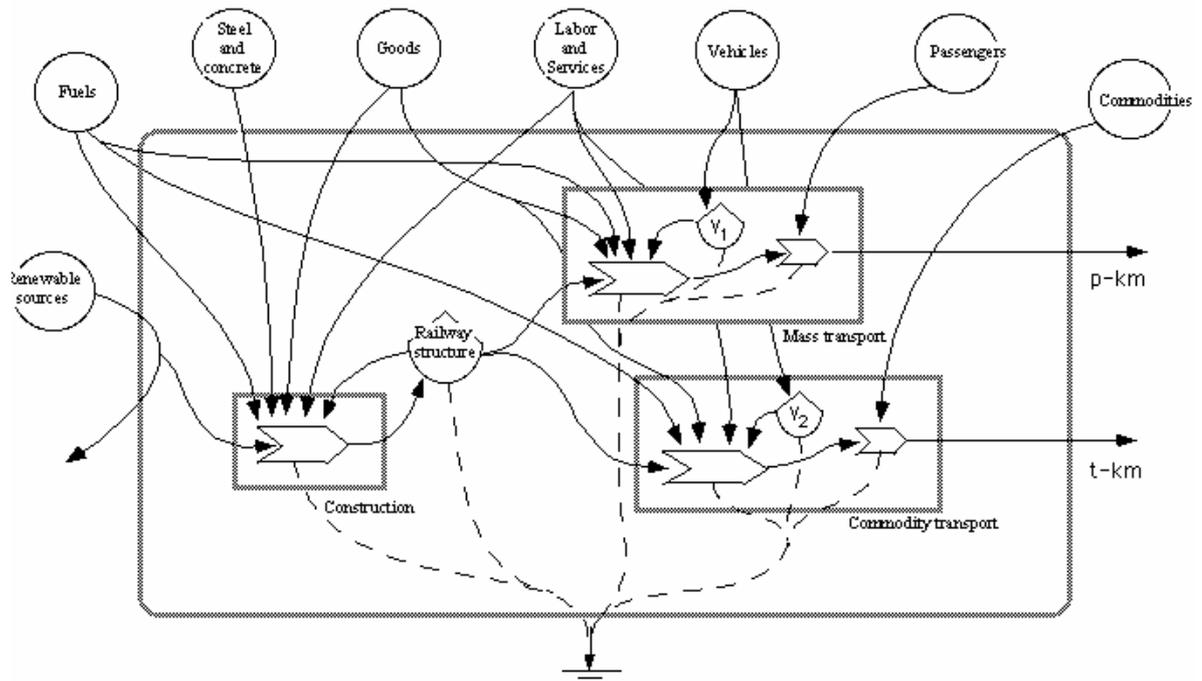


Figura 5. Diagramma di flusso di un generico sistema ferroviario. (Federici et al. 2003)

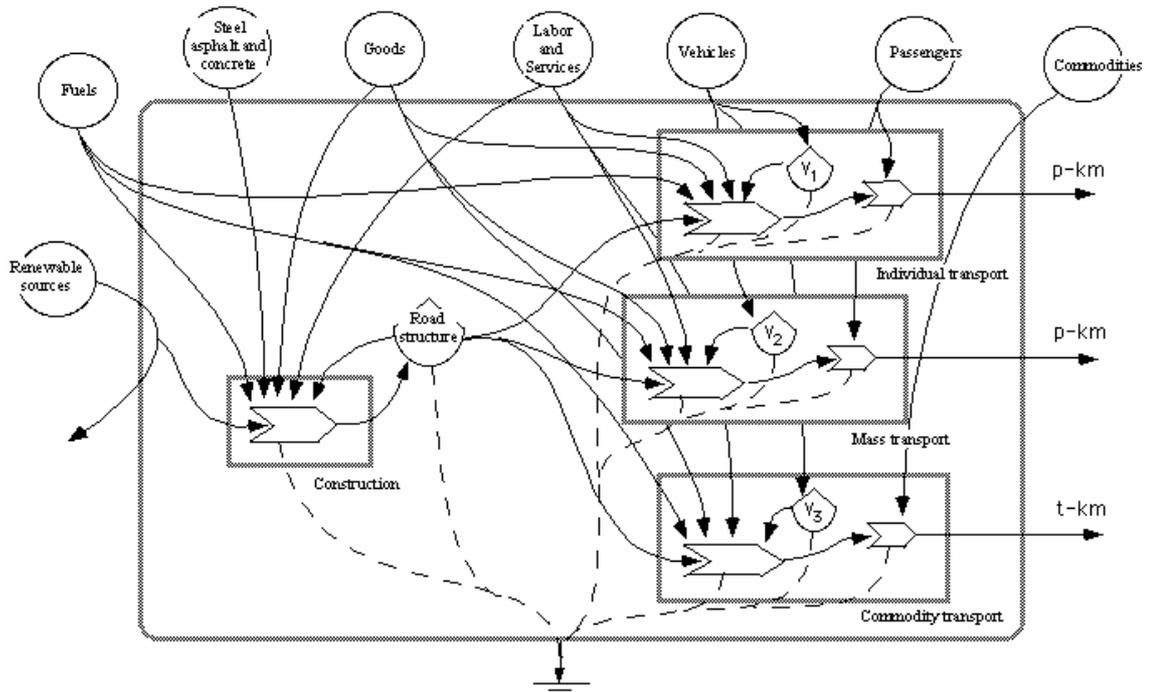


Figura 6. Diagramma di flusso di un generico sistema stradale. (Federici et al. 2003)

3 LE RELAZIONI TRA L'EFFICIENZA DEI SISTEMI DI TRASPORTO LOCALI E LE VARIABILI MACROECONOMICHE.

In questa sezione si è tentato di analizzare come il livello del traffico ed il relativo impatto ambientale siano influenzati da:

- La struttura economica e sociale di un territorio (settore produttivo, distribuzione delle merci, organizzazione sociale della città);
- Le performance termodinamiche del sistema di trasporto stesso (efficienza, consumo energetico, carico effettivo e velocità).

Solo una migliore comprensione di questi aspetti può portare infatti allo sviluppo di politiche efficaci mirate alla riduzione del traffico e delle emissioni così da sfruttare al meglio i benefici potenziali provenienti dalle nuove tecnologie.

3.1 L'APPLICAZIONE AI SISTEMI DI TRASPORTO LOCALI; LA PROVINCE DI SIENA E BRESCIA

Lo studio si basa sull'analisi comparativa di due aree del centro e del nord Italia; le province di Brescia e di Siena. I due sistemi territoriali sono caratterizzati da differenti strutture, diverse dimensioni e da un diverso sviluppo economico.

3.2 Il sistema dei trasporti nella Provincia di Siena

La Provincia di Siena ha una superficie di 3820 km², il 92% dei quali rappresentati da collina. La struttura economica è basata sull'agricoltura e sul settore terziario; particolare rilievo ricoprono il settore bancario e la struttura universitaria. Va aggiunto inoltre un cospicuo flusso turistico che supporta di fatto tutte o quasi le attività commerciali. La scarsa presenza di industrie sul territorio e la bassa densità di popolazione (66 ab/km², ISTAT 2000) rendono il livello d'inquinamento (traffico, inquinamento acustico, produzione di rifiuti etc.) abbastanza accettabile. Questo giudizio è confermato dai dati pubblicati sul Rapporto sullo Stato dell'Ambiente della Regione Toscana (ARPAT, 2000). In definitiva la pressione antropica nell'area può considerarsi lontana dall'essere critica. All'interno dei consumi totali di energia della provincia, il settore dei trasporti incide per il 39% (Basosi and Verdesca, 1998, 1999).

Le caratteristiche fisiche del territorio hanno influenzato pesantemente l'evoluzione e lo sviluppo del sistema dei trasporti; la dispersione della popolazione in piccoli centri abitati dislocati su un'area geografica relativamente vasta ha reso necessario lo sviluppo di un sistema stradale a ragnatela costituito quasi esclusivamente da strade "secondarie" di piccola sezione. Attualmente i chilometri di strade adatte alla percorrenza veloce non superano gli 80 km su un totale di 1630 km di rete. Il sistema stradale viene integrato da un sistema ferroviario costituito da tre direttrici con centro e nodo di scambio nella stazione di Siena; l'intera linea ferroviaria ha un'estensione di soli 227 km, quasi interamente a binario singolo.

Il livello tecnologico del trasporto individuale in auto è relativamente buono anche in conseguenza degli incentivi governativi per la rottamazione erogati dal 1997 al 2002; buona è anche la condizione della flotta degli autobus per il servizio extraurbano.

Il sistema ferroviario è basato invece su una vecchia flotta di treni diesel che viene usata praticamente solo dai pendolari. Oltre alla vetustà e all'efficienza dei mezzi, la capacità attrattiva del sistema ferroviario senese risente dello *stop and go* dovuto al binario singolo che rende i viaggi molto lenti e poco piacevoli.

Per conseguenza il trasporto ferroviario rimane in una posizione marginale: l'intero volume di traffico (passeggeri 3.75E9 p-km, e merci 2.85E9 t-km) viene assorbito quasi completamente dal sistema stradale dato che solo il 4.59% del traffico passeggeri ed il 12.19% del traffico merci viaggia su rotaia; a questo riguardo è interessante notare che i collegamenti extraurbani in autobus assorbono praticamente la stessa quantità di traffico passeggeri del sistema ferroviario (Federici, 2003).

3.2 IL SISTEMA DEI TRASPORTI DELLA PROVINCIA DI BRESCIA

La provincia di Brescia ha una superficie di 4874 km² distribuiti in 55% montagna, 16% collina e 29% pianura. La densità di popolazione è di 231 ab/km² (1.22 volte la media italiana, ISTAT 2000) e la sua struttura economica è basata fondamentalmente sul settore industriale (acciaierie, componentistica per la grande industria, manifatturiera del tessile etc.). La grande attività economica genera livelli critici per l'ambiente per l'alta produzione di sostanze inquinanti, polveri, rifiuti e non ultimo il traffico.

Il settore dei trasporti incide sul bilancio energetico provinciale per il 28%, ed è costituito principalmente da due sottosistemi: strada e ferrovia. Il peso inferiore del

trasporto nel bilancio energetico provinciale di Brescia rispetto al caso di Siena dipende dal fatto che mancando nel senese attività ad alta densità energetica, i trasporti assumono un ruolo di dominanza nei consumi finali.

A differenza di Siena, il cui territorio è posto in una posizione decentrata rispetto alle grandi vie di comunicazioni nazionali, la zona pianeggiante della provincia di Brescia è invece attraversata da una delle maggiori autostrade italiane, la Torino-Venezia, e da uno dei più importanti assi ferroviari che collega il nord ovest al nord est. Nella pianura, l'alta densità di popolazione e la forte attività industriale hanno richiesto lo sviluppo di una rete stradale molto sviluppata costituita da autostrade, raccordi, tangenziali e strade secondarie per un totale di 5700 km di lunghezza.

Il sistema ferroviario è costituito invece in maggior parte da linee elettriche utilizzate sia per i collegamenti veloci che per il trasporto dei pendolari, e da una linea diesel monorotaia che collega il centro urbano di Brescia alle zone montuose. Il volume del trasporto passeggeri nel 2000 è stato di 10.1E9 p-km. Di questo l'89,7% è stato percorso in auto, il 4.3% in autobus ed il 6% in treno. Il traffico merci è stato invece di 32.8E9 t-km assorbite per il 98% dal sistema stradale. In seguito agli incentivi governativi per la rottamazione, negli ultimi 5 anni la flotta delle autovetture è stata rinnovata per il 33%.

3.3 L'APPROCCIO METODOLOGICO

L'approccio utilizzato consiste nell'applicazione simultanea delle analisi di Bilancio di Massa, Analisi Energetica, Analisi Exergetica ed Emergetica. Lo schema logico dell'integrazione delle varie analisi consiste in un'analisi preliminare di "primo principio" (costituita dal Bilancio di Massa e dall'Analisi Energetica) che pone le basi per la conseguente analisi di "secondo principio" basata a sua volta sull'approccio "user side" dell'Analisi Exergetica, e "donor side" utilizzando invece l'Analisi Emergetica.

Anche in questo caso nell'analisi dei sottosistemi "strada" e "ferrovia" sono state considerate la fasi di:

- Costruzione delle infrastrutture, dei mezzi d'opera e dei veicoli (strade, linee ferroviarie, automobili, camion, treni etc.);
- Manutenzione;
- Uso dei sottosistemi per il trasporto passeggeri e merci;

3.3.1 Costruzione delle infrastrutture, dei mezzi d'opera e dei veicoli

Per l'analisi riguardante la costruzione delle strade e delle autostrade si è fatto riferimento a manuali di costruzione e a capitolati d'appalto forniti dagli ingegneri e dai geometri contattati nella fase di reperimento dei dati. Sono stati inclusi nell'analisi anche gli input materiali utilizzati nella costruzione della massicciata: lo strato inferiore di questa è costituito da materiale da cava (ghiaia e breccia di diverse sezioni) compattato, per il quale viene assunta una vita media di 50 anni; questo strato viene poi ricoperto da uno strato composto di diversi materiali bituminosi per il quale viene assunta invece una durata media di 5 anni. Il cemento viene utilizzato principalmente per la banchine laterali di contenimento e generalmente il loro utilizzo, nelle strade statali secondarie, è limitato al 10% della lunghezza della strada. In ultimo, l'allocazione dei macchinari usati nella costruzione è stata svolta assumendo una vita media di 30 anni.

L'analisi della costruzione delle linee ferroviarie è stata svolta in modo simile; le differenze principali consistono nella diversa profondità della massicciata rispetto al caso stradale (a causa del maggiore peso dei treni), nell'assenza dello strato superiore bituminoso che è invece costituito dal ballast (pietrisco stabilizzato), dal cemento armato delle traversine ed ovviamente dai binari. Per le linee ferroviarie elettrificate sono stati considerati inoltre i pali di sostegno e tutti i cavi di acciaio e di rame che ne costituiscono le linee aeree. I dati riguardanti la costruzione delle ferrovie sono stati forniti da RFI Spa.

Per quanto riguarda il calcolo delle risorse utilizzate nella costruzione dei veicoli stradali è stato assunto che essi fossero costituiti per l'80% da acciaio e per il restante 20% da materiali plastici (cavi elettrici, allestimenti interni e pneumatici). Per i treni invece si è assunto che fossero costituiti per il 100% da acciaio considerando trascurabili le quantità degli altri materiali. Per la vita media si è assunto 10 anni per le auto, 15 anni per gli autobus, 20 anni per i camions e 30 anni per i treni.

3.3.2 Manutenzione

I dati e le procedure di manutenzione di strade e binari sono stati forniti in parte dalle società che le gestiscono (ANAS e Trenitalia Spa ora divenuta RFI) ed in parte stimati.

Per la manutenzione delle auto si è fatto riferimento ad interviste ai meccanici impiegati in alcune officine di riparazione autorizzate dalle case costruttrici, mentre i

dati per la manutenzione e cura dei mezzi pubblici sono stati forniti direttamente dalle società di trasporto (Train Siena, ASM Brescia, FNM e Trenitalia Spa, comunicazioni personali).

3.3.3 Uso

Per il trasporto individuale su strada si è proceduto al calcolo di una media pesata delle prestazioni e delle dimensioni delle auto maggiormente vendute nelle due province utilizzando sia i dati nazionali riguardanti il mercato dell'auto (Quattroruote, 2000) sia i dati locali (Aci 2000); la stima dei consumi, considerando una velocità media degli spostamenti pari a 70 km/h, prende in considerazione le distanze medie percorse annualmente in relazione alla cilindrata e alla tipologia dei veicoli (ISTAT, 2000) e i fattori di occupazione media delle auto negli spostamenti extraurbani. L'alternativa a questo tipo di stima poteva venire dal considerare, piuttosto che le prestazioni medie dei mezzi, i quantitativi di combustibili venduti sul territorio provinciale; in realtà, pur essendo il metodo più diffuso negli studi territoriali di pianificazione energetica, questa pratica porta con sé una serie di errori di stima dovuti al fatto che è impossibile stabilire con certezza dove venga consumato un pieno di benzina. Nel caso di territori caratterizzati da un'alta percentuale di traffico di attraversamento, come quello bresciano, il dato sulla vendita di carburanti diviene praticamente inutilizzabile ai fini di un'analisi di efficienza.

I dati dei consumi di combustibile per il trasporto pubblico sono stati invece forniti direttamente dalle società che gestiscono il servizio (Train, ASM e Trenitalia Spa, comunicazioni personali).

I dati riguardanti il traffico merci in provincia di Siena sono stati desunti dal Piano Energetico Regionale della Toscana (PER, 1997) mentre le informazioni riguardanti il traffico merci bresciano sono state fornite dalla "Società Autostrade Spa" e dall'"Unione delle Camere di Commercio della Regione Lombardia" (<http://www.lom.camcom.it>). Per il trasporto su strada a Brescia è stato calcolato un fattore medio di carico di 8.78 t/v-km (ovvero le tonnellate che trasporta mediamente un camion per ogni km di viaggio) che è sostanzialmente più basso del valore senese pari invece a 11.2 t/v-km. Questa differenza è dovuta principalmente a due fattori: la diversa distanza media dei viaggi merci (pari a 250 km/trip per Siena e 170 km/trip per Brescia) e la diversa frequenza dei viaggi. Infatti la presenza sul territorio bresciano di una rete

stradale diffusa e di facile percorrenza rende i viaggi dei camion più “semplici” e meno costosi rispetto al caso senese in cui la scarsa accessibilità del territorio e l’assenza delle grandi strade rende necessaria una pianificazione preventiva dei viaggi. Questo aspetto verrà comunque ripreso più avanti.

Basandosi sui dati pubblicati dalla stampa specializzata (Tuttotrasporti, 2001) si è assunto inoltre che la percorrenza annuale media dei camion sia di 150000 km.

3.3.4 Allocazione degli input tra i sotto-sistemi

Le infrastrutture dei sistemi “strada” e “ferro” sono usate sia per il trasporto passeggeri che per il trasporto merci e quindi la corretta allocazione delle risorse e dell’energia usate nella costruzione dei sotto-sistemi costituisce un passo cruciale dell’analisi. Per rendere possibile questa allocazione è stato necessario trasformare le unità passeggero trasportate in unità merci equivalenti: pertanto si è assunto che il peso medio di ogni passeggero fosse di 65kg. In questo modo è possibile calcolare le percentuali di utilizzo e di erosione delle infrastrutture in dipendenza dell’intensità del traffico merci e del traffico passeggeri.

Il risultato è eloquente ed è questo: di tutta la massa transitata nel 2000 sulle infrastrutture stradali di Brescia il 97,3% è stato costituito dal traffico merci, il 2,56% dal traffico automobilistico e solo lo 0,12% dal trasporto pubblico su autobus. A Siena il sistema stradale sopporta invece un carico dovuto al trasporto merci pari al 91%, dal traffico automobilistico per l’8,52%, ed il restante 0,51% dagli autobus.

Conseguentemente il costo energetico e l’erosione delle strade viene attribuito tra i vari split modali nelle stesse proporzioni.

3.4 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Il sistema stradale bresciano assorbe l’84% del traffico passeggeri e il 98% del traffico merci, indicando un ruolo dominante della strada nei confronti della ferrovia. Vale la pena considerare inoltre che il sistema stradale di Brescia ha una massa totale 4 volte più grande della massa del sistema ferroviario. La tabella 1 confronta i volumi e le ripartizioni del traffico nei due territori.

Questa tabella mostra inoltre le dimensioni in massa dei sistemi stradali e ferroviari nei due territori; la quantità di combustibili usati a Siena e a Brescia sono rispettivamente lo 0,46% e 1,16% del totale italiano (Ministero dell’Ambiente, 2000).

Tabella 1. Analisi dei flussi di massa dei sistemi di trasporto di Siena e Brescia.

	Traffico Passeggeri (10 ⁹ p-km/yr)	Traffico Merci (10 ⁹ t-km/yr)	Massa del Sistema (*) (10 ⁹ kg/yr)	Totale Combustibili usati (\$) (10 ⁵ toe/yr)
SIENA				
STRADA	3.57	2.5	1.71	1.77
FERROVIA	0.17	0.35	0.35	0.07
BRESCIA				
STRADA	8.49	32.7	9.50	4.13
FERROVIA	0.57	0.08	0.91	0.61

(*) = Veicoli ed infrastrutture

(*) = elettricità inclusa

Un ulteriore informazione che è possibile trarre dalla tabella è che il “sistema strada” a Siena e a Brescia consuma rispettivamente 25.3 e 6.8 volte più energia del “sistema ferro”.

Tabella 2. Performance dei sistemi di trasporto di Siena e Brescia, Italia.

	Bilancio di Massa unit (kg/unit)	Analisi Energetica (MJ/unit)	Analisi Energetica (MJ/unit)	Analisi Exergetica (MJ/unit)	Analisi Emergetica (10 ¹¹ seJ/unit)
SIENA					
TRASPORTO PASSEGGERI					
STRADA INDIVIDUALE (p-km)	0.19	1.75	2.10	1.63	1.66
STRADA COLLETTIVO (p-km)	0.07	0.49	0.62	0.47	0.60
FERROVIA (DIESEL) (p-km)	0.12	0.61	0.73	0.58	0.74
TRASPORTO MERCI					
STRADA (t-km)	0.50	1.59	1.66	1.29	3.11
FERROVIA (DIESEL) (t-km)	0.95	0.30	0.42	0.28	4.17
BRESCIA					
TRASPORTO PASSEGGERI					
STRADA INDIVIDUALE (p-km)	0.17	1.76	2.12	1.74	2.47
STRADA COLLETTIVO (p-km)	0.06	0.12	0.21	0.11	0.37
FERROVIA (DIESEL) (p-km)	0.61	0.18	0.85	0.17	3.58
FERROVIA (ELETTRICA) (p-km)	0.14	0.52	1.76	0.47	1.87
TRASPORTO MERCI					
STRADA (t-km)	0.27	1.68	2.08	1.61	1.91
FERROVIA (DIESEL) (t-km)	9.21	1.90	2.70	1.89	39.82
FERROVIA (ELETTRICA) (t-km)	2.10	0.14	0.67	0.13	13.34

Confronto dei risultati ottenuti dalle differenti metodologie di valutazione. (Federici et al. 2003).

La tabella 2 mostra il confronto dei risultati dell'analisi svolta a Brescia con quelli di Siena permettendo quindi di confrontare le performance delle varie tipologie di trasporto all'interno dello stesso territorio, e le performance della stessa tipologia in territori differenti.

Per quanto riguarda il trasporto passeggeri è evidente che il trasporto individuale in auto è quello che mostra in entrambi i casi le più alte intensità materiali, energetiche ed exergetiche su scala locale (a parte per il caso delle ferrovie diesel di Brescia che verrà discusso dopo); i consumi di energia per p-km sono in linea con la media italiana di 1.7 MJ/p-km (Malosti e Romanazzo, 1997). Il trasporto individuale è anche quello che necessita la più alta quantità di energia per passeggero.

A causa della più alta densità di popolazione, e quindi della maggiore urbanizzazione del territorio, a Brescia gli autobus ed i treni diesel mostrano un fattore di carico mediamente più alto dei mezzi pubblici di Siena, e, per conseguenza, risultano più bassi i consumi di energia diretta per passeggero trasportato.

Per il trasporto collettivo, in entrambe le province, sono gli autobus a mostrare le migliori prestazioni termodinamiche per tutti gli indicatori utilizzati; anche a Brescia quindi risulta sfatato il mito del "treno ecologico" e la causa sembra essere ancora una volta il sovradimensionamento delle infrastrutture ferroviarie adibite al trasporto passeggeri.

Il trasporto merci richiede invece una più cauta interpretazione dei dati e dei risultati. Prima di tutto vale la pena ricordare che il trasporto ferroviario richiede una maggiore quantità di materia e di energia a causa delle maggiori dimensioni delle infrastrutture e dei mezzi. Nonostante questo, a Siena, il trasporto merci ferroviario mostra migliori consumi di energia e di exergia rispetto al trasporto su gomma. Questo comportamento deriva dal fatto che a Siena il traffico merci ferroviario è organizzato con la perfetta sovrapposizione di domanda ed offerta in modo tale che i treni viaggino sempre a pieno carico. La stessa cosa non avviene a Brescia dove il netto predominio del sistema strada, sia in termini di diffusione sul territorio che in termini di velocità del servizio, e l'accessibilità del territorio, rendono il treno diesel sotto-utilizzato: il risultato è che la ferrovia diesel bresciana mostra i peggiori valori degli indicatori usati.

E' importante far notare che i treni diesel utilizzati a Brescia e a Siena sono gli stessi (E 345 ed E 445) e che quindi le differenze nelle performance ambientali dei due sistemi sono conseguenza solo del diverso uso che ne viene fatto.

Il confronto tra la ferrovia senese con la ferrovia elettrica di Brescia non è stato svolto perché ha poco senso confrontare due sistemi così diversi tecnologicamente; va aggiunto inoltre che la ferrovia elettrica in provincia di Brescia viene utilizzata quasi esclusivamente per il traffico merci di attraversamento per lunga percorrenza e quindi non costituisce un sostegno significativo all'economia bresciana³.

3.4.1 Ulteriori risultati: la scala globale

La tabella 3 mostra i rapporti tra le intensità energetiche locali e globali.

Tabella 3. Rapporto tra le intensità energetiche Globali e Locali

	Passeggeri: Trasporto Individuale	Passeggeri: Trasporto Collettivo	Trasporto Merci
SIENA			
STRADA	1.20	1.26	1.04
FERROVIA (DIESEL)	n.a.	1.20	1.40
BRESCIA			
STRADA	1.20	1.75	1.24
FERROVIA (DIESEL)	n.a.	4.72	1.42
FERROVIA (ELETTRICA)	n.a.	3.38	4.78

n.a.= non applicabile

Le intensità energetiche globali includono la quantità di energia direttamente ed indirettamente utilizzata nel ciclo di vita delle infrastrutture e dei mezzi che costituiscono i sistemi di trasporto. L'allargamento di scala però non influenza le varie modalità di trasporto nella stessa maniera; i sotto-sistemi che mostrano gli incrementi minori sono quelle tipologie di trasporto dove i combustibili costituiscono gli input più grandi, e il costo energetico indiretto dei combustibili è generalmente basso. Gli incrementi sono invece grandi per quei sotto-sistemi che hanno bisogno di grosse infrastrutture con contenuti energetici non trascurabili (come l'acciaio e l'asfalto), o

³ La provincia di Brescia è confinante con la provincia di Milano che ha un ruolo di attrattore su tutto il traffico proveniente dalle zone esterne alla Lombardia. Le stazioni ferroviarie comprese nell'interland milanese costituiscono quindi nodi di scambio tra il traffico ferroviario e stradale. Quindi la maggior parte delle merci dirette a Brescia e nelle altre province lombarde, arrivano a Milano per poi essere messe su strada per raggiungere le destinazioni finali. Da questo deriva l'importanza delle autostrade per il traffico merci.

quelli che utilizzano l'energia elettrica; quest'ultima infatti viene prodotta in Italia per più del 60% dalla combustione dell'olio combustibile con una efficienza di conversione pari mediamente al 30%.

Una descrizione delle relazioni esistenti tra i sistemi di trasporto e l'ambiente può essere fatta attraverso la disaggregazione dei dati energetici mostrata in tabella 4. I risultati mostrati in questa tabella provengono dalla convergenza e dalla sovrapposizione dei diversi fattori (economici, termodinamici e di calcolo) che influenzano i dati. Il peso energetico delle strutture (veicoli) per unità di trasporto diminuisce con l'aumentare dell'intensità di utilizzo, in relazione alla allocazione su un numero più grande di prodotto (p-km o t-km).

L'emergia diretta, ovvero l'emergia dei combustibili, aumenta invece col numero di chilometri percorsi e diminuisce all'aumentare del fattore di carico del mezzo (p/v-km o t/v-km). Questa ultima relazione vale anche per l'emergia associata al lavoro degli autisti.

La voce "servizi" include diverse voci tra cui il lavoro svolto per la costruzione dei mezzi, delle infrastrutture e dei combustibili; dato che l'emergia dei combustibili e dell'elettricità aumenta proporzionalmente all'utilizzo mentre quella delle strutture diminuisce, lo stesso andamento viene seguito dall'emergia relativa ai "servizi" ad esse legati.

In definitiva sulla transformity delle unità passeggero (seJ/p-km) e merci (seJ/t-km) possiamo concludere che:

- a) l'input di emergia rinnovabile è sempre trascurabile e quindi il sistema è lontano dall'essere sostenibile,
- b) il peso dell'emergia dei veicoli diminuisce all'aumentare dell'uso e della vita media del veicolo,
- c) l'emergia dei combustibili è proporzionale all'intensità di utilizzo,
- d) l'emergia delle infrastrutture viene allocata in misura maggiore alla tipologia di trasporto con il più alto indice di utilizzo ed erosione (merci o passeggeri), ma all'interno di una stessa tipologia (es. strada merci e ferrovia merci) diviene meno importante all'aumentare del peso dei combustibili.

In tutti quei casi in cui il peso dell'emergia delle infrastrutture rimane rilevante quando paragonata con l'emergia diretta dei combustibili, esiste un problema di "sovradimensionamento" del sistema rispetto all'uso attuale.

Tabella 4. Frazione dell'energia supportante una unità di "prodotto" per ciascuna tipologia di trasporto.

ALLOCAZIONE DELL'ENERGIA	Rinnovabile (§)	Struttura (*)	Infrastruttura (**)	Uso Diretto dell' Energia (°)	Lavoro e servizi (#)
STRADA, SIENA					
INDIVIDUALE	0.008%	12.68%	3.18%	49.43%	33.77%
BUS	0.032%	6.76%	13.31%	64.28%	14.80%
MERCI STRADALE	0.097%	0.37%	40.48%	34.02%	22.54%
STRADA, BRESCIA					
INDIVIDUALE	0.002%	13.28%	0.89%	52.15%	33.59%
BUS	0.014%	29.05%	5.92%	25.68%	38.73%
MERCI STRADALE	0.044%	1.72%	17.83%	69.94%	8.63%
TRENO DIESEL SIENA					
PASSEGGERI	0.01%	6.48%	28.31%	26.59%	38.61%
MERCI	0.02%	0.16%	70.12%	1.70%	27.99%
TRENO DIESEL BRESCIA					
PASSEGGERI	0.01%	20.83%	53.32%	7.99%	17.82%
MERCI	0.02%	0.24%	74.28%	2.97%	22.45%
TRENO ELETTRICO, BRESCIA					
PASSEGGERI	0.01%	0.34%	36.62%	13.53%	49.15%
MERCI	0.02%	0.07%	62.16%	18.60%	19.13%

(§) Solo la radiazione solare che interessa le superfici dei sistemi viari è stata conteggiata come Renewable Energy.

(*) Questa voce comprende colo i veicoli.

(**) Tutti i tipi di infrastrutture: ponti, strade, binari etc.

(°) Combustibili ed elettricità.

(#) Include il lavoro diretto ed indiretto quantificato come servizi e misurato dal valore economico (costo infrastrutture, manodopera e lavoro).

Potenziali miglioramenti

Anche se i risultati presentati finora sono già ricchi di informazioni un ulteriore passo per la comprensione del sistema è ancora possibile: l'applicazione del rendimento di secondo ordine. I rendimenti di primo e secondo ordine vengono confrontati in tabella 5. Come noto il rendimento di primo ordine, o più comunemente efficienza termodinamica, è il rapporto tra il lavoro ottenuto dalla macchina e l'energia consumata ed indica la distanza tra il caso studiato (reale) e il caso ideale. Questa distanza può essere ridotta attraverso miglioramenti tecnologici ma non può essere completamente eliminata a causa del Secondo Principio della Termodinamica. Il rendimento di secondo ordine (paragrafo 2.2.5) (€) indica invece la distanza tra il sistema attuale ed un ipotetico sistema dove i veicoli meno efficienti sono sostituiti con i veicoli migliori già

disponibili ed usati nel modo più appropriato (ovvero a pieno carico). Il rendimento di secondo ordine può essere migliorato nel breve periodo indirizzando le scelte dei cittadini verso macchine più efficienti piuttosto che verso macchine sempre più grandi e potenti. In questo caso il sistema di riferimento non è più un sistema ideale in senso stretto in quanto può essere “reale” quanto quello attuale. Chiaramente più basso è il valore del rendimento di secondo ordine, più alti sono i miglioramenti e i risparmi di energia che si possono ottenere. I veicoli scelti come riferimento sono a) per le auto la Volkswagen Lupo 1.2 TDI, b) per gli autobus il Fiat Iveco 8460.31X e c) per il treno la locomotiva diesel ALN 663.

Al solito, il trasporto individuale in auto è il modo più inefficiente per spostarsi in quanto mostra un valore di ϵ pari a 16%; il fattore che influenza di più questo risultato non è tanto la differenza tra l'efficienza del veicolo di riferimento e l'efficienza media del parco auto a Brescia e a Siena, quanto il fatto che il coefficiente di occupazione medio delle auto è di soli 1.4 persone per auto a fronte di 4 passeggeri per auto presi a riferimento. Ancora una volta invece è l'autobus la modalità di trasporto passeggeri a mostrare il risultato migliore. Tuttavia la differenza esistente tra i rendimenti degli autobus a Brescia e a Siena merita molta attenzione: infatti pur disponendo di una flotta di autobus più recente e quindi potenzialmente più efficiente, il sistema di autobus bresciano ha un rendimento di secondo ordine pari quasi a 97%: la questione è che gli autobus di Brescia viaggiano sempre a pieno carico mentre la stessa cosa non succede a Siena. Anche in questo caso, come per l'uso dell'auto, il miglioramento tecnologico da solo non è importante se il mezzo viene poi usato in modo inopportuno.

L'applicazione del rendimento di secondo ordine per il trasporto passeggeri ferroviario, assumendo come mezzo di riferimento il locomotore E444R da 4 MW nelle condizioni di esercizio ottimali, da un risultato di 60%. Tuttavia la sostituzione dell'attuale sistema ferroviario senese con un moderno sistema elettrico richiederebbe un forte investimento di massa ed energia sottoforma di acciaio e rame per le linee aeree e cemento armato per le nuove massicciate e traversine. Come conseguenza il vantaggio teoricamente ottenibile in termini di riduzione dei consumi diretti di energia verrebbe di fatto annullato da un costo di materia ed energia superiore al caso attuale.

Tabella 5. Rendimenti exergetici di primo e secondo ordine per il trasporto passeggeri a Siena e Brescia. (Federici et al. 2003).

	STRADA INDIVIDUALE	STRADA COLLETTIVO	FERROVIA PASSEGGERI
SIENA			
ϵ (*)	26%	40%	30%
η (#)	16%	40%	60%
BRESCIA			
ϵ (*)	26%	40%	85%
η (#)	16%	97%	21%

Federici XVI

3.5 LA COMPLESSITÀ ECONOMICA E IL SISTEMA DEI TRASPORTI

Una delle indicazioni più importanti ottenute dall'analisi dei flussi di massa (Tabella 6) è la grossa differenza esistente nei volumi di traffico merci tra le due province. Potrebbe sembrare ovvio che in una realtà economica industriale come quella bresciana il traffico di merci risulti più intenso se confrontato con quello di una economia rurale e terziaria come quella di Siena. Tuttavia non esiste una relazione diretta tra il volume del traffico merci e la dimensione del settore industriale locale. Infatti se il rapporto tra i settori industriali di Brescia e Siena (considerando il PIL del 1998 al netto dei costi esterni) è di 8 a 1, il rapporto tra le quantità di t-km trasportate è invece di 13 a 1 (Camera di Commercio di Siena, Camera di Commercio di Brescia). Inoltre, sebbene esistano delle similitudini tra le due province come il reddito pro-capite ed il consumo di combustibili per veicolo, esistono anche grosse differenze come la distribuzione della forza lavoro tra i vari settori economici e, come già sottolineato, esiste una grandissima differenza nella dotazione infrastrutturale; in più è differente il livello di internazionalizzazione delle due economie. Proprio quest'ultimo aspetto sembra essere quello che più influenza il trasporto merci, piuttosto che l'industrializzazione in se stessa. Entrambe le economie hanno mostrato una considerevole crescita nell'ultima decade, ma mentre per la provincia di Brescia il volume di esportazioni è strettamente dipendente dal volume di merci importate, a Siena esportazioni ed importazioni sembrano avere percorsi indipendenti.

Tabella 6. Commercio internazionale in Brescia, Siena e in Italia nel 1999 (£)

	BRESCIA	SIENA	ITALIA
IMPORT	8.52×10^{12}	2.94×10^{11}	3.94×10^{14}
EXPORT	1.34×10^{13}	1.52×10^{12}	2.42×10^{13}
BILANCIO	4.86×10^{12}	1.22×10^{12}	2.43×10^{13}
EXPORT /GP (#)	38,6 %	17,0 %	23,0 %
TOTAL TRADE/GP (*)	63,9 %	20,4 %	43,4 %

(#) Export/Prodotto Interno dell'area di riferimento.

(*) (Export + Import)/ Prodotto Interno dell'area di riferimento.

Ref.: (Istituto Tagliacarne, Roma, www.tagliacarne.it)

I dati della Camera di Commercio di Siena indicano che il volume delle esportazioni è aumentato del 237% mentre le importazioni sono aumentate solo del 42% tra il 1992 e il 2000. I rapporti Export/GDP e Total Trade/GDP indicano che il carico degli scambi internazionali sono equamente distribuiti tra import ed export nella provincia di Brescia come nel caso medio Italiano, mentre per l'economia di Siena gli export rappresentano la quota maggiore. Questo aspetto è dovuto ovviamente alla struttura economica territoriale: a Siena la maggior parte dei prodotti esportati provengono dall'agricoltura (maggiormente vino) e da prodotti del settore manifatturiero (cristallerie) a carattere "mono-modulare". Un settore mono-modulare trasforma direttamente le materie prime in prodotti finiti, che rappresentano l'output del processo, mentre un settore multi-modulare è inserito in processo caratterizzato da una frammentazione della produzione in più fasi, con una vasta dislocazione spaziale. In altre parole il commercio senese si basa solo sul down stream della produzione mentre il commercio bresciano necessita sia dell'up stream che del down stream. In più a Siena la maggior parte delle materie prime locali vengono lavorate in loco per poi essere utilizzate internamente o per essere esportate. Brescia importa invece le materie prime dall'esterno. Il sistema multi-modulare crea a Brescia la cosiddetta "vocazione" al commercio internazionale, rendendola una prerogativa sia delle grandi che delle piccole e medie imprese (che rappresentano l'82% dell'attività industriale totale). Per le ragioni illustrate precedentemente il commercio dei prodotti è diretto ai paesi esteri o nel resto dell'Italia. Nella teoria economica questo processo di internazionalizzazione viene chiamato "outsourcing".

I dati analizzati mostrano quindi che è l'outsourcing ad influenzare maggiormente la struttura economica di un settore e generalmente ne intensifica il volume del traffico merci. E' quindi la diversa struttura mono e multi-modulare nei due casi a creare le differenze nei livelli del traffico merci.

3.5.1 Il sistema produttivo e il traffico passeggeri.

I dati del traffico medio giornaliero (TGM) di dieci delle maggiori strade prese come campione, mostrano che Brescia è più satura di Siena essendo il valore delle auto circolanti giornalmente rispettivamente pari a 13821 e 6084 (ANAS). Anche la densità degli abitanti e delle auto nelle aree urbane mostrano una situazione di "congestione"

superiore a Brescia rispetto a Siena con valori di auto per km² pari rispettivamente a 1436 e 243.

Stabilire una relazione tra la complessità economica del territorio e l'intensità del traffico passeggeri è però più difficile di quanto lo sia per il trasporto merci. Tuttavia si può affermare che le abitudini di trasporto della popolazione sembrano essere più dipendenti dagli aspetti macroeconomici che non dall'assetto dell'economia locale.

Anche fattori sociali e demografici possono avere un peso; l'aumento delle dimensioni e della complessità delle aree urbane, può avere come conseguenza l'aumento della lunghezza e della frequenza dei viaggi, a questo va poi aggiunto l'aumento delle auto circolanti all'interno delle aree urbane e lo spostamento di attrattori del traffico dal centro verso la periferia (es. ospedali, centri commerciali, banche, uffici pubblici etc.).

Probabilmente la dipendenza del trasporto passeggeri dall'economia può essere analizzato utilizzando una scala spazio-temporale d'indagine più vasta (ad esempio regionale o nazionale). Si può affermare con sicurezza che la struttura economica agisca in maniera pesante sulla mobilità sistematica delle persone (ad esempio per ciò che concerne il pendolarismo); ad esempio la serie storica delle distanze medie percorse giornalmente in Italia, dagli anni 70' fino ad ora (Enea, 2001), mostra un parallelismo con il fenomeno dell'urbanesimo: negli anni in cui aumenta il numero dei residenti nelle aree urbane corrisponde una diminuzione delle percorrenze medie giornaliere.

L'uso dell'auto nel tempo libero rimane probabilmente legato di più ad altri fattori come la disponibilità economica e il "piacere" di guidare (O.Hagman, 2003); a Siena, nonostante la superiore disponibilità di trasporti pubblici in termini di posti offerti, l'uso dell'auto in termini di consumo di benzina e distanze percorse è pressoché identico a Brescia.

4 L'EFFICIENZA E L'IMPATTO AMBIENTALE DELLE GRANDI VIE DI COMUNICAZIONE: L'ASSE MILANO-NAPOLI.

Le analisi dei sistemi di Brescia e Siena hanno mostrato come le performance di ciascuna modalità di trasporto siano influenzate dall'efficienza dei veicoli e soprattutto dalla razionalità dell'utilizzo delle infrastrutture; il valore degli indicatori intensivi (es. seJ/p-km) è infatti composto da una parte imputabile all'uso diretto del mezzo (principalmente il consumo di combustibile) e da una parte dipendente dall'uso delle infrastrutture. Come già visto, il peso di queste ultime può incidere dal 4% fino al 40% sul consumo totale energetico per unità trasportata, in maniera inversamente proporzionale all'intensità di utilizzo della strada o della ferrovia. A sua volta, l'intensità di utilizzo è determinata da specificità locali quali l'orografia (es. ferrovia Brescia-Edolo) e la bassa densità di popolazione (autolinee extraurbane senesi).

Sorge quindi l'esigenza di analizzare un sistema di trasporto più esteso e non soggetto a specificità locali, e che sia caratterizzato da un'altissima intensità di utilizzo. L'ultimo aspetto è particolarmente importante perché solo in casi vicini alla saturazione della capacità di traffico è possibile verificare le massime performance ambientali ottenibili dai vettori di trasporto. A questo proposito è stato scelto come caso studio l'asse terrestre sulla direttrice Milano-Napoli costituito da:

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

I risultati e le tabelle di calcolo verranno mostrate solo per l'Autosole e per la TAV, essenzialmente per due motivi; il primo è quello di non voler "appesantire" troppo la lettura del lavoro con un numero eccessivo di tabelle e di dati numerici, il secondo è invece il ruolo sempre più marginale al quale sarà relegata l'attuale linea ferroviaria, se verranno attuate le linee programmatiche governative in materia di trasporto. Infatti la strategia di sviluppo per il futuro del trasporto Italiano prevede a) per le ferrovie la riduzione delle linee locali e tradizionali a favore di investimenti sull'Alta Velocità, mentre b) per il trasporto stradale la costruzione di nuovi raccordi autostradali a scorrimento veloce.

Pertanto i risultati riguardanti la linea ferroviaria esistente verranno mostrati ed utilizzati come termine di paragone, per capire cosa ci si può attendere del futuro.

4.1 L'AUTOSTRADA MILANO-NAPOLI

L'Autostrada Milano-Napoli è probabilmente l'asse stradale più importante d'Italia: essa congiunge infatti il cuore economico del Nord Italia con la città più grande del Sud. Nel 1956 la società "Autostrade" viene fondata proprio con lo scopo di realizzare e gestire la Milano-Roma-Napoli: l'Autostrada del Sole. Il momento storico coincide con la ricostruzione del dopoguerra e sono tanti a sostenere che proprio l'Autosole abbia catalizzato il processo di ammodernamento e di ripresa economica del Paese. In modo del tutto imprevedibile, i volumi di traffico merci e passeggeri subirono un incremento talmente rapido che a distanza di pochi anni dall'apertura dell'autostrada si cominciarono a verificare i primi casi di sovra-saturazione della infrastruttura. Autostrade S.p.A. si vide quindi costretta ad elaborare piani di potenziamento del tratto appenninico sin dagli anni '70.

Il tratto appenninico, come avremo modo di verificare anche nella sezione dedicata al trasporto ferroviario, ha sempre rappresentato il punto più critico dell'intera linea per l'oggettiva difficoltà di progettazione e realizzazione delle linee a causa della pendenza e della tortuosità del tracciato; storicamente esso ha sempre rappresentato il "collo di bottiglia" dell'intera tratta Milano-Napoli. Ad ogni modo è solo nel 1983, superati gli effetti della crisi energetica, che viene costituito un comitato di esperti per individuare le soluzioni idonee a risolvere i problemi di funzionalità del tratto Bologna-Firenze.

Nel 1989 il Ministero dell'Ambiente approvò lo studio di "impatto ambientale", confermato nel '94 dall'Unione Europea, mentre nel 1992 il progetto venne approvato dall'ANAS. Dalla presentazione del primo progetto, tutti i governi succedutisi nel corso di quindici anni hanno dovuto affrontare il problema dell'adeguamento del tratto appenninico fino alla decisione del Governo Prodi del 26 luglio 1996.

Il tratto Bologna-Firenze è sempre stato, insieme ai cantieri per l'Alta Velocità in Val di Susa e al Ponte di Messina, una delle infrastrutture più discusse e osteggiate da parte degli ambientalisti. Tutti i problemi ambientali scontati dalle popolazioni locali, dovuti alla cantierizzazione di aree vastissime che hanno portato alla deviazione di falde acquifere, distruzione di poggi e colline etc., si inseriscono nella assenza storica di un

piano di sviluppo organico delle infrastrutture di trasporto in Italia (Strati F. 1993). Proprio l'assenza di un programma di lungo periodo ha creato in buona parte dell'opinione pubblica il dubbio sull'effettiva utilità del potenziamento infrastrutturale; questo dubbio è sempre stato alimentato inoltre, dalla poca trasparenza delle gare di appalto, dalla mala gestione dei controlli sui cantieri e dalla emanazione di leggi e decreti che sembrano non avere avuto altri scopi se non l'accelerazione e la facilitazione dei cantieri (esempio Legge 21 dicembre 2001, n. 443 o Legge Lunardi, che stabilisce che *“le terre e le rocce da scavo, anche di gallerie, non costituiscono rifiuti e sono, perciò, escluse dall'ambito di applicazione del medesimo decreto legislativo, anche quando contaminate, durante il ciclo produttivo, da sostanze inquinanti derivanti dalle attività di escavazione, perforazione e costruzione”* (www.ambientediritto.it)).

Purtroppo gli strumenti termodinamici non consentono di valutare l'impatto totale connesso alla costruzione di gallerie e ponti, tuttavia il metodo utilizzato è in grado di poter stabilire “l'opportunità” e “l'appropriatezza” termodinamica di un sistema di trasporto rispetto ad un altro.

4.1.1 Caratteristiche dell'Autostrada

L'Autostrada del Sole si estende per una lunghezza totale di 800 km, 419 km dei quali a tre corsie per senso di marcia. Attualmente sono in fase di allargamento i tratti compresi tra Fiano Romano ed Orte, e la tanto discussa “variante di valico” appenninica.

Nel 2001 l'ammontare del traffico passeggeri percorso sull'intera tratta è stato di 1.19E10 v-km per un totale di 2.16E10 p-km, mentre il volume di traffico merci è stato pari a 4.09E9 v-km per un totale di 3.6E10 t-km. Nel complesso l'intero traffico (merci + passeggeri) nel periodo 1995-2001 ha registrato un aumento del 27% (dati Autostrade S.p.A., 2002).

4.1.2 L'approccio metodologico

La metodologia usata per l'analisi del trasporto autostradale è molto simile a quella con cui sono stati analizzati i sistemi di trasporto di Siena e Brescia fatto salvo per l'introduzione di ulteriori strumenti di analisi:

- a) a fianco del Bilancio di Massa classico, è stata utilizzato il “Material Flow Accounting” su scala globale;

- b) l'EMIPS a tutti i componenti del sistema (infrastrutture, mezzi e consumo diretto di energia);
- c) il bilancio delle emissioni su scala globale utilizzando la versione aggiornata del metodo "Corinair" (vedere appendice, su CD-ROM).

4.1.3 Costruzione delle infrastrutture, dei mezzi d'opera e dei veicoli

I dati riguardanti la costruzione dell'autostrada sono stati desunti anche in questo caso da capitolati d'appalto e da manuali di costruzione. Purtroppo a causa della vastità del percorso e della frammentazione della costruzione tra varie imprese costruttrici, non è stato possibile ottenere dati precisi per tutte le voci. Oltre a questa prima difficoltà, tutto sommato oggettiva, va segnalato che per quanto riguarda la costruzione della maggior parte dei tunnel le ditte hanno mostrato una vera e propria reticenza a rilasciare dati ed informazioni, ragion per cui è stato necessario utilizzare canali alternativi quali il web.

I dati per cui è stato necessario procedere ad una stima sono:

- a) altezza effettiva di ciascun rilevato;
- b) altezza e sezione effettiva di ciascun ponte;
- c) quantità di materiale realmente movimentato in galleria;
- d) lunghezza effettiva degli sparti-traffico e dei guardrail;
- e) quantità effettiva di gasolio ed elettricità utilizzata nei cantieri per la costruzione delle gallerie.

Per le infrastrutture autostradali è stata assunta una vita media di 50 anni, mentre l'allocazione delle risorse tra trasporto passeggeri e trasporto merci è stata svolta assumendo un peso medio di 65 kg per passeggero trasformando quindi i p-km in t-km equivalenti. Questa procedura imputa al trasporto passeggeri un "carico erosivo" sulla strada del 4% lasciando il restante 96% al trasporto merci. Valori molto simili sono stati riscontrati per il sistema stradale di Brescia.

La quantità di materiali che compongono i veicoli passeggeri e merci è determinante, ed il metodo con il quale sono stati stimati è conseguenza delle seguenti considerazioni: se stessimo stilando un bilancio di massa di un territorio "chiuso", l'acciaio dei veicoli verrebbe calcolato sommando le masse dei veicoli immatricolati nel territorio, dividendola per gli anni di vita media dei veicoli. In questo caso però, trattandosi di un asse viario di attraversamento, deve essere calcolata la sola massa usurata nell'attraversamento.

Si è deciso pertanto di calcolare tale frazione in virtù della seguente formula:

$$\text{massa veicoli/km vita} = \text{massa allocata/km autostrada}.$$

I dati riguardanti le percorrenze annuali sono stati forniti da Autostrade (dati Autostrade Spa, 2002); il coefficiente di occupazione medio delle auto è di 1.8 persone per veicolo (Istat, 2000), mentre il coefficiente di carico medio per i camion è di 8.8 tonnellate per veicolo (Istat, 2000).

Per tutte le altre modalità di calcolo e di stima per ciascuna voce materiale si rimanda all'Appendice (Note di calcolo Autostrada Milano-Napoli, su CD-ROM).

4.1.4 Risultati

Il Bilancio di Massa.

Di seguito si riporta la Tabella 7 che mostra le quantità annuali di materiali consumate e prodotte (sotto forma di rifiuti ed emissioni) dall'Autosole.

I flussi di input mostrano le “dimensioni” relative del trasporto merci rispetto al trasporto passeggeri; le quantità di materia usate direttamente da i due sistemi, compresi la massa dei mezzi e dei combustibili, sono rispettivamente di 3.22E9 kg e di 2.69E9 kg e le stesse proporzioni vengono mantenute anche dai valori delle emissioni provocate dalle due modalità.

Il valore della quantità di massa utilizzata per p-km è di 0.13 kg, più basso dei valori ottenuti nei casi di Brescia e Siena, fondamentalmente a causa del più alto coefficiente di occupazione dei veicoli in autostrada (1.8 contro 1.4 persone per veicoli, ISTAT 2000).

Il valore di massa per unità merce è pari a 0.18 kg/t-km ed è anch'essa più bassa dei valori di Brescia e Siena (0.27 kg/t-km e 0.50kg/t-km rispettivamente); in questo caso la differenza è dovuta ad un coefficiente di carico leggermente più alto e soprattutto all'alta intensità di utilizzo delle infrastrutture che abbassa di conseguenza la frazione di massa consumata indirettamente.

Tabella 7. Bilancio di massa dell'Autostrada Milano-Napoli (espresso in kg/anno)

INPUT		
FASE DI COSTRUZIONE DELLA RETE AUTOSTRADALE		
1	GHIAIA	2.46E+08
2	SUOLO SCAVATO PER COSTRUZIONE (ATTRIBUZIONE ANNUA)	8.89E+08
3	MISTO GRANULARE STABILIZZATO	6.80E+08
4	ASFALTO	1.50E+09
5	CEMENTO	4.48E+07
6	CEMENTO ARMATO	4.45E+06
7	CEMENTO ARMATO SPARTITRAFFICO	2.64E+07
8	ACCIAIO SPARTITRAFFICO	2.15E+06
9	ACCIAIO GUARDRAIL	4.30E+06
10	ACCIAIO GALLERIE	1.54E+07
11	DIESEL (PER COSTRUZIONE)	2.69E+04
12	ACCIAIO DEI MACCHINARI	8.53E+02
13	O ₂	9.30E+04
14	N ₂	4.00E+02
FASE DI MANUTENZIONE		
15	GASOLIO (PER MANUTENZIONE)	1.28E+06
16	O ₂	4.42E+06
17	N ₂	1.90E+04
AUTOCONSUMI SOCIETÀ AUTOSTRADALE		
18	METANO	1.94E+05
19	GASOLIO RISCALDAMENTO	8.78E+05
20	GASOLIO AUTO TRAZIONE	5.11E+05
21	BENZINA	8.96E+05
22	GPL	1.22E+04
23	OLIO COMBUSTIBILE	3.94E+04
UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO PRIVATO		
24	ACCIAIO DEI VEICOLI	7.04E+07
25	BENZINA PER CIRCOLAZIONE	5.34E+08
26	DIESEL PER CIRCOLAZIONE	7.84E+07
27	GAS PER CIRCOLAZIONE	1.74E+07
28	PNEUMATICI	7.13E+06
29	OLIO LUBRIFICANTE	1.31E+06
30	O ₂	1.97E+09
31	N ₂	1.03E+07
UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO MERCI		
32	ACCIAIO DEI VEICOLI	8.45E+06
33	BENZINA PER CIRCOLAZIONE	7.70E+07
34	DIESEL PER CIRCOLAZIONE	6.46E+08
35	PNEUMATICI	9.04E+06
36	OLIO LUBRIFICANTE	2.48E+06
37	O ₂	2.47E+09
38	N ₂	6.78E+06
TOTALE INPUT		9.33E+09

OUTPUT

DEGRADAZIONE INFRASTRUTTURE		
39	SUOLO SCAVATO PER COSTRUZIONE (ATTRIBUZIONE ANNUA)	8.89E+08
40	MATERIALE DI DEGRADAZIONE DELLA SEDE STRADALE	2.53E+09
41	MATERIALE DI DEGRADAZIONE DALL'USURA DEI VEICOLI	1.23E+08
EMISSIONI IN FASE DI COSTRUZIONE		
42	CO ₂	8.46E+04
43	CO	4.26E+02
44	NO _x	1.32E+03
45	S0X	1.35E+02
46	PARTICOLATO	1.54E+02
47	VOC	1.91E+02
48	H ₂ O	3.41E+04
EMISSIONI IN FASE DI MANUTENZIONE		
49	CO ₂	4.02E+06
50	CO	2.03E+04
51	NO _x	6.26E+04
52	S0X	1.28E+03
53	PARTICOLATO	7.35E+03
54	VOC	9.08E+03
55	H ₂ O	1.62E+06
EMISSIONI DA TRASPORTO PRIVATO		
56	CO ₂	1.69E+09
57	CO	1.44E+08
58	NO _x	3.38E+07
59	S0X	1.44E+06
60	PARTICOLATO	5.46E+05
61	VOC	1.12E+07
62	H ₂ O	7.15E+08
EMISSIONI DA TRASPORTO MERCI		
63	CO ₂	2.22E+09
64	CO	3.16E+07
65	NO _x	2.23E+07
66	SOX	3.25E+06
67	PARTICOLATO	8.88E+05
68	VOC	4.42E+06
69	H ₂ O	9.18E+08
TOTALE OUTPUT		9.33E+09
70	RAPPORTO OUTPUT/INPUT	1.00
71	MASSA TOTALE DELLE INFRASTRUTTURE AUTOSTRADALI (KG)	2.39E+11
72	MASSA TOTALE PER PKM PRIVATO (KG/P-KM)	0.13
73	MASSA TOTALE PER TKM (KG/T-KM)	0.18
74	CO₂ PER P-KM (G/P-KM)	77.9
75	CO₂ PER T-KM (G/T-KM)	61.8

Il bilancio delle emissioni locali e globali

I risultati delle emissioni gassose mostrati finora si riferiscono alla sola combustione dei carburanti dovuta all'utilizzo dei veicoli e dei mezzi usati nella costruzione. In realtà ad ogni materiale usato per la costruzione dei veicoli e dell'infrastrutture sono associate quantità di emissioni dovute al loro processo di produzione. L'internalizzazione delle emissioni dovute al ciclo di produzione dei materiali consente quindi di avere una stima più completa e "reale" delle emissioni associate al trasporto dei passeggeri e delle merci. In Tabella 8 vengono riportati i risultati delle analisi locale e globale; l'allargamento di scala comporta un incremento sulla quantità di emissioni per unità trasportate che va dallo 0.34% al 2478%. I risultati sono interessanti per diversi aspetti:

- il solo calcolo delle emissioni dirette comporta una sottostima del reale impatto ambientale,
- il cambio di scala non influenza allo stesso modo le diverse specie emesse e questa influenza è differente tra i sottosistemi passeggeri e merci. Mentre il punto *a* non necessita di ulteriori spiegazioni, la diversa influenza della scala globale sui fattori di emissioni merita una discussione più approfondita.

Tabella 8: Principali inquinanti gassosi su scala locale e globale per il tratto autostradale Milano-Napoli

	Unit	CO ₂	CO	NOx	Particolato	VOC	SOx
PASSEGGERI							
LOCALE	kg/p-km	7.79E-02	6.66E-03	1.56E-03	2.53E-05	5.17E-04	6.64E-05
INCREMENTO	kg/p-km	1.16E-02	2.29E-05	4.72E-05	4.42E-05	9.84E-07	1.72E-04
TOTALE	kg/p-km	8.95E-02	6.68E-03	1.61E-03	6.95E-05	5.18E-04	2.39E-04
GLOBAL/LOCAL	%	14.90%	0.34%	3.02%	175.04%	0.19%	259.88%
MERCI							
LOCALE	kg/t-km	6.18E-02	8.80E-04	6.21E-04	2.49E-05	1.23E-04	9.04E-05
INCREMENTO	kg/t-km	1.16E-02	2.60E-05	4.26E-05	6.17E-04	2.00E-06	1.35E-04
TOTALE	kg/t-km	7.34E-02	9.06E-04	6.64E-04	6.42E-04	1.25E-04	2.25E-04
GLOBAL/LOCAL	%	18.69%	2.95%	6.86%	2478.43%	1.62%	149.20%

Le differenze di risposta tra i vari gas dipendono essenzialmente da dove essi vengono prodotti; per la CO₂ ad esempio, l'emissione diretta da parte dei veicoli è preponderante

rispetto alla quantità che viene emessa durante la produzione dell'asfalto e del cemento. La stessa cosa non può invece dirsi per il Particolato, per il quale sono i processi di produzione del cemento (14.01 kg/t, EPA 1998) e dell'asfalto (14 kg/t, EPA 1998) ad avere il maggior peso nell'emissione totale rispetto alla combustione nei motori. La diversa influenza della scala tra trasporto passeggeri e trasporto merci è invece da imputarsi alla diversa allocazione dei materiali utilizzati nella costruzione (rispettivamente 15% e 85%).

Il Total Material Requirement

L'allargamento di scala sul bilancio di massa conduce a risultati importanti.

Tabella 9: Total Material Requirement dell'Autostrada Milano.Napoli

FLUSSI	Unit	Quantità annuale (local scale)	Quantità annuale (incremento global scale)
FASE DI COSTRUZIONE DELLA RETE STRADALE			
1 GHIAIA	g	2.46E+11	8.11E+11
2 SUOLO	g	8.89E+11	8.89E+11
3 MISTO GRANULARE STABILIZZATO	g	6.80E+11	2.24E+12
4 ASFALTO	g	1.50E+12	5.67E+12
5 CEMENTO	g	4.48E+10	9.17E+11
6 CEMENTO ARMATO	g	3.09E+10	6.29E+11
7 GASOLIO (PER COSTRUZIONE)	g	2.69E+07	4.32E+08
8 ACCIAIO SPARTITRAFFICO	g	2.15E+09	4.15E+10
9 ACCIAIO GUARDRAIL	g	4.30E+09	8.31E+10
10 ACCIAIO ARMATURE	g	1.54E+07	2.97E+08
11 ACCIAIO DEI MACCHINARI	g	8.53E+05	1.65E+07
12 O ₂	g	6.26E+07	6.26E+07
13 N ₂	g	9.08E+06	9.08E+06
FASE DI MANUTENZIONE			
14 GASOLIO (PER MANUTENZIONE)	g	1.28E+09	2.06E+10
AUTOCONSUMI AUTOSTRADALE SPA			
15 METANO	g	1.94E+08	3.30E+08
16 EN ELETTRICA	g		3.09E+11
17 GASOLIO RISCALDAMENTO	g	8.78E+08	1.41E+10
18 GASOLIO AUTOTRAZIONE	g	5.11E+08	8.20E+09
19 BENZINA	g	8.96E+08	1.40E+10
20 GPL	g	1.22E+07	0.00E+00
21 OLIO COMBUSTIBILE	g	3.94E+07	5.10E+08
TOTALI COSTRUZIONE E MANUTENZIONE		3.40E+12	1.17E+13
UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO PRIVATO			
22 ACCIAIO DEI VEICOLI	g	7.04E+10	1.36E+12
23 BENZINA PER CIRCOLAZIONE	g	5.34E+11	8.35E+12
24 DIESEL PER CIRCOLAZIONE	g	7.84E+10	1.26E+12

25	GAS PER CIRCOLAZIONE	g	1.74E+10	2.96E+10
26	PNEUMATICI	g	7.13E+09	0.00E+00
27	OLIO LUBRIFICANTE	g	1.31E+09	2.34E+10
TOTALI USI DIRETTI INDIVIDUALE			7.08E+11	1.10E+13
UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO MERCI				
28	ACCIAIO DEI VEICOLI	g	8.45E+09	1.63E+11
29	BENZINA PER CIRCOLAZIONE	g	7.70E+10	1.20E+12
30	DIESEL PER CIRCOLAZIONE	g	5.49E+11	8.81E+12
31	PNEUMATICI	g	9.04E+09	0.00E+00
32	OLIO LUBRIFICANTE	g	2.48E+09	4.44E+10
TOTALI USI DIRETTI MERCI			8.86E+12	1.02E+13
MIPP (KG/P-KM)			0.53	
MIPP (KG/T-KM)			0.60	
RAPPORTO GLOBAL/LOCAL MASSA IN INPUT			3.50	
RAPPORTO GLOBAL/LOCAL MASSA PER P-KM			4.07	
RAPPORTO GLOBAL/LOCAL MASSA PER T-KM			3.29	

I risultati sono eloquenti e mostrano che la quantità totale di materia coinvolta nel sistema Autosole è 3.5 volte la quantità locale. Riferito invece alle singole modalità di trasporto, all'applicazione dell'MFA corrisponde un incremento del 407% per il trasporto passeggeri e del 329% per le merci. Generalmente, nelle metodologie utilizzate, l'allargamento di scala assume peso maggiore per il trasporto merci a causa dell'allocazione maggiore delle risorse che compongono le infrastrutture; in questo caso invece lo zainetto ecologico delle automobili è prevalente sul peso delle infrastrutture a causa dell'altissimo numero di vetture che vengono utilizzate, e del basso fattore di occupazione pari ad un terzo della loro capacità massima; inoltre le automobili hanno una vita media molto più breve di un camion merci e questo fa sì che una massa maggiore venga allocata su un numero minore di unità trasportate.

L'analisi Energetica Locale

La metodologia di calcolo è stata già illustrata nelle sezioni precedenti; di seguito si riportano in tabella 10 i dati dei flussi energetici annuali dell'Autosole; il consumo di energia per p-km è pari a 1.37 MJ, ed è più basso dei consumi medi per il trasporto

individuali calcolati per Siena e Brescia (circa 1.76 MJ/p-km). Anche in questo caso la causa è il più alto coefficiente di occupazione medio dei veicoli in autostrada.

Il consumo di energia per le merci invece è di 0.91 MJ/t-km più basso di circa il 70% dei valori osservati per Siena e Brescia: in questo caso i fattori che determinano questa situazione sono a) un fattore di carico medio leggermente superiore, b) l'alta intensità di utilizzo e c) la migliore pianificazione dei viaggi dovuta alle maggiori percorrenze.

Federici XVI

Tabella 10. Analisi energetica locale dell'Autostrada Milano-Napoli

FLUSSI	Quantità	Unit	Tep/unit	Tep/anno	MJ/anno
FASE DI COSTRUZIONE DELLA RETE STRADALE					
1 GASOLIO (PER COSTRUZIONE)	2.69E+04	kg	1.07E-03	2.88E+01	1.21E+06
FASE DI MANUTENZIONE					
2 GASOLIO (PER MANUTENZIONE)	1.28E+06	kg	1.07E-03	1.37E+03	5.74E+07
AUTOCONSUMI					
3 METANO	1.94E+05	kg	1.20E-03	2.33E+02	9.74E+06
4 GASOLIO RISCALDAMENTO	8.78E+05	kg	1.07E-03	9.39E+02	3.93E+07
5 GASOLIO AUTOTRAZIONE	5.11E+05	kg	1.07E-03	5.47E+02	2.29E+07
6 BENZINA	8.96E+05	kg	1.13E-03	1.01E+03	4.24E+07
7 GPL	1.22E+04	kg	1.20E-03	1.46E+01	6.13E+05
8 OLIO COMBUSTIBILE	3.94E+04	kg	9.72E-04	3.83E+01	1.60E+06
9 EN. ELETTRICA	3.72E+07	kWh	8.60E-05	3.20E+03	1.34E+08
UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO PRIVATO					
10 BENZINA PER CIRCOLAZIONE	5.34E+08	kg	1.13E-03	6.04E+05	2.53E+10
11 DIESEL PER CIRCOLAZIONE	7.84E+07	kg	1.07E-03	8.39E+04	3.51E+09
12 GAS PER CIRCOLAZIONE	1.74E+07	kg	1.20E-03	2.09E+04	8.76E+08
UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO MERCI					
13 BENZINA PER CIRCOLAZIONE	7.70E+07	kg	1.13E-03	8.70E+04	3.64E+09
14 DIESEL PER CIRCOLAZIONE	6.46E+08	kg	1.07E-03	6.91E+05	2.89E+10
TOTALE				1.49E+06	6.25E+10
15 MJ/P-KM	1.37				
16 MJ/T-KM	0.91				

L'analisi Energetica Globale

La differenza con l'analisi precedente risiede come noto nell'inglobare i costi energetici di tutti i materiali utilizzati dal sistema autostrada:

Tabella 11. Analisi energetica globale dell'Autostrada Milano.Napoli

FLUSSI		Quantità	Unit	Tep/unit	Tep/anno	MJ/anno
FASE DI COSTRUZIONE DELLA RETE STRADALE						
1	GHIAIA	2.46E+08	kg	2.39E-07	5.89E+01	2.46E+06
2	SUOLO	8.89E+08	kg	2.39E-07	2.12E+02	8.89E+06
3	MISTO GRANULARE STABILIZZATO	6.80E+08	kg	2.39E-07	1.63E+02	6.81E+06
4	ASFALTO	1.50E+09	kg	2.72E-05	4.09E+04	1.71E+09
5	CEMENTO	4.48E+07	kg	1.10E-04	4.93E+03	2.06E+08
6	CEMENTO ARMATO	4.45E+06	kg	4.70E-04	2.09E+03	8.76E+07
7	CEMENTO ARMATO SPARTITRAFFICO	2.15E+06	kg	4.70E-04	1.01E+03	4.23E+07
8	GASOLIO (PER COSTRUZIONE)	2.69E+04	kg	1.28E-03	3.45E+01	1.44E+06
9	ACCIAIO DEI MACCHINARI	8.53E+02	kg	1.91E-03	1.63E+00	6.82E+04
10	ACCIAIO GUARDRAIL	4.30E+06	kg	1.91E-03	8.21E+03	3.44E+08
11	ACCIAIO ARMATURE	1.54E+07	kg	1.91E-03	2.93E+04	1.23E+09
12	ACCIAIO SPARTITRAFFICO	4.30E+06	kg	1.91E-03	8.21E+03	3.44E+08
FASE DI MANUTENZIONE						
13	GASOLIO (PER MANUTENZIONE)	1.28E+06	kg	1.28E-03	1.64E+03	6.87E+07
AUTOCONSUMI						
14	METANO	1.94E+05	kg	1.37E-03	2.66E+02	1.11E+07
15	GASOLIO RISCALDAMENTO	8.78E+05	kg	1.28E-03	1.12E+03	4.70E+07
16	GASOLIO AUTOTRAZIONE	5.11E+05	kg	1.28E-03	6.54E+02	2.74E+07
17	BENZINA	8.96E+05	kg	1.28E-03	1.15E+03	4.80E+07
18	GPL	1.22E+04	kg	1.41E-03	1.72E+01	7.20E+05
19	OLIO COMBUSTIBILE	3.94E+04	kg	1.23E-03	4.85E+01	2.03E+06
20	EN. ELETTRICA	3.72E+07	kWh	2.87E-04	1.07E+04	4.46E+08
UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO PRIVATO						
22	ACCIAIO DEI VEICOLI	7.04E+07	kg	1.91E-03	1.34E+05	5.63E+09
23	BENZINA PER CIRCOLAZIONE	5.34E+08	kg	1.28E-03	6.84E+05	2.86E+10
24	DIESEL PER CIRCOLAZIONE	7.84E+07	kg	1.28E-03	1.00E+05	4.20E+09
25	GAS PER CIRCOLAZIONE	1.74E+07	kg	1.41E-03	2.46E+04	1.03E+09
26	PNEUMATICI	7.13E+06	kg	2.05E-03	1.46E+04	6.12E+08
27	OLIO LUBRIFICANTE	1.31E+06	kg	2.00E-03	2.62E+03	1.10E+08
UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO MERCI						
28	ACCIAIO DEI VEICOLI	8.45E+06	kg	1.91E-03	1.61E+04	6.76E+08
29	BENZINA PER CIRCOLAZIONE	7.70E+07	kg	1.28E-03	9.85E+04	4.12E+09
30	DIESEL PER CIRCOLAZIONE	6.46E+08	kg	1.28E-03	8.26E+05	3.46E+10
31	PNEUMATICI	9.04E+06	kg	2.05E-03	1.85E+04	7.76E+08
32	OLIO LUBRIFICANTE	2.48E+06	kg	2.00E-03	4.95E+03	2.07E+08
TOTALE					2.05E+06	8.59E+10
33	MJ/P-KM	1.87				
34	MJ/T-KM	1.25				

L'internalizzazione dei costi energetici indiretti aumenta il valore dei consumi per unità trasportata del 36% sia nel caso dei passeggeri che nel caso delle merci. Anche l'analisi energetica globale vede le performance del sistema autostradale superiori a quelle dei sistemi stradali di Brescia e Siena, sia per il trasporto in auto che per il trasporto merci.

L'analisi Exergetica (EMIPS)

L'analisi exergetica del sistema autostradale è stata svolta, a differenza dei casi studio precedenti, tenendo conto anche dell'exergia accumulata nei materiali utilizzati; questa scelta è motivata da una parte dalla volontà di implementare l'approccio analitico e dall'altra per poter confrontare in maniera più appropriata l'analisi exergetica con l'analisi energetica. I risultati sono mostrati in tabella 12.

I risultati denominati "local" si riferiscono all'analisi exergetica svolta tenendo conto soltanto dei combustibili e dell'energia elettrica, i risultati denominati invece "global" si riferiscono invece all'exergia di tutti i flussi entranti; come si vede, la differenza tra le scale non è molto rilevante a causa del peso maggiore di combustibili ed energia elettrica che mettono in secondo piano il contenuto exergetico degli altri materiali usati.

Anche inglobando le exergie dei materiali, il sistema autostradale risulta migliore degli altri sistemi stradali analizzati.

Tabella 12. Analisi exergetica globale dell'Autostrada Milano-Napoli

FLUSSI	QUANTITÀ	UNIT	EXERGIA SPECIFICA MJ/unit	REF	EXERGIA MJ/anno
FASE DI COSTRUZIONE DELLA RETE STRADALE					
1	GHIAIA	2.46E+08	kg	0.31	[h] 7.56E+07
2	MISTO GRANULARE STABILIZZATO	6.80E+08	kg	0.31	[h] 2.09E+08
3	ASFALTO	1.50E+09	kg	2.29	[d] 3.45E+09
4	CEMENTO	4.48E+07	kg	0.63	[h] 2.82E+07
5	CEMENTO ARMATO	4.45E+06	kg	1.92	[a] 8.57E+06
6	CEMENTO ARMATO SPARTITRAFFICO	2.15E+06	kg	1.92	[a] 4.13E+06
7	GASOLIO (PER COSTRUZIONE)	2.69E+04	kg	44.40	[a] 1.20E+06
8	ACCIAIO DEI MACCHINARI	8.53E+02	kg	7.10	[c] 6.05E+03
9	ACCIAIO GUARDRAIL	4.30E+06	kg	7.10	[c] 3.05E+07
10	ACCIAIO ARMATURE	1.54E+07	kg	7.10	[c] 1.09E+08
11	ACCIAIO SPARTITRAFFICO	2.15E+06	kg	7.10	[c] 3.05E+07
FASE DI MANUTENZIONE					
12	GASOLIO (PER MANUTENZIONE)	1.28E+06	kg	44.40	[a] 5.69E+07
AUTOCONSUMI					
13	METANO	1.94E+05	kg	51.98	[c] 1.01E+07
14	GASOLIO RISCALDAMENTO	8.78E+05	kg	44.40	[a] 3.90E+07
15	GASOLIO AUTOTRAZIONE	5.11E+05	kg	44.40	[a] 2.27E+07
16	BENZINA	8.96E+05	kg	43.20	[a] 3.87E+07
17	GPL	1.22E+04	kg	48.95	[c] 5.97E+05
18	OLIO COMBUSTIBILE	3.94E+04	kg	43.20	[a] 1.70E+06
19	EN. ELETTRICA	3.72E+07	kWh	3.60	[b] 1.34E+08
UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO PRIVATO					
20	ACCIAIO DEI VEICOLI	7.04E+07	kg	7.10	[c] 5.00E+08
21	BENZINA PER CIRCOLAZIONE	5.34E+08	kg	43.20	[a] 2.31E+10
22	DIESEL PER CIRCOLAZIONE	7.84E+07	kg	44.40	[a] 3.48E+09
23	GAS PER CIRCOLAZIONE	1.74E+07	kg	48.95	[c] 8.53E+08
24	PNEUMATICI	7.13E+06	kg	23.90	[e] 1.70E+08
25	OLIO LUBRIFICANTE	1.31E+06	kg	50.23	[a] 6.57E+07
UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO MERCI					
26	ACCIAIO DEI VEICOLI	8.45E+06	kg	7.10	[c] 6.00E+07
27	BENZINA PER CIRCOLAZIONE	7.70E+07	kg	43.20	[a] 3.33E+09
28	DIESEL PER CIRCOLAZIONE	6.46E+08	kg	44.40	[a] 2.87E+10
29	PNEUMATICI	9.04E+06	kg	23.90	[e] 2.16E+08
30	OLIO LUBRIFICANTE	2.48E+06	kg	50.23	[a] 1.24E+08
TOTALE					6.53E+10
ANALISI EXERGETICA					
		Local	Global		
31	MJ/P-KM	1.27	1.31		
32	MJ/T-KM	0.90	1.01		

Riferimenti

- [a] Stime basate su dati di letteratura (Shieh and Fan, 1982; Szargut et al., 1988)
 [b] Szargut J., Morris D.R., Steward F.R., 1988 pg. 297-304
 [c] Szargut et al., 1988, p. 188; Wurbs J., et al., Wuppertal Papers Nr. 64, 1996.
 [d] Da calcoli svolti in questo lavoro, basati su Szargut et al., 1988, p 185
 [e] Ayres (Italia 1996)
 [h] Szargut et al., 1988

L'analisi Energetica

L'analisi Energetica è stata applicata nello stesso modo visto nei casi studio precedenti; i dati riguardanti il costo delle infrastrutture e del lavoro di manutenzione e costruzione del manto stradale sono stati in parte forniti da Autostrade S.p.A., in parte stimati dai capitolati di appalto. Per il costo dei mezzi si è fatto riferimento alle riviste di settore (Quattroruote 2002, Tuttotrasporti 2002), mentre per il costo e il lavoro della manutenzione dei veicoli si è fatto riferimento a dati desunti da interviste agli addetti di alcune officine autorizzate, fatte durante il lavoro di ricerca.

Tabella 13. Analisi energetica globale dell'Autostrada Milano-Napoli

	UNIT	QUANTITÀ	SOLAR TRANSFORMITY (SEJ/UNIT)	REF.	EMERGI EMERGY (SEJ/ANNO)	
1	ENERGIA SOLARE	J/anno	9.62E+16	1.00E+00	[a]	9.62E+16
2	PIOGGIA, POTENZIALE CHIMICO	J/anno	9.44E+13	1.82E+04	[b]	1.72E+18
3	CALORE GEOTERMICO	J/anno	6.60E+13	6.06E+03	[b]	4.00E+17
FASE DI COSTRUZIONE DELLA RETE STRADALE						
4	GHIAIA	kg/anno	2.46E+08	5.00E+11	[c]	1.23E+20
5	SUOLO MISTO GRANULARE	J/anno	8.04E+14	7.40E+04	[c]	5.95E+19
6	STABILIZZATO	kg/anno	6.80E+08	5.00E+11		3.40E+20
7	ASFALTO	J/anno	1.72E+15	3.47E+05	[g]	5.96E+20
8	CEMENTO	kg/anno	4.48E+07	1.03E+09	[c]	4.62E+16
9	CEMENTO ARMATO CEMENTO ARMATO	kg/anno	4.45E+06	1.11E+09	[f]	4.94E+15
10	SPARTITRAFFICO	kg/anno	2.64E+07	1.11E+09		2.93E+16
11	GASOLIO (PER COSTRUZIONE)	J/anno	1.21E+12	6.60E+04	[c]	7.98E+16
12	ACCIAIO DEI MACCHINARI	kg/anno	8.53E+02	6.70E+12	[c]	5.71E+15
13	ACCIAIO ARMATURE	kg/anno	1.54E+07	6.70E+12	[c]	1.03E+20
14	ACCIAIO GUARDRAIL	kg/anno	4.30E+06	6.70E+12	[c]	2.88E+19
15	ACCIAIO SPARTITRAFFICO	kg/anno	2.15E+06	6.70E+12	[c]	1.44E+19

16	LAVORO PER COSTRUZIONE	J/anno	4.47E+09	8.10E+04	[e]	3.62E+14
17	SERVIZI PER COSTRUZIONE	€/anno	2.20E+08	1.30E+12	[e]	2.86E+20

FASE DI MANUTENZIONE

18	GASOLIO (PER MANUTENZIONE) ACCIAIO DEI MACCHINARI (PER	J/anno	5.75E+13	6.60E+04	[c]	3.80E+18
19	MANUTENZIONE)	kg/anno	n.d.	6.70E+12	[c]	0.00E+00
20	LAVORO PER MANUTENZIONE	J/anno	4.06E+10	8.10E+04	[e]	3.29E+15
21	SERVIZI PER MANUTENZIONE	€/anno	1.86E+06	1.30E+12	[e]	2.42E+18

AUTOCONSUMI

22	METANO GASOLIO RISCALDAMENTO +	J/anno	9.69E+12	5.22E+04	[h]	5.06E+17
23	AUTOTRAZIONE	J/anno	6.23E+13	6.60E+04	[c]	4.11E+18
24	BENZINA	J/anno	4.22E+13	6.60E+04	[c]	2.79E+18
25	GPL	J/anno	6.10E+11	6.60E+04	[c]	4.03E+16
26	OLIO COMBUSTIBILE	J/anno	1.60E+12	6.60E+04	[c]	1.06E+17
27	EN. ELETTRICA	J/anno	1.34E+14	1.50E+05	[d]	2.01E+19

UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO PRIVATO

28	ACCIAIO DEI VEICOLI	kg/anno	7.04E+07	6.70E+12	[c]	4.72E+20
29	BENZINA PER CIRCOLAZIONE	J/anno	2.52E+16	6.60E+04	[c]	1.66E+21
30	DIESEL PER CIRCOLAZIONE	J/anno	3.52E+15	6.60E+04	[c]	2.32E+20
31	GAS PER CIRCOLAZIONE	J/anno	8.72E+14	6.60E+04	[c]	5.75E+19
32	PNEUMATICI	J/anno	1.50E+14	2.10E+04	[g]	3.14E+18
33	OLIO LUBRIFICANTE ORE DI GUIDA ANNUALI	J/anno	1.10E+14	6.60E+04	[c]	7.23E+18
34	TRASPORTO INDIVIDUALE LAVORO PER MANUTENZIONE	J/anno	3.98E+13	8.10E+04	[e]	3.23E+18
35	VEICOLI	J/anno	1.04E+11	8.10E+04	[e]	8.39E+15
36	COSTO AUTOVEICOLI	€/anno	9.80E+08	1.30E+12	[e]	1.27E+21

UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO MERCI

37	ACCIAIO DEI VEICOLI	kg/anno	8.45E+06	6.70E+12	[c]	5.66E+19
38	BENZINA PER CIRCOLAZIONE	J/anno	3.63E+15	6.60E+04	[c]	2.40E+20
39	DIESEL PER CIRCOLAZIONE	J/anno	2.89E+16	6.60E+04	[c]	1.91E+21
40	PNEUMATICI	J/anno	7.75E+14	2.10E+04	[g]	1.63E+19
41	OLIO LUBRIFICANTE ORE DI GUIDA ANNUALI	J/anno	2.07E+14	6.60E+04	[c]	1.37E+19
42	TRASPORTO MERCI LAVORO PER MANUTENZIONE	J/anno	1.78E+13	8.10E+04	[e]	1.44E+18
43	VEICOLI MERCI	J/anno	2.43E+13	8.10E+04	[e]	1.96E+18
44	COSTO CAMION AND TRUCK	€/anno	9.56E+07	1.30E+12	[e]	1.24E+20

EMERGENZA TOTALE (SEJ/ANNO) 7.71E+21

45	SEJ/P-KM	1.74E+11
46	SEJ/T-KM	1.08E+11

References per le trasformities

- [a] per definizione
- [b] Odum H.T., 1996.
- [c] Brown M.T. e Arding J., 1991.
- [d] Ulgiati, 1996 (Report per ENEA)
- [e] Ulgiati-Russi, 1999, manoscritto non pubblicato.

- [f] Da calcoli fatti in questo lavoro.
 [g] Odum 1983.
 [h] Bargigli, in press.

I risultati finali mostrano che il supporto energetico richiesto per unità trasportata è maggiore per la movimentazione dei passeggeri che per quello delle merci; la stessa cosa, seppur in misura differente, l'abbiamo vista per il sistema stradale di Brescia ma non per quello di Siena. I valori di transformity per le unità trasportate in autostrada sono in assoluto i più bassi tra tutti i sistemi stradali studiati. Anche in questo caso la motivazione va ricercata nei più alti fattori di carico, e nella più alta intensità di utilizzo delle infrastrutture.

Confronto tra i sistemi stradali fin qui analizzati

Di seguito si riportano in tabella 14 i risultati dei sistemi stradali di Brescia, Siena e dell'Autosole. I dati mostrano chiaramente che il trasporto in autostrada è caratterizzato dalle migliori performance ambientali. La ragione risiede nel migliore utilizzo dei veicoli che si fa in autostrada rispetto ai sistemi locali; la maggiore lunghezza dei viaggi autostradali fa da deterrente ad un più alto fattore di carico, sia per le auto che per i camion, mettendo in secondo piano il peso delle infrastrutture.

Tabella 14. Confronto dei sistemi stradali Siena, Brescia, Autosole.

	Unit	Bilancio di Massa Locale (kg/unit)	Analisi Energetica Locale (MJ/unit)	Analisi Energetica Globale (MJ/unit)	Analisi Exergetica Locale (MJ/unit)	Analisi Emergetica Globale (10¹¹ seJ/unit)
TRASPORTO PASSEGGERI						
SIENA	(p-km)	0.19	1.75	2.10	1.63	1.66
BRESCIA	(p-km)	0.17	1.76	2.12	1.74	2.47
AUTOSOLE	(p-km)	0.13	1.37	1.87	1.31	1.74
TRASPORTO MERCI						
SIENA	(t-km)	0.50	1.59	1.66	1.29	3.11
BRESCIA	(t-km)	0.27	1.68	2.08	1.61	1.91
AUTOSOLE	(t-km)	0.18	0.91	1.25	1.01	1.08

4.2 LA LINEA AD ALTA VELOCITÀ MILANO-NAPOLI (TAV)

I lavori per la costruzione della linea ad alta velocità sono cominciati in Italia all'inizio degli anni '90. Inizialmente i progetti si ponevano lo scopo di rendere più veloci i collegamenti tra le capitali italiane, sulla scia del modello francese (TGV) cominciato qualche anno prima e già in servizio. L'idea del treno ad alta velocità (TAV) nacque anche con lo scopo di rendere più attraente e "competitivo" il trasporto ferroviario, relegato sempre di più in una posizione marginale sia per la movimentazione dei passeggeri che per il trasporto merci, a causa del fortissimo sviluppo del trasporto stradale.

Inizialmente le linee TAV avrebbero dovuto migliorare e potenziare esclusivamente l'offerta del trasporto passeggeri, puntando sulla velocità e la modernità dei nuovi ETR. Fortunatamente, ragioni di tipo economico quali l'alto costo di progettazione e di esercizio, convertirono presto l'idea di alta velocità in idea di "alta capacità". Attualmente i progetti sono finalizzati alla costruzione di una nuova linea ferroviaria veloce che avrà il ruolo di quadruplicare la linea esistente. 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.

4.2.1 Gli stati di avanzamento

Roma – Napoli

La linea si sviluppa per 204.6 km attraversando il territorio di 61 comuni. E' collegata alla rete esistente attraverso 3 interconnessioni (in totale 21 km) a Frosinone nord, Cassino sud e Caserta nord. I lavori, sono iniziati nel '94 e attualmente hanno raggiunto un avanzamento complessivo di circa l'90%, pari circa a 3,100 milioni di Euro. Nei cantieri al lavoro operano circa 825 lavoratori. Dal km 12 al km 196 sono state completate le opere civili e la posa dei binari. Sugli ultimi 20 km saranno realizzate le opere finalizzate all'integrazione della linea veloce con il sistema dei trasporti campano.

Firenze – Bologna

La linea si sviluppa per 78.5 Km - di cui 73.3 in galleria - e attraversa il territorio di 12 comuni. I lavori, affidati al General Contractor [FIAT/CAVET](#), sono iniziati nel giugno 1996. La realizzazione del tratto terminale verso Firenze, approvato nel luglio '98, è iniziata invece nel giugno del 1999. Attualmente l'avanzamento complessivo dei lavori ha raggiunto il 71%, pari a 2,306 milioni di euro. Lo scavo delle gallerie di linea è all'87% corrispondente a oltre 61 km di scavo. Nei 22 cantieri aperti lavorano circa 2,380 persone. Sono state aggiudicate 8 gare d'appalto per le opere civili per un totale di circa 251 milioni di euro.

Milano – Bologna

La linea si sviluppa per 182 km attraversando il territorio di 42 comuni. E' collegata alla rete esistente attraverso 8 interconnessioni (una a Melegnano, due a Piacenza, una a Fidenza, una a Parma, due a Modena, una a Lavino). Nel febbraio 2000 si è definitivamente concluso l'iter di approvazione del progetto. Dall'inizio del 2001 sono aperti i primi cantieri per le opere. L'avanzamento complessivo dei lavori è del 33%, pari a 1.617 milioni di euro e gli occupati sono circa 3,620 su 4,500 previsti a pieno regime.

I nodi

Bologna

Il tratto di penetrazione urbana della nuova linea misura 17.7 km, di cui oltre la metà in galleria. All'interno del nodo sono previste due interconnessioni: una con la linea Padova-Venezia e una con la linea per Verona. In totale l'avanzamento economico dei lavori è pari a 200 milioni di euro, sono al lavoro 425 persone.

Firenze

Il tratto urbano della nuova linea si sviluppa per 9 km (di cui 7 km in sotterranea) fino alla stazione di Campo di Marte e sarà accessibile dalla nuova stazione, anch'essa sotterranea, che sorgerà in zona Belfiore.

In totale l'avanzamento economico del progetto TAV è pari a 90 milioni di Euro e sono al lavoro 110 persone.

Roma

Il tracciato di penetrazione urbana della nuova linea veloce, lungo circa 10 Km, utilizza il corridoio infrastrutturale costituito dalla attuale linea Roma-Sulmona che, con tracciato parallelo all'autostrada A24, entra in città da est, dal Grande Raccordo Anulare (GRA) fino a Roma Termini o fino a Roma Tiburtina per i treni passanti Nord Sud. In totale l'avanzamento economico del progetto TAV è pari a 180 milioni di euro e gli occupati sono circa 380.

Napoli

Il nuovo tratto di penetrazione urbana ha inizio nel comune di Casoria ed ha una lunghezza complessiva di 6.2 km; un ulteriore chilometro di binari - già realizzato - permetterà l'ingresso nella stazione di Napoli Centrale. In totale l'avanzamento economico delle attività connesse alla realizzazione delle opere TAV è pari a 90 milioni di euro e sono al lavoro circa 270 persone.

4.2.2 L'approccio metodologico

La metodologia usata per l'analisi del trasporto ferroviario la stessa utilizzata per l'analisi dell'Autosole:

- d) a fianco del Bilancio di Massa locale, è stata utilizzato il “ Material Flow accounting”;
- e) l'analisi exergetica estesa a tutti i componenti del sistema (infrastrutture, mezzi e consumo diretto di energia);
- f) il bilancio delle emissioni utilizzando la versione aggiornata del metodo “Corinair”.

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. La maggior parte dei dati riguardanti la costruzione dei segmenti ferroviari sono stati forniti direttamente da TAV SpA, tuttavia a causa della frammentazione delle responsabilità esecutive tali dati vanno considerati soltanto a titolo di stima.

Il problema nel reperimento dei dati è stato cruciale per il lavoro di ricerca sia per quanto concerne i tempi di attesa, sia per il lavoro di verifica e validazione che i dati hanno richiesto. Questi problemi derivano dalla gestione delle gare d'appalto e dei

cantieri tramite il General Contractor che a sua volta ha la facoltà di delegare a terzi l'esecuzione materiale dei lavori; tutto questo comporta l'impossibilità di fatto per TAV SpA di monitorare costantemente i flussi di materiali, forza lavoro e costi reali della cantierizzazione (non sono stati rari episodi giudiziari legati agli appalti, allo smaltimento incontrollato dei rifiuti ed alla sicurezza sui cantieri).

Tuttora, i dati riguardanti la quantità di energia, di gasolio e di mezzi utilizzati nei cantieri non sono stati forniti né da TAV, né da nessuna altra ditta; il problema è stato superato attraverso le interviste fatte ad ingegneri e grazie alla consultazione di altre ditte operanti nella costruzione di infrastrutture pesanti.

L'impossibilità di ottenere le sezioni dei progetti di ogni segmento ha portato inevitabilmente ad assumere dimensioni medie (in qualche maniera standardizzate) per rilevati, gallerie e trincee. Per quanto riguarda i viadotti sono stati stimati esclusivamente i materiali relativi alla parte superiore degli stessi, trascurando quindi il conteggio delle strutture di supporto (piloni di cemento armato, architravi etc.). Tuttavia, essendo la lunghezza dei viadotti pari al solo 10% dell'intera linea, si ritiene che questa approssimazione non infici in maniera rilevante i risultati finali.

I dati riguardanti la dimensione dei veicoli, gli addetti alla guida e ai sistemi di sicurezza, nonché i consumi elettrici di esercizio sono stati forniti direttamente da TAV SpA. (TAV 2002) Per le infrastrutture è stata assunta una vita media di 50 anni, mentre per i treni la vita media è di 15 milioni di km; l'allocazione della massa viene quindi calcolata in funzione dei km percorsi annualmente (vedere Appendice "Tab. Note di Calcolo TAV Mi-Na", su CD-ROM).

Essendo una linea ancora in fase di costruzione, non esistono evidentemente dati reali sul traffico passeggeri e merci. TAV dispone però di un piano di esercizio che consiste nella pianificazione dell'offerta giornaliera di posti chilometro viaggiatori/giorno e di tonnellate chilometro merci/giorno.

Si è deciso pertanto 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) e b) una stima più pessimista 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. Come al solito il confronto tra le unità

passaggeri e le unità merci viene fatto assumendo un peso medio di 65 kg per persona. 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 1.09E10 p-km/anno e 1.52E10 p-km/anno, mentre per il trasporto merci si ipotizza un range tra 3.84E9 e 5.48E9 t-km/anno.

4.2.3 Il bilancio di massa della TAV Mi-Na

In tabella 15 viene riportato il bilancio di massa “locale” della linea Mi-Na. I flussi in output si riferiscono alla quantità di materiali erosi, provenienti dalla degradazione delle linee e dei treni, e alle emissioni emesse durante la fase di costruzione. Le quantità di gas serra associate al consumo di energia elettrica dei treni sono invece riportate nella Tabella 17 (Emissioni locali e globali); nel bilancio di massa locale infatti, l’elettricità non ha una massa equivalente associata e il calcolo delle emissioni avrebbe portato ad un bilancio stechiometrico input-output sballato.

I risultati degli indicatori intensivi di massa espressi in kg/unità variano tra 0.08 e 0.12 kg/p-km per i passeggeri, e tra 1.25 e 1.78 kg/t-km per le merci.

Il trasporto passeggeri richiede quindi meno materia rispetto al trasporto ferroviario di Brescia e Siena (rispettivamente 0.14 e 0.12 kg/p-km), mentre il trasporto merci risulta migliore rispetto al caso di Brescia (2.10 kg/t-km) ma sensibilmente peggiore rispetto a Siena (con soli 0.95 kg/t-km). La motivazione va ricercata nelle esigue dimensioni delle infrastrutture ferroviarie nel senese.

Tabella 15. Bilancio di massa della linea TAV Milano-Napoli.

INPUT	
	(t/anno)
FASE DI COSTRUZIONE	
1	SUOLO MOSSO 1.96E+06
2	MATERIALE DA CAVA 5.27E+06
3	ACCIAIO ROTAIE 1.85E+04
4	ACCIAIO ARMATURE 5.00E+04
3	ACCIAIO LINEE AEREE 1.25E+03
5	RAME LINEE AEREE 3.86E+02
6	CEMENTO ARMATO 5.53E+04
7	CALCESTRUZZO 7.34E+05
8	DIESEL 1.66E+03
9	ACCIAIO MEZZI COSTRUZIONE 2.65E+00
10	O ₂ 5.65E+03
11	N ₂ 2.47E+01
FASE DI MANUTENZIONE	
12	ACCIAIO LOCOMOTIVE MANOVRA 3.67E+01
FASE DI UTILIZZO TRASPORTO PASSEGGERI	
13	ACCIAIO LOCOMOTIVE 1.74E+03
FASE DI UTILIZZO TRASPORTO MERCI	
14	ACCIAIO LOCOMOTIVE 4.39E+02
TOTALE	8.10E+06
OUTPUT	
EMISSIONI PER COSTRUZIONE	
15	MATERIALE EROSO 8.09E+06
16	NOX 8.08E+01
17	VOC 1.17E+01
18	CO 2.62E+01
19	PARTICOLATO 9.49E+00
20	H ₂ O 2.10E+03
21	CO ₂ 5.10E+03
TOTALE	8.10E+06
OUTPUT/INPUT RATIO	1.00
<i>IPOTESI DI MASSIMO UTILIZZO</i>	
MASSA UTILIZZATA PER P-KM (KG/P-KM)	0.08
MASSA UTILIZZATA PER T-KM (KG/T-KM)	1.25
<i>SITUAZIONE ATTUALE</i>	
MASSA UTILIZZATA PER P-KM (KG/P-KM)	0.12
MASSA UTILIZZATA PER T-KM (KG/T-KM)	1.78

4.2.4 Il bilancio delle emissioni locali e globali

Come già detto, il trasporto elettrico provoca delle emissioni associate che dipendono dalla modalità di produzione dell'energia elettrica che consuma. Pertanto le emissioni direttamente imputabili al trasporto ferroviario sono rappresentate dalla somma delle emissioni delle centrali elettriche, più la somma delle emissioni prodotte localmente durante le varie fasi. Se la scala d'indagine viene invece estesa alla produzione di tutti i materiali utilizzati nella fase di costruzione ed esercizio della linea ferroviaria, si ottiene una stima di tutto il carico di inquinanti aeriformi correlato al sistema.

Tabella 16.a: Principali inquinanti gassosi su scala locale e globale per il tratto della linea TAV Milano-Napoli (Ipotesi di massimo utilizzo).

		CO ₂	CO	NOx	Particolato	VOC	SOx
PASSEGGERI							
LOCALE	kg/p-km	3.70E-02	2.63E-07	5.53E-05	1.64E-05	1.18E-07	5.09E-04
INCREMENTO	kg/p-km	1.12E-02	9.81E-06	3.34E-05	1.64E-04	6.75E-07	5.45E-05
TOTALE	kg/p-km	4.82E-02	1.01E-05	8.87E-05	1.81E-04	7.92E-07	5.64E-04
GLOBAL/LOCAL	%	30.24%	3733.13%	60.41%	1000.40%	573.22%	10.69%
MERCI							
LOCALE	Kg/t-km	2.17E-02	4.04E-06	4.33E-05	1.07E-05	1.81E-06	2.89E-04
INCREMENTO	Kg/t-km	1.67E-01	1.41E-04	4.92E-04	2.53E-03	9.97E-06	7.60E-04
TOTALE	Kg/t-km	1.89E-01	1.45E-04	5.36E-04	2.54E-03	1.18E-05	1.05E-03
GLOBAL/LOCAL	%	769.93%	3482.78%	1137.84%	23606.06%	550.67%	262.59%

Tabella 16.b: Principali inquinanti gassosi su scala locale e globale per il tratto della linea TAV Milano-Napoli (Situazione attuale)

		CO ₂	CO	NOx	Particolato	VOC	SOx
PASSEGGERI							
LOCALE	kg/p-km	5.19E-02	3.74E-07	7.74E-05	2.30E-05	1.68E-07	7.13E-04
INCREMENTO	kg/p-km	1.59E-02	1.39E-05	4.75E-05	2.34E-04	9.60E-07	7.74E-05
TOTALE	kg/p-km	6.78E-02	1.43E-05	1.25E-04	2.57E-04	1.13E-06	7.90E-04
GLOBAL/LOCAL	%	30.74%	3728.68%	61.39%	1017.52%	572.82%	10.86%
MERCI							
LOCALE	kg/t-km	3.10E-02	5.76E-06	6.18E-05	1.53E-05	2.58E-06	4.13E-04
INCREMENTO	kg/t-km	2.38E-01	2.00E-04	7.01E-04	3.60E-03	1.42E-05	1.08E-03
TOTALE	kg/t-km	2.69E-01	2.06E-04	7.63E-04	3.61E-03	1.68E-05	1.49E-03
GLOBAL/LOCAL	%	767.54%	3482.81%	1135.33%	23542.58%	550.67%	261.78%

Le due tabelle 16.a e 16.b mostrano i valori delle emissioni locali e globali per unità trasportate nelle due ipotesi di esercizio. Ovviamente, come già visto nel bilancio di massa, all'ipotesi di massimo utilizzo corrispondono i valori più bassi di emissioni. Quello che invece è interessante notare, è che non tutti gli inquinanti gassosi subiscono lo stesso incremento nel passaggio da una scala all'altra e, inoltre, l'incremento osservato per il trasporto passeggeri è differente da quello osservato per il trasporto merci. Le differenze fra trasporto passeggeri e trasporto merci sono causate dalla diversa allocazione dei materiali e dell'energia delle infrastrutture assegnate per l'85% al trasporto merci e per il 15% al trasporto passeggeri: per conseguenza l'allargamento della scala influisce in misura maggiore sulle merci.

Le differenze tra le specie emesse sono invece dipendenti dal loro differente ruolo nei processi: la CO₂ e la SO_x subiscono gli incrementi minori in funzione della scala globale, perché esse vengono emesse in quantità considerevoli nella fase di utilizzo dei treni, e quindi la loro emissione associata al ciclo produttivo (fondamentalmente di acciaio e cemento) ha nel complesso un peso minore rispetto a quanto accade per il Particolato o PM₁₀ e la CO; queste ultime specie infatti vengono emesse in maniera preponderante nella fase di produzione dell'acciaio (CO 6.05kg/t, EPA 1998) e del cemento (PM 10 14.07kg/t, EPA 1998).

In termini assoluti la CO₂ per unità trasportata varia da 37-52 g/p-km (locale) a 48-68 g/p-km (globale), mentre per le merci si stima un range di 22-31 g/t-km sulla scala locale, e di 190-270 g/t-km sulla scala globale.

4.2.5 L'analisi energetica locale

L'analisi energetica locale è mostrata nella tabella 17. Il range di consumo energetico per il trasporto passeggeri va da 0.27 a 0.38 MJ/p-km, che sono valori più bassi di quelli calcolati per Siena (0.61 MJ/p-km) e per Brescia (0.52 MJ/p-km). Lo stesso range per il trasporto merci va invece da 0.17 a 0.24 MJ/p-km che indica un'efficienza più alta rispetto a Siena (0.30 MJ/p-km) ma peggiore rispetto ai treni elettrici di Brescia (0.14 MJ/p-km). Questa analisi preliminare è già sufficiente per affermare che il trasporto merci sulla TAV Mi-Na non è stato ben pianificato.

4.2.6 L'analisi energetica globale

In tabella 19 vengono riportati i risultati dell'analisi energetica globale. Gli effetti dell'allargamento della scala anche in questo caso sono notevoli; è facile notare che la quantità di energia annuale immagazzinata nell'acciaio delle linee ferroviarie (rotaie ed armature) è addirittura superiore al consumo di energia elettrica della movimentazione dei treni merci, ed un valore altrettanto alto è rappresentato anche dal costo energetico del cemento delle traversine di sostegno. Tutto questo si traduce in un aumento del valore del consumo energetico per unità trasportata pari al 375% per i passeggeri e del 1270% per le merci.

Tabella 17. Bilancio energetico locale per il tratto della linea TAV Milano-Napoli

FASI		MJ/anno
COSTRUZIONE		
1	DIESEL (T/ANNO)	8.87E+07
MANUTENZIONE		
2	ENERGIA ELETTRICA	2.10E+07
UTILIZZO TRASPORTO PASSEGGERI		
3	ENERGIA ELETTRICA (MJ/ANNO)	4.15E+09
UTILIZZO TRASPORTO MERCI		
4	ENERGIA ELETTRICA (MJ/ANNO)	8.44E+08
TOTALE		5.10E+09
INDICATORI INTENSIVI		
<i>UTILIZZO ATTUALE</i>		
5	MJ/P-KM	0.38
6	MJ/T-KM	0.24
<i>MASSIMO UTILIZZO</i>		
7	MJ/P-KM	0.27
8	MJ/T-KM	0.17

La differenza del peso della scala più grande è sempre da attribuire alla maggiore quantità di risorse allocate al trasporto merci.

Il paragone con gli altri sistemi analizzati è in parte sconcertante: il consumo di energia globale a Siena è 0.73 MJ/p-km e di 0.42 MJ/t-km, mentre a Brescia è di 1.76 MJ/p-km e 0.67 MJ/t-km. In definitiva anche in questo caso la TAV offre un servizio passeggeri migliore delle linee bresciane, ma non può confrontarsi con le prestazioni delle ferrovie senesi: i treni TAV sono troppo potenti e richiedono un costo energetico di infrastrutturazione troppo alto in relazione al loro utilizzo.

Federici XVI

Tabella 18. Bilancio energetico Globale per il tratto della linea TAV Milano-Napoli

	Unit	Quantità	Tep/Unit	MJ/anno	
FASE DI COSTRUZIONE DELLA RETE STRADALE					
1	MATERIALE DA CAVA	kg	5.27E+09	2.39E-07	5.27E+07
1	CEMENTO	kg	7.34E+08	1.10E-04	3.38E+09
2	CEMENTO ARMATO	kg	5.53E+07	6.50E-04	1.50E+09
3	GASOLIO (PER COSTRUZIONE)	kg	1.66E+06	1.28E-03	8.87E+07
4	ACCIAIO DEI MACCHINARI	kg	2.65E+03	1.91E-03	2.12E+05
5	ACCIAIO ROTAIE	kg	1.85E+07	1.91E-03	1.48E+09
6	ACCIAIO LINEE AEREE	kg	1.25E+06	1.91E-03	1.00E+08
7	ACCIAIO ARMATURE	kg	5.00E+07	1.91E-03	4.00E+09
8	RAME LINEE AEREE	kg	3.86E+05		0.00E+00
FASE DI MANUTENZIONE					
9	ENERGIA ELETTRICA PER MANUTENZIONE	kWh	5.84E+06	2.87E-04	7.01E+07
10	ACCIAIO DEI MACCHINARI (PER MANUTENZIONE)	kg	3.67E+04	1.91E-03	2.93E+06
UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO PASSEGGERI					
11	ACCIAIO DEI VEICOLI	kg	1.74E+06	1.91E-03	1.39E+08
12	ENERGIA ELETTRICA	kWh	1.15E+09	2.87E-04	1.38E+10
UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO MERCI					
13	ACCIAIO DEI VEICOLI	kg	4.39E+05	1.91E-03	3.51E+07
14	ENERGIA ELETTRICA	kWh	2.34E+08	2.87E-04	2.81E+09
TOTALE					2.75E+10
INDICATORI INTENSIVI					
<i>SITUAZIONE ATTUALE</i>					
15	MJ/P-KM		1.44		
16	MJ/T-KM		3.09		
<i>MASSIMO UTILIZZO</i>					
17	MJ/P-KM		1.02		
18	MJ/T-KM		2.17		
GLOBAL/LOCAL RATIO					
19	PASSEGGERI		3.75		
20	MERCI		12.7		

4.2.7 L'EMIPS

Come per l'autostrada Mi-Na anche in questo caso la valutazione del costo exergetico del trasporto ha tenuto conto anche delle infrastrutture e dei veicoli:

Tabella 19. Bilancio exergetico per il tratto della linea TAV Milano-Napoli

FLUSSI	QUANTITÀ	UNIT	EXERGIA SPECIFICA MJ/unit	REF	EXERGIA MJ/anno
FASE DI COSTRUZIONE DELLA RETE STRADALE					
1	MATERIALE DA CAVA	5.27E+09	kg	0.31	[h] 1.63E+09
1	CEMENTO	7.34E+08	kg	0.635	[h] 4.66E+08
2	CEMENTO ARMATO	5.53E+07	kg	1.928	[a] 1.07E+08
3	GASOLIO (PER COSTRUZIONE)	1.66E+06	kg	44.4	[a] 7.35E+07
4	ACCIAIO DEI MACCHINARI	2.65E+03	kg	7.1	[c] 1.88E+04
5	ACCIAIO ROTAIE	1.85E+07	kg	7.1	[c] 1.32E+08
6	ACCIAIO LINEE AEREE	1.25E+06	kg	7.1	[c] 8.90E+06
7	ACCIAIO ARMATURE	5.00E+07	kg	7.1	[c] 3.55E+08
8	RAME LINEE AEREE	3.86E+05	kg	2.11	[d] 8.15E+05
FASE DI MANUTENZIONE					
ENERGIA ELETTRICA PER					[b]
9	MANUTENZIONE	5.84E+06	kWh	3.6	2.10E+07
ACCIAIO DEI MACCHINARI (PER					[c]
10	MANUTENZIONE)	3.67E+04	kg	7.1	2.60E+05
UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO PASSEGGERI					
11	ACCIAIO DEI VEICOLI	1.74E+06	kg	7.1	[c] 1.23E+07
12	ENERGIA ELETTRICA	1.15E+09	kWh	3.6	[b] 4.15E+09
UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO MERCI					
13	ACCIAIO DEI VEICOLI	4.39E+05	kg	7.1	[c] 3.11E+06
14	ENERGIA ELETTRICA	2.34E+08	kWh	3.6	[b] 8.44E+08
TOTALE					7.81E+09
INDICATORI INTENSIVI					
<i>SITUAZIONE ATTUALE</i>					
15	MJ/P-KM				0.42
16	MJ/T-KM				0.83
<i>IPOTESI DI MASSIMO UTILIZZO</i>					
17	MJ/P-KM				0.30
18	MJ/T-KM				0.59

Riferimenti

- [a] Stime basate su dati di letteratura (Shieh and Fan, 1982; Szargut et al., 1988)
 [b] Szargut J., Morris D.R., Steward F.R., 1988 pg. 297-304
 [c] Szargut et al., 1988, p. 188; Wurbs J., et al., Wuppertal Papers Nr. 64, 1996.
 [d] Da calcoli svolti in questo lavoro, basati su Szargut et al., 1988, p 185
 [e] Ayres, 1996
 [h] Szargut et al., 1988

Anche per l'analisi exergetica risulta pesantissimo il ruolo dei materiali utilizzati nelle infrastrutture ed in particolar modo il pietrisco (ballast) dei binari ed il cemento. Nel valore dell'indicatore intensivo il peso delle infrastrutture consiste in un aumento del 10% dell'exergia per passeggero trasportato e del 378% per tonnellata trasportata. Nonostante la diversa scala di analisi, la TAV mostra comunque consumi di exergia per passeggero inferiore al caso di Siena e di Brescia.

4.2.8 L'analisi emergetica

L'analisi emergetica risente delle dimensioni colossali dell'infrastruttura, delle enormi masse dei treni, dei lavori e dei materiali utilizzati per la costruzione delle gallerie, nonché delle ingenti quantità di investimenti necessari.

Appare evidente, dai dati riportati in tabella 20, che il ruolo dell'energia rinnovabile all'interno del sistema ferroviario TAV (come in tutti quelli esaminati) è pressoché nullo. A farla da padrone sono invece le emergie del pietrisco, dell'acciaio dei binari e l'energia elettrica dell'utilizzo.

Ad ogni modo le transformities del trasporto passeggeri ($1.17E11$ - $1.65E11$ seJ/p-km) sono superiori al dato senese ($0.72E11$ seJ/p-km) ed inferiori, seppur non in modo sensibile, al dato bresciano ($1.87E11$ seJ/p-km).

La transformity del trasporto merci è invece addirittura un ordine di grandezza superiore al volare senese.

Tabella 20. Analisi Energetica per il tratto della linea TAV Milano-Napoli

ITEM	UNIT	QUANTITÀ	SOLAR TRANSFORMITY seJ/unit	REF	EMERGIA seJ/anno	
1	ENERGIA SOLARE	J/anno	5.30E+16	1.00E+00	[a]	5.30E+16
2	PIOGGIA, POTENZIALE CHIMICO	J/anno	4.32E+13	1.82E+04	[b]	7.87E+17
3	CALORE GEOTERMICO	J/anno	2.89E+13	6.06E+03	[b]	1.75E+17
FASE DI COSTRUZIONE DELLA RETE FERROVIARIA						
4	MATERIALE DA CAVA	kg	5.27E+09	5.00E+11	[c]	2.64E+21
5	SUOLO SCAVATO	J	4.42E+16	7.40E+04	[c]	3.27E+21
6	CEMENTO	kg	7.34E+08	1.03E+09	[c]	7.56E+17
7	CEMENTO ARMATO	kg	5.53E+07	1.11E+09	[f]	6.14E+16
8	GASOLIO (PER COSTRUZIONE)	J	8.87E+13	6.60E+04	[c]	5.85E+18
9	ACCIAIO DEI MACCHINARI	kg	2.65E+03	6.70E+12	[c]	1.78E+16
10	ACCIAIO ROTAIE	kg	1.85E+07	6.70E+12	[c]	1.24E+20
11	ACCIAIO LINEE AEREE	kg	1.25E+06	6.70E+12	[c]	8.40E+18
12	ACCIAIO ARMATURE	kg	5.00E+07	6.70E+12	[c]	3.35E+20
13	RAME LINEE AEREE	kg	3.86E+05	6.80E+10	[g]	2.62E+16
14	SERVIZI	€	3.68E+08	1.30E+12	[e]	4.78E+20
15	LAVORO	J	5.16E+10	8.10E+04	[e]	4.18E+15
FASE DI MANUTENZIONE						
ENERGIA ELETTRICA PER						
16	MANUTENZIONE	J	2.10E+13	1.50E+05	[d]	3.15E+18
ACCIAIO DEI MACCHINARI (PER						
17	MANUTENZIONE)	kg	3.67E+04	6.70E+12	[c]	2.46E+17
18	SERVIZI	€	3.81E+06	1.30E+12	[e]	4.95E+18
19	LAVORO	J	8.30E+10	8.10E+04	[e]	6.72E+15
UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO PASSEGGERI						
20	ACCIAIO DEI VEICOLI	kg	1.74E+06	6.70E+12	[c]	1.16E+19
21	ENERGIA ELETTRICA	J	4.15E+15	1.50E+05	[d]	6.23E+20
22	SERVIZI	€	7.35E+07	1.30E+12	[e]	9.55E+19
23	LAVORO	J/anno	5.77E+12	8.10E+04	[e]	4.68E+17
UTILIZZO ANNUALE TRASPORTO MERCI						
24	ACCIAIO DEI VEICOLI	kg	4.39E+05	6.70E+12	[c]	2.94E+18
25	ENERGIA ELETTRICA	J	8.44E+14	1.50E+05	[d]	1.27E+20
26	SERVIZI	€	2.85E+06	1.30E+12	[e]	3.71E+18
27	LAVORO	J/anno	4.78E+12	8.10E+04	[e]	3.87E+17
TOTALE						
7.73E+21						
<i>IPOTESI DI MASSIMO UTILIZZO</i>						
28	SEJ/P-KM		1.17E+11			
29	SEJ/T-KM		1.09E+12			
<i>IPOTESI DI UTILIZZO ATTUALE</i>						
30	SEJ/P-KM		1.65E+11			
31	SEJ/T-KM		1.55E+12			

References per le transformities:

[a] per definizione [b] Odum H.T., 1996. [c] Brown M.T. e Arding J.,1991.[d] Ulgiati, 1996 (Report per ENEA) [e] Ulgiati-Russi, 1999, manoscritto non pubblicato. [f] Da calcoli fatti in questo lavoro. [g] Brown et al 1992.

4.3 LA LINEA FERROVIARIA MILANO-NAPOLI

L'attuale linea ferroviaria sorge sostanzialmente sullo stesso tracciato della futura TAV: ha una lunghezza di 778 km ma, a differenza della linea ad alta velocità, la lunghezza delle tratte in galleria è di soli 141.7 km (circa 70 in meno della futura TAV); lievemente inferiore è anche la lunghezza dei viadotti e del tracciato in rilevato. Queste differenze derivano dalla necessità della TAV di diminuire al massimo le pendenze e le irregolarità orografiche del tracciato per consentire di mantenere la più alta velocità possibile; questa esigenza non è invece così esasperata per i normali treni Intercity o Espresso. La minore lunghezza delle gallerie e dei viadotti si traduce inoltre in una minore quantità di materiali ed energia richiesti nella fase di costruzione e manutenzione (si ricorda che per ogni chilometro di galleria ferroviaria vengono utilizzati 12400 t di acciaio).

Altre differenze sostanziali rispetto alla TAV sono:

- 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).

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

4.3.1 Risultati dell'Analisi Multicriteriale.

In tabella 21 si riportano i risultati dell'applicazione della metodologia di analisi alla Linea Ferroviaria Mi-Na.

Anche in questo caso è evidente il "salto" esistente tra le analisi svolte su scala locale e quelle svolte su scala globale.

In Tabella 22 si riportano invece i risultati della stima delle emissioni su scala locale e globale del tratto ferroviario.

Tabella 21. Riepilogo risultati Linea ferroviaria Mi-Na

	Unit	Bilancio di Massa (kg/unit)	MFA (globale) (kg/unit)	Analisi Energetica (locale) (MJ/unit)	Analisi Energetica (globale) (MJ/unit)	Analisi Energetica (globale) (MJ/unit)	Analisi Energetica (globale) (10 ¹¹ seJ/unit)
Trasporto Passeggeri							
Utilizzo attuale	(p-km)	0.11	0.85	0.20	0.77	0.23	1.26
Utilizzo massimo	(p-km)	0.08	0.69	0.16	0.62	0.19	0.94
Trasporto Merci							
Utilizzo attuale	(t-km)	1.65	7.65	0.24	2.50	0.76	14.3
Utilizzo massimo	(t-km)	1.2	5.35	0.17	1.79	0.55	10.3

Tabella. 22. Principali inquinanti gassosi su scala locale e globale per il tratto ferroviario MI-NA

Ipotesi di massimo utilizzo							
		CO2	CO	NOX	Particolato	VOC	SOx
Passeggeri							
Locale	kg/p-km	2.17E-02	2.63E-07	3.27E-05	9.67E-06	1.18E-07	2.99E-04
Incremento	kg/p-km	8.57E-03	7.30E-06	2.52E-05	1.36E-04	5.05E-07	4.04E-05
Totale	kg/p-km	3.03E-02	7.56E-06	5.79E-05	1.46E-04	6.22E-07	3.39E-04
Global/Local	%	39%	2780%	77%	1409%	429%	13%
Merci							
Locale	kg/p-km	2.17E-02	4.04E-06	4.33E-05	1.07E-05	1.81E-06	2.89E-04
Incremento	kg/p-km	1.28E-01	1.05E-04	3.72E-04	2.10E-03	7.48E-06	5.66E-04
Totale	kg/p-km	1.50E-01	1.09E-04	4.16E-04	2.11E-03	9.29E-06	8.55E-04
Global/Local	%	591%	2605%	860%	19573%	413%	196%
Situazione attuale							
		CO2	CO	NOX	Particolato	VOC	SOx
Passeggeri							
Locale	kg/p-km	2.66E-02	3.63E-07	4.02E-05	1.19E-05	1.63E-07	3.66E-04
Incremento	kg/p-km	1.18E-02	1.00E-05	3.46E-05	1.88E-04	6.94E-07	5.52E-05
Totale	kg/p-km	3.84E-02	1.04E-05	7.49E-05	2.00E-04	8.57E-07	4.21E-04
Global/Local	%	44%	2759%	86%	1588%	427%	15%
Merci							
Locale	kg/p-km	3.10E-02	5.58E-06	6.12E-05	1.52E-05	2.50E-06	4.13E-04
Incremento	kg/p-km	1.77E-01	1.45E-04	5.15E-04	2.90E-03	1.03E-05	7.83E-04
Totale	kg/p-km	2.08E-01	1.51E-04	5.76E-04	2.91E-03	1.28E-05	1.20E-03
Global/Local	%	572%	2605%	840%	19022%	413%	189%

4.4 CONFRONTO TRA I SISTEMI FERROVIARI FIN QUI ANALIZZATI

In tabella 23 si riportano i risultati ottenuti dalle analisi svolte. Il confronto delle performance della TAV e della Linea Mi-Na con quelle dei sistemi di Brescia e Siena è servito a stabilire quanto bene è stata pianificata la costruzione e il funzionamento della mega infrastruttura. I dati non sono confortanti: la TAV mostra prestazioni sensibilmente migliori per il trasporto passeggeri rispetto alle ferrovie di Siena e Brescia, anche se il valore di transformity più bassa è mostrato dalla ferrovia senese, per il trasporto merci non sembra apportare variazioni positive rispetto al treno elettrico classico di Brescia, mentre è decisamente peggiore del piccolo sistema senese.

Tabella 23. Confronto sistemi ferroviari Siena, Brescia, Ferrovia Mi-Na e TAV.

	Unit	MFA	Analisi Energetica	Analisi Energetica	Analisi Exergetica	Analisi Emergetica
		(kg/unit)	(MJ/unit)	(MJ/unit)	(MJ/unit)	(10 ¹¹ seJ/unit)
Trasporto Passeggeri						
TAV Mi-Na (*)	(p-km)	0.08-0.12	0.27-0.38	1.02-1.44	0.30-0.42	1.17-1.65
Linea Mi-Na (*)	(p-km)	0.08-0.11	0.16-0.20	0.62-0.77	0.19-0.23	0.94-1.26
Brescia (elettrica)	(p-km)	0.14	0.52	1.76	0.47	1.87
Siena (diesel)	(p-km)	0.12	0.61	0.73	0.58	0.74
Trasporto Merci						
TAV Mi-Na (*)	(t-km)	1.25-1.78	0.17-0.24	2.17-3.09	0.59-0.83	10.9-15.5
Linea Mi-Na (*)	(t-km)	1.2-1.65	0.17-0.24	1.79-2.50	0.55-0.76	10.3-14.3
Brescia (elettrica)	(t-km)	2.10	0.14	0.67	0.13	13.34
Siena (diesel)	(t-km)	0.95	0.30	0.42	0.28	4.17

(*) L'intervallo dei dati corrisponde alle ipotesi di massimo utilizzo delle infrastrutture e all'ipotesi di utilizzo attuale.

I risultati peggiori riguardano le analisi che tengono maggior conto delle risorse energetiche e materiali utilizzate dal sistema. Nel complesso la TAV, anche nell'ipotesi di massimo utilizzo, risulta sovradimensionata nella dotazione strutturale e nella potenza specifica dei mezzi.

4.5 CONFRONTO DEI RISULTATI SULL'ASSE MILANO-NAPOLI

Finora i risultati ottenuti dalle analisi svolte sull'asse Mi-Na sono stati utilizzati per costruire un confronto intra-modale tra sistemi dislocati su territori differenti e con

destinazione d'uso diversi. Questo confronto è stato utile per verificare in che modo ed in che misura le diverse dimensioni (territoriali ed infrastrutturali) ed il diverso uso dei sistemi ne influenzino le performance.

Tuttavia è la diversa destinazione d'uso tra sistemi di trasporto locali e sistemi a lunga percorrenza che richiede un diverso design delle infrastrutture: è chiaro che un treno che deve percorrere lunghe distanze ad alta velocità richieda potenze e tracciati con caratteristiche differenti da un treno che deve svolgere un servizio locale.

Confrontiamo allora le caratteristiche di tre sistemi nati per lo stesso fine, ovvero il trasporto veloce per le lunghe percorrenze, con la scopo di poter stabilire su quale tipologia sia preferibile investire strategicamente per ottenere nel futuro un sistema dei trasporti a minore impatto.

4.5.1 Il confronto tra Autostrada e Treno.

Di seguito si riportano i risultati delle analisi svolte finora riguardanti la Ferrovia Mi-Na, la TAV e l'Autosole raggruppati per tipologia di trasporto.

Tabella 24. Trasporto passeggeri sull'Asse Mi-Na

	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 ¹¹ seJ/p-km)
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'intervallo dei dati corrisponde alle ipotesi di massimo utilizzo delle infrastrutture e all'ipotesi di utilizzo attuale.

Per il calcolo delle performance degli Autobus si è assunto che il volume di traffico passeggeri trasportato in pullman sia uguale al 10% del totale traffico passeggeri autostradale; questa assunzione è stata necessaria perché i dati forniti da Autostrade S.p.A. sono raggruppati in funzione della dimensione dei veicoli e non della destinazione d'uso; in altre parole Autobus e Camion superiori a 3.5 t sono accorpati

insieme. Non è stato possibile neanche rivolgersi alle aziende di trasporto a causa della alta frammentazione dei servizi lungo tutta l'autostrada. Ad ogni modo il dato assunto è con ogni probabilità una sovrastima del dato reale. L'introduzione di questo dato è stato però necessario per consentire un confronto tra la modalità di trasporto collettiva su strada e su ferro; va aggiunto che l'introduzione di un 10% di traffico passeggeri in più non ha influenzato in modo sensibile l'allocazione delle risorse materiali ed energetiche dell'infrastruttura stradale. Trasformando le p-km in t-km equivalenti, il peso in percentuale del trasporto collettivo è inferiore allo 0.38%: i valori degli indicatori del trasporto collettivo sono influenzati quindi esclusivamente dalle caratteristiche dei veicoli (consumi specifici e dimensioni).

I risultati mostrano in modo inequivocabile che il migliore modo di trasportare le persone è l'autobus, confermando un dato che era già stato osservato nei sistemi locali di Brescia e Siena.

Il trasporto ferroviario mostra invece vantaggi rispetto al trasporto in auto per tutti gli indicatori usati, fatto salva per il MFA su scala globale. Rispetto al trasporto su autobus invece, risulta vantaggioso nelle analisi locali (energia, exergia e massa) ma risulta peggiore per tutte le analisi di scala globale. Quello che invece è sorprendente è che la TAV, fatto salvo per l'uso diretto di energia ed exergia, ha i valori degli indicatori confrontabili con quelli del trasporto individuale.

Ricordiamo che le performance della TAV sono state calcolate in funzione di un range di utilizzo che ovviamente influenza il risultato finale; il bilancio di massa locale infatti, nel caso in cui il tasso di utilizzo dei futuri treni rimanga simile al tasso di utilizzo attuale, mostra un valore del tutto in linea con il consumo di materia del trasporto automobilistico. Questo dato è in qualche modo allarmante e il dato del MFA su scala globale lo conferma; la TAV richiede una quantità di materiali altissima, addirittura il doppio della quantità di materia totale richiesta dal trasporto individuale. Molto più bassi invece i consumi di energia diretti del treno rispetto all'auto; tuttavia questo vantaggio si riduce notevolmente quando vengono inclusi nel calcolo tutti i costi energetici del treno. L'analisi exergetica conferma le indicazioni fornite dall'analisi energetica locale. Il valore della transformity delle p-km trasportate in treno è invece solo di poco inferiore al trasporto al valore del trasporto automobilistico.

Tabella 25. Trasporto merci sull'Asse Mi-Na.

	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 Exergetica Globale (MJ/p-km)	Analisi Emergetica Globale (10 ¹¹ 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

(*) L'intervallo dei dati corrisponde alle ipotesi di massimo utilizzo delle infrastrutture e all'ipotesi di utilizzo attuale.

L'analisi comparativa del trasporto merci è molto più lampante: il trasporto ferroviario mostra valori di alcuni indicatori superiori addirittura di un ordine di grandezza rispetto al trasporto su strada; fanno eccezione soltanto i consumi di energia diretta e di exergia. Anche il confronto delle emissioni calcolate sulla scala globale non sono confortanti: rispetto alle automobili il treno (nell'ipotesi di massimo utilizzo) emette più SO_x, più particolato e una quantità leggermente inferiore di CO₂; risulta nettamente migliore solo per CO, VOC e NO_x.

Tabella 26. Inquinanti gassosi sull'Asse Milano Napoli

PRINCIPALI INQUINANTI GASSOSI SU SCALA GLOBALE PER IL TRATTO MI-NA							
		CO ₂	CO	NO _x	Particolato	VOC	SO _x
PASSEGGERI							
AUTOSTRADA							
(AUTOVETTURE)	kg/p-km	8.94E-02	6.68E-03	1.61E-03	6.94E-05	5.17E-04	2.38E-04
FERROVIA	kg/p-km	3.03E-02	7.56E-06	5.79E-05	1.46E-04	6.22E-07	3.39E-04
TAV	kg/p-km	4.82E-02	1.01E-05	8.87E-05	1.81E-04	7.92E-07	5.64E-04
MERCI							
AUTOSTRADA	kg/p-km	7.21E-02	9.03E-04	6.59E-04	6.41E-04	1.25E-04	2.06E-04
FERROVIA	kg/t-km	1.50E-01	1.09E-04	4.16E-04	2.11E-03	9.29E-06	8.55E-04
TAV	kg/t-km	1.89E-01	1.45E-04	5.36E-04	2.54E-03	1.18E-05	1.05E-03

Il trasporto merci ferroviario è invece peggiore del trasporto stradale per le emissioni di CO₂, Particolato e SO_x; sono confrontabili invece i valori delle altre specie gassose.

Il treno veloce mostra valori sistematicamente peggiori del trasporto ferroviario classico. La causa è da ricercarsi nella eccessiva infrastrutturazione della TAV, e nella eccessiva potenza dei treni. Questo giudizio trova conferma se si confronta il peso delle infrastrutture all'interno del valore degli indicatori intensivi delle varie analisi mostrati in tabella 27. I dati mostrano che per il trasporto merci le infrastrutture pesano, tra le varie analisi, in un range che va dal 76 al 99.9% nella TAV, e dal 1 al 52% per l'Autosole. Per il trasporto passeggeri l'influenza della costruzione è più bassa ma comunque non trascurabile.

Se la costruzione della TAV Mi-Na dovesse essere giudicata solo per mezzo di criteri termodinamici, la valutazione finale sarebbe univoca: puntare sulla TAV significa investire risorse e soldi su una tipologia di trasporto che non offre sostanziali miglioramenti ambientali nel caso del trasporto passeggeri e che addirittura peggiora la situazione per quanto concerne il trasporto merci. Sottolineiamo che se il trasporto merci sulle TAV venisse abbandonato, allora il trasporto passeggeri diverrebbe assolutamente insostenibile, poiché l'allocazione dei materiali e dell'energia delle infrastrutture verrebbe imputata interamente su un volume di traffico, che per quanto ottimistico, porterebbe ad una sotto utilizzazione della linea.

Tabella 27. Peso delle infrastrutture negli indicatori intensivi.

PESO DELLE INFRASTRUTTURE NEGLI INDICATORI INTENSIVI.					
	Massa	MFA	Energia	EMIPS	Energia
PASSEGGERI					
AUTOSTRADA	5.0%	4.0%	0.10%	0.10%	2.0%
FERROVIA	99.9%	47%	13%	15%	72.0%
TAV	99.8%	37%	10%	9%	59.0%
MERCI					
AUTOSTRADA	51%	52%	10%	1%	39%
FERROVIA	99.9%	93%	71%	71%	98%
TAV	99.9%	94%	76%	74%	98%

L'insostenibilità del sistema TAV è confermata dal valore della densità energetica calcolata come rapporto tra l'emergia annuale e la superficie in *ha* del sistema che mostra un valore altissimo di $8.03E+18 \text{ seJ/ha/year}$ pari a 2.77 volte la densità energetica di un centro commerciale (M.T.Brown, M.B.Viras in press), mentre il valore mostrato dal sistema autostradale è di $3.68E+18 \text{ seJ/ha/year}$.

Se questi risultati venissero integrati dagli altri impatti ambientali relativi alla cantierizzazione della TAV (come le falde acquifere deviate, infiltrazioni e contaminazione di terreni e falde sotterranee, impatto paesaggistico, inquinamento acustico etc.), il giudizio finale delle TAV diverrebbe ancora più negativo.

I dati mostrati nelle tabelle 24 e 25 riguardanti il confronto delle varie modalità sono mostrati graficamente nelle figure 7 e 8.

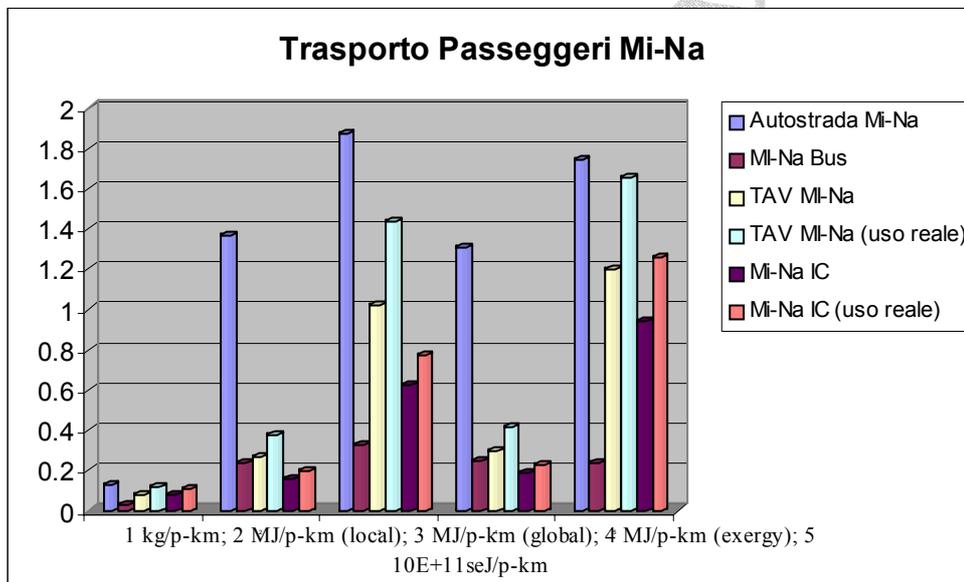


Figura 7. Trasporto Passeggeri sull'Asse Mi-Na.

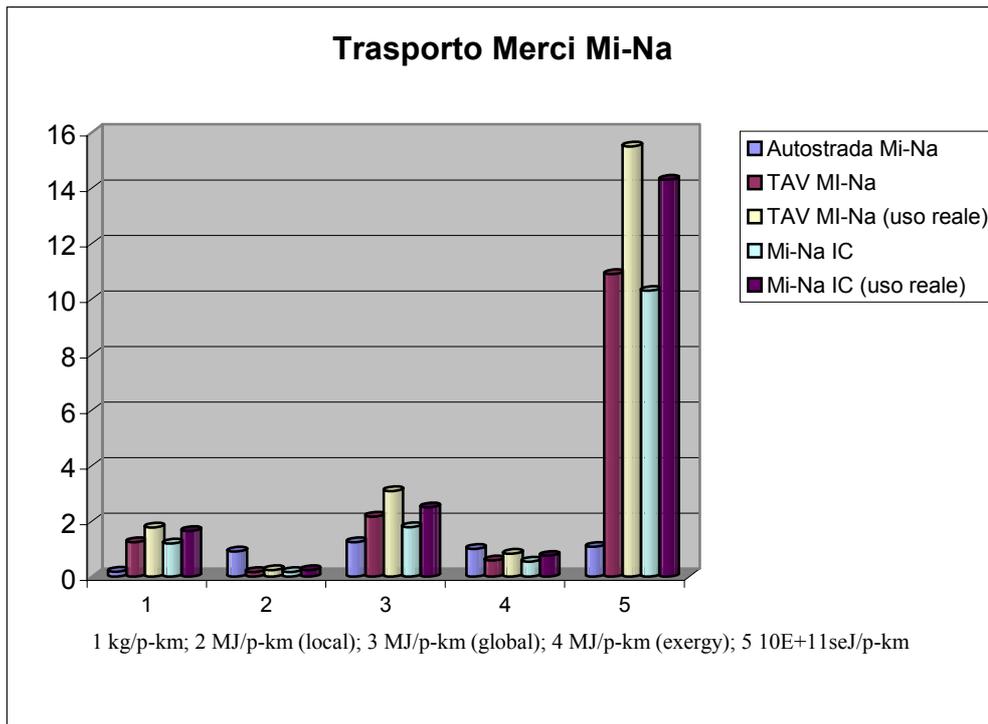


Figura 8. Trasporto Merci sull'Asse Mi-Na.

Federicci

5 L'INTEGRAZIONE DELLE ANALISI DI SECONDO PRINCIPIO: LA PERDITA EMERGETICA E L'AMPLIFICAZIONE EMERGETICA

I dati ottenuti delle analisi Exergetica ed Emergetica mostrano che è impossibile ottenere risultati completamente convergenti dai due approcci, e che inoltre non sempre è possibile migliorare simultaneamente l'efficienza emergetica e l'efficienza exergetica. Per cui di fronte alla necessità di dover prendere delle decisioni la domanda che ci si pone è questa: è da preferire un *risparmio* emergetico od un *risparmio* exergetico?

Non si può rispondere a questa domanda, tuttavia è possibile proporre una integrazione delle due analisi che consenta di semplificare la discussione. L'applicazione simultanea di diversi strumenti di analisi allo stesso sistema (o processo) se da una parte ne consente una visione ed una descrizione più completa, dall'altra rischia di portare ad una "dissipazione" delle informazioni con conseguenti strategie politiche divergenti. L'informazione più importante derivante dall'analisi emergetica in un processo di decisione locale riguarda l'internalizzazione dei costi ambientali sostenuti dalla natura in altri contesti spazio-temporali per supportare il sistema o il processo studiato. L'analisi exergetica fornisce invece informazioni sull'efficienza del sistema considerato e, per mezzo del *rendimento di secondo ordine*, permette di valutare l'entità dei miglioramenti possibili in una finestra d'indagine più circoscritta. Le "esternalità ambientali" causate dal sistema o dal processo vengono contabilizzate all'interno della analisi exergetica in termini di "perdite" o "spreco" di exergia. La valutazione delle perdite di exergia e dello spreco di exergia viene espressa per mezzo del rendimento di II ordine già definito nel paragrafo 2.2.5.

5.1 LA PERDITA EMERGETICA

Un sistema supportato da un dato flusso di energia in input e da un basso valore di ε , in qualche modo sta "sprecando" o "male utilizzando" parte delle risorse materiali ed energetiche che lo supportano. Ricordando che ε è definito come il rapporto tra la minima exergia richiesta per lo scopo e l'exergia realmente utilizzata dal sistema, l'integrazione dell'analisi exergetica di secondo ordine nell'analisi emergetica porta quindi a scorporre il supporto emergetico del sistema-processo in due parti: una

minima energia richiesta per lo scopo (E_M), ed un surplus di consumo energetico “evitabile” o, per analogia al concetto di efficienza exergetica, una perdita di energia causata dalle inefficienze del sistema (E_L).

La frazione di energia “persa” a causa dell’inefficienza può essere calcolata come segue:

$$E_L = E*(1 - \varepsilon)$$

Dove:

E_L (energy loss) rappresenta il consumo di energia “evitabile”;

E è il reale supporto energetico del sistema;

ε è il rendimento di II ordine.

Il supporto energetico totale può allora essere espresso come:

$$E = E_M + E_L = E*\varepsilon + E*(1-\varepsilon)$$

Dove E_M rappresenta la frazione di energia minima necessaria allo scopo.

Nel caso di un processo che funzioni in modo ottimale, ovvero che sia caratterizzato da un rendimento ε pari ad 1, E_L si annulla ed in questo caso il supporto energetico totale E coincide con la minima quantità di energia necessaria E_M ; in questo caso il sistema utilizza la minima energia necessaria.

5.1.1 L’applicazione della Perdita Energetica ai casi studio.

L’applicazione della Perdita Energetica ai casi studio di Brescia e Siena è mostrata in tabella 28. La colonna E_M mostra che se nelle varie modalità di trasporto venissero usati i mezzi più efficienti presenti sul mercato, e se questi venissero utilizzati nel modo più opportuno, le enormi differenze mostrate nella analisi energetica (E) si affievolirebbero notevolmente, riducendo l’intervallo delle energie specifiche “richieste” per p-km da $3.7E+10 - 3.58E+11$ seJ/p-km a $2.4E+10 - 7.88E+10$ seJ/p-km. La colonna E_M mostra inoltre che la modalità di trasporto che richiederebbe la minore quantità di energia è il trasporto collettivo in autobus. Va notato che il treno, anche nel migliore dei casi,

richiederebbe invece una quantità di energia minima superiore a quella richiesta dalla migliore automobile disponibile sul mercato.

La colonna E_L mostra invece che la modalità di trasporto che spreca la più alta quantità di energia è il treno elettrico, seguito a ruota dall'automobile.

Tabella 28. La Perdita Energetica applicata ai sistemi di Brescia e Siena.

	E (seJ/p-km)	ϵ	E_M (seJ/p-km)	E_L (seJ/p-km)
SIENA				
STRADA(AUTO)	1.66E+11	16%	2.66E+10	1.39E+11
STRADA (BUS)	6.00E+10	40%	2.40E+10	3.60E+10
FERROVIA	7.40E+10	60%	4.44E+10	2.96E+10
BRESCIA				
STRADA(AUTO)	2.47E+11	16%	3.95E+10	2.07E+11
STRADA (BUS)	3.70E+10	97%	3.59E+10	1.11E+09
FERROVIA	3.58E+11	22%	7.88E+10	2.79E+11

Rispetto alla quantità totale di energia utilizzata dai sistemi di trasporto passeggeri di Siena e Brescia, le perdite energetiche rappresentano rispettivamente l'82% e l'83% ($4.92E+20$ seJ/p-km e $2.87E+21$ seJ/p-km); ovvero l'energia sprecata a Brescia è superiore al supporto energetico dell'intero sistema di trasporto della provincia di Siena. E' importante rimarcare che questo "spreco" di energia non è stato calcolato rispetto a mezzi tecnologicamente ideali, o a sistemi di trasporto lontani dallo standard attuale; per evitare questa "strage di energia" e di risorse sarebbe sufficiente utilizzare i mezzi migliori attualmente disponibili sul mercato a pieno carico.

L'applicazione al trasporto passeggeri ad alta velocità è mostrato invece in Tabella 29.

Anche in questo caso il dato sorprendente è che l'Energia minima richiesta dal treno per il trasporto passeggeri è mediamente il triplo del valore minimo richiesto dal trasporto in automobile. In termini di surplus di energia utilizzata, è invece l'automobile a mostrare il valore peggiore, superiore alla perdita energetica del treno di circa un ordine di grandezza.

Tabella 29. La Perdita Emergetica applicata all'asse Mi-Na. Le ipotesi a e b si riferiscono rispettivamente all'ipotesi di massimo utilizzo del piano di esercizio TAV, e alla situazione di utilizzo attuale.

	E (seJ/p-km)	ε	E_M (seJ/p-km)	E_L (seJ/p-km)
AUTOSOLE	1.74E+11	21%	3.66E+10	1.38E+11
TAV A	1.17E+11	80%	9.35E+10	2.34E+10
TAV B	1.65E+11	57%	9.42E+10	7.11E+10
FERROVIA A	9.44E+10	90%	8.50E+10	9.44E+09
FERROVIA B	1.26E+11	80%	1.01E+11	2.52E+10

5.2 L'AMPLIFICAZIONE EMERGETICA

Un secondo metodo proposto per l'integrazione delle analisi emergetica ed exergetica è il seguente:

$$EA = E / \varepsilon$$

Dove EA rappresenta l'Amplificazione Emergetica;
 E è la domanda di Energia del sistema (o l'emergia specifica del bene o del servizio prodotto);
 e ε è il rendimento di secondo ordine.

In un processo decisionale basato sull'analisi emergetica la soluzione preferita è generalmente quella che richiede il minor costo emergetico, mentre dal punto di vista exergetico la soluzione preferita è quella caratterizzata dalla più alta efficienza.

Volendo mantenere il trend qualitativo dell'analisi emergetica, e quindi l'impostazione "donor side", l'EA ne mantiene la stessa unità di misura (seJ) ed il suo valore aumenta al diminuire di ε : in altre parole l'EA rappresenta una sorta di *enfasi* dell'impatto emergetico di quei sistemi caratterizzati da una bassa efficienza; l'EA mostra un valore uguale al valore di B solo quando ε è uguale a 1. Sebbene l'EA esprima un valore numerico "virtuale", ovvero più grande del reale consumo di emergia, esso ha il vantaggio di racchiudere in un solo valore le informazioni derivanti dalle due analisi termodinamiche ed è pertanto facilmente utilizzabile dai *decision makers*.

L'EA è uno strumento utile sia per scopi predittivi (pianificazione), sia per scopi valutativi riguardanti sistemi e processi già esistenti. Nel primo caso, disponendo di un

set di alternative da scegliere, l'approccio dell'EA consiste in una analisi emergetica volta a valutare la dimensione spazio-temporale del sistema e le transformities dei prodotti, e in una analisi exergetica volta a valutarne il rendimento di secondo ordine: l'opzione "favorita" sarà quella che mostrerà il più basso valore di EA.

Per scopi valutativi invece si procede prima ad una analisi exergetica per identificare le possibili opzioni attuabili per migliorare l'efficienza del sistema, mentre l'analisi emergetica viene utilizzata per valutare il costo ambientale di ogni opzione. In questo caso l'opzione scelta sarà quella caratterizzata da un valore di EA finale minore dell'EA iniziale.

5.2.1 L'applicazione dell'EA al caso studio.

I risultati delle analisi svolte sui sistemi di trasporto sono già stati lungamente discussi ed interpretati nei capitoli precedenti. Vediamo cosa succede applicando l'EA:

Tabella 30. L'Amplificazione Emergetica per il trasporto passeggeri a Siena e a Brescia

	E (seJ/p-km)	ε %	EA (seJ/p-km)
SIENA			
STRADA (AUTO)	1.66 E+11	16%	10.4 E+11
STRADA (BUS)	0.60 E+11	40%	1.50 E+11
FERROVIA	0.74 E+11	60%	1.23 E+11
BRESCIA			
STRADA (AUTO)	2.47 E+11	16%	15.4 E+11
STRADA (BUS)	0.37 E+11	97%	0.38 E+11
FERROVIA	3.58 E+11	22%	16.3 E+11

L'EA risulta sempre più grande delle Transformities delle unità passeggeri in dipendenza dei valori del rendimento exergetico: gli aumenti maggiori corrispondono al trasporto in auto, mentre l'aumento minore viene osservato sul trasporto pubblico stradale di Brescia: gli autobus di Brescia mostrano inoltre il più basso valore di EA in

assoluto. Questo significa che il modo in cui vengono utilizzati gli autobus in provincia di Brescia rappresenta il miglior modo di trasportare i passeggeri.

L'EA consente di poter fare ulteriori considerazioni sul trasporto ferroviario: a Siena, nonostante il treno abbia un supporto energetico superiore a quello degli autobus, il compromesso con le migliori prestazioni energetiche lo rendono, seppur con un lieve margine, nel complesso il miglior modo di muovere i passeggeri a Siena.

A Brescia il calcolo dell'EA rende il treno addirittura peggiore dell'automobile.

Tabella 31. L'applicazione dell'Amplificazione Energetica al trasporto passeggeri sull'Asse Mi-Na.

	E (seJ/p-km)	ε %	EA (seJ/p-km)
AUTOSOLE	1.74E+11	21%	8.30E+11
TAV A	1.17E+11	80%	1.46E+11
TAV B	1.65E+11	57%	2.90E+11
FERROVIA A	9.44E+10	90%	1.05E+11
FERROVIA B	1.26E+11	80%	1.58E+11

Le ipotesi a e b si riferiscono rispettivamente all'ipotesi di massimo utilizzo del piano di esercizio TAV, e alla situazione di utilizzo attuale.

L'EA non aggiunge particolari elementi di discussione rispetto alle considerazioni precedenti e le indicazioni che derivano dalla sua applicazione sono completamente convergenti con quelle della Perdita Energetica: è evidente ad ogni modo l'utilità "sintetica" ed "esplicativa" dell'EA.

6 CONCLUSIONI

Le analisi dei casi studio presentati in questo lavoro consentono di delineare una descrizione molto precisa degli impatti ambientali dovuti al trasporto delle persone e delle cose; i punti di forza e di innovazione di questa tesi sono stati a) l'utilizzo di un approccio analitico multicriteriale e b) l'aver analizzato il fenomeno del trasporto non come un processo a se stante, ma all'interno del sistema territoriale nel quale esso è inserito. Nei due sistemi provinciali analizzati, il trasporto individuale per mezzo dell'auto è preferito al trasporto collettivo indipendentemente dall'efficienza, dalla modernità e dal comfort offerto dai sistemi di trasporto pubblici. Questo vale sia per la mobilità sistematica (lavoro, studio etc.) che per la mobilità erratica (tempo libero). La lieve differenza che esiste nell'utilizzo quotidiano dell'auto (ore/giorno) tra Siena e Brescia è solo dipendente dalla diffusione sul territorio senese di zone in cui il traffico automobilistico è vietato. In qualche modo questo dato suggerisce che solo interventi drastici di contenimento permanente del traffico possono portare a benefici consistenti alla vivibilità delle aree urbane, e ad "indirizzare" le preferenze dei cittadini verso il trasporto pubblico. E' ovvio pertanto che, alla base della preferenza delle persone, la totale inefficienza dell'automobile e degli impatti ambientali ad essa collegata ha un'importanza pressoché nulla. Le persone continueranno ad utilizzare le auto solo per fattori estetici, di status symbol, per la flessibilità e per la pura voglia di guidare (Olle Hagman 2003); il trasporto pubblico viene preso in considerazione solo quando viene meno la possibilità di muoversi per conto proprio (divieti di circolazione imposti, o indisponibilità di possedere un mezzo). L'unico fattore che può inibire l'utilizzo dell'auto è il costo d'esercizio ed in particolare il consumo dei combustibili: a questo riguardo i miglioramenti tecnologici apportati dalle case automobilistiche ai nuovi mezzi, se da un lato hanno aumentato l'efficienza specifica del singolo spostamento e diminuito la quantità di emissioni per km percorso, dall'altra, abbassando il costo dello spostamento, hanno reso ancora più attraente il trasporto automobilistico.

Il trasporto merci è influenzato dalla complessità e dalla struttura economica del sistema territoriale: anche in questo caso le scelte tra una modalità di trasporto ed un'altra non sono basate sull'efficienza o sull'impatto ambientale del vettore, ma da esclusive motivazioni economiche (accessibilità, e costo del viaggio); in questo caso si

osserva empiricamente che tanto più accessibile è un territorio (e tanto meno costosi sono i viaggi) tanto meno è efficiente e razionale il sistema di trasporto. Pertanto, una politica dei trasporti realmente efficace deve prendere in considerazione la riorganizzazione dell'intera struttura produttiva territoriale, a cominciare dalla riduzione della dispersione territoriale delle filiere e riducendo il fenomeno dello "just in time" e dell'"outsourcing". Tutto questo non avverrà spontaneamente finché il prezzo dei combustibili fossili non aumenterà significativamente.

Per i trasporti sulle medie e lunghe distanze le considerazioni che la tesi consente di fare sono differenti.

Per quello che concerne gli aspetti puramente termodinamici, l'analisi dell'Asse Milano-Napoli ha mostrato in modo inequivocabile quanto sia determinante il peso delle infrastrutture, sia all'interno dei consumi globali dei sistemi di trasporto, sia all'interno degli indicatori intensivi: tutte le analisi comparative sui trasporti (TAV 1995) che trascurano le fasi di costruzione e manutenzione delle linee e dei mezzi, forniscono risultati sottostimati in un range che va dal 15% (energia) fino al 99% (massa ed emissioni) rispetto agli impatti reali.

Come conseguenza di questo, tanto più alto è il tasso di utilizzo di una infrastruttura, tanto più basso sarà il consumo di materia e di energia per unità trasportata: diventa pertanto cruciale il "giusto dimensionamento" delle infrastrutture.

Gli studi comparativi tra trasporto ferroviario e stradale che non tengono conto di questo aspetto, portano a risultati completamente errati: infatti, quando il confronto tiene conto esclusivamente dei consumi diretti dei mezzi, il treno risulta essere l'alternativa sostenibile al trasporto stradale. Proprio dall'aver per anni trascurato il ruolo delle infrastrutture e della "scala globale" all'interno delle metodologie di valutazione, è nata e si è radicata nell'opinione pubblica e tra i politici l'idea del "treno verde". In realtà, all'interno delle analisi di scala globale (intero supporto ambientale necessario al funzionamento dei sistemi tenendo conto anche delle inefficienze nell'utilizzo) il treno, ed in particolare la TAV, diventa in alcuni casi addirittura peggiore dell'automobile.

Questo suggerisce che la costruzione di infrastrutture sovradimensionate, non solo non risolve il problema della congestione del traffico e del miglioramento della qualità della vita, ma addirittura aumenta il consumo di materia, di energia e dei rifiuti prodotti.

Reali e consistenti miglioramenti possono invece derivare da una politica drastica che spinga i cittadini *a rinunciare ai cavalli vapore in eccesso sulle loro automobili* (Odum,2000), e che inserisca il concetto di “analisi su scala globale” all’interno dei criteri di scelta dei decisori politici.

Federici XVI

7 BIBLIOGRAFIA

- ACI 2002, Automobile Club Italia, Report Annuale, <http://www.aci.it/>
- A.N.A.S., 1991. Risultati del censimento nazionale del 1991. I Dati del 2001 non sono ancora disponibili.
- ARPAT, 1997. Pagni R., Pozzana G., Rossi D., Verdesca D., Rapporto sullo stato dell'ambiente della regione Toscana, Regione Toscana Giunta Regionale Dipartimento delle Politiche Territoriali e Ambientali. Pp 504.
- ARPAT 2000. Rapporto sullo stato dell'Ambiente in Toscana. Regione Toscana Editrice.
- Autostrade SpA 2002, Report Annuale. <http://www.autostrade.it>
- Ayres R.U. and Ayres L.W. 1996 Industrial Ecology. Towards closing the material cycle EDS. Edwar Elgar Publishing Ltd. UK, pp 379
- Bargigli S., Raugei M., Ulgiati S., An integrated and thermodynamic and environmental assessment of natural gas, syngas, and hydrogen production. Energy, the international Journal. Accepted.
- Basosi R., Verdesca D. 1998, Piano Energetico Regionale Toscana, Summary Report, Cognitive Framework. REA Toscana-CESVIT-Regione Toscana, Publisher
- Basosi R., Verdesca D., 1999. Verso un sistema di trasporti sostenibile. Relazione energetica-ambientale per il settore trasporti. Piano Energetico regionale della Toscana
- Basosi R., Federici M., Vannuccini L. e Guerrini C. 2001. Verso la sostenibilità ambientale in una città storica: l'esperienza di Firenze. atti del Convegno internazionale " Il Contributo delle Aree Urbane al Protocollo di Kyoto" del 31 Maggio 2001, Comune di Genova, 2001;
- Boustead I. and Hancock G.F., 1979. Handbook of industrial energy analysis. Ellis Horword Limited. Pp.442.
- Brown M.T. and Arding J.,1991. "Transformities". Working paper. Center for Wetlands, University of Florida, Gainesville, USA.
- Brown M.T., T.R. McClanahan, Emery analysis perspectives of Thailand and Mekong river proposals, 1992. the coustean society. Contract No 89092601. Center for Wetlands, University of Florida, Gainesville, USA.
- M.T.Brown, M.B.Viras. A Landscape Development Index. In press
- CamCom Lombardia, 2000. <http://www.lom.camcom.it>
- Camera di Commercio di Siena, <http://www.si.camcom.it>;
- Camera di Commercio di Brescia, <http://www.bs.camcom.it>
- Corinair, 1993. Methodology and Emission Factors. Working Group on Emission Factors for Calculating 1990 Emissions from Road Traffic. Commission of the European Communities, Volume 1, ISBN 92-826-5771-X.

- Dewulf J. Van Langenhove H., 2002 Exergetic material input per unit of service (EMIPS) for the assessment of resource productivity of transport commodities. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 38, Issue 2, May 2003, Pages 161-174. Elsevier.
- ENEA 2001. *Rapporto Energetico ed Ambientale 2001*. ISBN 88-8286-010-8
- ENI 2002. <http://www.eni.it>
- EPA, 1996. United States Environmental Protection Agency. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. Vol.1, Fifth Edition, Point Sources AP-42.
- EPA 1998, <http://www.epa.gov/ttn/chief/>
- Federici, 2000. “Un approccio integrato di analisi termodinamica per la valutazione dell’efficienza e dell’impatto ambientale del sistema di trasporto della Provincia di Siena”. Tesi di Laurea in Chimica, Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali.
- Federici, Ulgiati, Verdesca e Basosi 2003. Efficiency and sustainability indicators for passenger and commodities transportation systems. The case of Siena, Italy. *Ecological Indicators* 3, pp 155-169. Elsevier.
- Federici M. Ruzzenenti F., Ulgiati S. e Basosi R. 2003 “ A thermodynamic and economic analysis of local transport systems” atti del congresso “3rd Biennial International Workshop “Advances in Energy Studies”, Grand Hotel Porto Venere, Porto Venere (SP), Italy, 24-28/09/2002;
- Herendeen A. R., 1998, Embodied energy, embodied everything...now what? In: *Advances in Energy Studies. Energy Flows in Ecology and Economy*. S. Ulgiati, M.T. Brown, M. Giampietro, R.A. Herendeen, and K. Mayumi (Eds); MUSIS Publisher, Roma, Italy, pp.13-48.
- Herendeen A.R., 2000. Prospective/Retrospective on Strategies. In: *Advances in Energy Studies. Exploring supplies, constraints, and strategies*. S. Ulgiati, M.T. Brown, M. Giampietro, R.A. Herendeen, and K. Mayumi (Eds); SGE Editoriali Publisher, Padova, Italy, pp 343-348.
- Hinterberger F. and Stiller H., 1998. Energy and Material Flows In: *Advances in Energy Studies. Energy Flows in Ecology and Economy*. S. Ulgiati, M.T. Brown, M. Giampietro, R.A. Herendeen, and K. Mayumi (Eds); MUSIS Publisher, Roma, Italy, pp.275-286.
- IEA, 1997, *Indicators of energy use and efficiency*.
- ISTAT, 1998. *La mobilità territoriale di una società complessa*. <http://mirrors.cib.unibo.it/www.istat.it/Primpag/Rapannuale1998/cap.6.pdf>
- ISTAT, 1998. *Il Trasporto di merci su strada*. <http://mirrors.cib.unibo.it/www.istat.it/Primpag/Rapannuale1998/cap.6.pdf>
- ISTAT 2000. *Censimento annuale*. <http://www.istat.it>
- Istituto Tagliacarne, Rome 2001, <http://www.istitutotagliacarne.it/>
- Malosti D. and Romanazzo M., 1997. *Il trasporto stradale di persone e merci*. Ministero dell’Ambiente and Ministero dell’Industria, CUEN Publisher, Atti della

- conferenza: Cambiamenti climatici energia e trasporti, Roma 13-14-15 November 1997, pp. 435-466 (in Italian).
- Ministero dell'Ambiente, 1999. Relazione sullo stato dell'Ambiente. www.minambiente.it/Sito/pubblicazioni/Collana_RSA/Collana_elenco.asp Shipper C., Meyers H., 1992. Energy efficiency & human activity: past trends, future prospects. Cambridge University Press. Cambridge, U.K.
- Odum H.T. and Odum E.C. 2000, The Prosperous Way Down, In: Advances in Energy Studies. Exploring supplies, constraints, and strategies. S. Ulgiati, M.T. Brown, M. Giampietro, R.A. Herendeen, and K. Mayumi (Eds); SGE Editoriali Publisher, Padova, Italy, pp 361-366.
- Odum H.T., 1996. Environmental Accounting. Energy and Environmental Decision Making. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA. Pp.370.
- Odum H.T. and Odum E.C., 1987. Ecology and Economy: Energy Analysis and Public Policy in Texas. Energy Evaluation of Texas Highway. Policy Research Project Report, No. 78, Lyndon B. Johnson School of Public Affairs. Pp.178.
- Olle Hagman 2003, Mobilizing meanings of mobility: car users's constructions of the goods and bads of car use. Transportation Research Part D, in press. Pergamon.
- Quattroruote, 1999. Editoriale Domus, Vol. 519.
- Ruzzenenti F., 2000. Il Sistema dei Trasporti e l'Effetto Serra: Un confronto fra due realtà locali. Tesi di Laurea in Economia Ambientale, Facoltà di Economia, Università di Siena.
- Shieh and Fan, 1982. Estimation of energy (enthalpy) and exergy (availability) contents in structurally complicated materials. Energy Sources 6, No 1/2. Crane Russak & Co.
- Shipper C., Meyers H., 1992. Energy efficiency & human activity: past trends, future prospects. Cambridge University Press. Cambridge, U.K.
- Strati F. 1993 Energy Consumption in the Italian transport system: problems and perspectives. Transport Reviews N° 4, pp 323-350. Taylor and Francis Ltd.
- Szargut et al., 1988, p. 188; Wurbs J., et al., Wuppertal Papers Nr. 64, 1996
- Szargut J., Morris D.R., Steward F.R., 1988 pg. 297-304 Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes: Springer-Verlag;
- Szargut J., 1998. Exergy Analysis of Thermal Processes: Ecological Cost. In: Advances in Energy Studies. Energy Flows in Ecology and Economy. S. Ulgiati, M.T. Brown, M. Giampietro, R.A. Herendeen, and K. Mayumi (Eds); MUSIS Publisher, Roma, Italy, pp.77-98
- TAV 1995. Elementi di ecobilancio comparato. Studio svolto per conto di TAV SpA da "Ecobilancio Italia".
- TAV 2000. <http://www.tav.it>
- TAV 2003. Ufficio stampa. Comunicazioni personali.
- Tuttotrasporti, 2000. Editoriale Domus, Vol. 216. <http://www.tuttotrasporti.it>.
- Trenitalia, 2000. Dr. Cini, (FS, Distretto di Siena), comunicazione personale.

Ulgiati S., 2002. Energy Flows in Ecology and in the Economy. Encyclopedia of Physical Science and Technology. Academic Press, Vol.5, pp.441-460.

Ulgiati S., 1996 (Report per ENEA)

Ulgiati S. Russi D., 1999, Analisi Energetica dell' Italia. Tesina del corso in “Valutazione di impatto ambientale” Università di Siena. Manoscritto non pubblicato.

Widman J.,1998. Environmental Impact Assessment of Steel Bridges Steel Res. Vol 46, Nos 1-3, pp 291-293, paper number 412. Elsevier Science.

Federici XVI

8 ALLEGATI A

Pubblicazioni inerenti il settore dei trasporti

- “Verso la sostenibilità ambientale in una città storica: l’esperienza di Firenze” (R.Basosi, **M.Federici**, L.Vannuccini e C.Guerrini); Atti del Convegno internazionale “ Il Contributo delle Aree Urbane al Protocollo di Kyoto” del 31 Maggio 2001, Comune di Genova, 2001;
- Efficiency and sustainability of passenger and commodities transportation systems. The case of Siena, Italy. (**M.Federici**, S. Ulgiati, D. Verdesca, R. Basosi) Ecological Indicator n°3, pp 155-169, Elsevier;
- “ A thermodynamic and economic analysis of local transport systems” **M.Federici**, F.Ruzzenenti, S.Ulgiati and R.Basosi; Atti del congresso “3rd Biennial International Workshop “Advances in Energy Studies”, Grand Hotel Porto Venere, Porto Venere (SP), Italy, 24-28/09/2002;
- “Energy Analysis of selected Local and National Transport Systems in Italy”. **M. Federici**, *F. Ruzzenenti, S. Ulgiati, and R. Basosi*. THIRD BIENNIAL EMERGY EVALUATION and RESEARCH CONFERENCE: January 29-31, 2004 Gainesville, Florida

9 ALLEGATI B

Elenco delle presentazioni tenute in convegni e conferenze.

“Environmental Accounting on exergetic bases for costal lagoon”. Verdesca D., Torsello L., **Federici M.**, Vercelli A., Basosi R. Atti del convegno internazionale ”Southern European Coastal Lagoons: The Influence of River Basin-Coastal Zone interactions”. INTERNATIONAL CONFERENCE Castello Estense (Ferrara, Italy) 10-12th November 2003;

“Biocarburanti: una possibile alternativa”. **M.Federici**, R.Basosi; Atti del Convegno “Dall’Agricoltura Idee per l’Ambiente”, CIA Toscana, Lucignano (AR) 26 Marzo 2002;

Federici M.