
POLITECNICO DI MILANO

FACOLTÀ DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA



**NOTE SUL PROBLEMA
DELL'INNOVAZIONE DEI VEICOLI
PER IL TRASPORTO PUBBLICO
URBANO SU GOMMA**

RELATORE: PROF. GIORGIO COLOMBO

TESI DI LAUREA MAGISTRALE DI: PAOLO PAIETTA

MATRICOLA 740316

ANNO ACCADEMICO 2012 - 2013

INDICE GENERALE

Sommario.....	7
Abstract.....	8
Introduzione	9
Capitolo 1 : L'inquinamento atmosferico e i suoi effetti.....	11
1. Il modello ICAP sui costi delle malattie causate dall'inquinamento.....	12
1.1. Morti premature.....	13
1.2. Ricoveri ospedalieri	14
1.3. Visite al pronto soccorso	16
1.4. Patologie di minore entità	17
1.5. Danni economici.....	18
2. Le emissioni inquinanti in Italia	19
3. Piani di risanamento in atto per la qualità dell'aria.....	20
4. Il ruolo dei trasporti urbani sulla qualità dell'aria	22
Capitolo 2 : L'inquinamento atmosferico urbano e il ruolo del traffico.....	26
1. Inquinamento da traffico veicolare	26
2. Le sostanze inquinanti emesse dai veicoli.....	27
2.1. Monossido di Carbonio (CO).....	28
2.2. Idrocarburi incombusti.....	30
2.3. Ossidi di azoto	31
2.4. Particolato.....	32
3. Il problema dell'anidride carbonica	34
3.1. L'effetto serra.....	34
3.2. Le conseguenze dei cambiamenti climatici.....	34
3.3. Le politiche dei paesi industrializzati.....	35
3.4. Il contributo del settore dei trasporti	36
Capitolo 3 : Le normative Europee sulle emissioni dei veicoli.....	38
1. Le norme Euro	38
1.1. Euro 1.....	39
1.2. Euro 2.....	40
1.3. Euro 3.....	41
1.4. Euro 4.....	42
1.5. Euro 5.....	43
2. Verso l'Euro 6.....	44

Capitolo 4 : Il trasporto pubblico urbano	45
1. Le tipologie di trasporto urbano.....	46
2. Trasporti su rotaia	46
2.1. Linee Metropolitane.....	47
2.2. Linee tranviarie.....	48
3. Trasporti su gomma	48
3.1. Autolinee	49
3.2. Filovie	50
4. L'inquinamento del trasporto urbano.....	50
4.1. Veicoli che emettono gas tossici "in loco"	51
4.2. Veicoli che non emettono gas tossici "in loco"	51
5. Le strategie per ridurre l'inquinamento da trasporto urbano.....	52
5.1. Prima strategia: potenziare il servizio pubblico su rotaia	52
5.2. Seconda strategia: investire negli autobus ecologici.....	54
Capitolo 5 : L'inquinamento dei mezzi pubblici in Lombardia	55
1. Milano	56
1.1. Dati ATM sulla sostenibilità ambientale	56
1.2. stima dell'inquinamento degli autobus urbani.....	59
1.3. Considerazioni finali	62
2. Brescia	63
2.1. Dati di brescia trasporti sulla sostenibilità ambientale	63
2.2. Considerazioni finali	67
3. Bergamo	68
3.1. Dati di ATB sulla sostenibilità ambientale	68
3.2. Considerazioni sull'inquinamento degli autobus urbani.....	69
Capitolo 6 :Analisi dei veicoli ecologici per trasporto pubblico	71
1. Veicoli ibridi	72
1.1. Veicolo "Ibrido serie"	73
1.2. Veicolo "ibrido parallelo"	74
2. Un esempio di veicolo ibrido: Scania Omnilink.....	75
2.1. Dettagli sulla progettazione del sistema di trazione	76
2.2. Potenza e prestazioni	77
2.3. Caratteristiche tecniche della trazione ibrida in serie di Scania.....	78
3. Altri autobus ibridi presenti sul mercato.....	79
3.1. Mercedes Cito	79
3.2. Volvo 7900 Hybrid.....	80

3.3. Man Lion's City Hybrid.....	81
3.4. Horus.....	82
4. Veicoli elettrici: caratteristiche generali	83
4.1. Veicoli elettrici a batterie.....	84
4.2. Veicoli elettrici "fuel cell"	85
5. Veicoli elettrici presenti sul mercato	87
5.1. Elfo (flotta EPT)	87
5.2. Proterra ECO RIDE BE3S6	88
6. Un caso interessante di veicolo fuel cell: mercedes citaro fuel-cell hybrid .	89
6.1. Funzionamento del Fuel Cell Hybrid	89
6.2. Caratteristiche tecniche del modello <i>citaro fuel cell hybrid class I</i> , 3 porte	91
7. Altri veicoli fuel-cell presenti sul mercato.....	92
7.1. Irisbus 491FCY.12 CITYCLASS Fuel Cell.....	92
7.2. Van Hool A330 Hybrid Fuel Cell.....	93
8. Veicoli elettrici e fuel cell: un confronto ambientale ed energetico.....	93
9. Veicoli elettrici a ricarica induttiva	96
9.1. Vantaggi economici e ambientali della ricarica induttiva [8]	96
9.2. Funzionamento del sistema di ricarica.....	97
10. Un esempio di veicolo a ricarica induttiva: il veicolo "OLEV"	99
11. Un esempio di veicolo a ricarica induttiva: gli autobus elettrici di Braunschweig.....	101
Capitolo 7 : il caso dei veicoli ibridi con microturbina.....	104
1. Le microturbine a gas	105
2. Esempi realizzativi e stato dell'arte	109
3. Applicazioni di microturbine Capstone ai veicoli ibridi-elettrici.....	112
4. Funzionamento del sistema di trazione ibrido-elettrico Capstone.....	114
5. Emissioni.....	115
6. Un'applicazione agli autobus ibridi: <i>DesignLine Eco Saver</i>	116
Capitolo 8 : La gestione di una linea con veicoli elettrici: il caso di Torino con le linee <i>Star</i>	118
1. Caratteristiche delle linee <i>Star</i>	120
2. Gestione energetica del servizio	122
3. Specifiche tecniche.....	123
4. Prestazioni a pieno carico	125
5. Calcolo costi ed emissioni.....	126

6. Confronto con autobus tradizionali.....	130
Conclusioni	132
Bibliografia	136

SOMMARIO

Dopo aver descritto gli effetti sulla salute e dei danni economici causati dall'inquinamento atmosferico, si focalizza il problema sull'inquinamento urbano generato dal traffico veicolare. Prima di illustrare le strategie per risolvere il problema del traffico, vengono descritte le normative europee che regolano le emissioni dei veicoli, ponendo particolare attenzione a quelle riferite ai mezzi pesanti, tra cui gli autobus.

A partire dal quarto capitolo si descrivono le diverse tipologie di mezzi di trasporto adibite servizio pubblico urbano, in modo da introdurre l'argomento centrale della trattazione, ossia gli autobus urbani. In Italia, infatti, il trasporto pubblico è garantito, nella maggioranza dei casi, da autobus. Una dimostrazione di ciò la si può facilmente avere analizzando la situazione in Lombardia, come fatto nel Capitolo 5.

I successivi capitoli vengono dedicati all'analisi delle principali caratteristiche delle tipologie di autobus urbani più innovativi, dai veicoli ibridi ai veicoli elettrici e "fuel cell", riportando le schede tecniche dei principali modelli presenti sul mercato.

Particolare attenzione è stata posta sull'evoluzione dei veicoli ibridi a microturbina e all'analisi delle problematiche riscontrate nella gestione di una linea percorsa da autobus elettrici a Torino.

ABSTRACT

After having demonstrated the effects of pollution on our health and the economy, we now turn our attention to the problem of urban pollution caused by motor-vehicles.

Before we illustrate the strategies aiming to resolve traffic related issues, European legislations will be explained. Particular attention will be given to heavy means of transportation such as busses.

From Chapter 4 we will discuss the different means of transportation used for public transport, in particular buses. In Italy public transport makes great use of buses, in fact they represent the main mean of transportation.

In the following chapters there is a comprehensive analysis of the main features of the most modern urban buses in use today, from hybrid to electric and fuel cell.

Special attention is given to the evolution of hybrid buses and the analysis of the problems that have emerged in the management of the electric buses in the city of Turin.

INTRODUZIONE

L'inquinamento dell'aria è diventato ormai da molti anni un argomento di animate discussioni tra gli esperti, i quali stanno fornendo raccomandazioni ai governi nazionali dei Paesi del mondo, affinché decidano di affrontare il problema con serietà. Le emissioni di gas tossici e anidride carbonica, infatti, sono ritenute responsabili dei pericolosi cambiamenti climatici che stanno colpendo il nostro pianeta, nonché dell'incremento delle patologie respiratorie che colpiscono ogni anno sempre più persone. Per risolvere questo problema occorre l'impegno di tutti i Paesi del mondo, i quali oggi, purtroppo, presentano normative ambientali profondamente diverse tra loro, in alcuni Stati più rigide, in altri molto più permissive. Il contenimento delle emissioni inquinanti, andando oltre il problema normativo e legislativo, si concretizza solo se vengono immesse sul mercato soluzioni tecnologicamente efficaci ed economicamente sostenibili. Uno dei settori più interessanti per quanto riguarda le innovazioni che si stanno sperimentando per aumentare l'efficienza energetica e ridurre l'inquinamento è quello del trasporto su strada. In questa tesi, in particolare, approfondiremo le innovazioni applicate al trasporto pubblico urbano su autobus, in quanto esso rappresenta per la maggior parte dei contesti urbani del nostro Paese il mezzo di trasporto pubblico più utilizzato.

L'inquinamento dato dal trasporto urbano è dato essenzialmente dai seguenti fattori:

- Inquinamento di mezzi privati che contribuiscono a creare traffico veicolare;
- Inquinamento dei mezzi pubblici.

La creazione di un'efficiente rete di trasporto pubblico locale è il miglior modo per favorire l'utilizzo dei mezzi pubblici rispetto ai veicoli privati per gli spostamenti nei contesti urbani, azione che contribuisce a ridurre le emissioni inquinanti.

Un'ulteriore riduzione delle emissioni di gas nocivi può venire dalla qualità del parco mezzi utilizzato per il servizio di linea: non è raro vedere, purtroppo, ancora in servizio su linee urbane mezzi *Euro 0*, obsoleti e fortemente inquinanti. Le soluzioni più convenzionali a questo problema sono gli autobus tradizionali di ultima generazione, dotati di motorizzazioni a gasolio o a gas naturale che rispettano le ultime normative in termini di riduzione di emissioni inquinanti. Tuttavia la ricerca in questo campo già da tempo sta sperimentando soluzioni alternative, che vanno dalle motorizzazioni ibride ai veicoli elettrici, passando per i veicoli "fuel cell".

L'obiettivo principale di questa tesi diventa quindi quello di analizzare attentamente le soluzioni innovative di autobus urbani già presenti sul mercato cercando di porre l'attenzione sui seguenti aspetti:

- Validità delle soluzioni in termini di impatto ambientale;
- Eventuali problemi o controindicazioni di utilizzo;
- Analisi dei costi di investimento iniziali e costi di gestione.

La valutazione dei mezzi innovativi che verranno analizzati verrà fatta confrontando dapprima le loro emissioni con quelle degli autobus EEV più performanti dotati di motorizzazioni tradizionali a gasolio e a gas naturale. Nel caso in cui questo prerequisito fosse rispettato si procederà ad effettuare un'attenta comparazione tra diverse tipologie di autobus innovativi a basso impatto ambientale. L'analisi di esperienze già vissute in alcune città, come per esempio l'esperienza di veicoli elettrici a ricarica induttiva a Torino, ci permetterà di individuare pregi, difetti, criticità, limiti e miglioramenti possibili per le soluzioni analizzate.

CAPITOLO 1 : L'INQUINAMENTO ATMOSFERICO E I SUOI EFFETTI

A partire dall'epoca coincidente con la diffusione della Rivoluzione Industriale, che ha portato l'impiego di combustibili fossili per ottenere energia meccanica, lo sviluppo dell'industria pesante e l'avvento dei trasporti motorizzati, l'uomo inizia ad alterare profondamente gli equilibri del pianeta emettendo sostanze inquinanti. Ben presto ci si è resi conto della tossicità e della pericolosità di queste sostanze, ma solo negli ultimi anni, analizzando a fondo la situazione grazie alla possibilità che ci offrono le moderne tecnologie di realizzare modelli sofisticati, si sta affrontando in maniera seria il problema cercando di comprendere quali effetti l'inquinamento potrebbe provocare per le generazioni future. Il problema è molto complesso poiché investire in tecnologie poco inquinanti è una pratica spesso osteggiata dalle grandi industrie, e purtroppo anche dai governi degli Stati, in quanto vista come un investimento senza ritorni economici a breve termine. La totale assenza di regole comuni sull'inquinamento a livello internazionale crea poi "disparità di trattamento" tra imprese che operano in Stati dove le norme sono più stringenti e quelli in cui tali norme sono molto "leggere".

Negli ultimi anni sono stati condotti un numero di studi sempre maggiore sull'inquinamento e sugli effetti che esso ha sul nostro pianeta. I risultati di queste ricerche illustrano scenari molto preoccupanti per quanto riguarda i cambiamenti climatici legati alle emissioni tossiche in atmosfera, qualora si continuasse sulla strada delle emissioni fuori controllo. Le strategie proposte per evitare conseguenze catastrofiche prevedono una drastica riduzione delle emissioni in atmosfera di anidride carbonica e dei principali gas tossici, accompagnata da una serie di interventi volti ad ottenere un sensibile risparmio energetico. La speranza è quindi che, a breve, sempre più stati si impegneranno nella riduzione delle sostanze inquinanti emesse, al fine di salvaguardare l'ecosistema globale e quindi anche la nostra salute.

1. IL MODELLO ICAP SUI COSTI DELLE MALATTIE CAUSATE DALL'INQUINAMENTO

Uno studio interessante condotto dall'*Ontario Medical Association* ha sviluppato nel giugno del 2000 un modello software denominato *Illness Costs of Air Pollution* (costi delle malattie causate dall'inquinamento) che, dopo numerose ricerche e analisi di dati clinici, ha rivelato una forte correlazione tra alcune malattie respiratorie e cardio-vascolari e la presenza di sostanze inquinanti nell'aria.

Il modello ICAP ha permesso di realizzare una serie di stime molto attendibili sugli effetti attesi sulla salute della popolazione dell'Ontario fino al 2025, e sui relativi danni economici conseguenti al peggioramento delle condizioni di salute delle persone causati da ozono (O₃), particolato fine (PM_{2,5}), Monossido di Carbonio (CO), Biossido di zolfo (SO₂) e Biossido di Azoto (NO₂).

In particolare vengono analizzati:

- Decessi prematuri;
- Ricoveri ospedalieri;
- Visite al Pronto Soccorso;
- Malattie meno gravi.

1.1. MORTI PREMATURE

Il modello ICAP prevede che i casi di decessi prematuri in Ontario imputabili ai principali gas tossici passino dai circa 6000 casi dell'anno 2005 ai quasi 9000 del 2025. La curva dei decessi (Fig.1-1) ha un andamento lievemente esponenziale crescente, il che ci lascia precludere che la situazione si aggraverà sempre maggiormente negli anni seguenti. Si può notare dal grafico del modello quanto l'inquinamento andrà a colpire le fasce di età più avanzata, mantenendo pressoché inalterato il numero di decessi nelle fasce di età inferiori ai 65 anni.

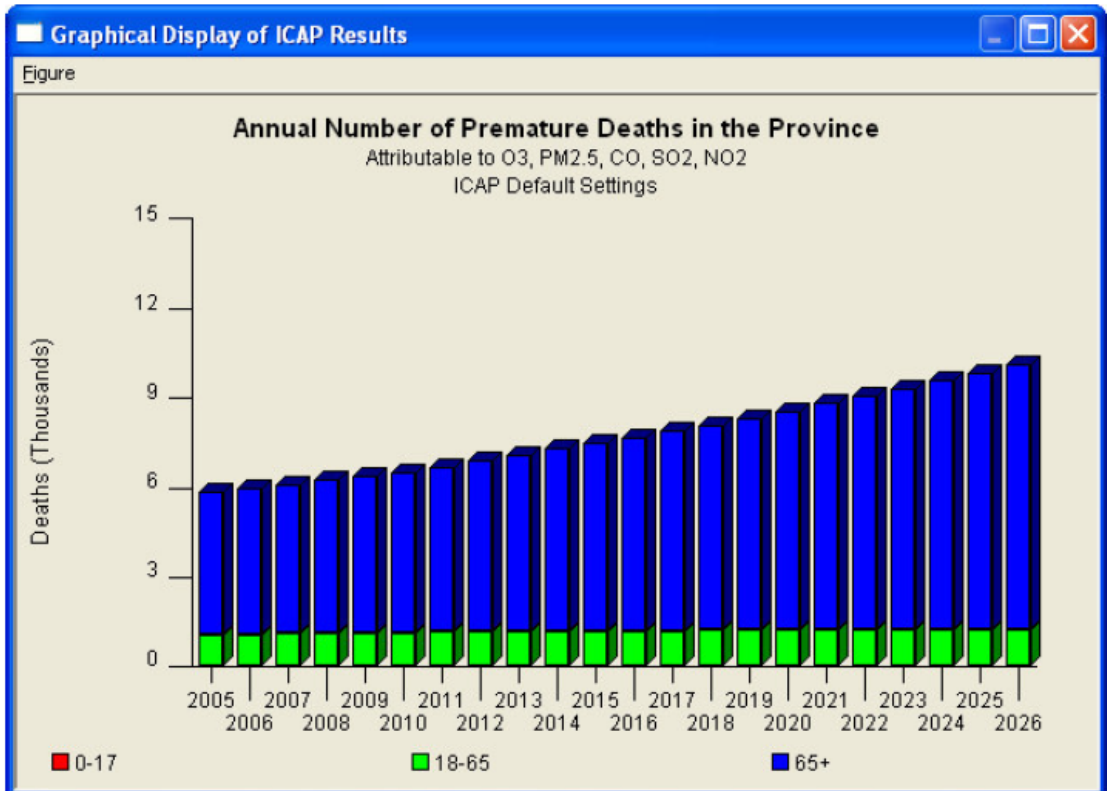


Figura 1-1: Morti premature legate agli inquinanti O3, PM2.5, CO, SO2 e NO2

1.2. RICOVERI OSPEDALIERI

Il peggioramento della qualità dell'aria e in particolare i fattori inquinanti già menzionati nei precedenti paragrafi, oltre ad incrementare la probabilità di decessi, soprattutto riscontrati nelle persone anziane, incrementa il numero di patologie respiratorie e cardio-vascolari che richiedono periodi di ricovero ospedaliero. Il modello ICAP (in Fig.1-2) prevede un incremento di ricoveri ospedalieri dovuti a queste patologie con andamento simile a quello delle morti premature, passando dai circa 17000 ricoveri annuali del 2005 ai quasi 25000 previsti nel 2025.

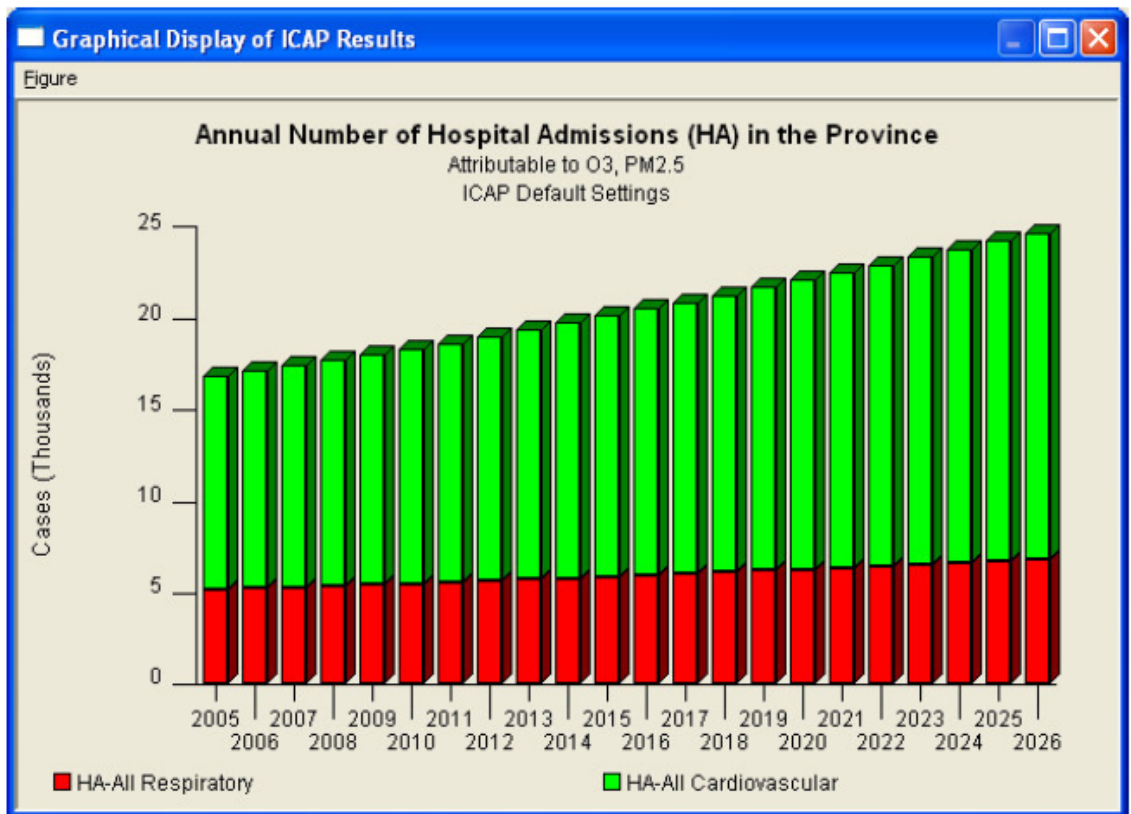


Figura 1-2: Ricoveri ospedalieri legati agli inquinanti O3, PM2.5, CO, SO2 e NO2

Come si evince dal grafico riportato in Fig.1-3, che mostra la distribuzione anagrafica della popolazione ricoverata per le patologie respiratorie o cardio-vascolari legate ai fattori inquinanti analizzati, i ricoveri delle persone più anziane tenderanno ad aumentare sempre maggiormente nel corso degli anni, mentre resteranno pressoché invariati i periodi di degenza ospedaliera per le fasce di età più giovani.

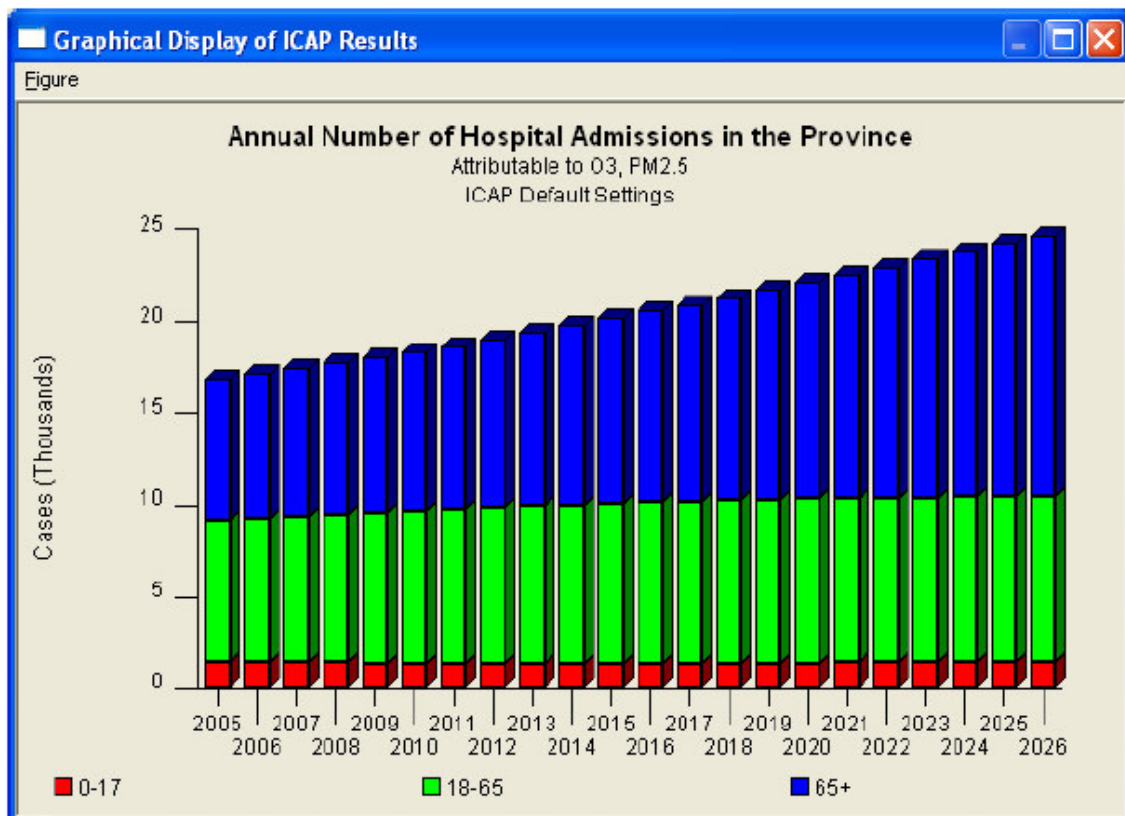


Figura 1-3: Ricoveri ospedalieri suddivisi per età anagrafica legati agli inquinanti O3, PM2.5, CO, SO2 e NO2

1.3. VISITE AL PRONTO SOCCORSO

Il modello ICAP, oltre ai decessi prematuri e ai ricoveri ospedalieri, prende in considerazione anche le visite al pronto soccorso a cui non è seguito un ricovero ospedaliero causate da patologie respiratorie o cardio-vascolari. In Fig.1-4 è riportato il numero delle visite attese al pronto soccorso fino al 2026: si nota anche in questa circostanza un consistente aumento dell'utilizzo del sistema sanitario, passando dalle 60000 visite annuali del 2005 alle 80000 visite previste per il 2026.

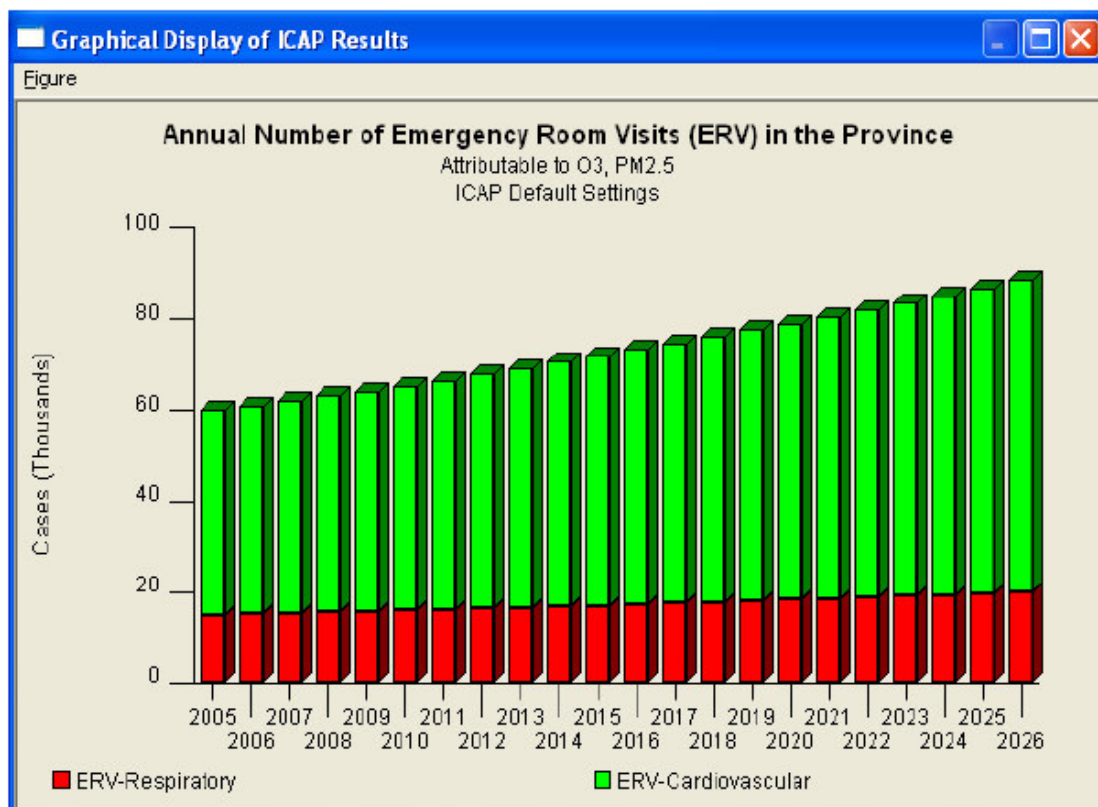


Figura 1-4: visite al pronto soccorso legate agli inquinanti O3, PM2.5, CO, SO2 e NO2

1.4. PATOLOGIE DI MINORE ENTITÀ

Le patologie di minore gravità, che richiedono comunque adeguate cure mediche e farmaci specifici, come ad esempio l'asma bronchiale, vengono provocate soprattutto dalle particelle sottili, ossia le polveri denominate PM, emesse in atmosfera. Il modello ICAP analizza il numero complessivo di casi all'anno in cui i cittadini dell'Ontario provino sintomi dovuti a patologie alle vie respiratorie causate dalla presenza di PM₁₀ nell'aria (Fig1-5). Anche in questo caso le previsioni non sono incoraggianti, lasciando presagire un sensibile peggioramento delle condizioni di salute dei cittadini.

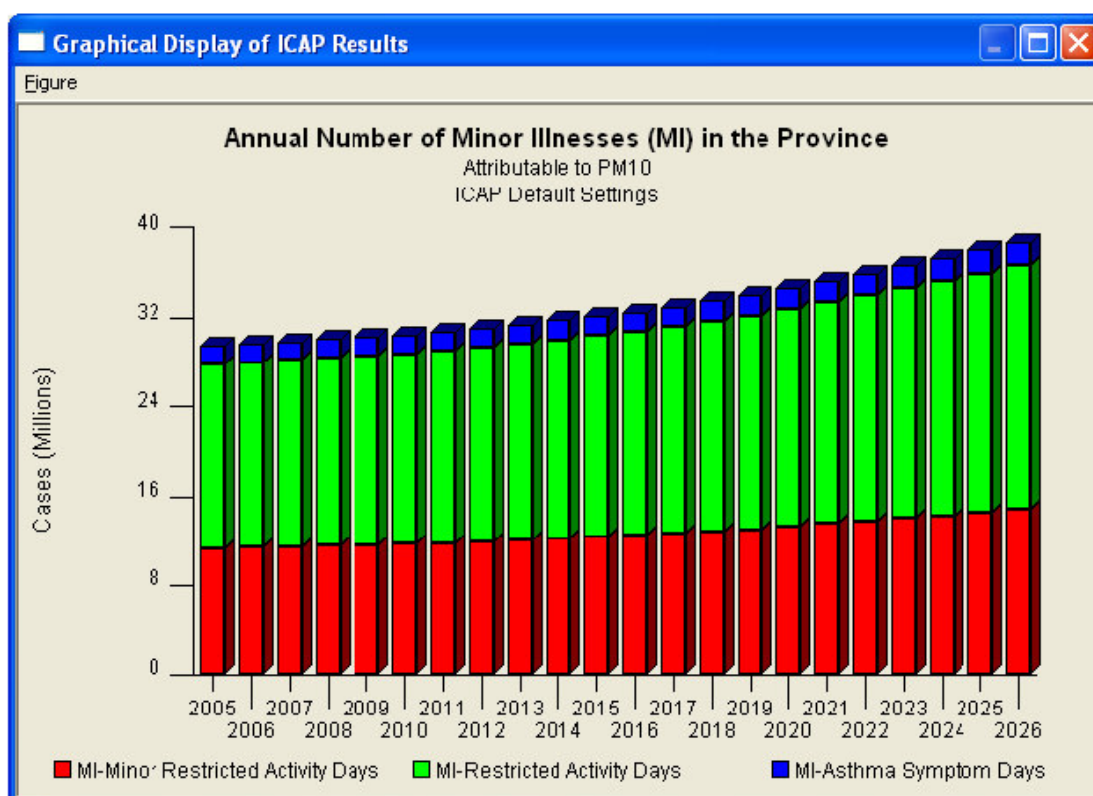


Figura 1-5: casi attesi di patologie di minore entità imputabili al PM10

Recentemente si è visto che anche le particelle sottili PM_{2.5} sono responsabili di malattie respiratorie e cardio-vascolari, anche se non sono ancora disponibili dati relativi ai fattori di rischio di contrazione di patologie dovute a questo inquinante.

1.5. DANNI ECONOMICI

I danni alla salute causati dalle emissioni nocive emesse dall'uomo in atmosfera, i quali possono, come visto, variare da piccoli disturbi fino a patologie vere e proprie che possono avere anche gravi risvolti, richiedono assistenza medica, la quale può variare dalla semplice visita generica o specialistica, con conseguenti terapie, al ricovero ospedaliero con periodi di degenza anche molto prolungati. Come ben sappiamo l'utilizzo del sistema sanitario ha un costo molto elevato per gli enti pubblici ed è quindi utile iniziare a pensare che inquinare l'aria non solo porta ad avere un peggioramento delle condizioni di salute dei cittadini, ma anche un aggravio dei costi per gli enti pubblici. Il modello ICAP propone la seguente ripartizione dei costi imputabili alla presenza in aria di gas inquinanti:

- Perdita di produttività;
- Costi per le cure sanitarie;
- Dolore e sofferenza;
- Perdita della vita.

Tabella 1-1: Danni economici stimati nel 2005, 2015 e 2026

	Example Years		
	2005	2015	2026
Lost Productivity	\$374,342,400	\$402,883,900	\$466,508,500
Healthcare Costs	\$506,612,700	\$571,089,400	\$701,988,500
Pain and Suffering	\$536,546,600	\$593,149,400	\$718,341,300
Loss of Life	\$6,391,700,000	\$8,279,400,000	\$11,027,400,000
Total	\$7,809,201,700	\$9,846,522,700	\$12,914,238,300

Le cifre riportate in Tab. 1-1 forniscono stime preoccupanti per quanto riguarda l'aggravio dei costi imputabili all'inquinamento dell'aria: si passa infatti dai circa 7800 milioni di dollari del 2005 ai circa 12900 milioni di dollari nel 2026, ossia una spesa quasi raddoppiata in vent'anni!

2. LE EMISSIONI INQUINANTI IN ITALIA

Dopo aver brevemente analizzato lo studio condotto in Ontario sulla qualità dell'aria e sulle ripercussioni che essa ha sulla salute umana e sui relativi danni economici, analizziamo ora la situazione in Italia, cercando di comprendere quali settori dell'economia sono maggiormente responsabili delle emissioni nocive. L'*VIII Rapporto sulla qualità dell'ambiente urbano*, realizzato da una collaborazione tra ARPA e ISPRA, dà un grande rilievo alle informazioni ambientali delle 51 aree urbane e metropolitane analizzate in modo da fornire un valido strumento per verificare la correttezza ed adeguatezza delle politiche di sostenibilità ambientale adottate.

Nel rapporto ampio spazio è dedicato alla qualità dell'aria nei centri urbani, e in particolare alle emissioni inquinanti, responsabili dell'alterazione della qualità dell'aria. Per stabilire in ciascuna area analizzata la qualità dell'aria, viene prima redatto un **inventario delle emissioni**, ossia una serie organizzata di dati relativi alla quantità, di inquinanti introdotti in atmosfera, in uno specifico intervallo di tempo, dalle attività antropiche e dalle sorgenti naturali insistenti su un determinato territorio. Le reti di monitoraggio regionali misurano i livelli degli inquinanti più importanti catalogati nell'inventario delle emissioni, i quali devono essere inferiori ai valori limite imposti per legge, fornendo così un valido strumento per la **valutazione della qualità dell'aria**.

A seconda dei risultati forniti dal monitoraggio degli inquinanti dell'aria si rende necessario effettuare degli interventi volti a consolidare risultati soddisfacenti o porre rimedio a situazioni critiche. Per queste ragioni, come prescritto dalla normativa vigente nazionale ed europea, viene redatto una **piano per la qualità dell'aria**. Tra i maggiori inquinanti spesso presenti in atmosfera, l'ISPRA analizza con grande attenzione l'esposizione della popolazione al PM₁₀ e alla quantità di ozono.

3. PIANI DI RISANAMENTO IN ATTO PER LA QUALITÀ DELL'ARIA

Le regioni e le Province autonome hanno l'obbligo di predisporre un piano per la qualità dell'aria laddove si siano verificati superamenti dei limiti prestabiliti per i seguenti inquinanti atmosferici: biossido di zolfo, biossido di azoto, benzene, monossido di carbonio, piombo, materiale particolato PM₁₀, secondo quanto previsto dal D.Lgs. 155/2010 nonché dalla precedente normativa (D.Lgs. 351/1999). I piani redatti vengono quindi trasmessi al Ministero dell'Ambiente, il quale le trasmetterà successivamente alla Commissione Europea, e all'ISPRA entro 18 mesi dalla fine dell'anno in cui sono stati sforati il valore limite o il valore obiettivo prefissato per un dato inquinante.

La realizzazione di un piano di risanamento, come detto, si rende obbligatoria qualora si verificano concentrazioni di gas inquinanti superiori ai limiti prescritti. Nelle aree in cui si verificano uno o più sforamenti annuali delle concentrazioni di gas nocivi, si procede individuando quali attività antropiche siano responsabili di tali emissioni, in modo da valutare in quali settori adottare opportune misure di risanamento.

In Fig. 1-6 si può osservare che, nel periodo 2005-2009, il settore trasporti è quello che ha subito il maggior numero di interventi di risanamento anche se, negli ultimi anni, si può rilevare un lieve incremento delle misure attuate nell'ambito dei settori energia e agricoltura ed allevamenti.

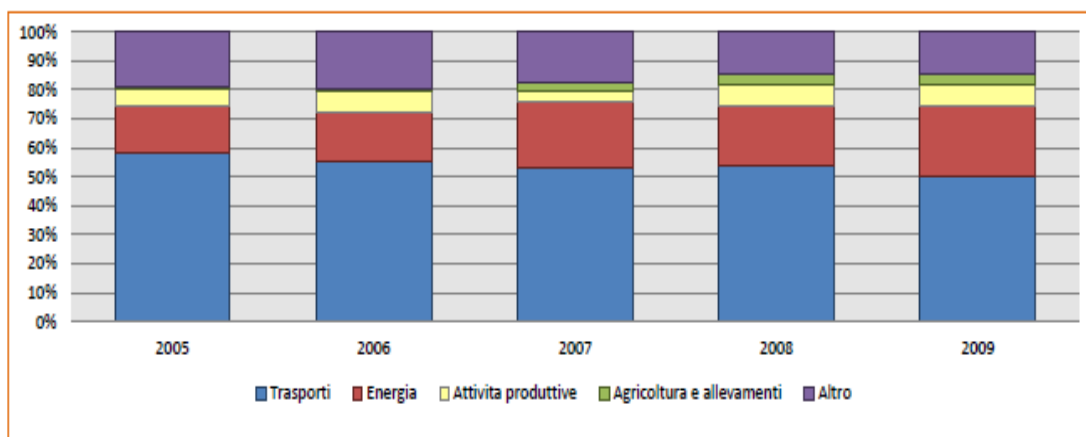


Figura 1-6: Ripartizione settoriale delle misure di risanamento adottate dal 2005 al 2009

In Fig.1-7 viene illustrata per ogni città la ripartizione delle misure nei principali settori di intervento, suddivise nelle seguenti categorie: trasporti/mobilità, energia, attività produttive, attività agricole/allevamenti e altro (categoria in cui includono misure di informazione e comunicazione ai cittadini, piani di azione ed aggiornamento dei piani della qualità dell'aria, progetti e studi di ricerca).

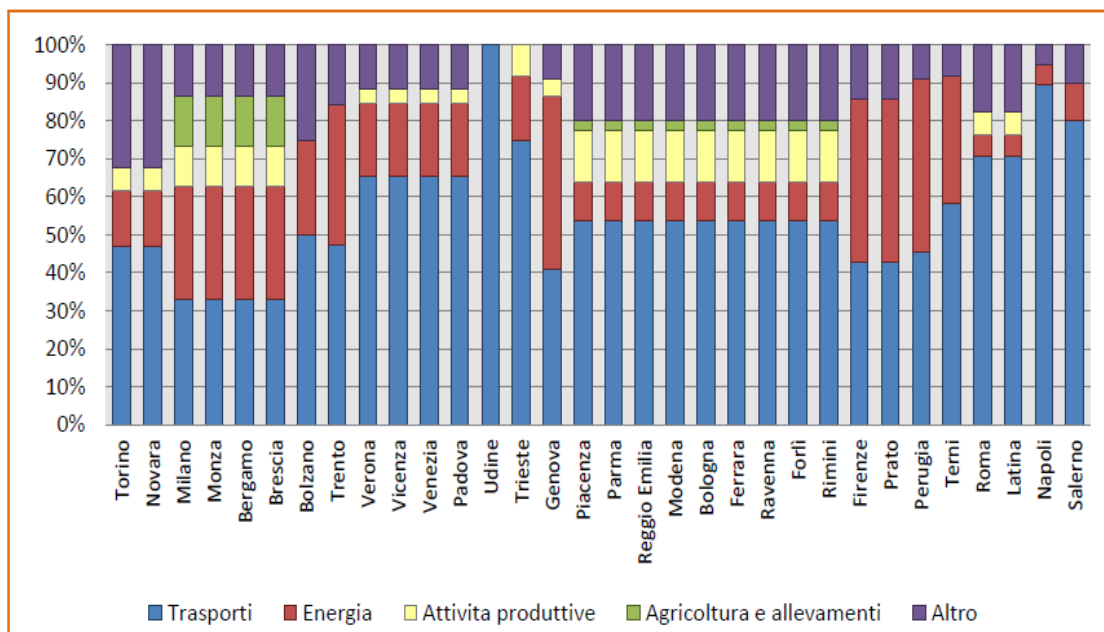


Figura 1-7: Ripartizione settoriale delle misure di risanamento adottate nel 2009

Per quanto riguarda le misure adottate nel **settore trasporti**, che costituiscono circa il 50% delle misure adottate nel 2009, si è operato con le strategie seguenti:

1. Sviluppo della mobilità alternativa all'utilizzo del mezzo privato individuale (car pooling, car sharing);
2. Incentivazione all'uso del trasporto pubblico;
3. Diffusione di mezzi di trasporto privato a basso impatto ambientale.

Il **settore energia** ha invece visto diffondersi interventi volti a:

1. Favorire un uso razionale dell'energia (per esempio favorendo interventi che migliorino la classe energetica degli edifici);
2. Produrre energia da fonti energetiche rinnovabili.

I più comuni interventi nel settore **attività produttive** si prefiggono invece l'obiettivo di ridurre le emissioni degli impianti industriali.

Nel **settore agricoltura e allevamenti** prevalgono invece le seguenti misure di intervento:

1. riduzione del carico azotato negli effluenti di allevamento;
2. la realizzazione di impianti agro-energetici (biogas e gassificatori);
3. la realizzazione di impianti che contribuiscono a contenere le emissioni di azoto.

Nella categoria **altro** vengono invece raggruppati i seguenti correttivi:

1. misure di informazione e comunicazione ai cittadini;
2. piani di azione ed aggiornamento dei piani della qualità dell'aria;
3. progetti di ricerca.

4. IL RUOLO DEI TRASPORTI URBANI SULLA QUALITÀ DELL'ARIA

Il ruolo del trasporto urbano, e in generale di tutti gli aspetti che riguardano il campo della mobilità, è ormai da molti anni al centro di un acceso dibattito per quanto riguarda gli effetti negativi che esso può creare all'ambiente e alla qualità della vita delle persone. L'obiettivo da perseguire è una mobilità sostenibile che consenta al cittadino di spostarsi liberamente senza però creare condizioni negative associate al traffico veicolare. Tale condizione è raggiungibile attraverso una sinergia tra le politiche definite dagli amministratori locali, cui compete la gestione del traffico urbano attraverso la definizione di specifici strumenti di programmazione, e il governo centrale, che interviene definendo politiche e strategie sul tema della mobilità a livello nazionale e stabilendo l'erogazione di specifici contributi per favorire interventi in tale ambito.

Il potenziamento del trasporto pubblico e la disincentivazione all'utilizzo del mezzo privato sono quindi la principale strada da perseguire, anche se non è una strada semplice da raggiungere specie nei piccoli centri abitati dove non esistono linee pubbliche urbane di collegamento particolarmente sviluppate. Ciò è invece possibile nelle città di medie e grandi dimensioni, dove l'elevata densità di popolazione renderebbe impossibile consentire a tutti i cittadini di usufruire dei mezzi propri di trasporto. Oltre a ciò, l'utilizzo di mezzi pubblici contribuisce a ridurre le quantità di gas nocivi che il parco veicolare, per lo più composto da veicoli a motore a scoppio, emette in atmosfera.

Osservando i grafici riportati in Fig. 1-8 e in Fig.1-9, si può riscontrare che nelle città in cui il trasporto urbano è poco sviluppato (come indicatore di sviluppo è stata utilizzata la densità di fermate di autobus, tram e filobus) è alta la concentrazione di automobili circolanti. Questo significa che i cittadini, se messi in condizione di poter usufruire di un efficiente servizio pubblico di linea, sarebbero disposti a rinunciare al mezzo privato. Inoltre, secondo un'indagine condotta dall'ISFORT, dal 2009 al 2011 il numero di persone disposte a rinunciare all'auto privata per il trasporto pubblico sarebbe aumentata dal 34,5% al 36,4%. Sempre secondo l'ISFORT nel biennio 2009-2010 emerge un aumento di passeggeri trasportati nelle piccole città (+3,76%) e nelle grandi città (+2,29%).

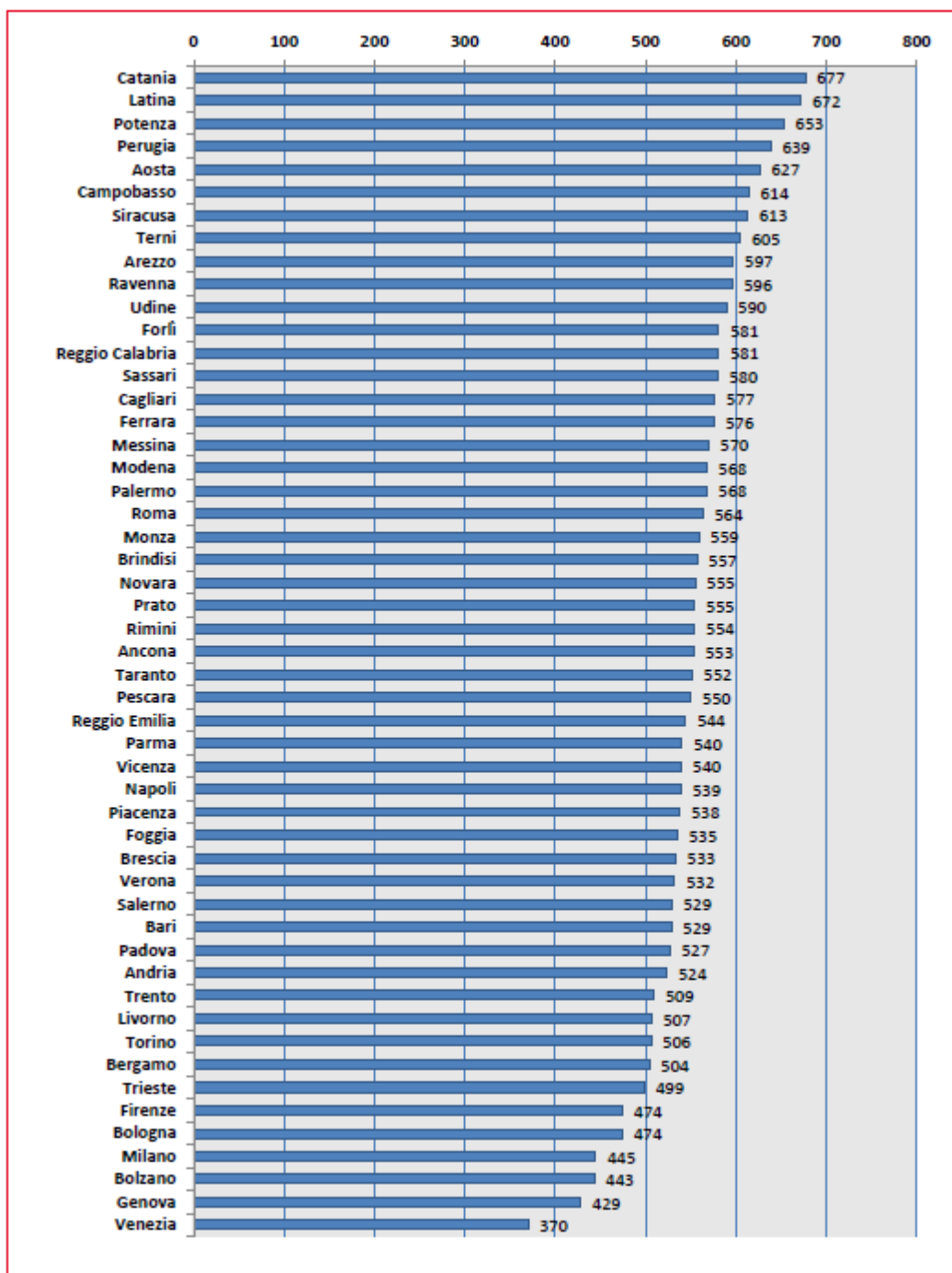


Figura 1-8: Numero di autovetture per 1000 abitanti (settore privato) nel 2010

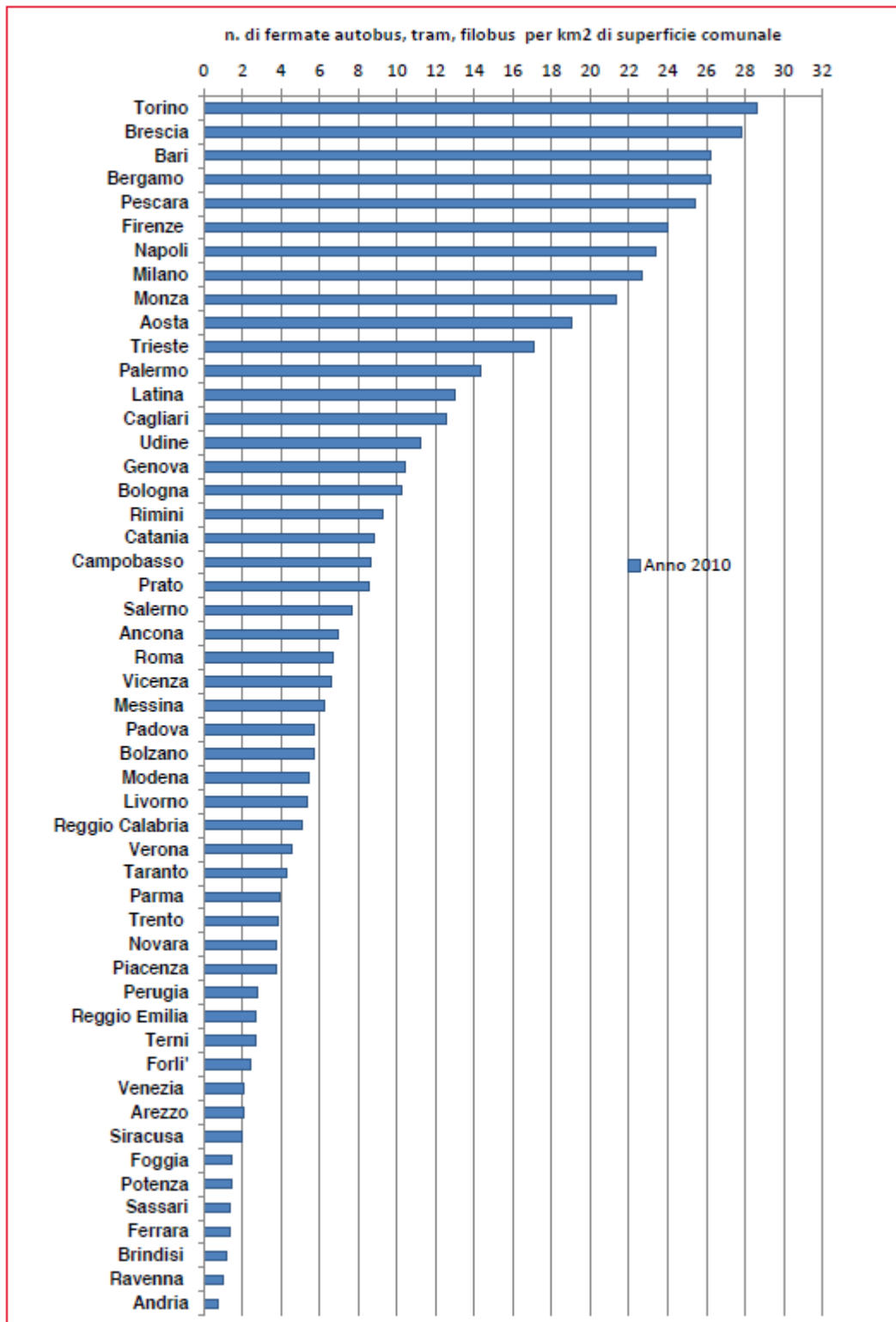


Figura 1-9: Densità di fermate di autobus, tram e filobus (n. di fermate per km² di superficie comunale)

Si deduce quindi che si possono effettuare diverse tipologie di intervento per migliorare la sostenibilità della mobilità urbana, classificabili in due principali categorie di interventi.

1. Potenziare la rete di mezzi pubblici esistente, aumentando il numero di mezzi in modo da servire sempre maggiore utenza e permettendo il collegamento tra due punti della città in modo sempre più rapido;
2. Sviluppare mezzi di trasporto pubblico e privato sempre meno inquinanti, puntando molto sulle nuove tecnologie, come motorizzazioni elettriche o ibride.

La prima categoria di soluzioni è quella più tradizionale e meno rischiosa e costosa, in quanto utilizza categorie di mezzi collaudate e quindi maggiormente affidabili. La seconda categoria rappresenta una sfida molto interessante, la quale mette in gioco una buona dose di rischio e di capitali, in quanto si utilizzano spesso tecnologie allo stato “embrionale”, e quindi molto costose, che vanno ancora messe a punto e adeguatamente implementate.

Questa categoria di soluzioni innovative sarà oggetto di analisi in questo elaborato il quale, dopo una breve analisi dei fattori inquinanti prodotti dal trasporto pubblico su strada e delle normative vigenti, si concentrerà su un’analisi dettagliata delle tipologie di autobus non convenzionali presenti sul mercato, portando esempi di esperienze condotte nelle principali città italiane.

CAPITOLO 2 : L'INQUINAMENTO ATMOSFERICO URBANO E IL RUOLO DEL TRAFFICO

Per *inquinamento dell'aria* si intende la presenza di sostanze contaminanti in quantità, caratteristiche e per un tempo di esposizione tali da creare disturbi, essere nocivi o addirittura letali per gli organismi viventi.

Il problema, presente soprattutto nei distretti urbani con alta densità di popolazione, è diventato negli ultimi anni di grande attualità. Abbiamo certamente tutti noi sentito parlare di blocchi del traffico nelle città a causa dell'eccessiva concentrazione di sostanze inquinanti o dei problemi legate all'inquinamento di centrali termoelettriche, per citare solo due esempi di inquinamento. Numerose associazioni e centri di ricerca negli ultimi anni hanno condotto ricerche per cercare di comprendere gli effetti dell'eccessivo inquinamento dell'aria e come trovare una strategia efficace per arginare questo fenomeno, anche se, ad oggi, una soluzione al problema non si è ancora trovata. L'ostruzionismo degli imprenditori, preoccupati dell'aggravio dei costi che il rispetto di normative troppo stringenti sul tema dell'inquinamento comporterebbero, il fatto che esistono imprese insediate in stati che non applicano normative sull'impatto ambientale così severe costituiscono il principale ostacolo che impedisce la definizione di una strategia condivisa.

Nella presente trattazione verranno analizzate le problematiche legate all'inquinamento causato dal traffico veicolare, in particolare dato dal trasporto pubblico su gomma, tralasciando le altre, altrettanto importanti, cause del problema.

1. INQUINAMENTO DA TRAFFICO VEICOLARE

Negli ultimi decenni, la consapevolezza della stretta correlazione tra la presenza di smog nei centri urbani e il manifestarsi di certe patologie ha indotto l'Unione Europea a varare alcune disposizioni, le norme Euro, che hanno l'obiettivo di ridurre le emissioni inquinanti dei veicoli.

Le immissioni nocive dei veicoli sono principalmente causate dall'apparato di propulsione: il serbatoio, il sistema di alimentazione, il motore e lo scarico dei gas incombusti in atmosfera causano quindi i maggiori problemi. In realtà anche l'impianto di condizionamento dell'aria genera inquinamento, ma l'entità di queste sostanze è per fortuna, ad oggi, arrivata a livelli molto bassi. Anche lo smaltimento degli pneumatici usurati, dell'olio esausto e di tutte le componenti a fine vita, compresa la dismissione del veicolo stesso a fine vita, costituiscono una fonte di inquinamento da trattare attentamente.

Nei paragrafi seguenti verranno analizzate nel dettaglio le sostanze inquinanti emesse dai tubi di scappamento dei veicoli, tralasciando gli altri aspetti sopra menzionati ad altre trattazioni.

2. LE SOSTANZE INQUINANTI EMESSE DAI VEICOLI

I motori per autotrazione, utilizzati prevalentemente nell'ambito del trasporto pubblico e privato, sono diventati, negli ultimi decenni, una delle maggiori fonti di inquinamento atmosferico soprattutto nelle aree urbane.

In tali aree l'inquinamento dovuto al traffico delle autovetture private e dei veicoli pubblici è responsabile della quasi totalità del monossido di carbonio emesso, della maggior parte degli ossidi di azoto, dei composti organici volatili, nonché di gran parte delle particelle solide presenti nell'aria, di dimensioni in genere inferiori al micron.

Il traffico veicolare è responsabile del rilascio di oltre il 60% di monossido di carbonio a livello globale, mentre leggermente inferiori sono le quote imputabili a idrocarburi incombusti (emessi come il monossido di carbonio a causa di problemi di incompleta combustione e di cinetica delle reazioni relativamente lenta rispetto ai tempi limitati per compiere il ciclo) e ossidi di azoto.

I motori a combustione interna sono progettati per viaggiare a differenti velocità di rotazione, a causa del fatto che i veicoli, per ovvi motivi, non possono essere concepiti per viaggiare a velocità costante. In generale, quindi, l'inquinamento del traffico veicolare dipende da diversi aspetti:

1. Tipologia del motore;
2. Condizioni di funzionamento del motore;
3. Qualità del combustibile;
4. Condizioni e caratteristiche del traffico.

Inoltre, data la presenza di reazioni chimiche che si susseguono nelle camere di combustione dei motori, si ha una notevole differenza tra la composizione dei gas di scarico del ciclo ideale da quelli dati dal ciclo reale.

Il gas di scarico ideale è composto da anidride carbonica, acqua e azoto. Il gas reale contiene in realtà altri prodotti di reazione tossici, i quali vanno ridotti il più possibile intervenendo sull'efficienza dei motori e sulla qualità dei carburanti utilizzati.

Le principali sostanze inquinanti, le quali sono oggetto di normativa, sono:

- Monossido di Carbonio (CO);
- Idrocarburi Incombusti;
- Ossidi di Azoto;
- Particolato (sostanza oggetto di normativa solo per i motori Diesel);

Altre sostanze emesse dai motori, di cui non esiste una regolamentazione che limiti le emissioni, sono le seguenti:

- Ammoniaca;
- Idrogeno solforato;
- Solfuro di Carbonile;
- Anidride solforosa;
- Solfati;
- Composti organici dello Zolfo;
- Aldeidi, Chetoni, Fenoli;
- Ammine organiche;
- Nitroammine;
- Alcohols;
- Idrocarburi Policiclici Aromatici;
- Composti organici legati al particolato;
- Metalli e composti metallici.

La descrizione delle principali sostanze inquinanti emesse dai motori a combustione interna è oggetto di trattazione dei seguenti paragrafi.

2.1. MONOSSIDO DI CARBONIO (CO)

Il monossido di carbonio (CO) è un gas inodore e incolore, tossico per l'uomo.

Questo gas è prodotto nel caso di combustioni incomplete, come nel caso dei veicoli spinti da motori a combustione interna. Il ciclo reale di questi motori prevede brusche alterazioni di pressione e temperatura nella camera di combustione. In particolare, durante la discesa del pistone, la temperatura e la pressione nella camera di combustione diminuiscono comportando un prematuro arresto della reazione: in tale fase si origina monossido di carbonio.

In generale la formazione di ossidi di carbonio può avvenire secondo tre processi:

1. Combustione incompleta di carbonio o di composti contenenti carbonio;
2. Reazione a elevata temperatura tra CO₂ e composti contenenti carbonio;
3. Dissociazione ad elevate temperature di CO₂ in CO e O.

Le emissioni di monossido di carbonio dai motori dipendono dai fattori seguenti:

1. Rapporto aria/combustibile;
2. Temperatura dell'acqua di raffreddamento del motore;
3. Caratteristiche tecniche della camera di combustione;
4. Stato di usura del motore;
5. Condizioni di marcia.

Il rapporto aria/combustibile è un fattore molto legato alla formazione dei monossidi di carbonio nel processo di combustione. Si definisce *rapporto stechiometrico* il rapporto aria/combustibile uguale a quello che chimicamente

consenta una completa reazione del combustibile con l'aria. Una miscela di rapporto aria/combustibile minore di quello stechiometrico viene detta *grassa*, viceversa è definita *magra*. In Fig.1.1 è riportato un andamento qualitativo delle emissioni di CO in base al rapporto aria/combustibile della miscela, nel quale si osserva come utilizzando miscele magre si emettano minori quantità di CO. In corrispondenza del rapporto stechiometrico i valori di CO non sono considerati trascurabili.

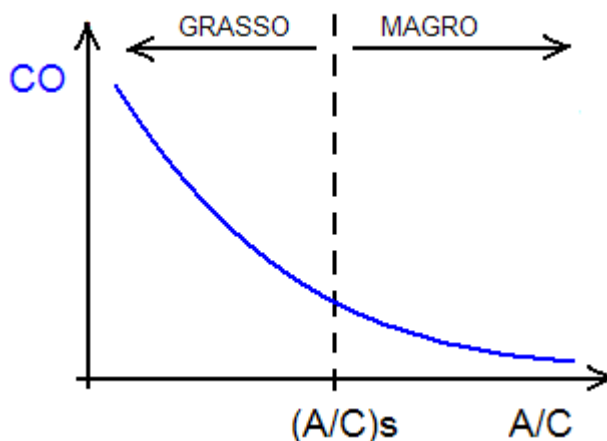


Figura 2-1: emissioni di CO in funzione del rapporto A/C [1]

Nel motore a benzina il monossido di carbonio costituisce un problema in quanto il rapporto di miscela utilizzato viene mantenuto il più possibile vicino a quello stechiometrico, mentre il motore Diesel, utilizzando miscele magre, emette circa 1/10 del monossido di carbonio emesso da un motore a benzina.

Le condizioni di marcia incidono anch'esse in modo rilevante, in quanto al diminuire della velocità di marcia le emissioni di monossido di carbonio aumentano raggiungendo valori massimi col motore al minimo, condizioni tipiche di traffico intenso dei grandi centri urbani.

Il monossido di carbonio, se respirato, ha la proprietà di fissarsi all'emoglobina del sangue con una affinità 220 volte maggiore rispetto all'ossigeno. Il composto che si genera, detto carbossiemoglobina, si sostituisce all'ossiemoglobina, composto formato invece tra ossigeno ed emoglobina, impedendo il normale trasporto dell'ossigeno nelle varie parti del corpo con conseguenze dannose sul sistema nervoso e cardiovascolare. L'entità di tali danni dipende direttamente dalle concentrazioni e dalla durata dell'esposizione. Gli effetti di tali esposizioni possono variare dai casi di leggera intossicazione con disturbi psico-motori, cefalea e indebolimento generale fino ai casi gravi di coma e morte per asfissia.

2.2. IDROCARBURI INCOMBUSTI

Gli idrocarburi sono composti organici costituiti da atomi di carbonio ed idrogeno. Essi, a seconda della struttura molecolare e dal numero di atomi di carbonio che presentano in cui si trovano, si possono trovare sia allo stato solido, sia liquido, sia gassoso. I composti che si presentano allo stato gassoso alle temperature ordinarie, o quelli altamente volatili alle temperature ordinarie, sono ovviamente i più inquinanti.

In base alla struttura molecolare si possono distinguere tre classi di idrocarburi, ciascuna caratterizzata da una certa reattività e tossicità:

1. gli *idrocarburi aciclici* (o *alifatici*): la loro struttura presenta atomi di carbonio disposti a catena, con o senza ramificazioni;
2. gli *idrocarburi aromatici*: gli atomi di carbonio sono disposti ad anello esagonale (benzenico) con ogni atomo dell'anello legato ad un solo atomo addizionale (C o H);
3. gli *idrocarburi aliciclici*: la struttura è ad anello (ma diversa da quella benzenica).

La presenza di idrocarburi nell'aria è data in parte da fenomeni naturali, quali i processi di decomposizione di materia organica sulla superficie terrestre. Tuttavia la principale fonte di inquinamento da idrocarburi dell'aria è, ancora una volta, data dalle attività umane: il settore dei trasporti, ed in particolare i veicoli alimentati a benzina, emettono considerevoli quantità di questo inquinante. I due meccanismi principali con cui le auto immettono idrocarburi nell'aria sono l'evaporazione della benzina e le emissioni di carburante incombusto nei gas di scarico.

Tali emissioni si verificano per svariati motivi:

- le cavità interne alla camera di combustione, come il gioco tra pistone e cilindro, si possono riempire di combustibile;
- il combustibile può essere parzialmente assorbito dall'olio di lubrificazione;
- la fiamma, in vicinanza delle pareti della camera, che per loro natura presentano temperature relativamente basse, può spegnersi e causare una combustione incompleta;
- in alcuni cicli la combustione può non avvenire o essere incompleta.

Si è verificato che le emissioni di idrocarburi incombusti (HC) sono correlate al rapporto aria/combustibile come rappresentato, a livello qualitativo, nel grafico di Fig.1.2.

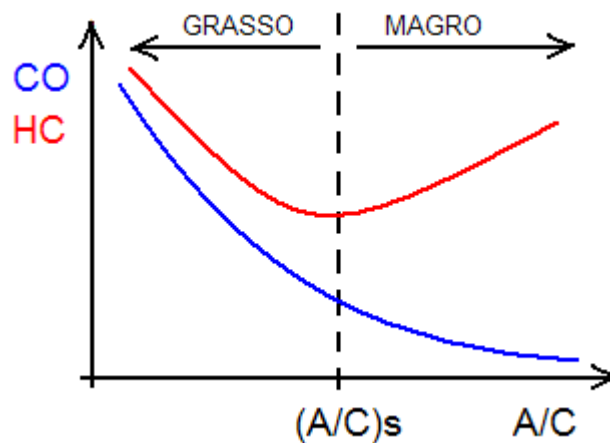


Figura 2-2: emissioni di HC in funzione del rapporto A/C [1]

Dal grafico si può facilmente osservare che il valore minimo di idrocarburi incombusti si ha per miscele leggermente grasse, con rapporto di miscela appena inferiore a quello stechiometrico, valore che garantisce la massima velocità di combustione.

L'aumento del rapporto di compressione del motore, che garantisce temperature più elevate e un tempo maggiore per bruciare combustibile nella camera di combustione, porta ad una diminuzione dell'emissione di idrocarburi.

Gli idrocarburi che generano i fattori di rischio più elevato per la salute dell'uomo sono gli *idrocarburi policiclici aromatici* (IPA). Molti di questi sono noti per la loro azione cancerogena (benzopirene, benzofluorantene, dibenzopirene, dibenzoantracene), mentre altri sono dotati di attività oncogena più modesta. Altri ancora sono di per sé inattivi ma con possibilità di azione cancerogena.

2.3. OSSIDI DI AZOTO

Gli ossidi di azoto sono composti che si formano mediante la combinazione di azoto e ossigeno e vengono denominati anche NO_x. Tra questi i più inquinanti sono l'ossido di azoto (NO) e soprattutto il biossido di azoto (NO₂).

L'ossido di azoto, gas inodore e incolore, si forma in qualsiasi processo di combustione, a prescindere dal combustibile impiegato, in cui si impiega l'aria come comburente, a causa della reazione tra ossigeno e azoto ad alte temperature. Circa il 10% dell'*ossido di azoto*, una volta immesso in atmosfera, viene trasformato in *biossido di azoto* per azione delle radiazioni solari. Quest'ultimo si presenta con un colore rosso bruno, un odore pungente ed è altamente tossico.

Gli NO_x, in presenza di forte irraggiamento solare, sono responsabili delle reazioni che comportano la formazione di inquinanti secondari molto pericolosi, che vanno a formare lo smog fotochimico.

La loro origine in campo motoristico avviene prevalentemente nella zona retrostante il fronte di fiamma, ossia dove la fiamma si è appena estinta, a causa dell'elevata pressione e temperatura presenti in quella zona. Per limitarne la presenza occorre quindi diminuire la temperatura del processo di combustione.

Il quantitativo di ossidi emesso in atmosfera dipende anche dal rapporto di miscela aria/combustibile utilizzato nel processo di combustione (Fig.1.3).

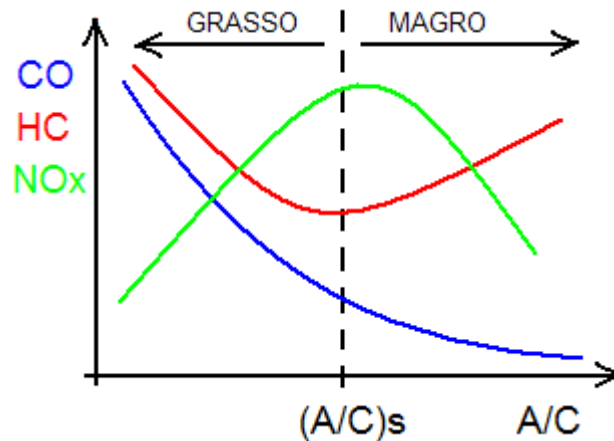


Figura 2-3: emissioni di NO_x in funzione del rapporto A/C [1] [2]

Dal grafico si osserva che il valore massimo di emissioni di ossidi di azoto si registra per miscele leggermente magre, di valore appena superiore a quello di miscela stechiometrica.

Tanto maggiore risulta essere il rapporto di compressione del motore, tanto maggiori saranno le emissioni di NO_x, dato che ciò porta ad avere temperature più alte nella camera di combustione, come accade anche anticipando l'accensione della miscela. Ciò spiega perché quale motivo il problema dovuto alle emissioni di ossidi di azoto è particolarmente presente nei motori Diesel, dove il rapporto di compressione risulta essere più elevato rispetto ai motori a benzina.

Il biossido di azoto è un gas tossico irritante per le mucose ed è responsabile di specifiche patologie dell'apparato respiratorio con diminuzioni delle difese polmonari.

Gli ossidi di azoto contribuiscono anche alla formazione delle piogge acide e favoriscono l'accumulo di nitrati al suolo che possono provocare alterazioni di equilibri ecologici ambientali.

2.4. PARTICOLATO

Con il termine *particelle totali sospese* (PTS) o *materiale particolato sospeso* vengono indicate tutte le particelle solide o liquide disperse in aria.

La natura delle particelle aereo disperse è molto varia: ne fanno parte le polveri sospese, il materiale organico disperso dai vegetali, come pollini e frammenti di

piante, il materiale inorganico prodotto da agenti naturali, dall'erosione del suolo o dei manufatti. Il traffico veicolare, in particolare i veicoli spinti da motori Diesel, contribuiscono in maniera considerevole all'emissione in aria di fuliggine, cenere e particelle incombuste di varia natura e dimensione. Nelle aree urbane l'inquinamento da particolato può essere causato anche dall'usura dell'asfalto, degli pneumatici, dell'impianto frenante e delle frizioni dei veicoli.

Il particolato sospeso costituisce un veicolo di trasporto di altri inquinanti come l'anidride solforosa e gli idrocarburi policiclici aromatici, contribuendo, insieme a questi, al degrado di monumenti ed opere d'arte delle aree urbane.

La formazione di particolato nei motori a combustione interna si ha soprattutto in presenza di elevate pressioni e temperature. Il massimo valore di formazione di particolato si registra quindi durante il picco di pressione iniziale della fase di espansione. Nella successiva fase di discesa del pistone, in cui pressione e temperatura diminuiscono, cala la concentrazione di tali polveri anche se, al momento dell'apertura della valvola di scarico sono presenti polveri sottili in quantità rilevanti.

L'emissione di particolato è strettamente connessa al carico di lavoro a cui è sottoposto il motore: la quantità emessa è relativamente ridotta nelle condizioni di marcia che richiedono prestazioni lontane da quelle prossime al limite del motore, mentre a pieno carico l'emissione risulta essere consistente.

Il particolato si forma solamente nei motori Diesel, di cui è il responsabile del fumo nero che fuoriesce dagli scarichi dei motori di vecchia concezione in fase di accelerazione o sotto sforzo, e nei motori a benzina ad iniezione diretta. In questi ultimi nella zona centrale del getto di combustibile si ha una miscela particolarmente ricca, che causa una grande produzione di particolato.

La maggior parte delle polveri ha un diametro compreso tra 0.1 e 10 micron. Il rischio sanitario legato alle particelle di particolato dipende dalla loro concentrazione e dalla loro dimensione:

- le particelle con diametro superiore a 10 micron si fermano nelle prime vie respiratorie;
- le particelle con diametro tra 5 e 10 micron raggiungono la trachea e i bronchi;
- le particelle con diametro inferiore ai 5 micron possono raggiungere gli alveoli polmonari.

Per questa ragione il DM 25/11/94 [3] ha affiancato alla misura delle particelle totali sospese quella del PM10.

La *Frazione PM10* viene definita come *la frazione delle particelle sospese con diametro nominale inferiore a 10 μ m*. Viene anche denominata *frazione respirabile*, in quanto le particelle che la compongono, data la loro dimensione, possono oltrepassare la faringe e arrivare ai polmoni provocando o accentuando malattie dell'apparato respiratorio.

3. IL PROBLEMA DELL'ANIDRIDE CARBONICA

3.1. L'EFFETTO SERRA

Il pianeta Terra ha sempre subito cambiamenti climatici ciclici e continuerà a subirne in futuro per cause imputabili a fenomeni naturali. Tuttavia, negli ultimi decenni, come hanno dimostrato gli studi scientifici, lo sviluppo del settore industriale, le miglione agricole, il settore dei trasporti eccetera, hanno causato alterazioni nell'equilibrio dei gas serra componenti l'atmosfera. Tali cambiamenti hanno provocato innalzamenti della temperatura della pianeta assolutamente non trascurabili. Si prevede che, senza un radicale intervento volto a ridurre le emissioni di questi gas, la temperatura media mondiale aumenterà di 1,4-5,8°C entro il 2100 e quella europea di 2°-6,3°C. Se pensiamo che la temperatura media dell'ultima era glaciale era di soli 5°C inferiore a quella attuale, possiamo facilmente concludere che gli scenari a cui si rischia di andare incontro siano davvero catastrofici per il clima del pianeta.

Il principale gas serra prodotto dalle attività umane è l'*anidride carbonica* (CO₂), che da sola costituisce circa il 75% delle emissioni mondiali di gas serra. La principale sorgente di anidride carbonica è la combustione dei combustibili fossili (carbone, petrolio, gas naturale), che al momento rimangono la fonte di energia maggiormente utilizzata per produrre elettricità e calore, nonché come carburanti per i mezzi di trasporto.

Per quanto concerne il settore dei trasporti, l'anidride carbonica è un inevitabile prodotto finale della reazione di combustione ed è strettamente correlato alla quantità di combustibile consumato. L'unico modo per ridurre l'emissione di questo gas in atmosfera è quindi di ridurre i consumi di carburante.

3.2. LE CONSEGUENZE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Le conseguenze dell'aumento della temperatura globale si stanno già manifestando in Europa e nel mondo.

Un primo fenomeno osservabile è la riduzione della superficie marina coperta dal ghiaccio al Polo Nord e dello spessore del ghiaccio al di sopra dell'acqua. Lo scioglimento delle calotte di ghiaccio comporta l'innalzamento del livello del mare: negli ultimi 100 anni il livello del mare è salito di 10-25cm ed entro il 2100 potrebbe aumentare fino ad un massimo di 88cm. L'innalzamento del livello del mare metterebbe a rischio gli abitanti delle zone costiere e delle piccole isole e potrebbe causare un processo di salinizzazione dei suoli agricoli e delle riserve di acqua potabile.

Un secondo problema connesso all'aumento di temperatura è il ritiro dei ghiacciai: ad esempio per i ghiacciai svizzeri sono attese, secondo alcune previsioni, perdite del 70% entro il 2060.

Questi cambiamenti climatici tendono a favorire l'insorgere di fenomeni meteorologici estremi, quali tifoni, periodi di siccità, inondazioni, ondate di calore, i quali tenderanno ad aumentare in frequenza ed intensità. Tali fenomeni causeranno rilevanti alterazioni dei regimi di precipitazione e, di conseguenza, un'accentuazione dell'aridità nelle regioni del Sud Europa. Oltre ad un'esposizione diretta ai cambiamenti climatici, rappresentata dalle mutazioni climatiche sopra descritte, gli esseri umani dovranno far fronte a fenomeni indiretti, come i cambiamenti della qualità e quantità dell'acqua, del suolo, del cibo, degli ecosistemi e, su periodi temporali variabili delle condizioni socio-economiche dipendenti dalla disponibilità di risorse naturali. Tutto ciò porterebbe ad avere, in diverse regioni della Terra, carenze di cibo, acqua potabile e gravi problemi economici a cui far fronte.

3.3. LE POLITICHE DEI PAESI INDUSTRIALIZZATI

A partire dagli anni '80, in seguito alle sempre più numerose pubblicazioni scientifiche che dimostravano che i cambiamenti climatici stavano ormai diventando una seria minaccia per il pianeta, iniziarono i dibattiti tra i Paesi industrializzati per trovare una soluzione al problema.

Nel 1992 fu approvata la *Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici* (UNFCCC) il cui obiettivo ultimo è di stabilizzare le concentrazioni in atmosfera di gas serra ad un livello tale da impedire che le attività umane interferiscano negativamente con il sistema climatico. Tale Convenzione impegna i Paesi che l'hanno ratificata a monitorare le proprie emissioni di gas serra ed elaborare strategie nazionali per ridurle; inoltre i Paesi industrializzati sono invitati ad assistere i Paesi in via di sviluppo ad affrontare la problematica dei cambiamenti climatici.

Nel 1997, con l'approvazione del *Protocollo di Kyoto*, entrato in vigore il 16 febbraio 2005 fu fatto un ulteriore progresso nella lotta ai cambiamenti climatici: questo protocollo impegna i Paesi industrializzati, entro il 2012, a ridurre le proprie emissioni di un certa percentuale rispetto ai livelli del 1990. L'impegno assunto dall'Unione Europea è quello di ridurre le proprie emissioni dell'8% rispetto ai livelli del 1990, mentre la riduzione che dovrà sostenere l'Italia sarà pari al 6,5%.

I risultati di molti studi hanno comunque dimostrato la necessità di attuare misure più stringenti per evitare un aumento della temperatura globale superiore di 2°C rispetto ai livelli pre-industriali.

Nel dicembre del 2007, durante la *Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici* svoltasi a Bali, i Paesi più sviluppati hanno ribadito l'impegno ad arginare i cambiamenti climatici per il post-Kyoto. Tale impegno venne ribadito l'anno successivo a Poznan.

Nel dicembre del 2009, in occasione della conferenza delle Nazioni Unite sul cambiamento climatico svoltasi a Copenaghen, è stato elaborato il *Copenaghen Accord*, un documento di intesa di valore politico, ma non legale, che individua

alcune strategie condivise per la lotta ai cambiamenti climatici e propone alcune linee guida per il proseguimento del negoziato.

Il 10 dicembre 2010 si è conclusa a Cancùn la *16° Conferenza delle Parti della Convenzione sui Cambiamenti Climatici* che ha confermato gli indirizzi politici contenuti nell'Accordo di Copenaghen e identificato i passi da intraprendere per giungere ad un accordo globale per la regolamentazione delle emissioni di gas serra per il periodo post-2012. Tuttavia, a causa dell'ostruzionismo di alcuni Paesi, probabilmente pressati dalle grandi multinazionali, non si è raggiunto ancora un accordo vincolante.

L'11 dicembre 2011 sono terminati i negoziati tra i rappresentanti degli Stati nella *Conferenza di Durban*. In tale sede i Paesi Europei e l'Australia hanno annunciato che inizieranno ad attuare la seconda fase del protocollo di Kyoto, in cui sono state concordate lievi riduzioni delle emissioni di anidride carbonica in atmosfera. Inoltre alle Nazioni Unite verrà affidato un Fondo Verde annuo da 100 milioni di Dollari da destinarsi a sostenere i Paesi poveri nell'adozione di tecnologie verdi. Tuttavia, per l'ennesima volta, si è riscontrato un atteggiamento ostruzionistico da parte di Paesi come Stati Uniti, Cina, Brasile ed India a firmare un accordo vincolante su una seria riduzione delle emissioni globali di gas serra.

3.4. IL CONTRIBUTO DEL SETTORE DEI TRASPORTI

Attualmente nel mondo la domanda di trasporto è in forte crescita. Nel periodo 1990-2008 la domanda di trasporto passeggeri si è incrementata del 34%, mentre per quanto riguarda le merci si segnala una crescita del 20,4%. Il trasporto stradale privato, ossia mediante automobili, costituisce circa il 74% della domanda di trasporto passeggeri.

Ovviamente le emissioni di gas serra del settore dei trasporti, data la crescita del settore, sono aumentate, rendendo difficile il raggiungimento degli obiettivi internazionali fissati dal protocollo di Kyoto.

In Italia le emissioni del settore trasporti nazionali sono aumentate del 15,9% nel periodo 1990-2009. Nel 2009 le emissioni di gas serra direttamente imputabili al settore in analisi hanno costituito il 29,3% del totale della quota nazionale, di cui il 58,7% prodotto dal trasporto passeggeri su strada.

La causa di una così grande quantità di emissioni è in gran parte da imputare alla grande quantità di chilometri percorsa dai veicoli, anche se le prestazioni dei veicoli, legate ai consumi degli stessi ed allo stile di guida non sono fattori trascurabili.

Risulta quindi necessario pensare a nuove soluzioni che possano ottimizzare il trasporto di merci, come l'integrazione nave-camion-treno, e di passeggeri, potenziando il settore dei trasporti pubblici.

Nel contempo risulta necessario incentivare la ricerca nel campo dei motori alternativi, ossia mezzi a propulsione ibrida, a idrogeno o ad alimentazione totalmente elettrica. In tal modo il problema dell'emissione da parte dei veicoli di gas serra, nonché degli altri inquinanti, sarebbe risolto, mentre l'attenzione si sposterebbe sul costo, in termini di inquinamento, della produzione dei vettori di energia utilizzati, ossia idrogeno liquido e corrente elettrica.

CAPITOLO 3 : LE NORMATIVE EUROPEE SULLE EMISSIONI DEI VEICOLI

La Comunità Europea, al fine di dare un limite alle emissioni di gas inquinanti in atmosfera, ha emesso una serie di limitazioni sulle emissioni massime che i veicoli venduti nell'Unione Europea devono rispettare. Tali limiti, definiti dagli *Standard Europei sulle Emissioni Inquinanti*, sono identificati con la sigla *Euro* seguita da un numero crescente, che identifica lo standard applicato ad un dato veicolo. Dal 1988, anno dell'introduzione delle prime Direttive che regolamentano le emissioni, ad oggi sono uscite diverse edizioni, sempre più stringenti, delle norme Euro.

Le normative sono differenti tra loro a seconda della classe di veicolo a cui si applicano: infatti esistono normative specifiche per ciclomotori, motocicli, autovetture alimentate a benzina e a gasolio, autocarri leggeri e autocarri pesanti e autobus.

Nel seguente paragrafo presenteremo un breve riassunto delle normative che si sono succedute negli anni.

1. LE NORME EURO

Fatta eccezione per gli autocarri pesanti e gli autobus, mezzi soggetti a normativa già dal 1988, anno in cui viene approvata la *Direttiva 88/77 CEE*, che regola gli ultimi mezzi classificati secondo la normativa *Euro 0*, la prima normativa che regola le emissioni di gas tossici per tutti i veicoli viene introdotta nel 1991 e denominata *Euro 1*. In realtà il numero dopo la dicitura *Euro* viene scritto utilizzando numeri romani, anziché arabi, per le normative riferite ai veicoli pesanti

A partire da tale data sono state imposte, a tutti i veicoli immatricolati in stati della Comunità Europea, regolamentazioni sulle emissioni dei principali inquinanti emessi dai loro tubi di scappamento. I gas monitorati sono monossido di carbonio, idrocarburi incombusti, ossidi di azoto e particolato. L'omologazione viene ottenuta dal veicolo qualora superi la prova al banco definita dettagliatamente dalla Direttiva che si applica al veicolo in esame.

Riportiamo nei seguenti paragrafi una breve descrizione degli standard Euro che si sono susseguiti negli anni, riportando i limiti di emissione imposti dalle normative per tutti i mezzi e le direttive a cui si fa riferimento.

1.1. EURO 1

Sono *Euro 1* tutti i veicoli immatricolati dopo il 1° gennaio 1993, anno in cui per legge è stato imposto il rispetto delle Direttive europee. Se sulla carta di circolazione del veicolo è riportata una delle seguenti Direttive, allora il veicolo è appartenente agli standard *Euro 1*.

- 83/351 CE rif. 91/441 CE
- 88/77 CE rif. 91/441 CE
- 88/436 CE rif. 91/441 CE
- 89/458 CE
- 91/441 CE
- 91/542 CE punto 6.2.1.A
- 93/59 CEE con catalizzatore

Sono *Euro 1* i motocicli e ciclomotori immatricolati dopo il 17 giugno 1999 che rispettano la seguente norma:

- 97/24 CE cap. 5

I limiti di emissioni fissati dagli standard *Euro 1* sono riportati nella seguente tabella.

Normativa Euro I						
Mezzo/classe veicolo	Motorizzazione	CO	HC	NO _x	Particolato*	Unità di misura
Ciclomotore	qualsiasi	6	3 (HC+NO _x)			g/km
Motociclo	2T	8	4	0,1		
	4T	13	3	0,3		
Autoveicolo	Benzina	2,72	0,97 (HC+NO _x)		0,14	
	Diesel					
Autocarri leggeri M	qualsiasi	3,16	1,13 (HC+NO _x)		0,18	g/km
Autocarri leggeri N < 1250kg		2,72	0,97 (HC+NO _x)		0,14	
Autocarri leggeri N < 1700kg	qualsiasi	5,17	1,4 (HC+NO _x)		0,19	
Autocarri leggeri N >1700kg		6,9	1,7 (HC+NO _x)		0,25	
Autocarri pesanti/Autobus	qualsiasi	4,5	1,1	8	0,36	g/kWh
					1,7 se di potenza ≤ 85 kW	

*= limiti validi solo per motorizzazioni Diesel

1.2. EURO 2

Sono *Euro 2* tutti i veicoli immatricolati dopo il 1^o gennaio 1997. Se sulla carta di circolazione del veicolo è riportata una delle seguenti Direttive, allora il veicolo è appartenente agli standard *Euro 2*.

- 994/12 CEE
- 96/1 CE
- 96/44 CE
- 96/69 CE
- 91/542 punto 6.2.1.B
- 98/77 CE
- 96/20-95/54 93/116-96/69-96/36
- 96/20-95/54 93/116-96/69-95/56-96/37
- 96/20-95/54 93/116-96/69-95/96-96/37-96/38
- 96/20-95/54 93/116-96/69-95/56-96/36-96/37-96/38
- 92/97/ CEE-94/12 CEE-93/116 CE
- 92/97/ CEE-94/12 CEE
- 96/20 CE-96/44 CE
- 96/20 CE-96/1 CE
- 96/20 CE-94/12 CEE
- 92/97/CE-96/69 CE
- 92/97/CE-96/69 CE-93/116 CE
- 96/20 CE-91/542 CEE punto 6.2.1-B
- 96/20 CE-94/12 CEE-93/116 CE
- 96/20 CE-95/54 CE-94/12 CEE-93/116 CE
- 96/20 CE- 96/69 CE-93/116 CE
- 96/20 CE-96/69 CE-95/54 CE-93/116 CE
- 92/97/CEE-94/12 CE-95/54 CE-93/116 CE
- CE 96/20-93116-96/69-95/56
- 1999/102/CE rif.96/69/CE
- 98/77 CE
- CE 96/20-95/54-93/116-94/12-96/36-96/38
- 96/20 CE-95/54 CE-96/69 CE-95/56 CE

Sono *Euro 2* i motocicli immatricolati dopo l'1/4/2003 ed i ciclomotori immatricolati dopo il 17/6/2002 che rispettano le seguenti Direttive:

- 97/24 CE cap. 5 fase II
- 2002/51/CE fase A
- 97/24 CE rif. 2003/77/CE fase A
- 2003/77/CE rif. 2002/51/CE fase A

I limiti di emissioni fissati dagli standard *Euro 2* sono riportati nella seguente tabella.

Normativa Euro II						
Mezzo/classe veicolo	Motorizzazione	CO	HC	NO _x	Particolato*	Unità di misura
Ciclomotore	qualsiasi	1	1,2 (HC+No _x)			g/km
Motociclo	< 150 cc	5,5	1,2	0,3		
	≥ 150 cc	5,5	1	0,3		
Autoveicolo e Autocarri leggeri M	Benzina	2,2	0,5 (HC+No _x)			
	Diesel	1	0,7 (HC+No _x)		0,08	
Autocarri leggeri N < 1250kg Autocarri leggeri N < 1700kg Autocarri leggeri N >1700kg	Benzina	2,2	0,5 (HC+No _x)		0,8	g/km
		4	0,6 (HC+No _x)			
		5	0,7 (HC+No _x)			
	Diesel	1	0,7 (HC+No _x)			
		1,25	1,0 (HC+No _x)			
1,5	1,2 (HC+No _x)		0,17			
Autocarri pesanti/Autobus	qualsiasi	4	1,1	7	0,15	g/kWh

*= limiti validi solo per motorizzazioni Diesel

1.3. EURO 3

Sono *Euro 3* tutti i veicoli immatricolati dopo il 1^o gennaio 2001. Se sulla carta di circolazione del veicolo è riportata una delle seguenti Direttive, allora il veicolo è appartenente agli standard *Euro 3*.

- 98/69 CE
- 98/77 CE rif 98/69 CE
- 99/96 CE
- 99/102 CE rif. 98/69 CE
- 2001/1 CE rif. 98/69 CE
- 2001/27 CE
- 2001/100 CE fase A
- 2002/80 CE fase A
- 2003/76 CE fase A

Sono *Euro 3* i motocicli immatricolati dopo l'1/1/2006. Per i ciclomotori non è ancora entrata in vigore una normativa successiva alla *Euro 2*:

- 97/24 CE cap. 5 fase III
- 2002/51/CE fase B
- 97/24 CE rif. 2003/77/CE fase B
- 2003/77/CE rif. 2002/51/CE fase B

I limiti di emissioni fissati dagli standard *Euro 3* sono riportati nella seguente tabella.

Normativa Euro III						
Mezzo/classe veicolo	Motorizzazione	CO	HC	NO _x	Particolato*	Unità di misura
Motociclo	< 150 cc	2	0,8	0,15		g/km
	≥ 150 cc	2	0,3	0,15		
Autoveicolo e Autocarri leggeri M	Benzina	2,3	0,2	0,15		
	Diesel	0,64	0,56 (HC+No _x)	0,5	0,05	
Autocarri leggeri N < 1250kg Autocarri leggeri N < 1700kg Autocarri leggeri N >1700kg	Benzina	2,3	0,2	0,15		g/km
		4,17	0,25	0,18		
		5,52	0,29	0,21		
	Diesel	0,64	0,56 (HC+No _x)	0,5	0,8	
		0,8	0,72 (HC+No _x)	0,65	0,12	
		0,95	0,86 (HC+No _x)	0,78	0,17	
Autocarri pesanti/Autobus	qualsiasi	2,1	0,66	5	0,1 0,13**	g/kWh

*= limiti validi solo per motorizzazioni Diesel

**= per cilindrata unitarie < 0,75dm³ e regime nominale > 3000 giri/min

1.4. EURO 4

Sono *Euro 4* tutti i veicoli immatricolati dopo il 1^o gennaio 2006. Se sulla carta di circolazione del veicolo è riportata una delle seguenti Direttive, allora il veicolo è appartenente agli standard *Euro 4*.

- 98/69/CE B
- 98/77/CE rif. 98/69/CE B
- 1999/96 CE B
- 1999/102 CE B rif. 98/69/CE B
- 2001/1 CE
- 2001/100 CE B
- 2002/80 CE B
- 2003/76 CE B
- 2005/55/CE B1
- 2006/51/CE rif. 2005/55/CE B1

I limiti di emissioni fissati dagli standard *Euro 4* sono riportati nella seguente tabella.

Normativa Euro IV						
Mezzo/classe veicolo	Motorizzazione	CO	HC	NO _x	Particolato*	Unità di misura
Autoveicolo e Autocarri leggeri M	Benzina	1	0,1	0,08		g/km
	Diesel	0,5	0,3 (HC+No _x)	0,25	0,025	
Autocarri leggeri N < 1250kg Autocarri leggeri N < 1700kg Autocarri leggeri N >1700kg	Benzina	1	0,1	0,08	0,025	g/km
		1,82	0,13	0,1		
		2,27	0,16	0,11		
	Diesel	0,5	0,3 (HC+No _x)	0,25	0,04	
		0,63	0,39 (HC+No _x)	0,33	0,06	
0,74	0,46 (HC+No _x)	0,39	0,06			
Autocarri pesanti/Autobus	qualsiasi	1,5	0,46	3,5	0,02	g/kWh

*= limiti validi solo per motorizzazioni Diesel

1.5. EURO 5

Sono Euro 5 i veicoli immatricolati dopo il 1^o settembre 2009 in cui, sulla carta di circolazione del veicolo, è riportata una delle seguenti Direttive/Regolamenti.

- 1999/96/CE Riga B2
- 1999/96/CE Riga C (ECOL. MIGLIORATO)
- 2001/27/CE RIF 1999/96/CE Riga B2
- 2001/27/CE RIF 1999/96/CE Riga C (ECOL. MIGLIORATO)
- 2005/79/CE RIF 2005/55/CE Riga B2 (Euro 5)
- 2005/79/CE RIF 2005/55/CE Riga C (ECOL. MIGL.)
- 2006/51/CE RIF 2005/55/CE Riga B2 (Euro 5)
- 2006/51/CE RIF 2005/55/CE Riga C (ECOL. MIGL.)[5]
- 715/2007 e 692/2008 (Euro 5A)
- 715/2007 e 692/2008 (Euro 5 con dispositivo antiparticolato)

I limiti di emissioni fissati dagli standard Euro 5 sono riportati nella seguente tabella.

Normativa Euro V						
Mezzo/classe veicolo	Motorizzazione	CO	HC	NO _x	Particolato*	Unità di misura
Autoveicolo e Autocarri leggeri M	Benzina	1	0,075	0,06	0,005	g/km
	Diesel	0,5	0,25 (HC+No _x)	0,02	0,005	
Autocarri leggeri N < 1250kg Autocarri leggeri N < 1700kg Autocarri leggeri N >1700kg	Benzina	1	0,075	0,06	0,005	g/km
		1,81	0,1	0,075		
		2,27	0,12	0,082		
	Diesel	0,5	0,25 (HC+No _x)	0,2	0,005	
		0,63	0,32 (HC+No _x)	0,26	0,005	
0,74	0,38 (HC+No _x)	0,31	0,005			
Autocarri pesanti/Autobus	qualsiasi	1,5	0,46	2	0,02	g/kWh

2. VERSO L'EURO 6

La normativa europea *Euro* è in continua evoluzione e presto la normativa *Euro 5* verrà sostituita dalla più restrittiva *Euro 6*. Riportiamo una tabella che riassume i limiti di emissione per gli autobus e autocarri pesanti che verranno immatricolati con la futura normativa.

La normativa di riferimento per i veicoli pesanti è la seguente:

- Regolamento (CE) N. 595/2009 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 18 giugno 2009.

Normativa Euro VI per motori di veicoli pesanti						
Mezzo/classe veicolo	Motorizzazione	CO	HC	NO _x	Particolato*	Unità di misura
Autocarri pesanti/Autobus	qualsiasi	1,5	0,13	0,4	0,01	g/kWh

La nuova normativa, rispetto alla precedente, fissa limiti molto più severi per quanto concerne le emissioni di idrocarburi e ossidi di azoto; è prevista inoltre una sensibile riduzione del particolato emesso dal veicolo.

CAPITOLO 4 : IL TRASPORTO PUBBLICO URBANO

Con la definizione di *Trasporto Pubblico Locale* si intende l'insieme delle modalità di trasporto pubblico (autobus, metropolitana, filovia ecc.) destinata alla mobilità dell'utenza su scala locale. Il *Trasporto Pubblico Urbano* costituisce invece la parte di Trasporto Pubblico Locale che opera esclusivamente nei centri urbani, ed è generalmente gestito dalle Municipalizzate, le quali fanno riferimento ai Comuni di appartenenza.

Il trasporto pubblico di massa si instaura per la prima volta in Europa e nel mondo alla fine del '700, in seguito ad alcune innovazioni introdotte dalla Rivoluzione Industriale e, quindi, dalla nascente Industria dell'acciaio. È infatti questo nuovo materiale a permettere la costruzione di linee di binari su cui far correre i primi convogli, che permettono di rendere più confortevole gli spostamenti su terra rispetto al transito di mezzi dotati di ruote in legno sulle tortuose strade dell'epoca. Inoltre l'invenzione del cuscinetto a sfera consente di risolvere i grossi problemi di attrito tra asse e ruota dei mezzi. Nel 1863 viene inaugurata la prima linea metropolitana sotterranea a Londra, dotata di carrozze a vapore, che garantisce un servizio all'utenza con corse ogni 10 minuti. Nel 1877 l'utilizzo del motore a vapore viene applicato anche ai convogli destinati alle linee tranviarie, anche se, già nel 1881 i progressi nel settore elettrico rendono possibile l'elettrificazione di tali linee, con i conseguenti vantaggi in termini di leggerezza dei mezzi e di inquinamento dell'aria. La prima linea metropolitana a trazione elettrica viene invece completata a Londra nel 1890. Da questo periodo fino al 1920 lo sviluppo tramviario conosce uno sviluppo notevole in tutto il mondo. In seguito, grazie alla sempre maggiore economicità degli pneumatici, del miglioramento del manto stradale, dell'avvento dell'automobile e del trasporto privato, le linee tranviarie iniziano un periodo di declino e vengono via via sostituite da linee di filobus e autobus. Tuttavia, negli ultimi anni, nelle città del centro Europa è in corso un processo di rivalutazione del trasporto locale su rotaia e dei tram in modo particolare, i quali presentano vantaggi notevoli per l'elevata capacità di trasporto, nonché di costi di esercizio ed emissioni inquinanti più bassi rispetto agli autobus di linea.

Attualmente il trasporto pubblico locale, ed in particolare quello urbano, ricoprono un valore strategico estremamente importante per un Paese. I notevoli problemi di inquinamento delle aree urbane ed extra-urbane delle città, nonché i problemi di congestione del traffico veicolare, sono i principali motivi per spingere gli enti pubblici ad investire risorse per potenziare e mantenere in efficienza questa forma di trasporto.

1. LE TIPOLOGIE DI TRASPORTO URBANO

Il trasporto urbano si serve di diversi mezzi di trasporto, ognuno con caratteristiche, pregi e difetti diversi tra loro, i quali, se opportunamente integrati tra loro, offrono all'utenza un servizio molto più conveniente rispetto al trasporto privato. Prima di procedere ad una classificazione dei mezzi di trasporto esistenti, occorre definire con chiarezza i seguenti termini che saranno utilizzati per definire le caratteristiche delle tipologie di mezzi di trasporto:

- **Velocità commerciale:** è la velocità media della linea del mezzo di trasporto considerato, tenendo conto anche del tempo speso per le fermate;
- **Zona d'influenza:** è la striscia, generalmente calcolata tra i 600-700 metri, che si ritiene possa essere agevolmente servita dal mezzo di trasporto;
- **Capacità di trasporto:** è la capacità di servire un numero elevato di utenze ad ogni corsa effettuata.

Un sistema di trasporto urbano ben progettato dovrà quindi prevedere l'integrazione tra linee ad alta velocità commerciale e elevata capacità di trasporto, come possono essere le metropolitane o i passanti ferroviari, e linee ad alta zona di influenza, come le linee di tram, autobus e filobus. In tal modo si garantisce la presenza di una serie di arterie principali che permettano spostamenti rapidi tra zone lontane della città, le quali vengono connesse ad una rete capillare di collegamenti che coprono tutto il territorio urbano.

Una prima classificazione dei mezzi adibiti al trasporto urbano su terra (escludendo quindi eventuali funicolari come nel caso della città di Como) può essere la seguente:

- **Trasporti su rotaia:** questa categoria include treni suburbani, metropolitane e tram;
- **Trasporti su gomma:** appartengono a questa categoria filobus e autobus.

2. TRASPORTI SU ROTAIA

I mezzi su rotaia, a differenza dei veicoli su gomma, hanno la peculiarità di muoversi solo ed esclusivamente sulla sede di binari ad essi adibita. Ciò richiede un'area riservata in cui ubicare la linea ed investimenti iniziali per realizzare la posa dei binari. Sia le linee metropolitane, sia le tramvie sono generalmente alimentate da linee elettriche che sormontano i binari.

2.1. LINEE METROPOLITANE



Figura 4-1: metropolitana di Milano

Le linee metropolitane sono costituite da piccoli convogli ferroviari che hanno la funzione di trasportare l'utenza, con una velocità commerciale relativamente alta, da un punto della città ad un altro relativamente lontano. I percorsi delle linee vengono progettati in modo da collegare le aree strategiche di una città, ossia quelle interessate da un flusso di utenza molto alto. Le sedi proprie, sotterranee, in superficie o anche in sopraelevazione, su cui vengono posati i binari, richiedono investimenti notevoli, giustificabili solo nelle grandi città in cui i flussi di utenza sono ingenti. Le stazioni, poste generalmente a non meno di 400 metri di distanza tra loro nel centro della città, più distanti nelle aree periferiche, vengono poste nei punti nevralgici della città, come aree di interesse turistico, stazioni, zone industriali o poli universitarie.

Al fine di garantire un'elevata efficienza delle linee metropolitane, la norma UNI 8379-2000 (Allegato B) fornisce, inoltre, alcuni parametri caratteristici delle metropolitane:

- **Portata potenziale minima per senso di marcia:** 24000 passeggeri/ora;
- **Frequenza potenziale minima per direzione:** 3 minuti;
- **Capacità potenziale di ogni convoglio:** 1200 persone;
- **Distanza media stazioni/fermate:** 600–1000 m;
- **Velocità commerciale minima:** 25 km/h;
- **lunghezza massima del convoglio:** 150 metri.

Tra le altre caratteristiche, contemplate nel medesimo allegato, per le metropolitane è previsto l'incarozzamento a raso.

I parametri sopra indicati sono da considerarsi comunque puramente indicativi, da intendersi come un utile strumento di riferimento per la buona costruzione dell'opera.

2.2. LINEE TRANVIARIE



Figura 4-2: tram

Il tram è un veicolo adibito al trasporto urbano che circola su binari incorporati nella sede stradale oppure, dove lo spazio lo consenta, su sede propria. La caratteristica principale di questo mezzo è quella di combinare una grande capacità di trasporto ad un'elevata frequenza di fermate. Ciò comporta inevitabilmente una velocità commerciale inferiore a quella delle metropolitane, però con il vantaggio di coprire una zona di influenza maggiore rispetto a queste ultime. Per questa ragione le linee tranviarie risultano l'ideale per il trasporto di un numero elevato di persone a distanze limitate, costituendo nelle grandi città il collegamento ideale tra le stazioni della metropolitana e altre zone della città non coperte da essa. Il basso impatto ambientale ed il costo di esercizio relativamente basso rendono il tram preferibile all'autobus nelle zone ad alta densità di utenza, ossia nelle zone dove i costi di realizzazione della linea vengono ammortizzati dai minori costi di esercizio. Uno dei problemi che rendono complessa la realizzazione di tramvie è il fatto che, spesso, la rete stradale urbana presenta uno spazio sufficiente per la realizzazione di una sede propria. In questa circostanza la posa dei binari deve essere eseguita direttamente sulla sede stradale, costituendo un intralcio alla circolazione veicolare.

3. TRASPORTI SU GOMMA

I mezzi pubblici "su gomma" adibiti al trasporto urbano presentano il vantaggio, rispetto ai mezzi su rotaia, di muoversi sulla sede stradale, riducendo così i costi di investimento per la realizzazione delle linee. Esistono due tipologie di mezzi su gomma: gli **autobus**, che sono alimentati da motori endotermici, ibridi o elettrici, i quali non necessitano di una linea esterna per attingere l'alimentazione elettrica; i **filobus**, mezzi elettrici simili esteticamente agli

autobus, ma che utilizzano una linea aerea di alimentazione elettrica che segue l'andamento della linea.

3.1. AUTOLINEE



Figura 4-3 autobus di linea a Bergamo

Gli autobus costituiscono uno dei principali mezzi di collegamento urbani presenti nelle città. Grazie all'assenza di impianti fissi, come l'installazione di binari o linee elettriche aeree, la costituzione di un'autolinea risulta la soluzione più semplice e versatile. Gli autobus, infatti, si muovono agevolmente nel traffico, utilizzando, dove presenti, le corsie preferenziali ad essi dedicate. Rispetto ai tram presentano capacità di trasporto minori, ma risultano più adatti nelle aree di città in cui le limitate dimensioni delle vie o la tortuosità dei percorsi rendono tecnicamente impossibile realizzare tramvie. L'utilizzo dei bus, fatta eccezione per le versioni elettriche, contribuisce, a differenza dei tram e dei filobus, alla generazione di inquinamento atmosferico. Inoltre i costi di gestione delle autolinee, nei casi di grandi flussi di utenza, risultano essere decisamente maggiori di quelli delle tramvie, che restano la prima scelta nel caso di flussi di utenza decisamente elevati.

3.2. FILOVIE



Figura 4-4: filobus a Milano

I filobus sono veicoli simili agli autobus, ma che differiscono da essi per il fatto che presentano un motore elettrico alimentato da una linea aerea esterna. Rispetto ai tram risultano più flessibili, in quanto sono in grado di aggirare eventuali ostacoli presenti sulla carreggiata, pur restando vincolati a seguire il percorso della linea aerea. Rispetto agli autobus risultano invece meno inquinanti e decisamente più silenziosi. Il problema dei filobus è che se, a causa di un errore del conducente, le aste di captazione perdono il contatto con la linea elettrica il veicolo si arresta non avendo più alimentazione elettrica. In questi casi si rende necessario un riposizionamento manuale del veicolo e delle aste di captazione, operazione alquanto scomoda.

4. L'INQUINAMENTO DEL TRASPORTO URBANO

Per rendere i centri urbani delle città più vivibili e meno inquinati occorre realizzare un sistema di trasporti pubblici urbano che sia una valida alternativa rispetto all'utilizzo del mezzo privato. In tal modo si creerebbero i presupposti per una seria riduzione del traffico e dei mezzi circolanti, con una seria riduzione delle emissioni inquinanti relative ai mezzi privati. Il grosso problema dei centri urbani è la presenza dello smog, una miscela di gas nocivi per l'uomo e per l'ambiente che rende l'aria inquinata. Le grandi concentrazioni di smog si registrano nelle aree a maggior densità di popolazione, in cui le emissioni di gas nocivi, prodotte per lo più da veicoli a motore endotermico e dagli impianti di riscaldamento, sono più marcate.

Tralasciando il discorso degli impianti di riscaldamento che esula dal discorso dei mezzi di trasporto, possiamo, come già fatto, affermare con certezza che una rete di mezzi pubblici funzionante e utilizzata dall'utenza porta a una

sostanziale riduzione di mezzi privati circolanti, e quindi una riduzione di traffico e inquinamento.

Circoscrivendo il discorso all'inquinamento prodotto dal trasporto urbano occorre fare una prima distinzione tra tipologie di veicoli per quanto riguarda le emissioni in loco:

1. Veicoli che emettono gas tossici "in loco";
2. Veicoli che non emettono gas tossici "in loco".

4.1. VEICOLI CHE EMETTONO GAS TOSSICI "IN LOCO"

La categoria di questi veicoli è quella di essere dotati di un motore endotermico a bordo, e comprende essenzialmente gli autobus convenzionali e gli autobus ibridi con motore endotermico o a microturbina. I mezzi appartenenti a questa categoria emettono gas di scarico quando il motore endotermico è funzionante, pertanto non rappresentano la migliore soluzione per i centri urbani già afflitti da grossi problemi di inquinamento. Contrariamente a quanto si possa pensare, non è affatto detto che questi mezzi siano più inquinanti di altri: infatti i mezzi non dotati di motori endotermici sono alimentati con corrente elettrica o utilizzano l'idrogeno come vettore di energia, ed è importante ribadire che la produzione di corrente elettrica e dell'idrogeno sono, salvo rari casi di provenienza da fonti rinnovabili, risultati di un processo inquinante. Infatti, per esempio, veicoli ibridi a microturbina risultano molto performanti dal punto di vista ambientale, pur emettendo gas di scarico. Inoltre, spesso, questa categoria di mezzi è più semplice da implementare in quanto non richiede grosse spese impiantistiche e non implica la realizzazione di sedi proprie per i veicoli.

4.2. VEICOLI CHE NON EMETTONO GAS TOSSICI "IN LOCO"

Questa categoria di veicoli comprende tutti i mezzi su rotaia alimentati da linee elettriche, ossia le metropolitane e i tram, i filobus e gli autobus con funzionamento puramente elettrico o con la tecnologia "fuel cell". Come anticipato nel precedente paragrafo, questi veicoli, pur non emettendo emissioni "in loco", generano comunque emissioni inquinanti a monte, ossia dove è ubicata la centrale elettrica dalla quale attingono l'energia. Il vantaggio di questi veicoli per i centri urbani è comunque evidente, in quanto non scaricando emissioni nocive "in loco", non contribuiscono ad incrementare le concentrazioni di gas inquinanti, favorendo la salvaguardia della salute e dei monumenti storici. Di contro questi veicoli risultano più costosi o richiedono comunque strutture o impianti ausiliari, come le stazioni di ricarica per gli autobus a ricarica induttiva, o sedi proprie, come le rotaie per tram o metropolitane, che rappresentano costi aggiuntivi o ingombri che non sempre sono compatibili con l'architettura della città.

Tra queste categorie di veicoli possiamo definire veicoli **completamente non inquinanti** i veicoli che non emettono alcun tipo di emissione in atmosfera, utilizzando quindi esclusivamente energia proveniente da fonti rinnovabili.

5. LE STRATEGIE PER RIDURRE L'INQUINAMENTO DA TRASPORTO URBANO

Una volta illustrate brevemente le caratteristiche delle principali classi di veicoli adibiti al trasporto pubblico locale e visto quali di questi veicoli generano emissioni nocive "in loco", passiamo ad analizzare alcune strategie per ridurre l'inquinamento da trasporto urbano.

5.1. PRIMA STRATEGIA: POTENZIARE IL SERVIZIO PUBBLICO SU ROTAIA

Una prima strategia sarebbe quella di sostituire, qualora sussistano le condizioni tecniche ed economiche per farlo, le autolinee urbane con le più ecologiche tramvie. Inoltre, nei grandi centri urbani, il potenziamento delle linee metropolitane, permetterebbe di ridurre notevolmente il tempo di attraversamento della città, con conseguenti incentivi alle persone ad usare i mezzi di trasporto pubblici.

In Fig.3.5 è riportato un confronto tra alcune città europee per quanto riguarda l'estensione della rete metropolitana.

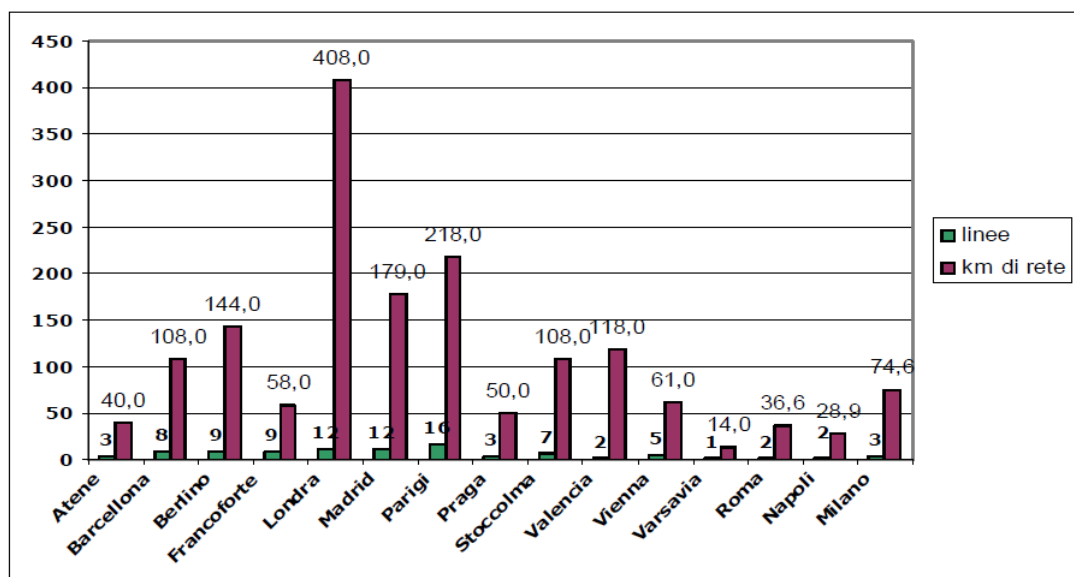


Figura 4-5: numero di linee ed estensione della rete metropolitana in alcune città europee (dati UE anno 2002, dati Italia anno 2004) [4]

Come si nota dalla tabella le reti metropolitane delle principali città italiane presentano un'estensione in media inferiore a quelle delle altre città europee. Naturalmente per valutare l'efficienza del servizio offerto dalle città occorrerebbe eseguire delle indagini più specifiche, ad esempio calcolare i

chilometri di rete presenti in rapporto alla superficie della città, ma appare comunque evidente come i soli 36,6 km di rete metropolitana di una città come Roma, rispetto ai 408 km di Londra, ai 218 di Parigi oppure ai 170 di Madrid, siano assolutamente al di sotto della media europea.

In Fig. 3.6 è invece rappresentata la distribuzione delle reti tranviarie delle principali città di Europa.

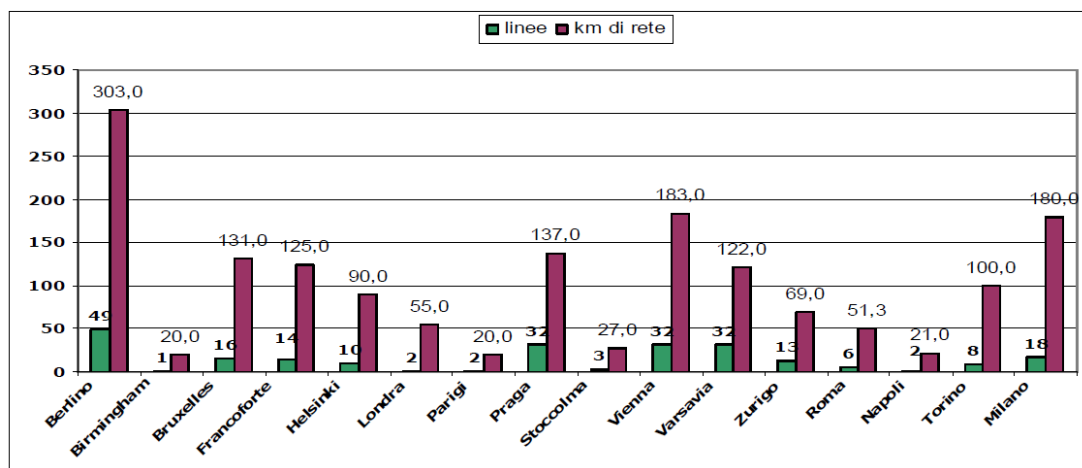


Figura 4-6: numero di linee ed estensione della rete tranviaria di alcune città europee (dati UE anno 2002, dati Italia anno 2004) [4]

Per quanto riguarda lo sviluppo della rete tranviaria, in Italia troviamo scenari opposti: da una parte città come Milano e Torino presentano un notevole numero di tramvie, specie se rapportiamo i chilometri di percorso con il numero di abitanti serviti, mentre dall'altra città come Roma e Napoli non puntano molto sui tram come mezzo di trasporto urbano.

In Tab.3-1 è indicata, per alcuni anni, la diffusione dei tram e delle "ferrovie e metropolitane leggere" in alcuni Stati dell'Unione Europea.

Tabella 4-1: Diffusione di tram e "light rail systems" nell'UE

Anno	Italia	Francia	Germania	Regno Unito	UE 15
1930	50	79	131	104	438
1960	14	8	86	4	157
1990	4	5	56	3	92
2000	4	11	57	8	102

Analizzando la cronologia dei dati, si evince come fino al 1990 si è assistito in tutta Europa ad un processo di smantellamento delle linee. Fino a quel periodo infatti il tram veniva considerato quasi come un ostacolo alla crescente circolazione di autovetture nei centri abitati, e veniva visto come un mezzo obsoleto, da sostituire con altri mezzi pubblici alternativi, quali l'autobus. Tale tendenza si è invertita a partire dagli Anni Novanta, quando, grazie anche alla necessità di ridurre le fonti di inquinamento delle città, è ripresa la costruzione di nuove tramvie in tutta Europa: in particolare sono state costruite nuove linee

in sei città della Francia, cinque nel regno Unito e una in Germania. Solo in Italia non si è registrato nessun nuovo investimento in tal senso.

Tuttavia nella città di Firenze, nel 2010, è entrata in funzione la linea 1 della nuova tramvia, che ha la funzione di collegare la Stazione di S. Maria Novella al comune di Scandicci. Il notevole successo di utenza che ha avuto la nuova rete urbana è stato definito da Palazzo vecchio “un successo, oltre ogni più rosea previsione” [5].

5.2. SECONDA STRATEGIA: INVESTIRE NEGLI AUTOBUS ECOLOGICI

Qualora non sia possibile o conveniente investire nei tram, l'utilizzo degli autobus diventa una scelta obbligata per il trasporto pubblico. Il sostanziale problema degli autobus, rispetto ai più ecologici mezzi su rotaia, è dato dalle emissioni inquinanti generate dai motori endotermici che li spingono. Gli autobus della categoria “Pre-Euro”, ossia quelli precedenti all'anno 1988, emettevano una quantità enorme di sostanze tossiche che oggi sono state in gran parte ridotte. Nell'anno 1988 è stata introdotta una prima normativa per i veicoli pesanti volta a limitare le emissioni inquinanti. A partire dall'anno 1991, sono state introdotte le normative Euro analizzate nel Cap. 2, che hanno costretto i costruttori di veicoli ad adottare accorgimenti per ridurre le emissioni di sostanze inquinanti emesse dai motori endotermici.

Tabella 4-2: emissione di sostanze inquinanti per veicoli pesanti

Normativa	CO	HC	NO _x	Particolato	Unità di misura
Euro I	4,5	1,1	8	0,36	g/kWh
Euro II	4	1,1	7	0,15	g/kWh
Euro III	2,1	0,66	5	0,1	g/kWh
Euro IV	1,5	0,46	3,5	0,02	g/kWh
Euro V	1,5	0,46	2	0,02	g/kWh
Euro VI	1,5	0,13	0,4	0,01	g/kWh

Come si può osservare la Tab.3-2, le emissioni di particolato e ossidi di azoto sono state drasticamente ridotte in circa venti anni di evoluzione della normativa, anche se il futuro deve orientarsi verso lo sviluppo di tecnologie alternative dei motori.

In tal senso, lo sviluppo di nuovi motori elettrici ed ibridi apre nuovi scenari per quanto riguarda la motorizzazione degli autobus urbani: infatti la velocità ridotta di percorrenza di tali tratte e la necessità di continue partenze da fermo del mezzo, rende molto conveniente, data la consistente riduzione dei consumi registrata, il loro utilizzo. Il principale ostacolo alla diffusione di mezzi ibridi o elettrici è dato dal fatto che, essendo ancora in fase di sviluppo e non prodotti su larga scala, i costi di acquisto dei singoli mezzi sono molto elevati. Per far fronte a questo problema gli enti pubblici dovrebbero creare delle forme di incentivazione per favorire il mercato di questi nuovi mezzi, contribuendo così all'incremento del numero di mezzi venduti e alla loro riduzione dei costi.

CAPITOLO 5 : L'INQUINAMENTO DEI MEZZI PUBBLICI IN LOMBARDIA

In questo capitolo ci proponiamo di analizzare i dati sulla sostenibilità ambientale del trasporto urbano nei principali capoluoghi lombardi. Il primo aspetto interessante da analizzare è individuare quali tipologie di trasporto pubblico vengono ora adottate nelle città analizzate, al fine di comprendere quanto incida attualmente il trasporto pubblico su gomma rispetto alla totalità dei mezzi operanti. A tal fine, in Tab. 5-1 viene riportato, per ogni città, il numero totali di mezzi, di autobus e la percentuale di autobus rispetto ai mezzi totali.

Tabella 5-1: composizione dei mezzi di trasporto urbano nei capoluoghi lombardi

Città	dati aggiornati al:	azienda di trasporto urbano	totale mezzi	autobus	% di autobus sul tot. mezzi
Milano	31.12.2010	ATM	2979	1415	47,50
Brescia	31.12.2010	Brescia Trasporti SPA	236	236	100
Bergamo	nd	ATB	192	192	100
Como	31.12.2010	Co.Mo. Fun&Bus Scarl	67	65	97,01
Varese	31.12.2010	CTP Insubria	84	84	100
Monza e Brianza	31.12.2010	Nord Est trasporti	61	61	100
Pavia*	30.04.2011	LINE	107	107	100
Lodi*	30.04.2011	LINE			
Sondrio	31.12.2010	STPS S.p.A	66	66	100
Cremona	31.12.2010	Cremona Trasporti S.c. a r.l.	108	108	100
Mantova	31.12.2010	APAM	261	261	100
Lecco	31.12.2011	Lecco trasporti	100	100	100

* = dati relativi alla sola area urbana di Pavia, Lodi, Vigevano e Cernusco sul Naviglio

Si nota immediatamente che l'unica città che dispone di mezzi diversi da autobus (fatta eccezione per la funicolare di Como) è Milano, la quale dispone di Filobus, Tram e Metropolitane oltre ai comuni Autobus.

Data la grande diffusione degli autobus come trasporto urbano, andiamo ora ad analizzare più nel dettaglio la composizione di questi mezzi, identificando eventuali realtà in cui siano circolanti mezzi ibridi o elettrici (Tab. 5-2).

Tabella 5-2: tipologie di autobus nelle città

Città	dati aggiornati al:	età media bus	veicoli ibridi	veicoli a metano	numero veicoli a H
Milano	31.12.2010	6,64 anni	5	0	3
Brescia	31.12.2010	nd	4	113	0
Bergamo	nd	nd	0	25	0
Como	31.12.2010	nd		0	0
Varese	31.12.2010	nd	0	0	0
Monza e Brianza	31.12.2010	nd	nd	nd	nd
Pavia*	30.04.2011	nd	nd	nd	nd
Lodi*	30.04.2011				
Sondrio	31.12.2010	nd	nd	nd	nd
Cremona	31.12.2010	nd	0	0	0
Mantova	31.12.2010	9 anni	nd	nd	nd
Lecco	31.12.2011	nd	0	0	0

* = dati relativi alla sola area urbana di Pavia, Lodi, Vigevano e Cernusco sul Naviglio

Nonostante manchino i dati relativi a parecchie città, possiamo trarre alcune considerazioni relative alle città di Milano, Bergamo e Brescia. Nella città di Milano l'età media dei bus è inferiore ai 7 anni, quindi relativamente bassa, il che significa una diminuzione delle emissioni dovute all'utilizzo di mezzi relativamente moderni. Sempre a Milano sono in atto sperimentazioni di autobus ibridi (presenti anche a Brescia) e a idrogeno. Le città di Brescia e di Bergamo, per ridurre le emissioni nocive, hanno invece deciso di intraprendere un processo di metanizzazione della flotta di autobus.

Dopo aver fatto una breve panoramica dei capoluoghi lombardi, dedichiamo i paragrafi successivi ad un'analisi della situazione nelle singole città analizzate.

1. MILANO

1.1. DATI ATM SULLA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

Nel *Rapporto per la Sostenibilità Ambientale* pubblicato da ATM nel 2009 sono illustrati i principali interventi compiuti dall'azienda di trasporti milanese per migliorarne l'impatto ambientale.

Come sappiamo, Milano presenta una rete di trasporto pubblico composto per circa la metà da autobus, veicoli a motore endotermico, e per un'altra metà da veicoli alimentati da una rete elettrica esterna, ossia metropolitane, filobus e tram. Quindi, oltre alla qualità delle emissioni dei motori endotermici degli autobus, occorre anche considerare, ai fini di una completa analisi, anche gli interventi per rendere più "verde" la corrente elettrica utilizzata dai mezzi elettrici. A tal fine, lo specchio in Fig. 5.1 illustra tutti gli interventi strategici compiuti nel triennio da ATM, che consistono nel miglioramento dell'efficienza energetica, nell'incremento della produzione di energia elettrica pulita

mediante l'installazione di nuovi pannelli fotovoltaici, e, ovviamente, investendo nell'acquisto di mezzi ecologici.

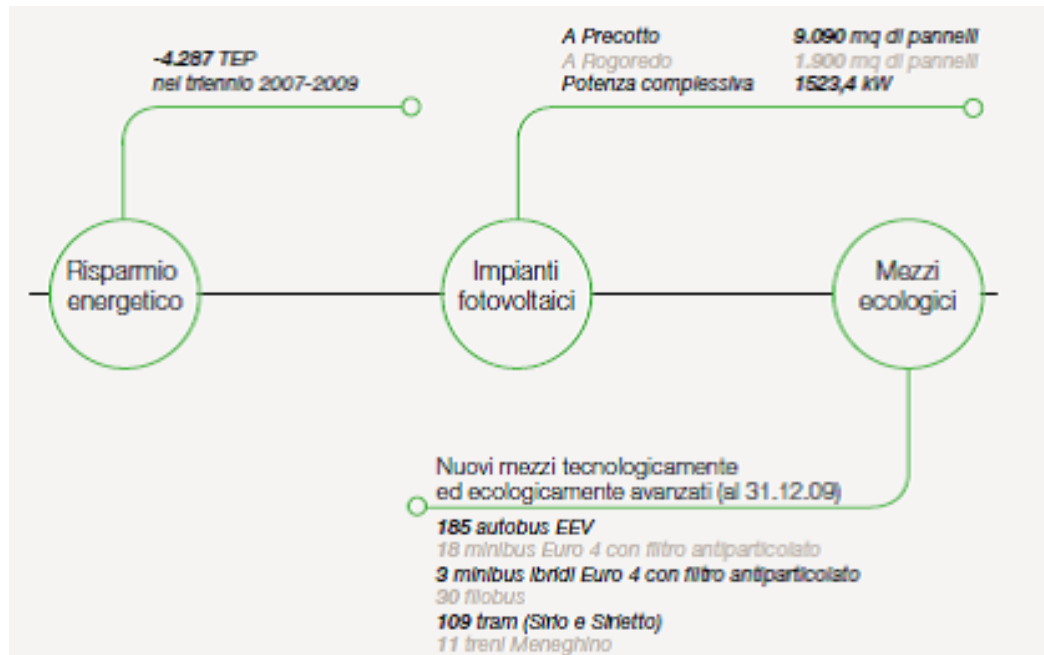


Figura 5-1: interventi nel triennio 2007-2009

Volendo concentrare la nostra analisi sui soli autobus, al fine di fare una comparazione con gli altri capoluoghi lombardi, i quali si servono prevalentemente di questo mezzo per il trasporto pubblico urbano, riportiamo in Fig. 5.2 la composizione delle motorizzazioni del parco autobus di ATM al 31.12.2009.

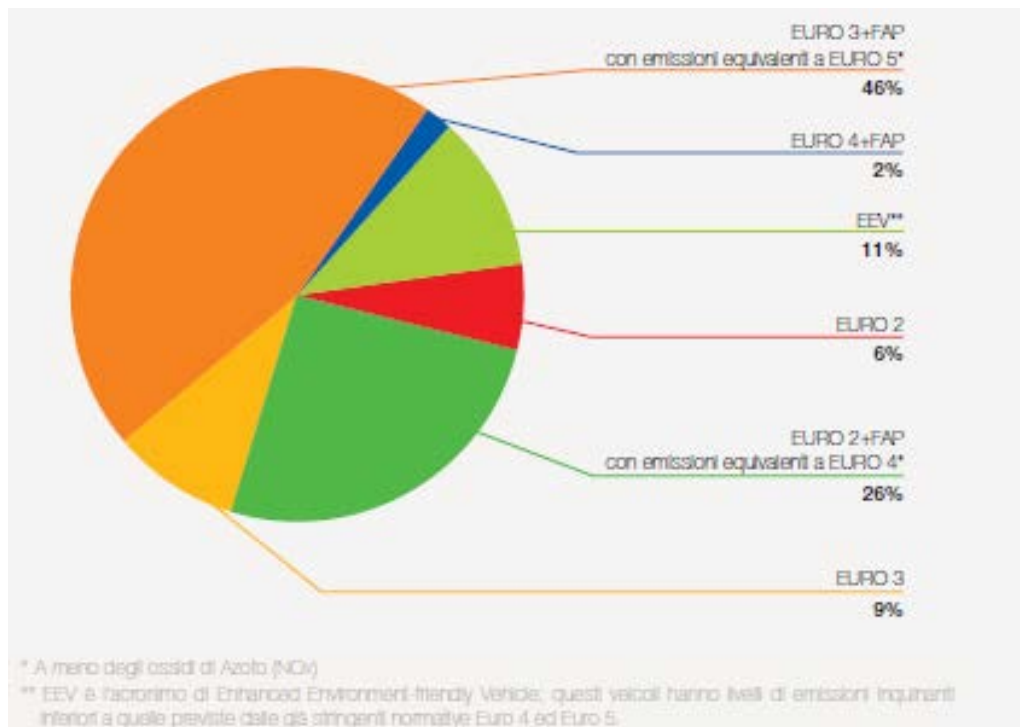


Figura 5-2: composizione delle motorizzazioni degli autobus di ATM

ATM fornisce inoltre la composizione del numero di autobus al termine di ogni anno del triennio 2007-2009 (Fig.5.3).

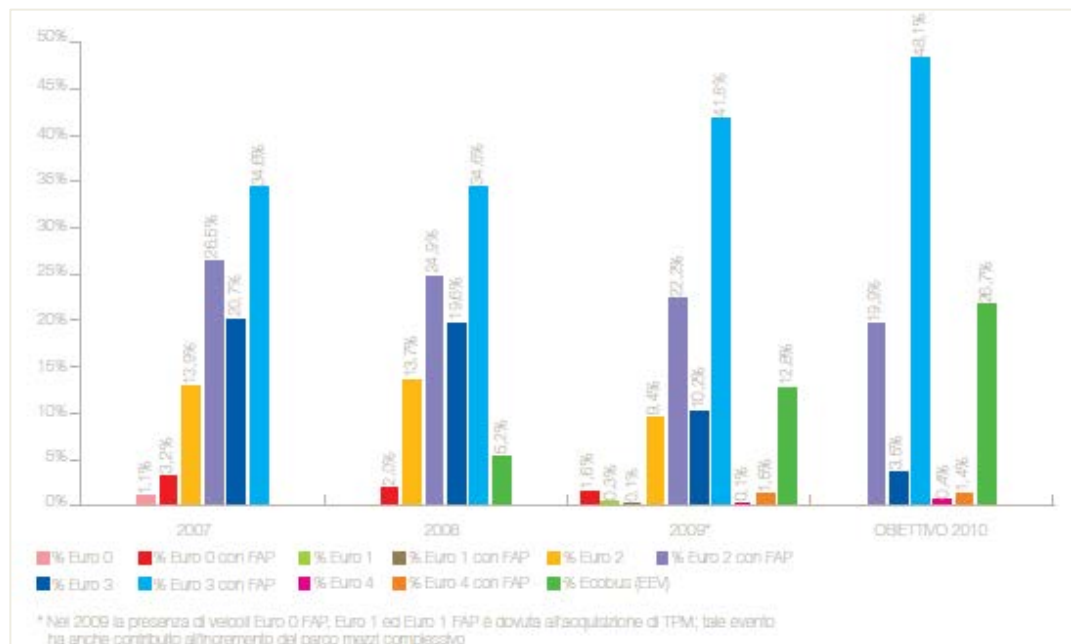


Figura 5-3: composizione del numero di autobus al termine di ogni anno del triennio 2007-2009

Come si nota dai grafici in Fig. 5.2 e 5.3, ATM ha progressivamente ridotto gli autobus “Euro 0”, sostituendoli con i moderni ed ecologici “EEV”. Inoltre sono stati installati, sempre nel triennio, filtri anti-particolato su parecchi mezzi “Euro 2” ed “Euro 3”, abbattendo così, secondo ATM, notevolmente le emissioni.

Per completezza di trattazione, ATM riporta uno specchietto in cui illustra i livelli dei principali inquinanti emessi in atmosfera dalle varie motorizzazioni presenti negli autobus secondo la normativa vigente (Tab-5.3). Inoltre ATM riporta le emissioni, ottenute da prove al banco, di particolato e di ossidi di azoto dei veicoli a cui è stato applicato il filtro anti-particolato. È curioso osservare che questi veicoli avrebbero, secondo ATM, emissioni di particolato inferiori a quelle dei veicoli EEV!

Tabella 5-3: emissioni inquinanti delle motorizzazioni degli autobus ATM

	DIRETTIVE	PT [G/KWH]	NOx [G/KWH]
EURO 0	88/77/CE	N.D.	14,4
EURO 1	91/542/CE	0,36	8
EURO 2	91/542/CE	0,15	7
EURO 2 FAP	---	0,015*	6,5*
EURO 3	2005/55/CE	0,1	5
EURO 3 FAP	---	0,006*	4,94*
EURO 4	2005/55/CE	0,02	3,5
EURO 5	2005/55/CE	0,02	2
EEV	2005/55/CE	0,02	2

* I valori relativi ad Euro 2 FAP ed Euro 3 FAP sono ricavati da prove al banco effettuate su autobus ATM

1.2. STIMA DELL'INQUINAMENTO DEGLI AUTOBUS URBANI

I dati riportati nel precedente paragrafo ci permettono di elaborare le seguenti considerazioni in merito all'inquinamento prodotto. In realtà l'inquinamento totale I_{tot} dell'azienda di trasporti è dato da:

$$I_{tot} = I_{1autobus} \cdot N_{autobus}$$

Dove:

- $I_{1autobus}$ = inquinamento medio dell'"autobus tipo", ossia la media dell'inquinamento di tutti i bus di ATM;
- $N_{autobus}$ = numero totale di autobus di ATM.

Dato che per ridurre l'inquinamento non ha senso ridurre il numero di autobus, in quanto significherebbe ridurre il servizio pubblico e costringere l'utenza a servirsi di mezzi privati ben più inquinanti, occorre lavorare sulla qualità degli autobus, ossia ridurre il parametro $I_{1autobus}$.

Inoltre, dato che ogni città, a causa della differente conformazione del territorio, dell'utenza da servire, nonché da altri parametri, necessita di un numero di mezzi diverso, l'unico modo per confrontare la qualità ambientale del servizio pubblico degli autobus di linea delle principali città lombarde è ragionare sul parametro $I_{1autobus}$. Infatti, se terremmo conto del numero di autobus in circolazione per valutare le emissioni prodotte concluderemmo erroneamente che Milano è la città più inquinata dagli autobus urbani. Se invece tale analisi fosse effettuata in modo "specifico", ossia dividendo il risultato per il numero totale di mezzi, si avrebbe un quadro più realistico sulle emissioni.

Come abbiamo detto, le tipologie di motorizzazioni degli autobus ATM dal 2007 al 2009 spaziano dagli "Euro 0" ai più moderni "Euro 5". Quindi, per valutare

quanto inquina l'autobus tipo, che abbiamo precedentemente definito $I_{1\text{autobus}}$, dobbiamo capire quanto peso abbia ogni tipologia di motorizzazione rispetto al totale degli autobus: in buona sostanza, assunto come 100 il totale di autobus, se avessimo 20 autobus "Euro 1", il peso di questi autobus per ottenere l'inquinamento dell'autobus tipo sarà 0,2, e così via per le altre classi di motorizzazioni presenti. Calcolato il peso che ha sul totale ogni classe di autobus (in Tab 5-4 è rappresentato dalle colonne 2007, 2008 e 2009), possiamo calcolare l'inquinamento pesato I_{pesato} di particolato e di ossidi di azoto del tipo di autobus analizzato con la relazione seguente:

$$I_{\text{pesato}} = I_{\text{classe analizzata}} \cdot \%_{\text{classe analizzata}}$$

Dove:

- $I_{\text{classe analizzata}}$ = quantitativo di inquinante emesso dalla classe considerata di autobus (valori delle colonne PT o Nox di Tab 5-4);
- $\%_{\text{classe analizzata}}$ = peso per ogni classe analizzata.

Tabella 5-4: composizione del parco mezzi ATM [%]

	2007	2008	2009	PT [G/kWh]	Nox [G/kWh]
Euro 0	1,1	0	0	0,4	14,4
Euro 0 con FAP	3,2	2	1,6	0,03	14,4
Euro 1	0	0	0,3	0,36	8
Euro 1 con FAP	0	0	0,1	0,03	8
Euro 2	13,9	13,7	9,4	0,1	7
Euro 2 con FAP	26,5	24,9	22,2	0,006	6,5
Euro 3	20,7	19,6	10,2	0,02	5
Euro 3 con FAP	34,6	34,6	41,8	0,006	4,94
Euro 4	0	0	0,1	0,02	3,5
Euro 4 con FAP	0	0	1,5	0,02	2
Veicoli EEV	0	5,2	12,8	0,02	2

Seguendo il procedimento sopra indicato, con questi dati è ora possibile calcolare, sempre per il triennio considerato, le emissioni di particolato e ossidi di azoto prodotte (Tab.5-5, Tab.5-6).

Tabella 5-5: emissioni di particolato

	PT 2007	PT 2008	PT 2009
Euro 0	0,0044	0	0
Euro 0 con FAP	0,00096	0,0006	0,00048
Euro 1	0	0	0,00108
Euro 1 con FAP	0	0	0,00003
Euro 2	0,0139	0,0137	0,0094
Euro 2 con FAP	0,00159	0,001494	0,001332
Euro 3	0,00414	0,00392	0,00204
Euro 3 con FAP	0,002076	0,002076	0,002508
Euro 4	0	0	0,00002
Euro 4 con FAP	0	0	0,0003
Veicoli EEV	0	0,00104	0,00256
Totale emissioni specifiche	0,027066	0,02283	0,01975

Tabella 5-6: emissioni di ossido di azoto

	Nox 2007	Nox 2008	Nox 2009
Euro 0	0,1584	0	0
Euro 0 con FAP	0,4608	0,288	0,2304
Euro 1	0	0	0,024
Euro 1 con FAP	0	0	0,008
Euro 2	0,973	0,959	0,658
Euro 2 con FAP	1,7225	1,6185	1,443
Euro 3	1,035	0,98	0,51
Euro 3 con FAP	1,70924	1,70924	2,06492
Euro 4	0	0	0,0035
Euro 4 con FAP	0	0	0,03
Veicoli EEV	0	0,104	0,256
Totale emissioni specifiche	6,05894	5,65874	5,22782

Naturalmente questo ragionamento può essere avallato solo se si considera l'ipotesi, più o meno realistica, che tutti gli autobus coprano lo stesso numero di chilometri in un anno. Si è infatti reso necessario fare questa ipotesi perché non sono disponibili dati relativi alle percorrenze medie di ogni classe di autobus.

Possiamo ora raffrontare i valori delle emissioni specifiche per ogni inquinante considerato anno per anno, realizzando un grafico (Fig. 5.4).

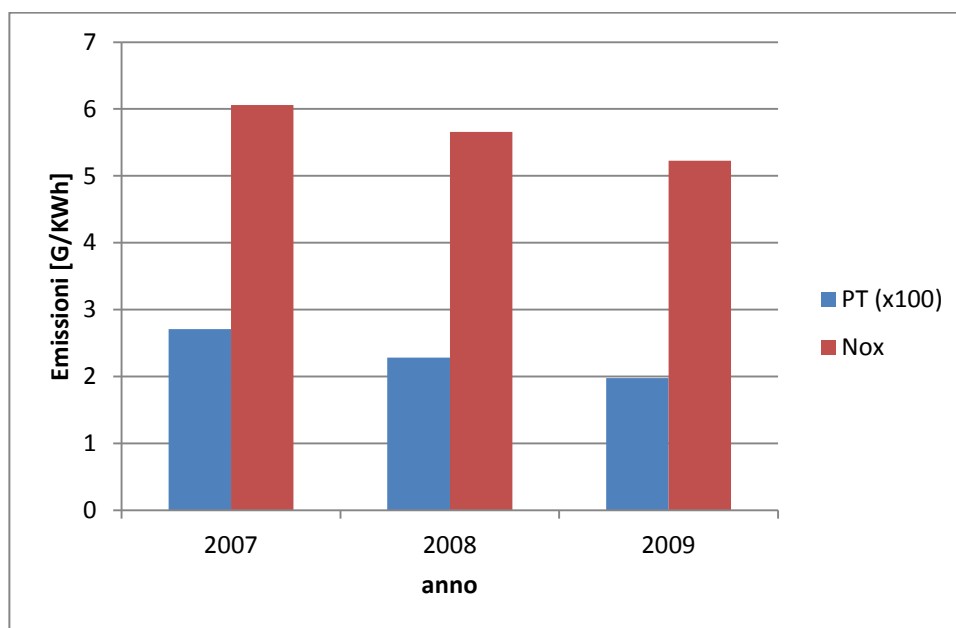


Figura 5-4: andamento emissioni di particolato e ossidi di azoto per il triennio 2007-2009

1.3. CONSIDERAZIONI FINALI

Notiamo dal grafico una sensibile riduzione dell'inquinamento specifico, che indica un consistente incremento della qualità degli autobus durante il triennio. La Tab 5-7 riassume questa tendenza che può essere quantificata in una riduzione del 27% di particolato e di quasi il 14% di ossidi di azoto in tre anni.

Tabella 5-7: riduzione emissioni inquinanti nel triennio

	2007	2008	2009	riduzione percentuale triennio
PT (x100)	270,66	228,3	197,5	27,03
Nox	605,89	565,87	522,78	13,72

Analizzando con attenzione la Tab. 5.4 notiamo che nel triennio sono stati installati parecchi filtri anti-particolato su autobus Euro 3, oltre ad essere stati acquistati autobus di tipo EEV. Dato che le emissioni dichiarate da ATM ottenute da prove al banco effettuate da ATM stessa sono alquanto ottimistiche, manteniamo qualche riserva sul risultato di Tab. 5-7 sulla riduzione di particolato.

2. BRESCIA

2.1. DATI DI BRESCIA TRASPORTI SULLA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

Oggi il trasporto urbano nella città di Brescia si basa esclusivamente su autobus, anche se presto verrà ultimata una linea metropolitana cittadina che si affiancherà al servizio offerto dalle autolinee. “Brescia Trasporti”, la municipalizzata che si occupa del trasporto urbano nella città di Brescia, fornisce dati piuttosto dettagliati sulla composizione del parco autobus nel quadriennio 2008-2011 e sul loro utilizzo. Infatti sul sito internet [8] vengono riportati, suddivisi per classi di motorizzazione, il numero di autobus per ogni anno ed il chilometraggio percorso complessivo e suddiviso per tipologia di mezzi (Tab. 5-8).

Tabella 5-8: composizione del parco autobus e chilometraggio percorso

ATTIVITÀ		unità di misura	2008	2009	2010	2011	
ESERCIZIO	PARCO AUTOBUS	TOTALE AUTOBUS LINEA	n	199	195	194	203
		Euro 0		0	0	0	0
		Euro 0 + Filtro Antip.		21	21	21	21
		Euro 1		51	12	11	11
		Euro 1 + Filtro Antip.		0	14	14	14
		Euro 2		38	38	38	9
		Euro 2 + Filtro Antip.		0	0	0	29
		Ibridi / Metano		4	4	4	6
		Metano		85	106	106	113
		KM PERCORSI	KM PERCORSI IN LINEA	km	7.608.680	7.454.230	7.376.815
	KM COMPLESSIVI (linea + vuoto)		km	9.010.428	8.813.120	8.762.905	8.563.550
	<i>Mezzi Elettrici</i>		km	95.909	99.911	93.283	101.300
	<i>Mezzi a Metano</i>		Km	4.598.395	5.510.441	5.803.062	5.894.468
<i>Mezzi a Gasolio</i>	km		4.316.124	3.202.768	2.866.560	2.567.782	

La strada intrapresa da Brescia Trasporti è quella di investire in veicoli alimentati a metano, veicoli che presentano emissioni tossiche contenute rispetto ai convenzionali mezzi a gasolio. Inoltre tra il 2010 e il 2011 è stato installato il filtro anti-particolato a 29 mezzi Euro 2.

Sempre in [8] viene riportata una tabella che contiene dati relativi al consumo di risorse, ossia acqua, combustibili, pneumatici eccetera, nonché dati relativi alla produzione di rifiuti e di emissioni di gas tossici in atmosfera (Tab. 5-9).

Tabella 5-9: consumo di risorse e produzione di rifiuti

DATI AMBIENTALI			unità di misura	2008	2009	2010	2011
ENTRATE	RISORSE UTILIZZATE	CONSUMI EE TOTALE	kWh	1.579.677	1.725.853	1.741.300	1.632.963
		<i>di cui per compres. Metano</i>	kwh	682.880	847.360	860.800	847.840
		<i>Produzione EE da impianto fotovoltaico</i>	kwh	35.922	46.633	49.414	127.697
		CONSUMI ACQUA TOTALE	m3	12.518	13.077	14.620	16.482
		CONSUMI DI CALORE TOTALE	kWh	799.827	739.367	737.736	681.685
		CONSUMI DI GAS TOTALE	m3	4.558	4.548	4.636	6.313
		gasolio	l	2.075.547	1.512.866	1.315.258	1.211.455
		metano	Nm3	3.229.188	3.994.075	4.131.570	4.132.890
		ACCUMULATORI (60kg/cad)	kg	14.340	13.740	13.380	12.840
		PNEUMATICI (50kg/cad)	kg	39.950	26.150	35.400	27.600
		OLIO	kg	18.959	18.700	14.575	16.295
		SOLVENTI	kg	8,95	8,48	9,91	10,27
	VERNICI	kg	104,0	97,0	64,0	61,0	
USCITE	RIFIUTI	PERICOLOSI (oli usati, fanghi, batterie, ...)	kg	45.717	65.245	74.276	48.816
		NON PERICOLOSI (metalli ferrosi, sabbie di filtrazione, condensa compressori, ...)	kg	14.460	22.805	20.898	15.645
	EMISSIONI IN ATMOSFERA	Emissioni CO2	kg	11.821.087	11.614.344	11.566.268	11.316.433
		<i>CO2 evitate dalla prod. Di ee da imp. fotovolta.</i>	-	- 19.075	- 24.762	- 26.239	- 67.807
		Emissioni HC	kg	21.170	13.685	12.388	6.496
		Emissioni CO	kg	158.520	142.740	141.980	121.716
	Emissioni Nox	kg	199.972	150.970	135.970	129.584	
	Emissioni PM	kg	4.581	2.238	1.922	929	
TEP	TEP	TEP (Tonn. Equiv. petrolio)	ton	4.956	5.106	5.047	4.925

Le ultime righe di Tabella 5-9 ci mostrano i risultati ottenuti da Brescia Trasporti nell'abbattimento delle emissioni inquinanti prodotte dai suoi mezzi. Il dato di maggiore interesse riguarda senz'altro la drastica riduzione delle emissioni di idrocarburi incombusti e di particolato, le quali risultano addirittura dimezzate nel periodo che intercorre dal 2010 al 2011. Per quanto riguarda gli altri dati relativi alle emissioni tossiche, sono state raggiunte una graduale diminuzione di ossidi di azoto e di monossido di carbonio durante tutto il quadriennio. Resta purtroppo ancora molto da fare per quanto concerne le emissioni in atmosfera di gas serra, in quanto le emissioni di CO2 si sono ridotte, anche se di poco, solo grazie ad un parziale utilizzo delle fonti rinnovabili per la produzione di energia. Un ulteriore passo avanti sarebbe attuabile lavorando sulla riduzione dei consumi dei mezzi oppure incrementando la quota energetica prodotta da fonti rinnovabili.

In Fig. 5.5 è riassunta la composizione del parco mezzi nel quadriennio 2008-2011.

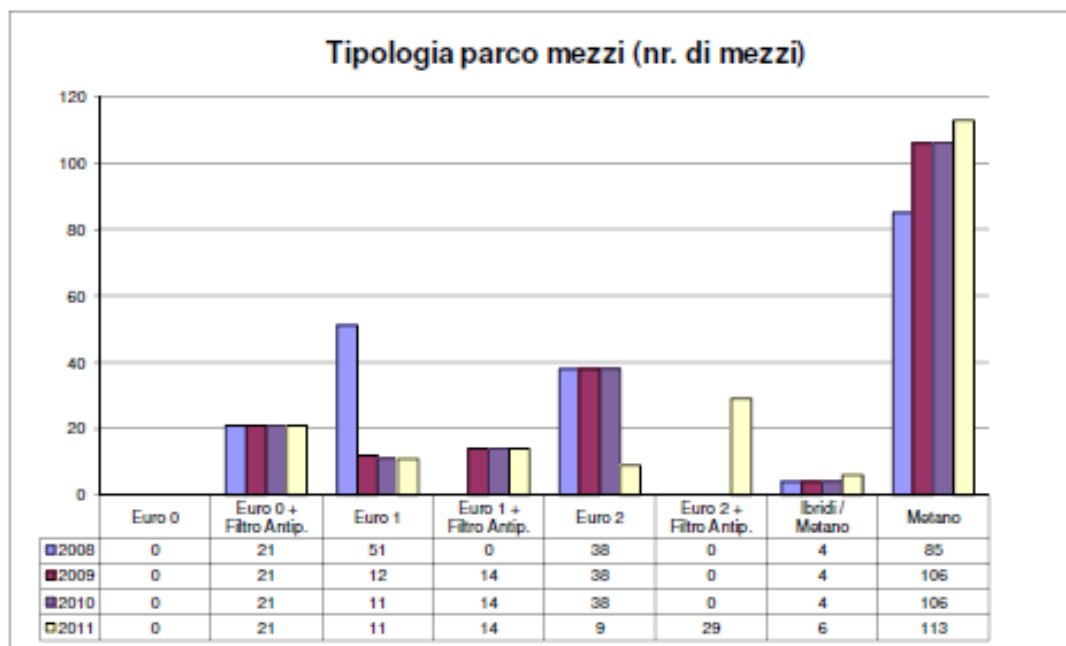


Figura 5-5: tipologia parco mezzi

In Fig. 5.6 viene riportata la percorrenza (in chilometri) che nel quadriennio hanno coperto gli autobus elettrici, a metano e a gasolio adibiti al trasporto urbano di Brescia.

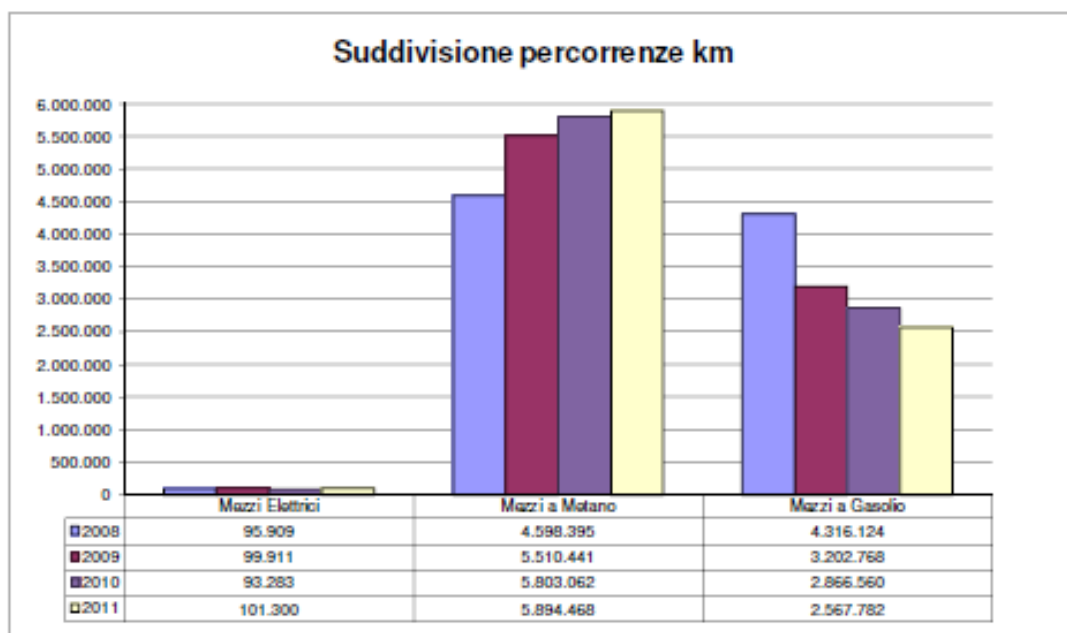


Figura 5-6: suddivisione percorrenze

I grafici e la tabella di Fig.5.6 mostrano chiaramente che la politica di “Brescia Trasporti” è quella di puntare su una progressiva metanizzazione della flotta degli autobus: infatti, dal 2008 al 2011 una grossa quota dei chilometri di linea coperti prima da mezzi a gasolio è ora coperta da mezzi alimentati a metano. Per quanto riguarda gli autobus elettrici, non si registra un significativo incremento del loro utilizzo negli ultimi quattro anni.

In Fig.5.7 sono riportati alcuni dati relativi al consumo medio di carburante degli autobus, nonché viene riportata l'età media dei mezzi anno per anno.

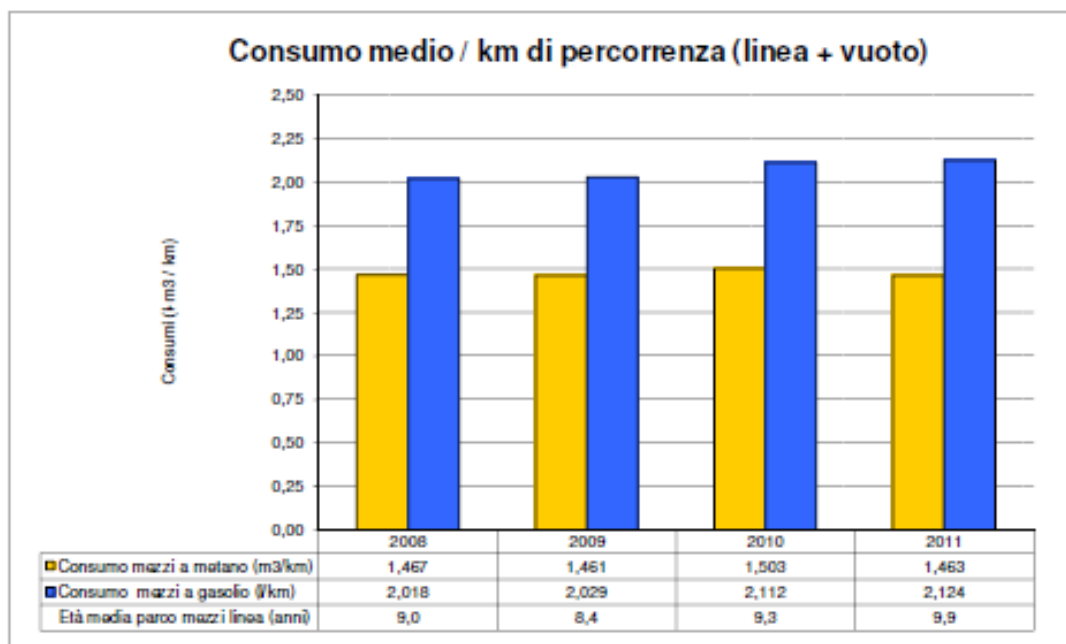


Figura 5-7: consumi medi per tipologia di mezzo di Brescia Trasporti

Si nota che dal 2008 al 2011 si sono registrati complessivamente lievi incrementi nei consumi dei mezzi, in controtendenza con le direttive europee le quali perseguono una diminuzione degli stessi. Occorre stabilire quali siano le cause dell'incremento dei consumi, il che significa, oltre che ridurre le emissioni di anidride carbonica in atmosfera, anche risparmiare sull'acquisto di carburante. L'incremento dell'età media dei mezzi, che nel 2011 è stata di quasi 10 anni, potrebbe fornire una parziale spiegazione all'incremento dei consumi, anche se occorre svolgere indagini più approfondite per avere un quadro più realistico e preciso della situazione.

In Fig.5.8 vengono riportate le emissioni in atmosfera dei principali inquinanti anno per anno, dal 2008 al 2011.

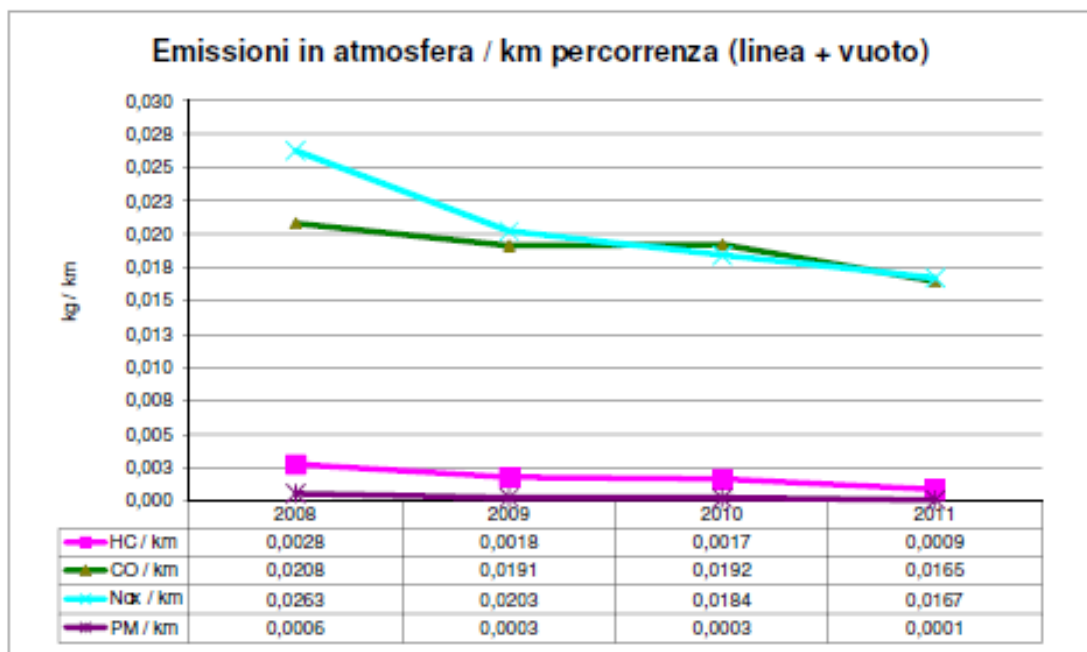


Figura 5-8: emissioni in atmosfera delle principali sostanze inquinanti nel quadriennio

La messa in disfunzione di una grande quantità di veicoli Euro 1 al termine dell'anno 2008 ha migliorato notevolmente le emissioni di idrocarburi incombusti, i quali sono passati dai 2,8 g/km del 2008 ai 0,18 g/km del 2009. Una sensibile riduzione di questi inquinanti (da 1,7 g/km del 2010 a 0,9 g/km del 2011) la si è avuta anche installando a gran parte dei veicoli Euro 2 il filtro anti-particolato. Tali operazioni, le quali hanno comportato una riduzione sostanziale dei mezzi non dotati di filtro anti-particolato, sono coincise con una drastica riduzione delle emissioni di particolato, il quale è passato dai 0,6 g/km del 2008 ai 0,1 g/km del 2011. Nel quadriennio considerato si sono ridotte anche le emissioni di monossido di carbonio e degli ossidi di azoto.

2.2. CONSIDERAZIONI FINALI

Secondo i dati forniti da Brescia Trasporti si sono ottenuti i seguenti obiettivi nella riduzione delle emissioni inquinanti nel corso del quadriennio (vedi Tab. 5-10): le emissioni di idrocarburi e di particolato sono state abbattute, mentre le emissioni di ossidi di azoto e dei monossido di carbonio sono state ridotte in maniera consistente. Anche in questo caso, come nel caso della città dei Milano, sembrerebbe che il filtro anti-particolato reciti un ruolo da protagonista assoluto nella riduzione di gran parte degli inquinanti emessi dai motori endotermici.

Tabella 5-10: riduzione delle emissioni nel quadriennio

g/km	2008	2009	2010	2011	riduzione percentuale quadriennio
HC	2,8	1,8	1,7	0,9	67,86%
CO	20,8	19,1	19,2	16,5	20.67%
Nox	26,3	20,3	18,4	16,7	36.50%
PM	0,6	0,3	0,3	0,1	83.33%

3. BERGAMO

3.1. DATI DI ATB SULLA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

ATB rende disponibili sul suo sito internet i seguenti dati sulla composizione dei mezzi relativi all'anno 2010 (Fig.4.1).

Alimentazione a gasolio		Alimentazione a metano	
Euro 1	n° 11	Euro 2	n° 2
Euro 2	n° 86	Euro 5	n° 23
Euro 3	n° 56		
Euro 4	n° 8		
Euro 5	n° 6		

Figura 5-9: composizione dei mezzi nell'anno 2009

A differenza di Milano e Brescia non vengono forniti dati sulla composizione del parco mezzi negli anni precedenti. Possiamo tuttavia, facendo uso delle normative sull'inquinamento, stimare le emissioni in atmosfera di particolato e ossidi di azoto, seguendo il procedimento già adottato per Milano. Per quanto riguarda l'alimentazione a gasolio, sappiamo che sono installati filtri anti-particolato su tutti i veicoli Euro3, Euro4 e Euro5, mentre è in via di completamento l'installazione dei suddetti filtri sui veicoli Euro1 e Euro2. La mancanza di questo dato rende di fatto difficile una corretta stima delle emissioni prodotte dagli autobus urbani di Bergamo, in quanto la presenza o meno del filtro anti-particolato contribuisce in modo sensibile all'abbattimento delle emissioni di particolato in atmosfera. Per ovviare a questo problema faremo l'ipotesi di avere il 50% dei veicoli Euro1 e Euro2 dotati di filtro anti-particolato, e confronteremo i risultati ottenuti da questo scenario con il caso in cui l'intero parco mezzi sia dotato del suddetto filtro.

3.2. CONSIDERAZIONI SULL'INQUINAMENTO DEGLI AUTOBUS URBANI

Analizziamo ora i due casi sopra citati, considerando come Caso1 l'ipotesi di avere il 50% dei veicoli Euro1 e Euro2 dotati di filtro anti-particolato (FAP), e come Caso2 l'ipotesi di avere la totalità dei veicoli dotata del suddetto filtro.

Nella seguente Tabella svolgiamo i calcoli seguendo lo schema proposto nel Par. 2.2 del presente capitolo. In Tab. 5-11 si riportano sulle righe le diverse tipologie di motori che compongono la flotta di autobus di ATB, mentre le prime due colonne indicano il numero di autobus appartenenti a ciascuna classe di motorizzazione, mentre la terza e la quarta colonna esprimono i quantitativi di particolato e di ossidi di azoto emessi da ogni classe.

Tabella 5-11: composizione del parco mezzi di ATB

	caso1	caso2	PT [G/KWh]	Nox [G/KWh]
Euro 1	5	0	0,36	8
Euro 1 con FAP	6	11	0,03	8
Euro 2	43	0	0,1	7
Euro 2 con FAP	43	86	0,006	6,5
Euro 3 con FAP	56	56	0,006	4,94
Euro 4 con FAP	8	8	0,02	2
Euro 5 con FAP	6	6	0,02	2
Metano	25	25	0,003	0,38
Totale	192	192		

* = non disponendo di dati differenti tra Metano Euro2 e Euro5 le classi sono state accorpate;

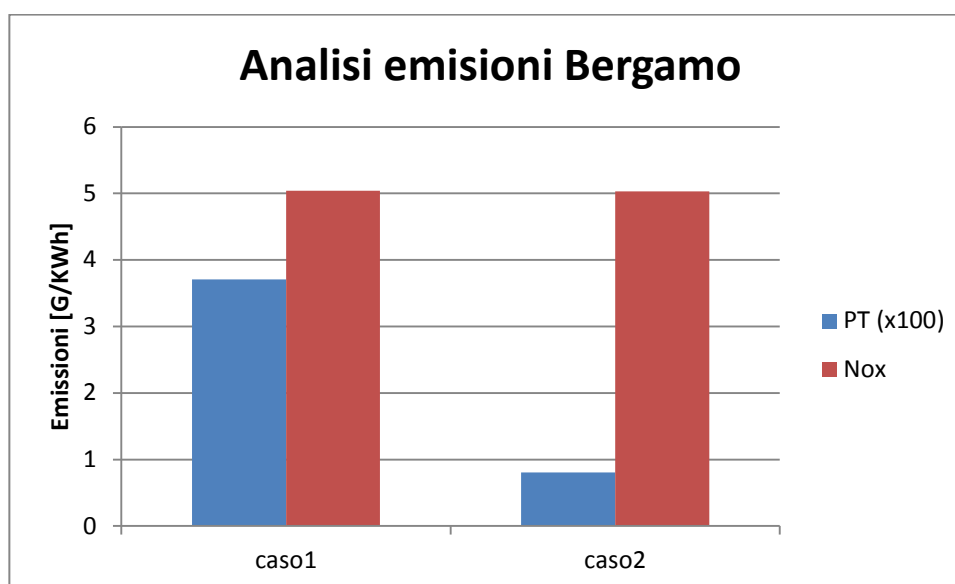
** = *caso1* si riferisce all'ipotesi di avere il 50% di veicoli Euro1 e Euro2 dotati di FAP, *caso2* si riferisce all'ipotesi di avere tutti i veicoli dotati di FAP.

Le emissioni di particolato e ossidi di azoto sono invece riportate nella tabella sottostante, dove l'ultima riga riporta le emissioni dell'autobus tipo, definito nei precedenti paragrafi, di ATB.

Tabella 5-12: calcolo emissioni di sostanze inquinanti rispetto alla composizione del parco mezzi [G/KWh]

	PT caso1	PT caso2	Nox caso1	Nox caso2
Euro 1	0,0092	0	0,2051	0
Euro 1 con FAP	0,0009	0,0017	0,2461	0,4607
Euro 2	0,0220	0	1,5436	0
Euro 2 con FAP	0,0013	0,0027	1,4333	2,9267
Euro 3 con FAP	0,0017	0,0017	1,4187	1,4483
Euro 4 con FAP	0,0008	0,0008	0,0820	0,0838
Euro 5 con FAP	0,0006	0,0006	0,0615	0,0628
Metano	0,0004	0,0004	0,0487	0,0497
Totale emissioni specifiche	0,0371	0,0080	5,0392	5,0321

Riportiamo ora un grafico che riassume i risultati delle emissioni specifiche relative ai casi 1 e 2.



Il dato che viene evidenziato dal grafico è la sostanziale differenza di emissioni di particolato tra il caso 1, ossia il caso in cui per ipotesi 48 autobus appartenenti alle classi Euro 1 e Euro 2 non siano dotati di filtro anti-particolato, e il caso 2, in cui tutti i veicoli montino il suddetto filtro.

Questi dati evidenziano l'importanza del filtro antiparticolato per la riduzione del PT emesso in atmosfera. Infatti la dotazione di 48 filtri antiparticolato sui mezzi sprovvisti dello stesso comporterebbe una riduzione delle emissioni di questo inquinante di oltre il 75%!

CAPITOLO 6 :ANALISI DEI VEICOLI ECOLOGICI PER TRASPORTO PUBBLICO

La maggior parte degli autobus circolanti nelle città europee sono alimentati a gasolio, contribuendo in modo rilevante all'aumento di sostanze inquinanti quali il particolato e gli ossidi di azoto. Un primo passo da compiere al fine di migliorare la qualità dell'aria dovrebbe essere quello di smantellare tutti i mezzi obsoleti ancora circolanti, fortemente inquinanti, e di sostituirli con autobus nuovi. In tal senso, al fine di rientrare nei limiti di emissioni stabiliti dalle Direttive sulla qualità dell'Aria è fortemente raccomandato l'acquisto di mezzi EEV, acronimo di *Enhanced Environmental Vehicle*, i quali rispettano normative ancora più stringenti rispetto alle norme Euro.

Una prima valida alternativa ai motori Diesel tradizionali può essere rappresentata dai motori a gas naturale (CNG), i quali risultano meno inquinanti oltre a presentare costi del combustibile più bassi rispetto al gasolio.

Tuttavia il futuro deve necessariamente percorrere strade alternative a quelle dei combustibili fossili, i quali, anche sviluppando tecnologie sempre più all'avanguardia, non potranno mai azzerare le emissioni. I veicoli ibridi costituiscono una svolta importante nella lotta contro l'inquinamento prodotto dai mezzi urbani, in quanto l'abbinamento tra motore endotermico e motore elettrico provoca una drastica riduzione degli inquinanti emessi in atmosfera.

La soluzione ideale sarebbe quella di riuscire ad avere un sistema di trasporto urbano alimentato da corrente elettrica prodotta da fonti rinnovabili: per raggiungere questo obiettivo si stanno sperimentando diverse soluzioni, come ad esempio la creazione di linee a ricarica induttiva, in cui l'autobus viene ricaricato ad ogni stazione con una quantità di carica sufficiente a raggiungere la successiva fermata.

Dopo aver sommariamente descritto le tipologie di autobus ecologici oggi presenti sul mercato, verrà descritto nel capitolo successivo il funzionamento dei sistemi propulsivi dei veicoli più innovativi, ossia i veicoli ibridi e gli elettrici.

1. VEICOLI IBRIDI

I veicoli hanno la peculiarità di essere spinti da un sistema propulsivo vede la compartecipazione di un motore a combustione interna e di uno elettrico. I due propulsori, presentando caratteristiche tra loro complementari, si integrano molto bene a vicenda. In particolar modo il motore a combustione interna lavora ad efficiente accettabili in alcuni punti di funzionamento a regime, mentre il motore elettrico lavora molto bene a basse velocità, risultando molto vantaggioso specie in fase di spunto. Uno dei vantaggi dei motori elettrici è che sono in grado di lavorare sia in trazione sia in generazione: quindi ogni veicolo ibrido cerca di sfruttare nei rallentamenti la capacità di frenare con il motore elettrico, generando energia altrimenti dissipata nei freni.

L'energia elettrica si può immagazzinare con l'utilizzo di vari dispositivi che possono anche essere utilizzati in contemporanea.

- **Batterie:** sono accumulatori che generano corrente elettrica mediante processi elettrochimici. Caratterizzate da una densità energetica inferiore a quella del carburante, possono essere dimensionate, a seconda delle necessità, per accumulare la massima energia, per scambiare la massima potenza o con un compromesso fra i due estremi.
- **Supercondensatori:** presentano una minore densità energetica rispetto alle batterie, ma hanno il vantaggio di essere in grado di cedere e ricevere maggiori potenze. Sono basati su un processo fisico, maggiormente controllabile e gestibile rispetto ai processi elettrochimici delle batterie.
- **Volani ad azionamento elettrico:** l'energia è immagazzinata come energia cinetica di un volano messo in rotazione da una macchina elettrica. È un processo del tutto meccanico e presenta problematiche ancora differenti dai precedenti accumulatori.

Il rapporto tra la potenza installata del motore elettrico rispetto a quella del motore endotermico definisce il *grado di ibridazione* del veicolo ibrido. Al variare di questo coefficiente, vengono definiti alcuni livelli di ibridazione:

- **Ibridazione piena (full hybrid):** veicoli dotati di un sistema elettrico in grado da solo di far avanzare il veicolo su un ciclo di guida normalizzato.
- **ibridazione leggera (mild hybrid):** veicoli in grado di funzionare in modalità puramente elettrica solo in parti del ciclo di guida, come nella fase di spunto o di marcia a basse velocità.
- **Ibridazione minima:** veicoli in grado di eseguire parti minime del ciclo di guida in modalità elettrica pura.

Esistono due schemi costruttivi principali per l'integrazione di un motore termico ed una macchina elettrica: *ibrido elettrico serie* e *ibrido elettrico parallelo*. La combinazione dei due dà origine all'*ibrido elettrico misto*.

1.1. VEICOLO "IBRIDO SERIE"

In Fig.3.7 è riportato lo schema di funzionamento di un veicolo *ibrido serie*.

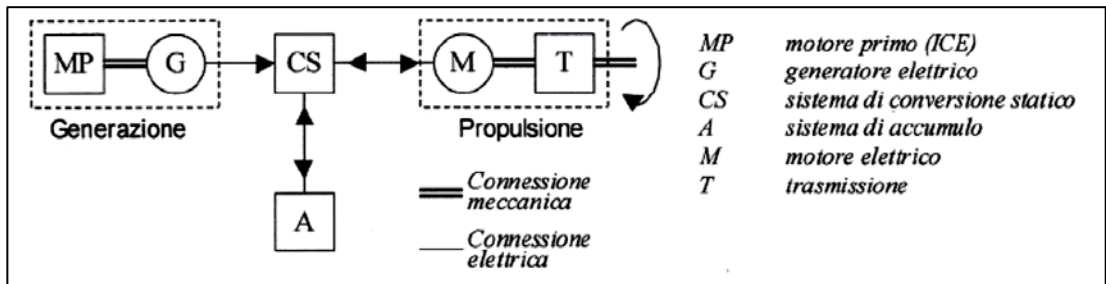


Figura 6-1: schema di funzionamento di un veicolo "ibrido serie" [6]

La caratteristica fondamentale dello schema di funzionamento tipo serie è che la propulsione del veicolo è garantita dal solo motore elettrico, mentre il motore termico è utilizzato come generatore di corrente per alimentare il motore elettrico e per ricaricare gli accumulatori di carica. In buona sostanza, nei momenti in cui viene richiesta una grande quantità di energia, essa viene attinta sia dal motore termico che dalle batterie, mentre quando la necessità energetica è minore rispetto a quella garantita dal motore termico, la quantità in eccesso di energia viene utilizzata per ricaricare le batterie.

Poiché i motori elettrici sono in grado di operare su di una grande vastità di regimi di rotazione, questo schema di funzionamento permette di rimuovere o ridurre la necessità di una trasmissione complessa.

Un vantaggio ulteriore dei sistemi ibridi è quello di far funzionare il motore endotermico ad un regime costante. È noto infatti che i motori endotermici presentano efficienze diverse a seconda del numero di giri in cui si trovano ad operare e ciò costringe i costruttori di motori di veicoli a creare dei compromessi per avere funzionamenti ad efficienze accettabili a tutti i range di funzionamento. Quindi, disporre di motori che devono operare sempre allo stesso regime consente ai costruttori di ottimizzare la costruzione del propulsore per il regime che sarà utilizzato per il veicolo su cui verrà installato, operando sempre alla massima efficienza.

I veicoli ibrido serie perdono invece tutti i loro vantaggi rispetto ai motori endotermici nelle situazioni di elevata e costante velocità di marcia, come nei percorsi autostradali. Infatti in tali situazioni nei veicoli convenzionali il rendimento del motore endotermico è superiore rispetto al sistema ibrido serie.

Il grosso vantaggio dei sistemi ibridi è costituito dall'utilizzo urbano, dove le frequenti situazioni di frenate e ripartenze rendono il sistema ibrido notevolmente più efficiente rispetto al solo motore endotermico. Proprio per questa ragione questo sistema di propulsione può trovare una grande applicazione nel trasporto urbano pubblico e nelle auto ad uso urbano.

1.2. VEICOLO “IBRIDO PARALLELO”

In Fig.3.7 è riportato lo schema di funzionamento di un veicolo *ibrido parallelo*.

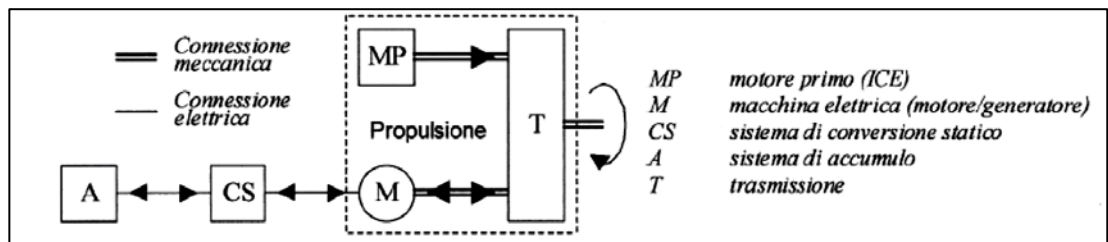


Figura 6-2: schema di funzionamento di un veicolo “ibrido parallelo” [6]

A differenza della soluzione ibrido serie, lo schema ibrido parallelo prevede che sia il motore endotermico, sia il motore elettrico possano essere utilizzati per fornire potenza meccanica alla trasmissione. A seconda della realizzazione costruttiva del nodo meccanico e della sua posizione rispetto al motore elettrico distinguiamo le seguenti tipologie di motori ibridi paralleli:

- **Pre-trasmissione:** presentano il motore elettrico a monte del cambio;
- **Post-trasmissione:** il motore elettrico è posto a valle cambio;
- **Post-ruota:** i motori elettrici sono connessi direttamente alle ruote.

A seconda delle condizioni di marcia, il veicolo potrà essere spinto dal solo motore elettrico, dal solo motore endotermico oppure dalla combinazione di entrambi.

Il principale vantaggio rispetto all’architettura *tipo serie* consiste nell’eliminazione di un organo rotante, ossia del generatore e si presta quindi a spingere veicoli multi-funzione, adatti anche a percorsi extra-urbani.

Di contro il sistema di trasmissione risulta molto più complesso e la presenza di rotismi e frizioni genera maggiori dissipazioni rispetto ad un *sistema serie*. Inoltre il motore endotermico non riesce a lavorare sempre al punto di lavoro ottimale, anche se le moderne trasmissioni a rotismi epicicloidali possono ridurre notevolmente questo inconveniente.

Un’ulteriore differenza rispetto ai sistemi serie è data dal fatto che solitamente il grado di ibridazione di questa tipologia di veicoli ibridi è più basso, dato che gran parte della potenza meccanica è generata dal motore endotermico.

2. UN ESEMPIO DI VEICOLO IBRIDO: SCANIA OMNILINK

Nel 2009 Scania avvia una sperimentazione di autobus ibridi innovativi presso la città di Stoccolma. La peculiarità di questi autobus è quella di essere dotati di un sistema propulsivo ibrido tipo serie, in cui il motore endotermico è alimentato a bioetanolo.



Figura 6-3: Autobus ibrido Scania alimentato ad bioetanolo

Il sistema ibrido che Scania applica ai suoi autobus è schematizzato in Fig. 4-4.

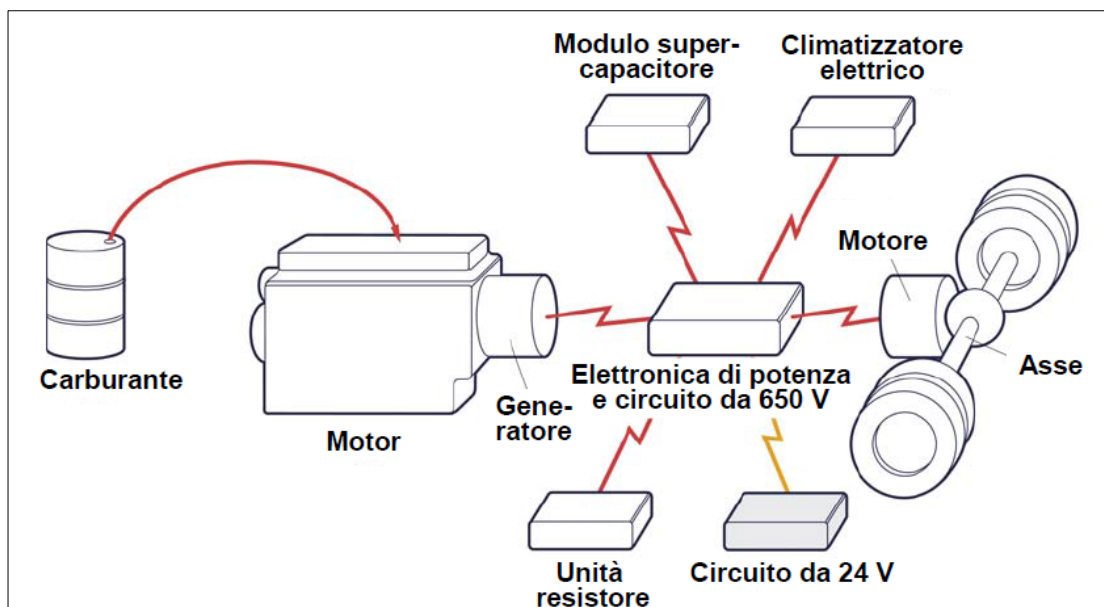


Figura 6-4: Schema della trazione ibrida in serie di Scania

La soluzione di autobus ibrido di Scania lanciata nel 2007 è stata realizzata per valutare l'interesse pubblico in un nuovo concetto di design per autobus urbani con propulsione elettrica ibrida e da allora continua a svolgere il ruolo di laboratorio "su ruote". I componenti della catena cinematica sono situati l'uno sull'altro sul lato posteriore dell'autobus, con accumulatori di energia e funzioni ausiliarie integrati nella struttura del tetto, garantendo così spazio nella sezione centrale dell'autobus per un vano passeggeri percorribile agevolmente. Nella parte frontale, la postazione di guida all'estremità dell'asse anteriore costituisce un modulo a sé stante.



Figura 6-5: componenti della catena cinematica della trazione ibrida Scania

Con ruote situate negli angoli e trazione integrale, questo autobus vanta un'eccezionale maneggevolezza senza praticamente nessuna parte sporgente in curva. La struttura modulare offre la possibilità di realizzare nuovi tipi di autobus urbano con facilità di accesso ed un'elevata attrattività per i passeggeri. Questi moduli sono ugualmente adatti per autobus a due piani e per servizi aeroportuali, nonché per alcune tipologie di autocarri.

2.1. DETTAGLI SULLA PROGETTAZIONE DEL SISTEMA DI TRAZIONE

In sede di progettazione della trazione ibrida in serie sono stati considerati i seguenti fattori:

- una riduzione dei consumi e delle emissioni almeno del 25% nel servizio urbano "stop-and-go";
- maggior comfort con accelerazioni fluide e costanti;
- motore diesel ad elevata efficienza per la generazione di potenza adattato a funzionare a bioetanolo;
- riduzione delle emissioni di anidride carbonica pari a circa il 90% grazie all'utilizzo di etanolo;
- catena cinematica di elevato rendimento con elevate prestazioni per un maggiore comfort di guida;
- modulo di accumulo (supercapacitori), riscaldamento e ventilazione e climatizzatore elettrico sul tetto;
- possibilità di adattare la catena cinematica di questi motori a propulsori a biogas o gas naturale, con spazio per il serbatoio sul tetto, nonché ad

eventuali sistemi di propulsione innovativi che verranno sviluppati in futuro;

- operatività e qualità garantite grazie all'uso esclusivo di componenti progettati per il servizio pesante;
- concetto di trazione economicamente conveniente per Scania e i suoi clienti.

2.2. POTENZA E PRESTAZIONI

Vista l'elevata potenza e coppia dei motori Scania si sono scelti generatori/motori elettrici ad alto rendimento. Il motore elettrico di propulsione eroga la massima coppia (2750 Nm) sin dallo spunto e l'azionamento è continuo. Anche il modulo di accumulo dell'energia con supercapacitori è progettato per un elevato rendimento e un'alta efficienza.

Oltre al differenziale sull'asse, non sono necessari altri riduttori dato l'ampio funzionamento del motore di propulsione (0-2400 rpm con coppia massima sin dalla partenza). L'accelerazione del veicolo dipende solo dalla potenza del motore elettrico di propulsione e quindi è indipendente dalla potenza erogata dal motore a combustione interna.

Il motore è stato ottimizzato per funzionare alla massima efficienza, la minima rumorosità e le minime emissioni.

L'efficienza del generatore è di norma superiore al 90%, raggiungendo picchi, in determinate condizioni, anche del 94%. Il motore endotermico segue un ciclo Diesel reale, presentando un'efficienza che si attesta tra il 40 e il 45%. L'efficienza del motore elettrico è simile a quella del generatore, tendendo a raggiungere valori più bassi in corrispondenza di condizioni di marcia a velocità molto basse.

Rispetto agli autobus tradizionali, grazie alla frenata rigenerativa e all'ottimizzazione dell'efficienza del motore, nel servizio urbano si ottiene almeno il 25% di risparmio totale di carburante.

Per quanto riguarda i moduli di accumulo, essi sono progettati per avere una durata analoga a quella del veicolo, ossia 10-15 anni.

2.3. CARATTERISTICHE TECNICHE DELLA TRAZIONE IBRIDA IN SERIE DI SCANIA

Motore	Motore Scania da 9 litri diesel-etanolo
Potenza	198 kW (270 CV) a 1900 giri/min
Coppia	1200 Nm a 1100-1400 giri/min
Generatore	Voith ELVO Drive®, generatore TFM, raffreddato ad acqua Coppia costante: 1250 Nm Potenza costante: 220 kW meccanica dal motore Velocità massima: 2400 giri/min
Motore di propulsione	Voith ELVO Drive®, motore TFM, raffreddato ad acqua Coppia massima: 2750 Nm, coppia costante: 1800 Nm Potenza costante: 150 kW meccanica Velocità massima: 2400 giri/min
Accumulo di energia	Supercapacitori: 4 moduli da 125 volt Maxwell BOOSTCAP®, raffreddati ad aria Energia disponibile: >400 Wh
Sistema di controllo	Architettura CAN Scania di serie con funzionalità ampliata per comando ibrido
Velocità massima	78 km/h, a seconda del rapporto di trasmissione finale
Partner di sviluppo	Voith (sistema di trazione ibrida) Carrier-Sütrak (climatizzatore elettrico)

3. ALTRI AUTOBUS IBRIDI PRESENTI SUL MERCATO

3.1. MERCEDES CITO



Figura 6-6: Mercedes Cito in circolazione a Bruxelles

Il *Mercedes-Benz O520 Cito*, denominazione derivata dalla contrazione delle parole “city” e “tomorrow”, è un autobus destinato all’uso urbano di medie dimensioni a trazione ibrida. Le tre versioni prodotte, rispettivamente di lunghezza 8 metri (52 posti), 9 metri (66 posti) e 10 metri (80 posti), sono state commercializzate dal 1999 al 2003.

Il posizionamento particolare del motore installato sul Cito, conferisce a questo autobus la peculiarità di non avere nessun vetro nella parte posteriore.

Dopo aver ottenuto il premio *International Bus & Coach of the Year*, questo modello ha avuto una discreta diffusione anche in Francia e in Italia, dove è presente in varie aziende di trasporto urbano tra cui *ATC Bologna*, *ATC La Spezia*, *Tempi Piacenza*, *CAP di Prato* e *SPT Como*.

3.2. VOLVO 7900 HYBRID



Figura 6-7: Volvo 7900 Hybrid

Il modello di autobus *7900 Hybrid* è l'ultimo modello di autobus urbano a trazione ibrida sviluppato da Volvo. L'obiettivo della riduzione dei consumi e delle emissioni è stato perseguito e raggiunto sia attraverso lo sviluppo di un sistema di trazione ibrido in grado di sviluppare una potenza massima di 120 kW, sia attraverso un meticoloso processo di alleggerimento delle masse di circa 550kg rispetto ai modelli precedenti. Con i suoi 12 metri di lunghezza, è in grado di ospitare fino a 102 passeggeri.

3.3. MAN LION'S CITY HYBRID



Figura 6-8: Man Lion's city Hybrid a Monaco

Il modello *Lion'City Hybrid* è un modello di autobus ibrido costruito e commercializzato dalla concessionaria *Man*. Pensato per avere la massima resa in condizioni di traffico urbano, ove le fermate e le ripartenze si susseguono continuamente, utilizza un motore endotermico da 184kW adibito alla ricarica del pacco batterie, mentre la trazione è garantita da due motori elettrici da 75kW ciascuno. Questo modello è lungo quasi 12 metri e può ospitare 28 passeggeri seduti e 49 in piedi. In Europa è impiegato nelle linee urbane a Barcellona, Vienna, Monaco e Parigi, mentre in Italia è stato recentemente introdotto a Milano nella linea 50 in via sperimentale.

3.4. HORUS



Figura 6-9: Horus a metano

Horus è un autobus ibrido impiegato nella flotta EPT. È concepito per avere un'autonomia in regime puramente elettrico per 50km, mentre, grazie ad una microturbina installata a bordo, è in grado di ricaricare le batterie sfruttando la potenza proveniente dal motore endotermico. Horus presenta due differenti tipologie di motori endotermici: una versione a metano e una a gasolio. Questo modello è lungo circa 8 metri, garantendo una capienza di 45 posti totali per la versione a gasolio, e 46 posti per la versione a metano.

4. VEICOLI ELETTRICI: CARATTERISTICHE GENERALI

Si definiscono veicoli elettrici tutti i veicoli spinti da un motore elettrico, senza che vi sia la presenza di un generatore di potenza elettrica o meccanica alimentato da un motore di altra tipologia. I veicoli elettrici sono equipaggiati con uno o più motori elettrici e da un sistema di accumulo dell'energia. Il metodo di accumulo più semplice e tradizionale è costituito da un pacco di batterie, che forniscono, mediante reazioni chimiche, l'energia elettrica al motore. Questo tipo di accumulatore è quello utilizzato dai *veicoli elettrici a batterie*. Un sistema innovativo per la generazione di corrente elettrica sfrutta le reazioni elettro-chimiche dell'idrogeno mediante sistemi tipo *fuel cell*.

Come per i veicoli ibridi, vengono comunemente installati sistemi per il recupero dell'energia cinetica in fase di frenata, la quale viene convertita in energia chimica ricaricando parzialmente le batterie del veicolo.

I veicoli elettrici presentano prestazioni eccellenti nelle situazioni di traffico urbano, in quanto il loro rendimento nelle situazioni di marcia a bassa velocità con frenate ed accelerazioni ripetute è nettamente superiore a quello dei veicoli a motore endotermico. Inoltre i veicoli elettrici hanno il vantaggio di non emettere gas di scarico nocivi in loco, anche se ciò non significa che essi non generino emissioni inquinanti: infatti l'impatto ambientale di questi veicoli va calcolato analizzando il ciclo di produzione e trasporto dell'energia elettrica dalla centrale al veicolo.

4.1. VEICOLI ELETTRICI A BATTERIE

Si definiscono *veicoli elettrici a batterie* i veicoli elettrici che attingono l'energia da accumulatori chimici.

Da molti anni si stanno conducendo studi per sviluppare veicoli elettrici competitivi sul mercato, anche se tale ricerca è stata ed è tuttora ostacolata dalle compagnie petrolifere, le quali hanno registrato o acquistato i brevetti di molti tipi di batteria, ed hanno utilizzato la *patent protection* per impedire che le tecnologie più moderne delle batterie ricaricabili venissero utilizzate nella produzione di veicoli elettrici.

Tuttavia, anche grazie agli impegni internazionali assunti dagli Stati per quanto concerne la riduzione delle emissioni inquinanti, si sta registrando negli ultimi tempi una piccola accelerazione dello sviluppo dei veicoli elettrici, nonché la loro progressiva diffusione, soprattutto tra i mezzi pubblici urbani.

In futuro, con l'espansione del mercato, potranno essere adottate anche altre innovazioni importanti, già largamente sperimentate ma che allo stato attuale non trovano ancora giustificazione economica: in particolare, i motori elettrici di trazione, assai più compatti dei motori endotermici, potranno essere incorporati direttamente nelle ruote motrici, eliminando così anche il differenziale meccanico, con una guida controllata totalmente per via elettronica. Potrebbe inoltre essere adottata la ricarica induttiva, anch'essa già largamente sperimentata, in sostituzione di quella conduttiva che richiede il collegamento via cavo tra veicolo e una presa elettrica. Con la ricarica induttiva, invece, il trasferimento di energia alle batterie avviene attraverso le due sezioni di un captatore elettromagnetico, delle quali una è montata sul veicolo, e l'altra può essere interrata nel punto di stazionamento del veicolo consentendo la possibilità di avvio automatico della ricarica non appena il veicolo viene parcheggiato.

Ancora più della sua struttura tecnica, interessano ai nostri fini le caratteristiche operative di questi veicoli, come l'autonomia e la velocità, oltre che naturalmente l'affidabilità, la capacità di trasporto, gli aspetti gestionali, la manutenzione. La Tab 4.1 sintetizza le principali prestazioni consentite dalla tecnologia oggi disponibile, per le diverse tipologie di automezzi.

Tabella 6-1: prestazioni auto elettriche

	Autovetture	Furgoni	Mini bus	Bus urbani
Autonomia [km]	120 - 250	100 - 160	140 - 200	15 - 250
Velocità massima [km/h]	100 - 130	80 - 110	80	70
Velocità continua [km/h]	100	80	60	60
Pendenza superabile	25	20 - 25	15 - 20	12 - 15
Accelerazione (0-50km/h)	6 - 9	10 - 15	12 - 18	15-20

4.2. VEICOLI ELETTRICI "FUEL CELL"

Si definiscono *veicoli elettrici "fuel cell"* i veicoli elettrici che generano l'energia necessaria al moto del veicolo sfruttando le reazioni elettrochimiche dell'idrogeno. In Fig.3.9 è riportato lo schema di funzionamento di questo tipo di veicolo.

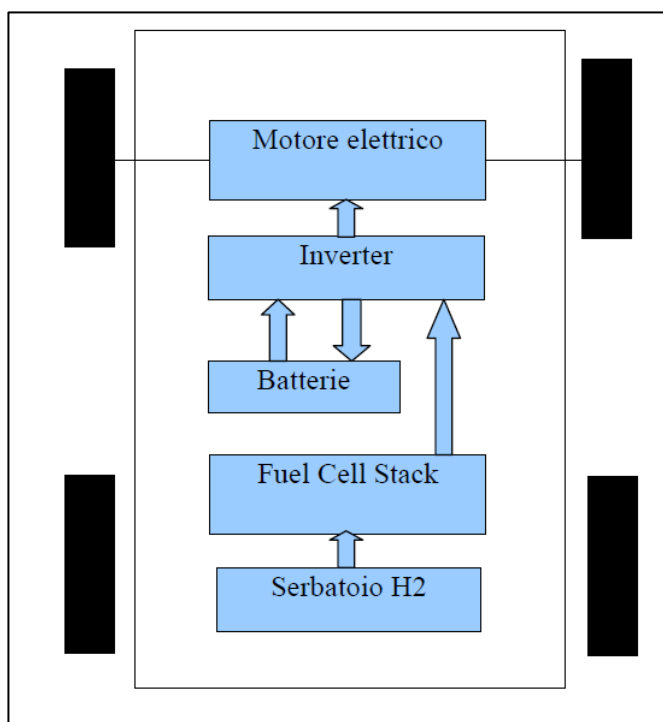


Figura 6-10: schema di funzionamento veicolo a "fuel cell"

L'idrogeno può essere immagazzinato nel veicolo, a seconda del tipo di serbatoio utilizzato, allo stato liquido o gassoso. Nel caso si opti per utilizzare idrogeno liquido, il serbatoio è decisamente più complesso in quanto il liquido viene immagazzinato ad una pressione di circa 700 atmosfere e a basse temperature che vengono mantenute tramite un circuito di raffreddamento e da un alto isolamento del serbatoio. Nel caso si utilizzi idrogeno gassoso, la pressione di immagazzinamento si riduce a circa 300 atmosfere, così come la complessità e il peso del serbatoio. Il vantaggio di usare idrogeno liquido risiede nel fatto che a pari volume del serbatoio, esso permette una maggiore autonomia rispetto all'impiego di idrogeno gassoso.

Le *fuel cell*, normalmente di tipo *PEMFC* (acronimo di *proton exchange membrane fuel cell*) combinano l'idrogeno ad elevato grado di purezza presente nel serbatoio con l'ossigeno presente nell'aria per produrre energia elettrica e vapore acqueo. In Fig. 3.10 è riportato lo schema della reazione elettro-chimica delle *fuel cell*.

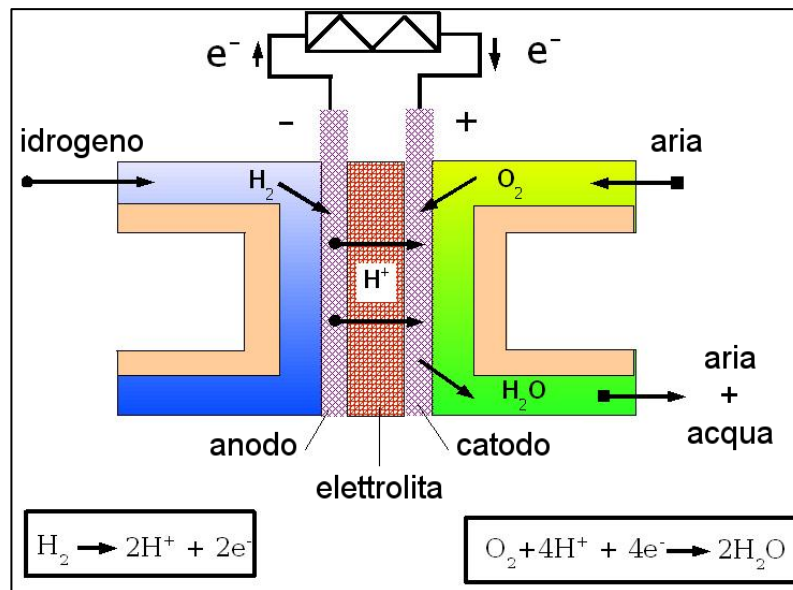


Figura 6-11: reazione elettrochimica di una "fuel cell"

Lo stoccaggio dell'idrogeno, come già anticipato, prevede condizioni ambientali particolari che richiedono l'installazione a bordo del veicolo di una serie di utenze secondarie, quali un compressore per l'aria esterna ed un sistema di raffreddamento. Le reazioni elettrochimiche delle fuel cell producono corrente continua, mentre il motore elettrico del veicolo funziona normalmente a corrente alternata, pertanto si rende quindi necessaria l'installazione di un inverter sul veicolo.

Rispetto ai veicoli elettrici a batteria, i tempi di ricarica sono piuttosto contenuti: infatti i veicoli fuel cell offrono la possibilità di ricaricare completamente il serbatoio di idrogeno per un'autonomia di circa 350km. Tuttavia lo scarso rendimento della tecnologia attuale delle fuel cell, accompagnato dagli elevati costi di produzione, non consente a questa tecnologia la diffusione su larga scala, in quanto non competitiva in termini di costi.

Occorre inoltre non dimenticare che l'idrogeno puro non si trova comunemente, ma va prodotto con reazioni che hanno un rilevante costo energetico.

5. VEICOLI ELETTRICI PRESENTI SUL MERCATO

5.1. ELFO (FLOTTA EPT)



Figura 6-12: Elfo

Appartenente alla flotta EPT di Brescia, l'*Elfo* è un autobus elettrico di dimensioni contenute, capace di trasportare a pieno carico fino a 34 passeggeri. Lungo 7,48 metri, può raggiungere la velocità di 70km/h, ampiamente sufficiente a garantire un adeguato servizio in condizioni di traffico urbano. Il motore installato, un ENOVA EDM 120, sviluppa una potenza massima di 120kw, garantendo consumi di circa 85kWh ogni 100km di marcia.

Tra le caratteristiche tecniche più interessanti ricordiamo il sistema di ricarica rapida induttiva al capolinea da 70kW, nonché il sistema di ricarica rapida conduttiva da 40kW da eseguire in officina.

5.2. PROTERRA ECO RIDE BE3S6



Figura 6-13: Proterra Eco Ride BE3S

Il modello *Eco Ride BE3S* della concessionaria statunitense *Proterra* è un autobus elettrico di 10,6 metri di lunghezza. Pensato per una funzione di trasporto prevalentemente urbano, è dotato di un sistema di ricarica rapida, il quale consente di ricaricare completamente le batterie del mezzo in 10 minuti. È adottato in diverse città statunitensi, tra cui Austin, Burbank, Lewis, Washington., San Antonio e Denver.

6. UN CASO INTERESSANTE DI VEICOLO FUEL CELL: MERCEDES CITARO FUEL-CELL HYBRID

Mercedes già nell'anno 1997 aveva sviluppato un motore alimentato a pile combustibili destinato alla propulsione di autobus: era nato il *Nebus*. Nel 2003 è arrivato il suo successore, denominato *Citaro Fuel Cell*. Proprio trenta esemplari di questo modello di autobus urbano sono stati utilizzati in un grande progetto di sperimentazione pratica delle celle combustibili in cui hanno percorso oltre due milioni di chilometri. I risultati di questa sperimentazione hanno dimostrato un'elevata disponibilità di esercizio dei mezzi, nonché un elevato comfort dato dall'elevata silenziosità di marcia e dall'annullamento delle emissioni inquinanti. L'ultima evoluzione degli autobus a celle combustibili è rappresentata dal *Citaro Fuel Cell Hybrid*, più parsimoniosa ed efficiente del 50% rispetto al modello precedente.

6.1. FUNZIONAMENTO DEL FUEL CELL HYBRID

Hybrid, una pila a combustibile come fonte di energia viene applicata ad una trazione elettrica ai mozzi delle ruote, insieme ad un sistema integrato di recupero di energia nelle frenate.

Il motore a combustione interna diventa quindi superfluo. Nella pila a combustibile vengono immessi insieme, in modo controllato, idrogeno e ossigeno. Attraverso questa reazione elettrochimica si producono elettricità e calore. Una membrana a scambio protonico all'interno della pila a combustibile previene il contatto diretto dei gas. La membrana è realizzata in modo da poter essere attraversata esclusivamente dai protoni degli atomi di idrogeno. Gli elettroni liberati da questo processo vengono deviati, e la corrente in tal modo aziona il veicolo attraverso un elettromotore.

Il rifornimento dell'autobus con idrogeno avviene in modo totalmente automatico e ad alta pressione. Infatti l'idrogeno viene accumulato nei serbatoi con una pressione fino a 700 bar. L'idrogeno come risorsa energetica può essere ricavato da numerose fonti, utilizzando anche materie prime rinnovabili e quindi in modo ecologico.

Per ottimizzare l'intero sistema di propulsione, ridurre i consumi e rendere l'autobus ancora più efficiente, oltre alla pila combustibile il *Citaro FuelCELL Hybrid* dispone di una potente batteria di accumulo. Questa batteria a ioni di litio raffreddata ad acqua funge da accumulatore intermedio per l'energia elettrica generata. Attraverso un circuito ad alta tensione da 650 Volt, la batteria alimenta con potenza complessiva di 160 kW i due motori elettrici ai mozzi delle ruote sull'asse motore, raffreddati a liquido, come pure i gruppi ausiliari dell'autobus.

In questo modo è possibile recuperare in frenata l'energia prodotta dal veicolo e accumularla nella batteria. Con questa strategia di trazione si sfrutta

attivamente il tipico comportamento di marcia di un qualsiasi autobus urbano, caratterizzato da frequenti soste e partenze. Quando l'autobus marcia a velocità costante, la corrente per l'elettromotore proviene dalla pila a combustibile, mentre durante la fase di spunto e accelerazione l'elettricità arriva anche dalla batteria. L'unica emissione allo scarico è rappresentata da vapore acqueo.

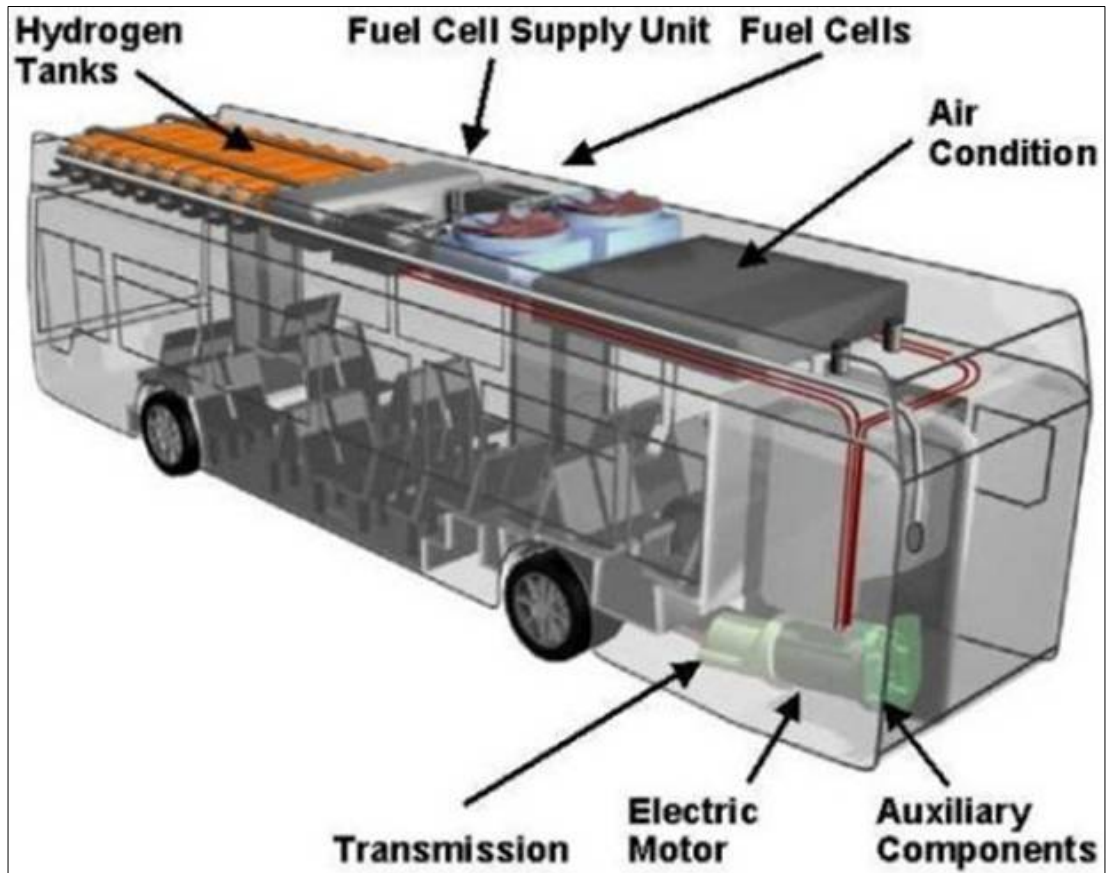


Figura 6-14: schema impianto fuel cell montato su autobus Citaro FuelCELL Hybrid

Il Mercedes *Citaro FuelCELL Hybrid* rappresenta quindi la seconda fase di una sperimentazione che dovrebbe portare entro il 2015 ad una vera e propria commercializzazione di queste tipologie di mezzi.

6.2. CARATTERISTICHE TECNICHE DEL MODELLO *CITARO FUEL CELL HYBRID CLASS I*, 3 PORTE

Nella Tab 4-2 vengono illustrate le principali caratteristiche tecniche del modello *Mercedes Citaro Fuel Cell Hybrid Class I* a 3 porte.

Tabella 6-2: caratteristiche tecniche del *Citaro Fuel Cell Hybrid Class I*, 3 porte

Capacità	
Passeggeri seduti	26+1H
Passeggeri totali	76+1H+1
Dimensioni	
Lunghezza [m]	11,95
Larghezza [m]	2,55
Altezza [m]	3,4
Altezza pavimento [mm]	350
Passo [mm]	5845
Sporgenza anteriore [mm]	2706
Sporgenza posteriore [mm]	3400
Diametro di sterzata [mm]	21030
Peso	
A vuoto [kg]	13000
A pieno carico [kg]	19000
Motore e trasmissione	
Sistema propulsivo	Ibrido tipo serie
Motore elettrico	2 motori elettrici alle ruote
Potenza Max/Potenza a regime [kW]	2x120/2x80
Generatore di potenza	Fuel Cell
Massima Potenza bhp [kW]	120/140
Inverter	Dc-Dc
Voltaggio [V]	400-750
Batterie	Ioni al litio
Capacità Ah	26.9
Freni e sospensioni	
Freni	Dischi pieni, Circuito elettropneumatico, Sistema di frenata Ebs, Abs
Sospensioni	Pneumatiche, indipendenti alle ruote anteriori
Pneumatici	275/70 R 22.5

7. ALTRI VEICOLI FUEL-CELL PRESENTI SUL MERCATO

7.1. IRISBUS 491FCY.12 CITYCLASS FUEL CELL



Figura 6-15: Irisbus 491FCY.12 CITYCLASS Fuel Cell

L'Irisbus 491FCY.12 CITYCLASS Fuel Cell è un autobus adibito e concepito per l'impiego su tratte urbane in grado trasportare fino ad un massimo di 73 passeggeri. Dotato di una potenza massima di 164kW, questo veicolo può raggiungere la velocità massima di 62km/h, sufficiente per l'utilizzo urbano. La propulsione è garantita da un motore elettrico ANSALDO, che sfrutta l'energia elettrica proveniente da un sistema fuel cell: tale sistema converte l'idrogeno liquido stoccato in nove differenti bombole in corrente continua, la quale, mediante l'ausilio di un alternatore, viene convertita in corrente alternata utile per alimentare il motore elettrico. Ha un'autonomia di servizio limitata a 200km.

Questo modello, immatricolato nell'anno 2004 ed attualmente in servizio a Torino, è uno dei primi modelli fuel cell immessi sul mercato.

7.2. VAN HOOL A330 HYBRID FUEL CELL



Figura 6-16: Van Hool A330 Hybrid Fuel Cell Bus

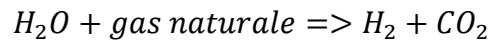
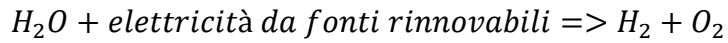
L'A330 Hybrid Fuel Cell è un moderno autobus alimentato ad idrogeno liquido. Lungo oltre 13 metri, è concepito per trasportare in ambito urbano 104 passeggeri, di cui 34 seduti, senza emettere in loco sostanze inquinanti. Questo autobus urbano è infatti spinto da un motore elettrico in grado di fornire fino a 120kW di potenza meccanica, che sfrutta l'energia elettrica proveniente da un sistema di conversione dell'idrogeno fuel cell di tipo UTC Power. L'autobus è dotato inoltre di un sistema di recupero dell'energia in fase di frenata, che ricarica un pacco batterie pronte a rilasciare energia in fase di spunto.

8. VEICOLI ELETTRICI E FUEL CELL: UN CONFRONTO AMBIENTALE ED ENERGETICO

La *Commissione Italiana Veicoli Elettrici Stradali a Batteria, Ibridi e a Celle Combustibili* ha condotto un'analisi mettendo in relazione le prestazioni ambientali ed energetiche di veicoli elettrici, ibridi e a celle combustibili: riportiamo il testo integrale tratto da [7].

“Si impongono infine alcune importanti considerazioni complessive sotto il profilo ambientale ed energetico. Analogamente ai veicoli a batterie, quelli a celle a combustibile non presentano emissioni atmosferiche locali; ma, per entrambi, la produzione del vettore energetico utilizzato (energia elettrica nei primi e idrogeno nei secondi) può produrre inquinamento, in particolare CO₂. L'idrogeno può essere prodotto dall'acqua o da diversi composti che lo contengono in quantità significative, tra cui i combustibili fossili e le biomasse, utilizzando sia fonti primarie convenzionali che fonti rinnovabili, attraverso diversi possibili processi, quali ad esempio:





È evidente che, stante le esigenze poste dall'effetto serra e dal riscaldamento globale del pianeta, le soluzioni accettabili sono solo quelle che presentano emissioni di CO₂ decisamente inferiori a quelle dei veicoli tradizionali. Nel caso di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili come la fotovoltaica e l'eolica, intrinsecamente esenti da emissioni di CO₂, la produzione di idrogeno attraverso l'elettrolisi dell'acqua è il processo più attraente in assoluto. Le altre soluzioni producono inevitabilmente CO₂, in alcuni casi a livelli anche superiori a quelli delle motorizzazioni convenzionali. Al di fuori dell'elettrolisi, la più ambientalmente efficiente è quella che utilizza il gas naturale.

In sostanza, il veicolo a idrogeno resta comunque meno favorevole di quello a batteria in termini ambientali globali, anche se, quest'ultimo, per la più ridotta autonomia, non può essere considerato la soluzione generalizzata per la mobilità stradale.

A conclusioni analoghe conduce un confronto in termini di efficienza energetica (vedi Figg.4.5-4.6).

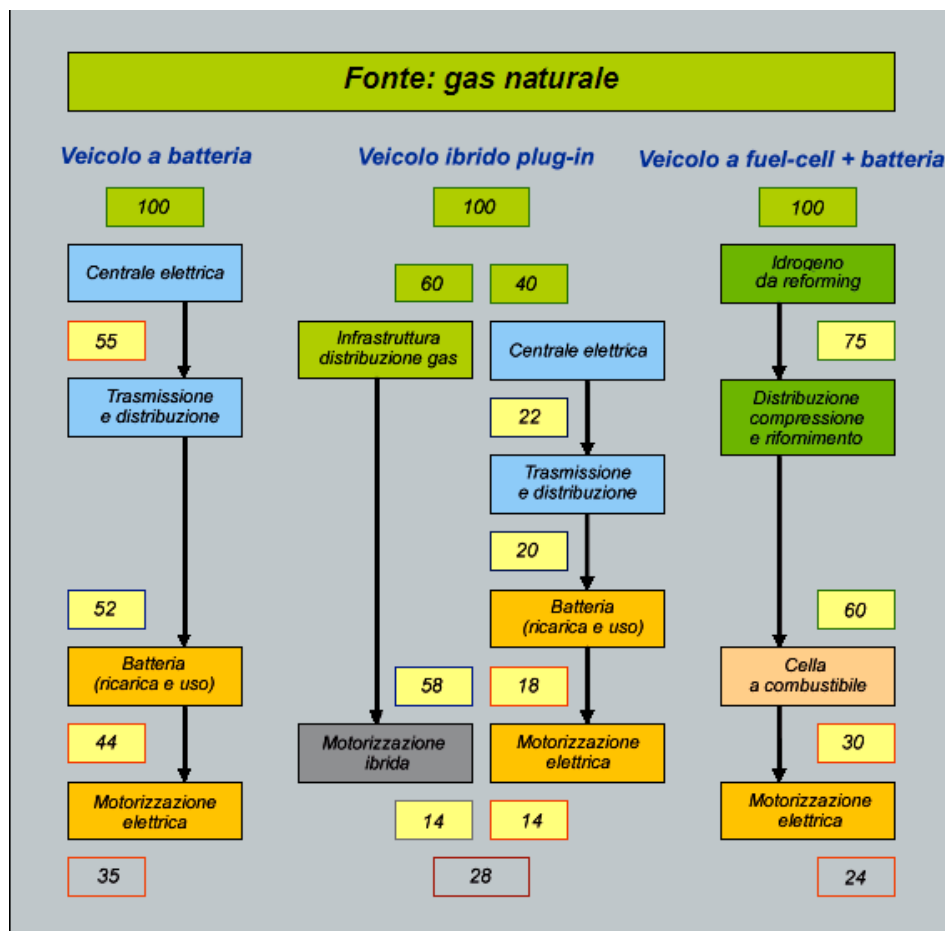


Figura 6-17: analisi energetica da fonti non rinnovabili

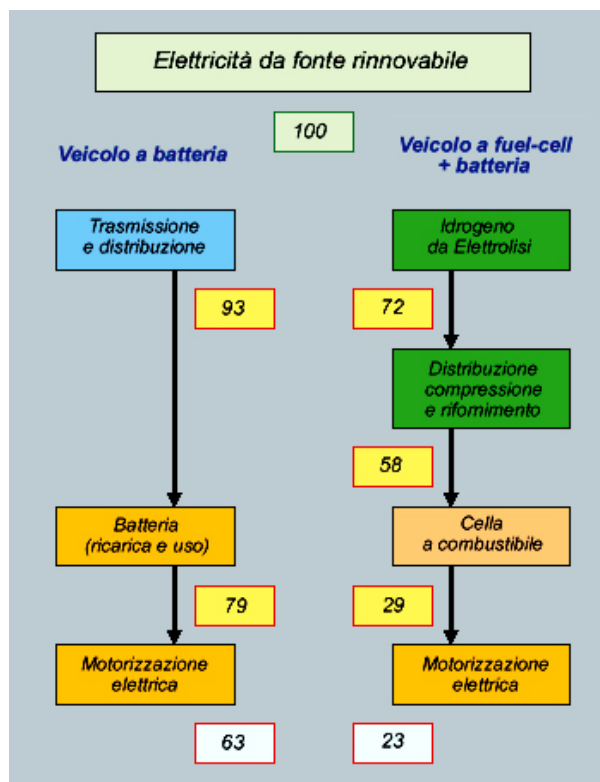


Figura 6-18: analisi energetica da fonti rinnovabili

Una valutazione del rendimento complessivo “dal pozzo alle ruote”, evidenzia sotto questo aspetto il vantaggio energetico del veicolo a batteria e del veicolo ibrido. Assumendo ad esempio quale fonte primaria il gas naturale, che sarà probabilmente la fonte più utilizzata negli anni a venire, e considerando tutti gli step della catena energetica (dalla produzione dell’energia elettrica o dell’idrogeno fino alla resa del propulsore elettrico) ne risulta un rendimento complessivo del 24% per il veicolo a cella a combustibile (provvisto di batteria per il recupero energetico), del 35% per il veicolo a batteria e del 28% per il veicolo ibrido plug-in considerandone l’utilizzo al 50% in emissioni zero e il 50% in funzionamento ibrido.

Partendo da altre fonti primarie, incluse quelle rinnovabili (Fig. 4.6), le cifre sono diverse ma la conclusione, anche per un futuro lontano basato sulle fonti rinnovabili, resta in ogni caso a favore della soluzione a batteria, nel rapporto di almeno 2:1 o più. Maggiori dettagli sono riportati nelle pagine ecosostenibilità del presente sito.

La conclusione è in sostanza che, anche in futuro, l’impegno a produrre e utilizzare veicoli non inquinanti ed energeticamente sobri si tradurrà nella scelta bilanciata fra i due vettori energetici, elettricità e idrogeno, in dipendenza delle esigenze degli specifici settori di impiego, e con una articolazione in continua evoluzione in ragione della maturità tecnologica dei sistemi e della accettazione del mercato.”

9. VEICOLI ELETTRICI A RICARICA INDUTTIVA

Gli autobus elettrici si distinguono dagli autobus a metano, ibridi, o con il classico motore a gasolio per i minori costi di esercizio che comportano a lungo termine nelle tratte urbane. Appare quindi ovvio che numerosi studi e sperimentazioni siano avviate per migliorare le prestazioni dei motori elettrici destinati alla trazione. Uno dei grossi problemi dei motori elettrici è quello dell'accumulo dell'energia: i motori elettrici tradizionali, come spiegato nei paragrafi precedenti, sono dotati di batterie ricaricabili, le quali hanno il problema di avere costi elevati, autonomie limitate e tempi di ricarica piuttosto lunghi. Una soluzione a questo problema, che trova applicazione nell'ambito del trasporto pubblico urbano su gomma, è rappresentata dalla ricarica induttiva. Tale modalità di ricarica prevede di sfruttare le soste degli autobus per il carico/scarico dei passeggeri o al capolinea per effettuare piccole ricariche induttive: tale tecnologia è detta IPT, acronimo inglese di trasferimento induttivo di potenza.

Dal 2002 circa 30 autobus elettrici a Genova e a Torino adottano la tecnologia IPT. Ad oggi, le aziende municipali di trasporto AMT e GTT hanno rilevato i seguenti vantaggi da questa tecnologia. Ricariche parziali periodiche degli autobus elettrici determinano una durata di esercizio maggiore di circa il triplo rispetto agli autobus elettrici tradizionali. La capacità della batteria può pertanto essere ridotta anche al 75 %, fatto che rende il veicolo più economico all'acquisto, più leggero e non limita lo spazio del vano per i passeggeri.

9.1. VANTAGGI ECONOMICI E AMBIENTALI DELLA RICARICA INDUTTIVA [8]

Sistemi di ricarica di tipo induttivo abbinano i vantaggi dell'elevata efficienza dei motori elettrici, a quelli offerti da ricariche induttive, le quali consentono di evitare l'installazione di grandi accumulatori elettrici sui veicoli.

I vantaggi della trazione elettrica risiedono soprattutto nel suo ottimo bilancio energetico. Secondo una recente analisi comparativa condotta negli Stati Uniti, i costi per l'energia degli autobus elettrici selezionati ammontano a circa 9.000 dollari all'anno, mentre un autobus a gasolio di simili prestazioni brucia carburante per 50.000 dollari all'anno. Il costo di acquisto di un autobus elettrico, oggi ancora piuttosto elevato, è ammortizzato al più tardi dopo il quarto anno di attività. Si tratta di un dato che in Cina non è più oggetto di ulteriori indagini ma che invece viene già messo in pratica in grande stile nelle città in rapido sviluppo come Shenzhen.

Oltre alle caratteristiche del sistema di trazione stesso, è anche la tecnologia di ricarica a rivestire un ruolo importante ai fini del miglioramento del bilancio energetico complessivo di una flotta di autobus. La ricarica parziale e periodica, nota anche con il termine di "biberonaggio", consente infatti al gestore della flotta di ricorrere ad autobus più convenienti con batterie di minori dimensioni

e che durano di più grazie alla minor sollecitazione elettrochimica delle celle derivante da cariche leggere e frequenti. Tale ricarica parziale occasionale consente altresì di dover spostare pesi molto minori e di evitare le corse verso le stazioni di ricarica: fatti che incidono positivamente sul bilancio complessivo delle spese e sull'efficienza del sistema. A ciò si aggiungano la soppressione delle indennità per l'inquinamento, i minori costi di manutenzione e i vantaggi di natura fiscale.

Le linee per autobus con tecnologia IPT hanno dimostrato la loro validità non solo in termini economici. I vantaggi riguardano anche l'assenza di emissioni inquinanti e la ridotta rumorosità. Poiché le stazioni di ricarica possono essere integrate a terra in maniera invisibile, il loro impiego non rappresenta un elemento di disturbo per l'aspetto architettonico urbano, né per le attrazioni turistiche. Non provocano inoltre rischi di inciampo e sono immuni da atti di vandalismo o da danneggiamenti da parte di roditori.

9.2. FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA DI RICARICA

La tecnologia di ricarica adottata, *Inductive Power Transfer*, abbreviato IPT®, è un sistema di trasferimento di energia per veicoli a trazione elettrica che si realizza mediante il fenomeno dell'accoppiamento per risonanza magnetica. Il sistema è costituito da due componenti principali: una spira primaria di trasmissione, collegata alla rete di distribuzione elettrica mediante un convertitore, e una spira secondaria di ricezione, integrata nel pianale del veicolo. Questa tecnologia consente il trasferimento di energia in maniera automatica, efficiente e senza contatto tra i componenti.

La strategia di IPT® si basa su processi di ricarica brevi e periodici. La batteria è caricata completamente durante la notte e ricaricata parzialmente durante il giorno in funzione delle necessità e delle possibilità presso fermate dedicate appositamente attrezzate, in una misura pari al 10-15 % a seconda della durata della sosta, mentre i passeggeri salgono o scendono dal mezzo.

La ricarica parziale effettuata ad esempio ai capolinea o ai punti nevralgici dei percorsi conferisce al veicolo sufficiente autonomia per raggiungere la stazione di ricarica successiva, così da poter ridurre al minimo la quantità di energia da immagazzinare. La capacità della batteria può pertanto essere ridotta drasticamente, rendendo il veicolo più economico all'acquisto, più leggero e senza limitazioni di spazio nel vano per i passeggeri.

Il numero delle stazioni di ricarica è funzionale alla grandezza e all'intensità del servizio della flotta di autobus: maggiore è il numero degli autobus della flotta e delle stazioni di ricarica presenti, maggiore sarà la flessibilità ed eventualmente la rapidità della modalità di ricarica. I costi di acquisto e di esercizio degli impianti di ricarica sono ammortizzati dagli autobus circolanti sulla linea: l'investimento risulta quindi conveniente qualora le linee siano ad alta frequentazione, in modo da ripartire i costi fissi di impianto su un numero consistente di utenti.

Alle fermate o ai capolinea gli autobus possono essere ricaricati con una potenza di 60 kW o 120 kW mentre i passeggeri salgono o scendono dal mezzo. Durante la fase di ricarica, le spire di ricezione dell'autobus si avvicinano alla spire di alimentazione collocate a terra fino a una distanza di 40 mm e il 95% dell'energia prelevata dalla rete di distribuzione elettrica viene trasferita, in condizioni normali, alla batteria.

In termini di rendimento la tecnologia IPT è praticamente paragonabile alla modalità di carica tramite cavo con alimentatori moderni di elevata qualità.

10. UN ESEMPIO DI VEICOLO A RICARICA INDUTTIVA: IL VEICOLO “OLEV”



Figura 6-19: trenino OLEV

Il trenino *OLEV* (Fig. 4-11), realizzato dalla KAIST (Istituto avanzato di scienza e tecnologia della Corea) per il Seoul Grand Park di Gwacheon City nel nord ovest della Corea del Sud, è un prototipo di un nuovo genere di veicoli elettrici comparabili agli attuali mezzi endotermici per quanto riguarda la percorrenza. Il nome *OLEV* è l'acronimo di *Veicolo Elettrico On-Line*, ovvero un veicolo elettrico che ricarica le batterie per induzione elettromagnetica attraverso l'accoppiamento di un sistema installato a bordo e una rete di cavi elettrici sotterranei disposti lungo il percorso, senza che avvenga un contatto diretto tra la rete di terra e l'impianto a bordo veicolo. Un primo vantaggio è quello di non dover installare pacchi batterie ingombranti, che pertanto possono ridurre la capacità ad un quinto di un normale veicolo elettrico con vantaggi sia per l'ingombro e il peso, in quanto la ricarica viene eseguita durante la marcia del veicolo. Oltre a ciò non è necessario ricaricare le batterie a lungo prima di partire o realizzare grossi impianti per la ricarica veloce.

La prima applicazione utile e possibile è quella delle linee di trasporto urbano. I sistemi presenti sotto il manto stradale possono trasmettere l'energia per un tempo adatto cioè alle fermate dei bus, nei parcheggi, ai semafori eccetera. KAIST stima che il 20% dei mezzi delle linee di bus presenti a Seoul City potrebbero usufruire del sistema di ricarica con opportune infrastrutture stradali.

Questo approccio di ricarica induttiva dei veicoli durante l'esercizio alle basse velocità o durante le soste o le fermate rappresenta una tecnologia importante per lo sviluppo dei veicoli elettrici nel prossimo futuro. Oltre ai vantaggi derivanti dalla riduzione dei costi e degli ingombri dovuti alle batterie installate sui veicoli elettrici convenzionali, la ricarica senza contatto è più sicura perché impedisce potenziali rischi di natura elettrica, come scosse elettriche, che derivano dal contatto diretto con le fonti di alimentazione.



Figura 6-20: veicolo OLEV e strisce di ricarica

Il percorso dei cavi sotterranei che consentono la ricarica dei veicoli è indicato da *strisce di ricarica*, suddivise in diversi metri di segmenti di lunghezza sotto il manto stradale. Ogni volta che i veicoli transitano su una striscia di ricarica, essi possono ricevere energia per ricaricare il pacco batterie. L'erogazione dell'energia è garantita da un sensore installato all'interno di ogni segmento: quando un veicolo vi passa sopra, viene attivato il sistema di erogazione dell'energia elettrica. Ciò significa che quando una macchina senza i sensori di dialogo passa sopra il segmento non viene erogata l'elettricità. L'alimentazione tramite interruttore on/off solleva anche dalle preoccupazioni per la sicurezza riguardo i campi elettromagnetici (EMF). Pedoni o automobili senza le unità di dialogo non saranno esposti a campi elettromagnetici, perché i sensori di "aggancio" nei segmenti non funzionano, quindi non viene erogata l'elettricità.

Sotto l'aspetto dei campi elettromagnetici, i risultati del test per OLEV sono ben al di sotto di 62.5mG a 20kHz come richiesto dalla direttiva del 1998 della *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP). I risultati del test EMF per l'OLEV variano tra 20mG (all'interno OLEV durante l'esecuzione) e 50mG (quando l'OLEV è in sosta al parcheggio).

Per la prima volta nel mondo, KAIST è riuscito ad ottenere da 12 centimetri fino a 17 centimetri di distanza tra i due sistemi una efficienza di trasmissione di potenza di oltre il 70%.

Il team di ricerca KAIST ha realizzato un pick-up di capacità massima di 62KWh, raggiungendo livelli del 74% in termini di efficienza di trasmissione di potenza, con una distanza di 13 centimetri dalla strada al fondo di un veicolo. Composto da una unità motrice e tre carrozze, l'OLEV viaggia in un percorso per una lunghezza totale di 2,2 km. Sono state realizzate quattro sezioni di infrastrutture di approvvigionamento di energia lungo la tratta. I cavi di alimentazione sono interrati per un totale di 372,5 metri, il 16% della distanza totale del percorso 2.200 metri.

11. UN ESEMPIO DI VEICOLO A RICARICA INDUTTIVA: GLI AUTOBUS ELETTRICI DI BRAUNSCHWEIG

A Braunschweig, cittadina tedesca della Bassa Sassonia di circa 250 mila abitanti, sarà sperimentato un nuovo sistema di trasporto pubblico su gomma, elettrico, senza binari, senza cavi, senza dover ricorrere a lunghe soste per la ricarica delle batterie.

Il Ministero tedesco dei trasporti ha annunciato il 5 giugno 2012 di voler investire 2,9 milioni di euro in questo progetto utilizzando una tecnologia sviluppata da Bombardier (*Primove*) già stata testata con successo ad Augusta, in Baviera. Grazie a questa tecnologia le batterie dei veicoli elettrici si ricaricano automaticamente mediante appositi trasmettitori di una potenza fino a 400 kW, collocati sotto l'asfalto in punti chiave della rete viaria. Per la sperimentazione verranno utilizzati due bus articolati di 18 metri, che entreranno in servizio nel 2013, e percorreranno una linea di 12 chilometri. L'alimentazione elettrica dei mezzi lungo il percorso è garantita da 7 stazioni di ricarica nascoste sotto all'asfalto, che forniscono corrente elettrica che per induzione in modo da ricaricare le batterie a bordo dei bus.

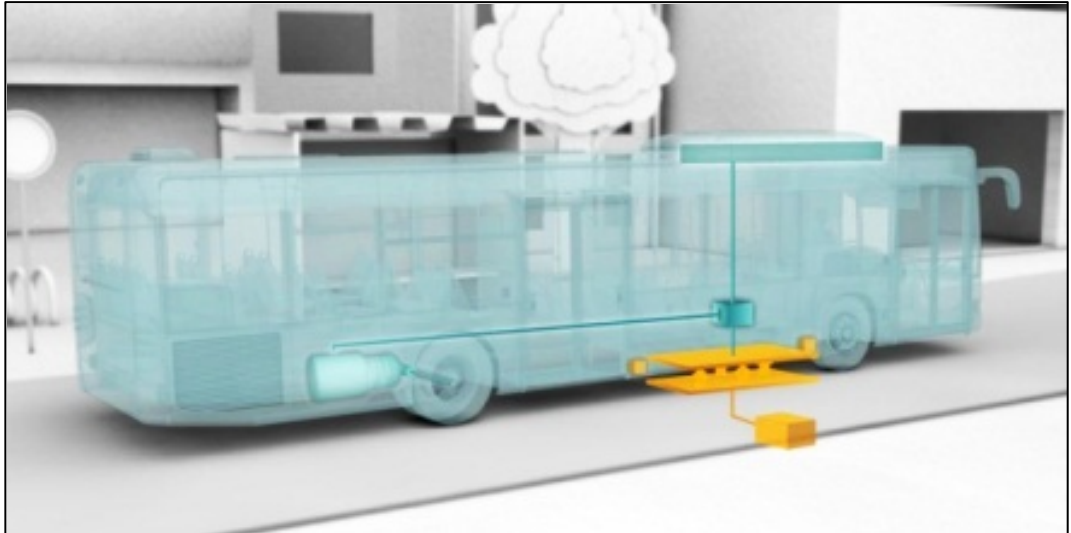


Figura 6-21: schema di ricarica *Primove*

La tecnologia *Primove* per la ricarica wireless comprende l'accoppiamento tra componenti sepolti lungo il tragitto e i componenti sono montati a bordo del veicolo. Entrambi i set sono progettati per consentire la massima integrazione strutturale e adatti per il trasferimento di energia ad alta potenza ad efficienza.

I componenti installati lungo la linea (Fig. 4-14) sono completamente interrati e possono essere rivestiti con materiali diversi come l'asfalto o cemento. I segmenti di cavo primari, dotati di una schermatura magnetica sotto l'avvolgimento primario per prevenire le interferenze elettromagnetiche, forniscono il trasferimento effettivo di potenza al veicolo e vengono installati appena sotto la superficie stradale. Sensori di passaggio del veicolo sopra i segmenti controllano l'erogazione della corrente, in modo da limitare le inutili dispersioni di potenza lungo la linea. È necessario installare anche un inverter per convertire la tensione di alimentazione da corrente continua alla tensione utilizzata nel sistema.

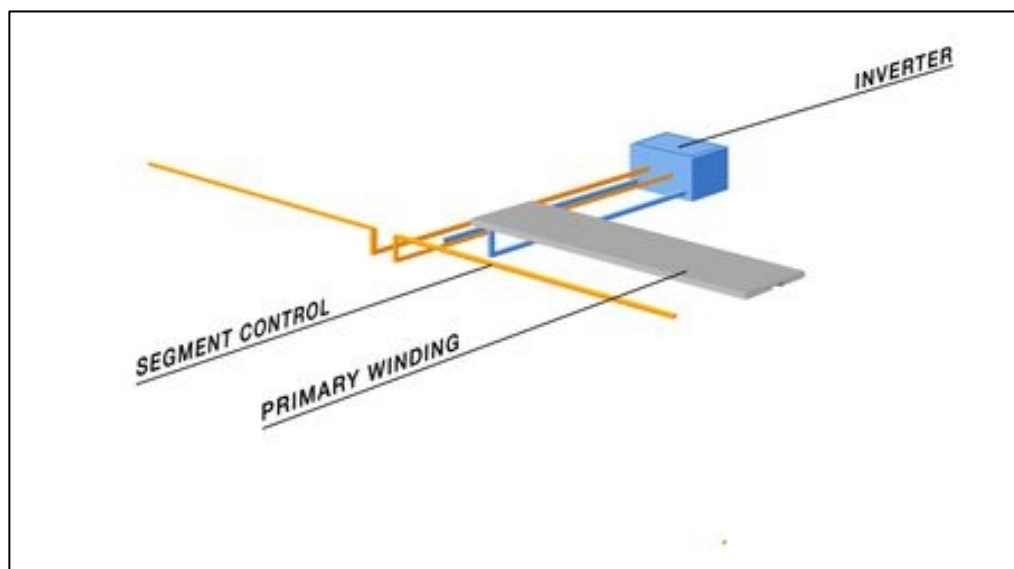


Figura 6-22: componenti di terra

I componenti a bordo del veicolo, posti sotto la scocca, fungono da ricevitori per convertire il campo magnetico dall'avvolgimento primario in corrente alternata. Gli inverter convertono la corrente alternata in corrente continua che alimenta e ricarica del veicolo, mentre il sistema di accumulo può essere effettuato con le batterie. È necessario infine installare a bordo veicolo un sistema di rilevamento e di controllo per individuare i segmenti di cavo per coordinare l'accensione e lo spegnimento dell'erogazione di corrente elettrica.

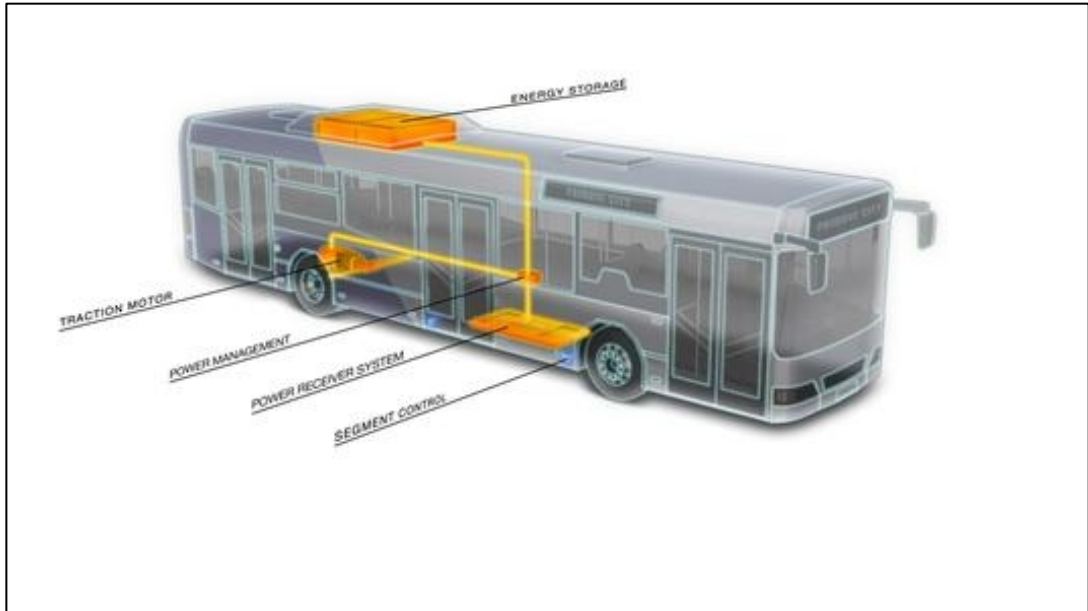


Figura 6-23: componenti di bordo

CAPITOLO 7 : IL CASO DEI VEICOLI IBRIDI CON MICROTURBINA

La prima sperimentazione delle motorizzazioni ibride-elettriche a microturbina applicate agli autobus adibiti al trasporto urbano viene fatta dall'azienda *Designline* negli anni 2000-2001. Tre autobus, dotati di una motorizzazione ibrida con una microturbina a basse emissioni inquinanti della ditta *Capstone* in sostituzione del tradizionale motore endotermico, percorrono senza sostanziali problemi 200.000 miglia in servizio urbano. Da quell'anno ad oggi, nonostante la riluttanza delle principali aziende di trasporto pubblico mondiali ad adottare la nuova soluzione, si sono registrati grandi miglioramenti in questo tipo di motorizzazione.

A giugno 2010, presso la città di Baltimore, entra in circolazione una flotta di 12 autobus ibridi-elettrici *Designline ECO Saver IV* dotati di microturbina *Capstone C30*, a cui si aggiunge un'ulteriore unità a fine anno. Il principio di funzionamento di tali unità è il seguente: come per i motori ibridi tradizionali la propulsione è garantita da un motore elettrico, mentre la microturbina entra in funzione per ricaricare le batterie quando queste scendono al di sotto di un certo livello di carica. Tale soluzione garantisce numerosi vantaggi, quantificabili in una riduzione delle emissioni inquinanti di circa il 70%, un abbattimento dei consumi del 40%, nonché di una riduzione delle emissioni sonore rispetto ad un autobus tradizionale.



Figura 7-1: autobus ibrido con microturbina in servizio a Baltimore

Prima di esaminare la configurazione impiantistica che caratterizza questa applicazione, descriviamo brevemente il funzionamento delle microturbine.

1. LE MICROTURBINE A GAS

Con il termine *microturbina a gas* si identifica un sistema di generazione di potenza di piccola taglia (<500kWe), basato su un ciclo a gas rigenerativo, composto da un compressore, una turbina, un recuperatore, un alternatore e una parte elettrica per la cessione della potenza elettrica prodotta.

Fino a poco fa i cicli a gas a turbina erano impiegati solo per le grandi generazioni di potenza, in quanto per impianti a piccola scala non risultavano competitivi. Per questo motivo la realizzazione delle microturbine ha richiesto una globale revisione dello schema architettonico tradizionale che veniva e viene applicato sulle grandi turbine.

Uno schema idoneo a descrivere uno schema impiantistico di microturbina per applicazioni stazionarie è riportato in Fig.5-2.

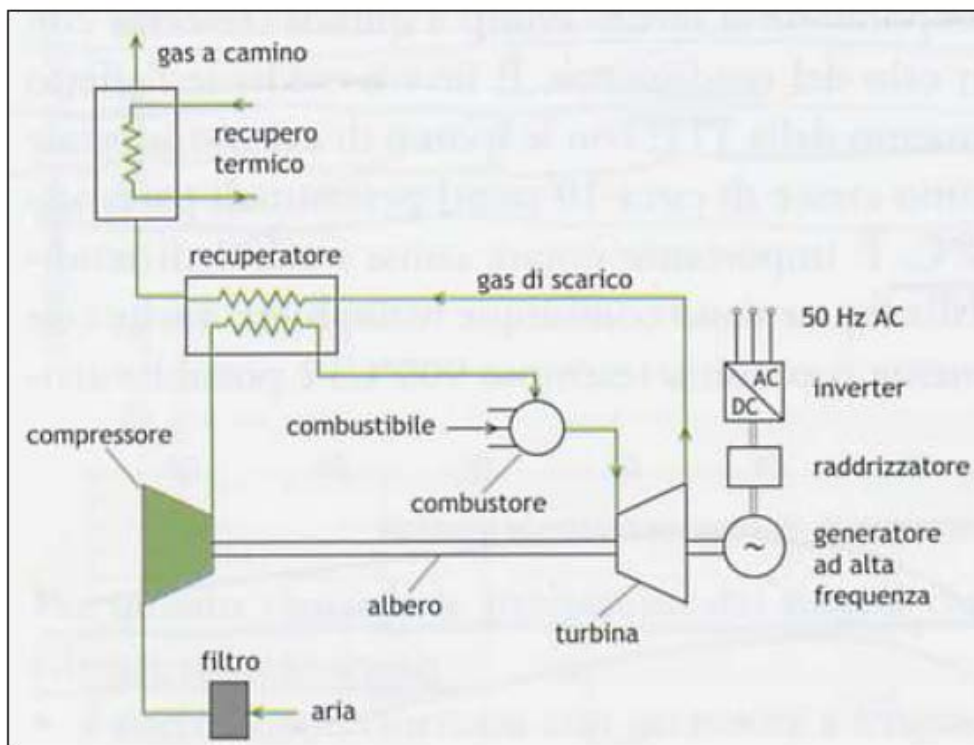


Figura 7-2 schema impiantistico di microturbina per applicazioni stazionarie

Si identificano così i seguenti elementi fondamentali:

1. **Turbocompressore:** composto da un **compressore centrifugo** e da una **turbina radiale** centripeta calettati su un unico albero rotante a velocità comprese tra i 50000 e i 120000 rpm;

2. **Recuperatore o scambiatore di calore aria/gas:** è necessario per ottenere rendimenti del ciclo accettabili nel caso in cui si adottassero limitati rapporti di compressione (circa 4);
3. **Combustore:** simile a quello della tradizionale turbina, ma p realizzato in modo che le emissioni di NO_x siano inferiori a 10 ppmvd (part per million, volumetric dry) al 15% di ossigeno, ossia circa un ordine di grandezza in meno rispetto ai motori alternativi a gas senza la necessità di impiegare sistemi di abbattimento agli scarichi;
4. **Sistema di recupero termico:** costituito da uno scambiatore di calore che recupera energia termica dai gas di scarico producendo per esempio acqua calda o vapore a bassa pressione.
5. **Sistema di *power conditioning*:** costituito da un generatore di magneti permanenti rotanti in modo solidale all'albero della macchina, produce energia elettrica ad alta frequenza. Tale frequenza viene poi riportata alla frequenza di rete mediante l'impiego di un **convertitore statico** a raddrizzatore ed inverter.

Rimandando approfondimenti tecnici alla letteratura specializzata, ci limitiamo a fare le seguenti considerazioni sulle prestazioni delle microturbine. In particolare il rendimento è influenzato dai tre parametri seguenti:

1. Rapporto di compressione;
2. Temperatura di ingresso in turbina;
3. Rendimento dei componenti.

L'adozione di macchine radiali monostadio implica l'ottenimento di un basso rapporto di compressione, a differenza delle grandi applicazioni, le quali prevedono rapporti di compressione da 10 a 15. Nel caso di **ciclo semplice**, l'impiego di un basso rapporto di compressione comporterebbe una temperatura di uscita dei gas di scarico molto alta e una temperatura di ingresso nel combustore molto bassa, due condizioni incompatibili con un buon rendimento. L'unico modo per avvicinare queste temperature sarebbe quello di portare il rapporto di compressione vicino a 12-15, ottenendo valori ragionevoli, pur sempre impiegando macchine multistadio, incompatibili con le dimensioni richieste per realizzare micro-turbine. L'impiego di un **ciclo recuperativo** dotato di uno scambiatore che recupera il calore disponibile allo scarico della turbina consente di ovviare ai problemi sopra elencati e di avere rendimenti elevati. L'andamento del rendimento è illustrato nel grafico di Fig.5-3.

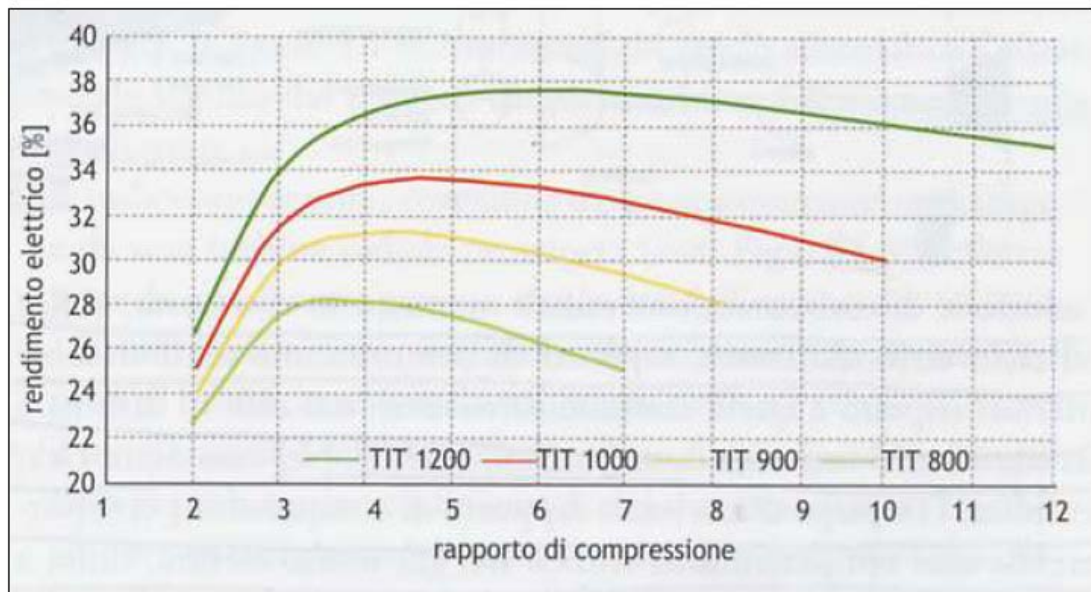


Figura 7-3: andamento del rendimento in funzione del rapporto di compressione e della temperatura di ingresso in turbina (TIT)

Dal grafico si evidenzia infatti come i rendimenti più elevati si ottengano, a seconda della temperatura di ingresso in turbina, per rapporti di compressione compresi tra i 3 e 7.

Le prestazioni delle microturbine, essendo macchine caratterizzate da un ciclo a gas aperto, risentono notevolmente delle condizioni ambientali in cui si trovano ad operare, in particolare delle variazioni di pressione e temperatura ambiente. In particolare il rendimento e la potenza prodotta variano come segue:

1. Al crescere della temperatura diminuiscono rendimento e potenza prodotta: per questo in alcuni casi vengono installati sistemi di raffreddamento dell'aria aspirata da impiegare nelle stagioni più calde;
2. Al diminuire della temperatura ambiente aumentano sia il rendimento che la potenza prodotta fino ad un valore di soglia, solitamente fissato a 5-10 °C, al di sotto del quale la potenza resta costante per l'insorgere di limitazioni sul campo di funzionamento ammissibile delle turbomacchine e per l'intervento di sistemi di sicurezza contro il rischio di formazione del ghiaccio.
3. Al diminuire della pressione ambiente, che può avvenire nel caso di installazione o utilizzo a quote altimetriche significative, si registra una diminuzione della potenza prodotta e del rendimento con andamento lineare. Ad esempio, alla quota di 1000m la potenza generata diminuisce di circa il 10% rispetto a quella che genererebbe in caso di utilizzo ad un livello altimetrico pari al livello del mare.

L'effetto di temperatura e pressione ambiente è riassunto nei grafici di Fig.5-4 e Fig.5-5.

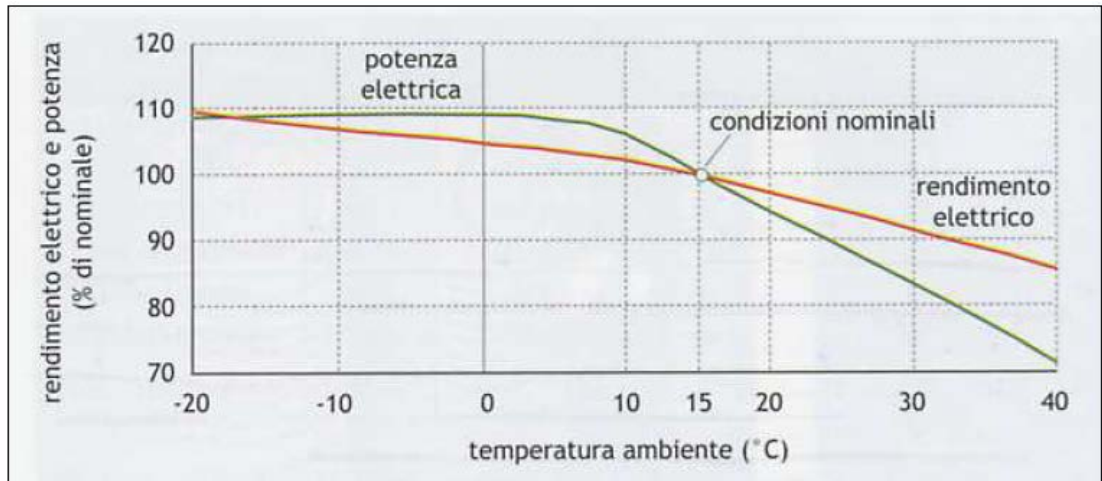


Figura 7-4: Influenza della temperatura ambiente su rendimento elettrico e potenza elettrica

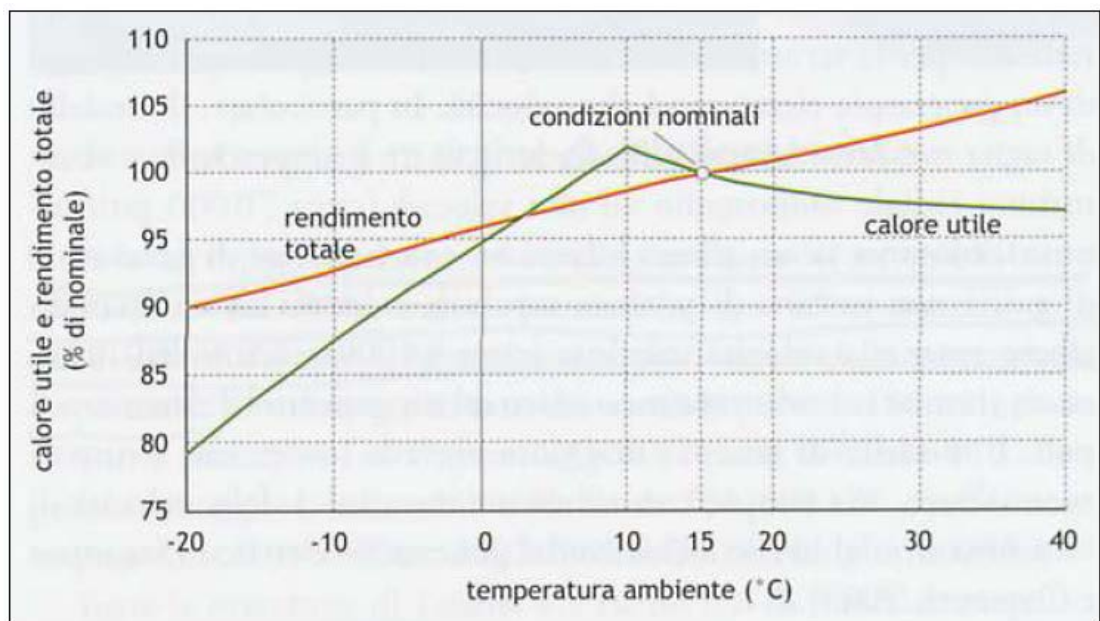


Figura 7-5: influenza della temperatura esterna sul calore recuperabile e sul rendimento totale

Fatte queste considerazioni, possiamo ora analizzare i principali vantaggi che derivano dall'adozione delle microturbine in sostituzione dei motori a combustione interna. Le microturbine presentano infatti:

- Emissioni notevolmente ridotte;
- Rendimenti ad oggi confrontabili, ma migliorabili in prospettiva con l'avanzamento tecnologico;
- Pesi e ingombri ridotti, maggiore facilità di installazione, minor rumore e minori vibrazioni;
- Manutenzione notevolmente ridotta, con conseguente riduzione di costi;

- Semplicità impiantistica ed alta affidabilità;
- Possibilità di impiego di differenti combustibili.

L'unico aspetto negativo è legato agli aspetti economici, in quanto i costi di acquisto, a causa di una produzione industriale a volumi ancora molto ridotti, sono ancora molto elevati. In Tab.5-1 sono riassunte i principali voci di parametri economici ed ambientali delle microturbine.

Tabella 7-1: principali parametri economici ed ambientali delle microturbine

Costo di investimento	1100 €/kWh
Costo di manutenzione	10-15MWh
Vita utile	60.000-80.000h
Emissioni	NO _x , CO < 10 ppmvd al 15% di O ₂

2. ESEMPI REALIZZATIVI E STATO DELL'ARTE

I primi sviluppi delle microturbine a gas si hanno nel 1945, in cui vengono per la prima volta applicate turbine a gas in ambito motoristico per lavori pesanti.

La *Ford Motor Company*, negli anni '60 sviluppa due modelli di microturbina, il 704 e il 705, applicati ad autocarri Diesel, per poi immettere sul mercato, nel 1971 un modello più piccolo e leggero per applicazioni ad autocarri utilizzando rigeneratori ceramici.

All'inizio degli Anni 90' vengono avviate le prime sperimentazioni sull'utilizzo delle microturbine applicate ai veicoli ibridi-elettrici.

Negli anni successivi si registrano nuovi sviluppi nelle microturbine a gas per applicazioni di generazione di potenza distribuita e la produzione di queste macchine ha inizio nell'anno 2000.

In Tab.0-2 vengono riportate le descrizioni dei principali modelli di microturbine oggi presenti sul mercato. Il numero di modelli disponibili risulta, a causa della ancora scarsa diffusione sul mercato delle microturbine, molto più piccolo rispetto a quello dei motori a combustione interna. Ciò è dovuto al fatto che attualmente i costi da sostenere per questo nuovo tipo di tecnologia sono molto più elevati rispetto ai motori e quindi fino ad ora sono state di fatto fuori dal mercato; questa tendenza però potrebbe invertirsi se in futuro ci si concentrerà principalmente sugli aspetti ambientali.

Tabella 7-2: principali modelli di microturbine presenti sul mercato prima del 2010

MOD.	POTENZA ELETT. (kW)	η_{el} (%)	PORT. FUMI (kg/s)	TEMP. FUMI (°C)	NO _x (mg/Nm ³)	NO _x (mg/kWh e)	NO _x (ppm)	INGOMBRI (mm)	PESO (kg)
1 CAPSTO NE C30	30	26	0,31	275	19	213,2	9	1943x76 2x1516	405
2 CAPSTO NE C60	60	28	0,49	305	19	222	9	2108x76 2x1956	758
3 I.R. MT70 ELLIOTT	70	29	0,72	232	10,6	234,6	9	2140x13 10x2910	2270
4 TA100 TURBEC	100	29	0,78	293	50	725,8	24	2250x85 0x1940 2770x90	2040
5 T100 CAPSTO	100	30	0,8	270	N.D.	384	15	0x1810 3700x17	2770
6 NE C200 I.R.	200	33	1,3	280	18	181,4	9	00x2500 4136x21	2775
7 MT250 CAPSTO	250	30	2,13	242	N.D.	187,3	9	34x4063 9100x24	5440
8 NE C600 CAPSTO	600	33	4	286	18	181,4	9	00x2900 9100x24	11475
9 NE C800 CAPSTO	800	33	5,3	280	18	181,4	9	00x2900	12700

Analizzando i dati relativi alle microturbine in questione, si può notare come le turbine *Capstone* di maggiore taglia presentino i migliori rendimenti elettrici; si registrano ottimi risultati anche con la *Turbec T100*, che supera la *Elliot TA100* di pari potenza ed eguaglia la *IR MT250* la quale presenta una potenza più che doppia rispetto a queste ultime.

In Fig.0-6 si riporta l'andamento del rendimento elettrico in funzione della taglia per i modelli sopra elencati: emerge che tali valori sono nettamente inferiori a quelli dei motori a combustione interna.

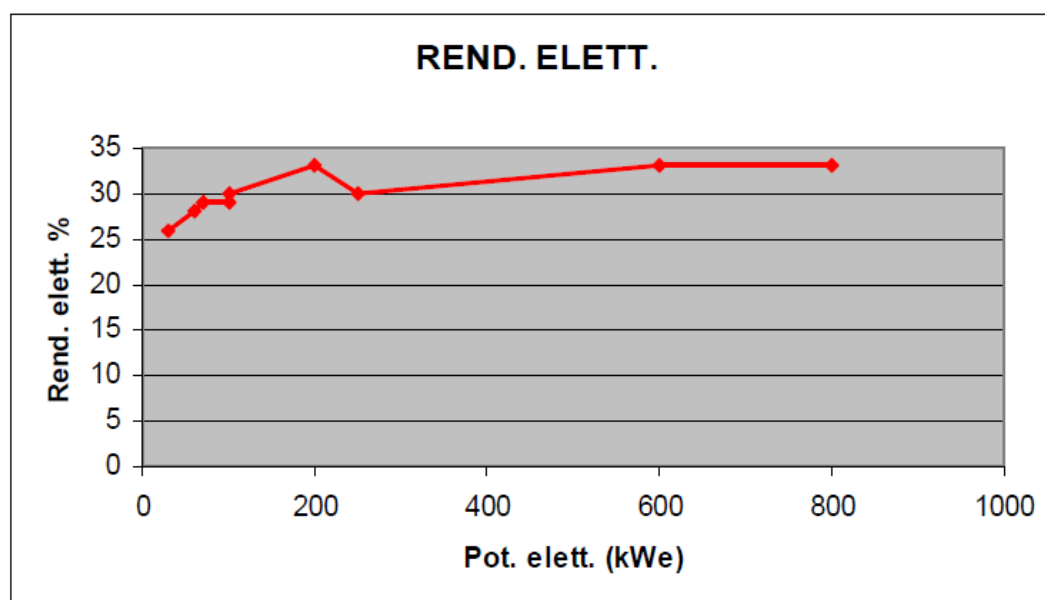


Figura 7-6: andamento del rendimento elettrico in funzione della taglia

È interessante osservare invece l'andamento delle principali emissioni di NO_x (al 15% di O₂): a parte la turbina *Elliot*, la quale risulta più inquinante, le emissioni delle microturbine analizzate oscillano tra 18 e 19 mg/Nm³, valore

inferiore di un ordine di grandezza rispetto ai motori a combustione interna. In Fig.0-7 sono graficati tali dati.

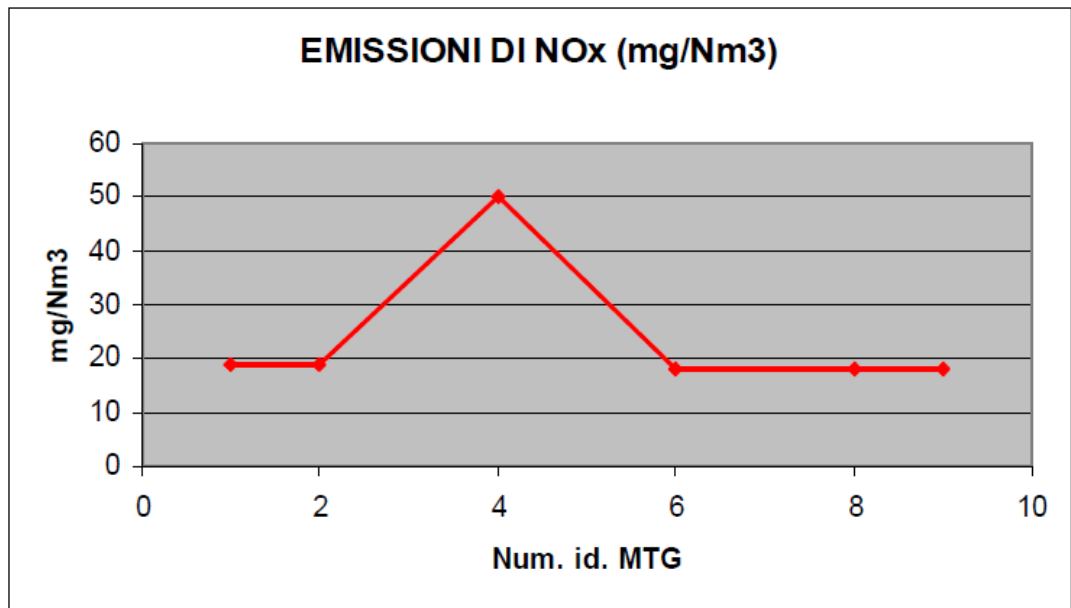


Figura 7-7: emissioni di NOx delle microturbine (ciascuna identificata con il numero di riga di Tab.0-2)

Le migliori emissioni in rapporto alla potenza erogata risultano ancora le Capstone di taglia più grossa, che fa registrare 181,4mg/kWhe. Tali risultati sono riassunti in Fig.0-8.

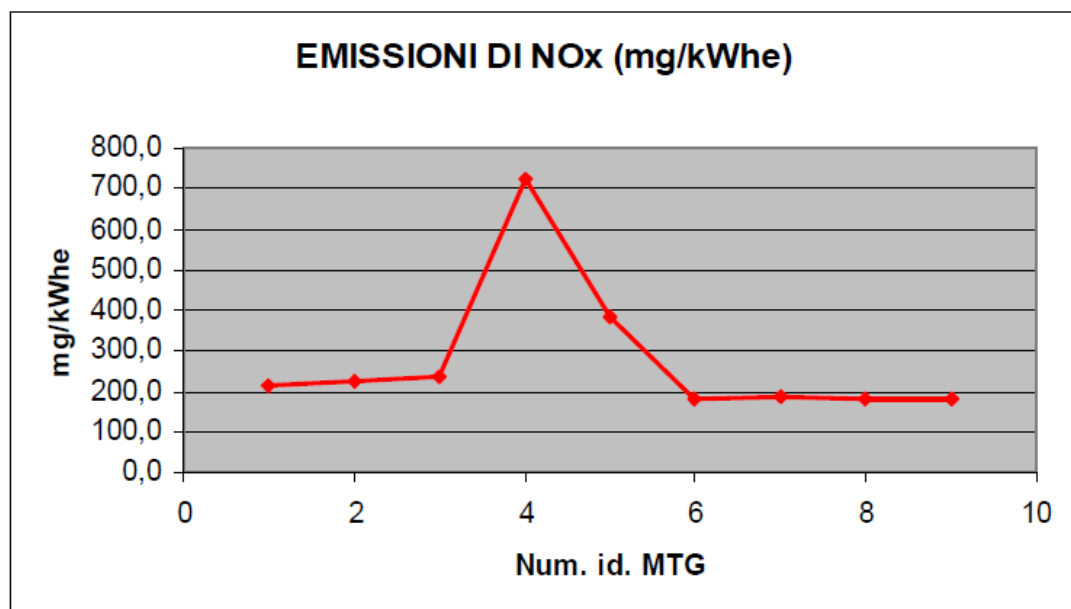


Figura 7-8: emissioni di NOx delle microturbine in rapporto alla potenza erogata

3. APPLICAZIONI DI MICROTURBINE CAPSTONE AI VEICOLI IBRIDI-ELETTRICI

Capstone è oggi senza dubbio la principale azienda produttrice di microturbine. Il suo catalogo, che comprende modelli dai 30kW ai 1000kW, offre diverse soluzioni per le più disparate applicazioni, passando dal mondo dei veicoli terrestri, come autobus urbani, ad applicazioni navali. In particolare, il mercato dei veicoli ibridi-elettrici è quello che negli ultimi anni sta crescendo con maggiore rapidità e risulta particolarmente adatto per installare le microturbine in sostituzione ai motori endotermici.

Il primo miglioramento necessario per l'applicazione ai veicoli ibridi è stata la riduzione di ingombri e peso del pacco batterie, ottenuta applicando un sistema di raffreddamento ad acqua in sostituzione alla vecchia soluzione ad aria. Il vecchio sistema di raffreddamento comprendeva un modulo di controllo del motore (ECM) per convertire la corrente elettrica ad alta frequenza prodotta dal turbogeneratore a 760Vdc, e un modulo di controllo delle batterie (BCM) per convertire a sua volta tale corrente alternata in una continua immagazzinabile direttamente nelle batterie. Il nuovo modello invece utilizza un solo step di conversione per generare potenza a 550-650Vdc. In Fig.5-9 si possono apprezzare le riduzioni di dimensioni raggiunte.

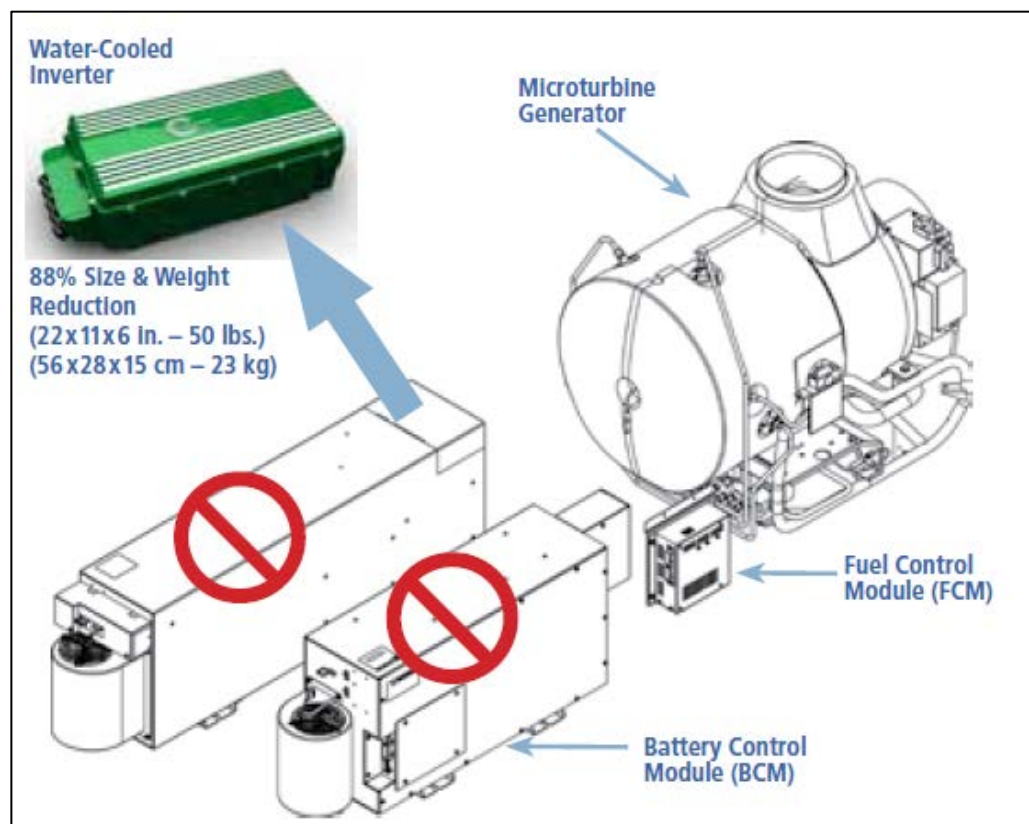


Figura 7-9: riduzione di dimensioni ottenute tra vecchio e nuovo sistema di raffreddamento

I vantaggi del nuovo sistema di raffreddamento rispetto alla soluzione tradizionale si possono così riassumere:

- Riduzione dell'88% degli ingombri (in riferimento al nuovo modello C65);
- Riduzione della massa dell'88% (in riferimento al modello C65);
- Applicazione di chiusura ermetica che protegge dalle contaminazioni esterne il modulo;

Capstone fornisce, oltre alla microturbina, i componenti principali per realizzare un sistema propulsivo adatto ai veicoli ibridi-elettrici (Fig.5-10).

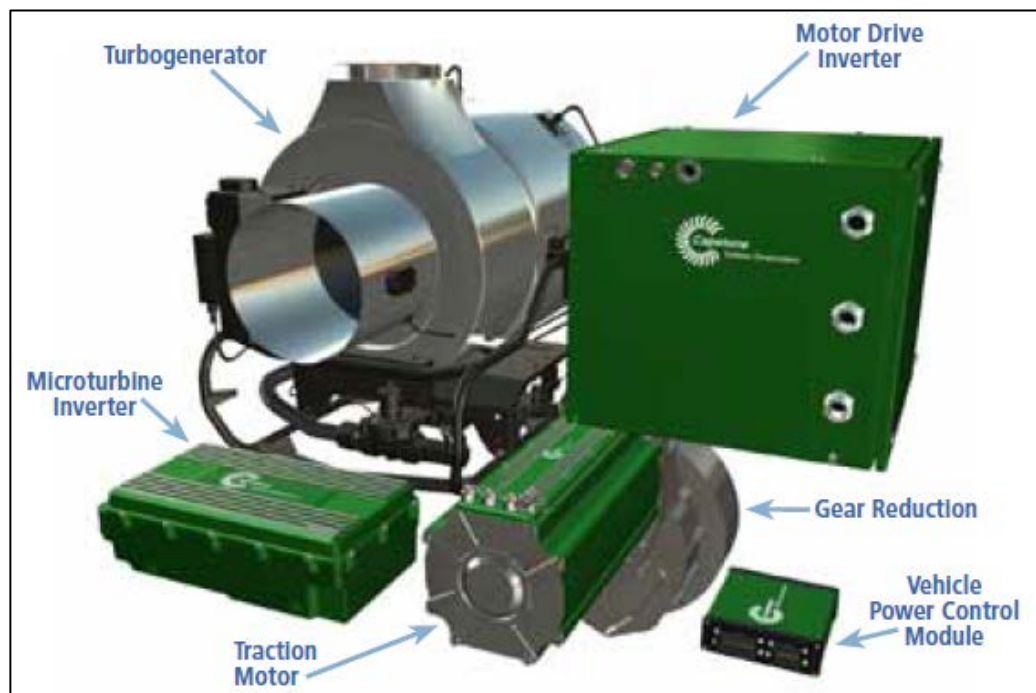


Figura 7-10: componenti per la trazione di un veicolo ibrido

Tali componenti sono:

1. **Turbogeneratore e Inverter della microturbina:** essi hanno la funzione di convertire il carburante bruciato in potenza elettrica utile per essere accumulata nel pacco batterie;
2. **Motore elettrico di trazione:** Sono disponibili diversi tipi di motore, da 70kW fino ad un massimo di 315kW, che operano ad un regime di rotazione da 7.000 a 12.000rpm;
3. **Riduttore:** Per l'applicazione ai veicoli ibridi è necessario utilizzare a valle un riduttore di rapporti;
4. **Inverter per il motore elettrico (Motor Drive Inverter):** converte la corrente continua accumulata nelle batterie in corrente alternata, necessaria per alimentare il motore elettrico. Esso presenta anche la

funzione di recuperare l'energia in frenata e trasformarla in corrente continua per ricaricare gli accumulatori;

5. **Modulo di controllo della potenza del veicolo (Vehicle Power Control Module):** il modulo di controllo ha la funzione di coordinare i componenti del sistema di trazione e di controllare i flussi di potenza elettrica e meccanica.

4. FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA DI TRAZIONE IBRIDO-ELETTRICO CAPSTONE

Il sistema di trazione ibrido-elettrico *Capstone* è costituito dall'accoppiamento di un'unità elettrica, la quale fornisce potenza meccanica al veicolo, con una microturbina, che svolge le stesse funzioni dei tradizionali motori a scoppio montati sui tradizionali veicoli ibridi.

La **microturbina**, infatti, bruciando combustibile attinto dal serbatoio del veicolo stesso, che può essere gasolio e gas naturale, produce potenza elettrica utile alla ricarica del pacco batterie del veicolo. La microturbina viene attivata solo quando il livello di carica delle batterie scende sotto un valore di soglia.

Il **pacco batterie** è l'organo di accumulo della potenza: esso infatti può essere ricaricato in tre differenti modalità:

1. Dalla microturbina;
2. Attraverso una ricarica esterna, nel caso fosse possibile ottenere energia elettrica da una stazione di ricarica;
3. Dal motore elettrico; quando funziona da freno, recuperando energia nelle fasi di decelerazione o frenata.

La **centralina elettronica** controlla i processi di cessione e ricevimento della potenza elettrica dal pacco batterie al motore elettrico e viceversa.

Il **motore elettrico** riceve potenza elettrica dal pacco batterie e la converte in potenza meccanica, che, grazie all'ausilio della trasmissione, viene scaricata alle ruote motrici.

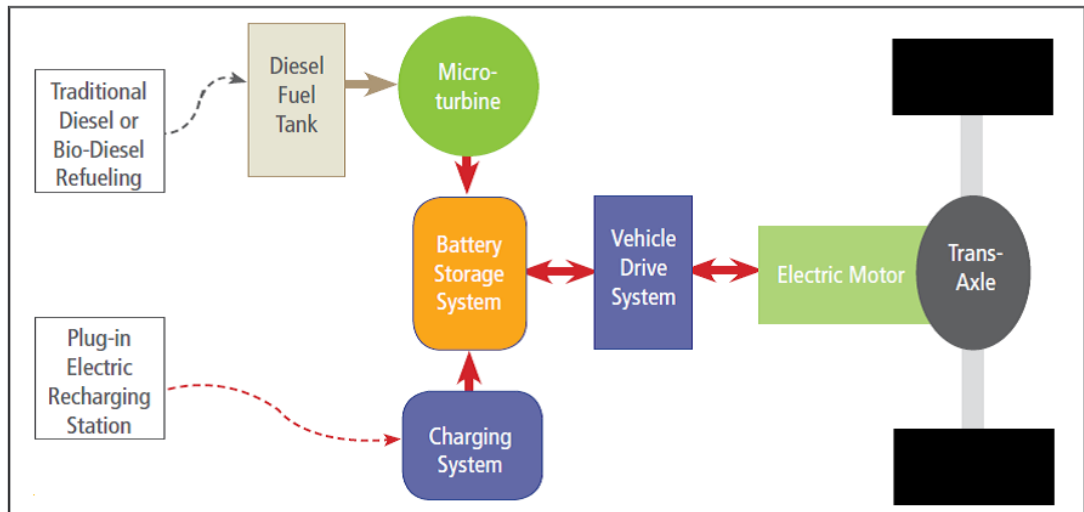


Figura 7-11: schema della trazione ibrido-elettrica Capstone

5. EMISSIONI

Analizziamo ora i dati relativi alle emissioni inquinanti prodotte. In particolare notiamo come l'utilizzo di una microturbina C30 fornisca dati eccellenti rispetto alle emissioni massime consentite dalle normative vigenti sull'inquinamento (Tab.5-3 – fonte *Capstone Turbine Corp*).

Tabella 7-3: principali emissioni inquinanti di un veicolo ibrido dotato di microturbina C30 a gasolio

HDE Standards	EPA (phase-in)	EPA	CARB	CARB Urban Bus	Capstone C30 Diesel Test Results		EU V	EU VI
Effective Date	2007-2010	2010					2008	2013
Emission Units	g/hp-hr				g/kWh			
NO _x	1.30	0.20	0.20	0.20	0.046	0.06	2.00	0.50
CO	15.50	15.50	15.50	5.00	0.87	1.17	1.50	1.50
NMHC	0.32	0.14	0.05	0.05	0.013	0.017	0.46	0.13
PM	0.01	0.01	0.01	0.01	0.003	0.004	0.020	0.01
HCHO				0.01	0.006	0.008		
Smoke							0.5 m ⁻¹	

Facendo un paragone con le emissioni consentite dalla normativa *Euro VI* si registra:

1. Un grande abbattimento degli NO_x, le cui emissioni sono pari a circa 10 volte inferiori ai valori limite della normativa;
2. Emissioni di CO inferiori del 20% rispetto a quelli ammessi;

3. Emissioni di NMHC e particolato notevolmente abbattute, pari a circa un ordine di grandezza in meno rispetto al consentito.

6. UN'APPLICAZIONE AGLI AUTOBUS IBRIDI: *DESIGNLINE ECO SAVER*

La *DesignLine* da anni collabora con *Capstone* per sviluppare autobus ibridi urbani dotati di microturbina in sostituzione ai tradizionali e più inquinanti motori a combustione interna. Il nuovo modello *EcoSaver IV*, sviluppato espressamente per il mercato nordamericano, è equipaggiato con la turbina *Capstone C30* da 30kW.



Figura 7-12: autobus ibrido con microturbina DesignLine EcoSaver IV

Il sistema di trazione presenta le caratteristiche riassunte in Tab.5-4.

Tabella 7-4: caratteristiche del sistema di trazione

Accumulatori elettrici	Batterie con ioni al litio
Principali Inverter	2 moduli <i>SemiKron</i> da 250kW ciascuno
Motori elettrici	2 motori <i>Bosch Rexroth Idramat 3-phase AC</i> , da 120kW ciascuno
Microturbina	<i>Capstone C30</i> , alimentata a gasolio o altri combustibili

I principali vantaggi rispetto al tradizionale utilizzo di autobus a motore endotermico sono così riassunti:

1. Meno emissioni in atmosfera, dato che la microturbina funziona solo nel periodo in cui le batterie devono essere ricaricate;
2. Spese per il carburante dimezzate, data la notevole riduzione dei consumi che offre la microturbina *Capstone*;
3. Il modello *EcoSaver* rispetta i limiti di emissioni prescritti dalla norma ambientale CARB 2010 ed i limiti previsti dalla normativa CARB 2014;
4. Ridotte emissioni acustiche, in particolare quando l'autobus viaggia in "puro elettrico";
5. I costi di manutenzione sono ridotti del 40%.

CAPITOLO 8 : LA GESTIONE DI UNA LINEA CON VEICOLI ELETTRICI: IL CASO DI TORINO CON LE LINEE STAR

Il 16 giugno 2003 a Torino viene inaugurata la linea *Star 1*, la cui peculiarità è quella di essere percorsa unicamente da piccoli autobus elettrici di 7.5 metri, denominati *Elfo*. Questa linea nasce inizialmente per connettere cinque aree di parcheggio, in modo da incrementare l'utilizzo del trasporto pubblico nelle aree cittadine caratterizzate da alta densità di traffico, unitamente all'avvenuta estensione della zona a traffico limitato della città.

Nel periodo iniziale di sperimentazione della linea, coincisa con l'estate 2003, tale linea può essere utilizzata esclusivamente dagli automobilisti che parcheggiavano la loro vettura in uno dei parcheggi appartenenti al sistema *park and ride*. Già dall'autunno dello stesso anno però, su richiesta di alcuni cittadini, l'utilizzo della linea viene esteso anche ai possessori di un normale biglietto di viaggio ordinario: in tal modo la nuova linea va a tutti gli effetti ad integrare la già esistente rete di trasporto gestita dal *Gruppo Torinese Trasporti* (GTT).

Il percorso collega i due capolinea, coincidenti con i parcheggi Palagiustizia e Fontanesi, ad importanti poli del centro città, quali due ospedali, diverse facoltà universitarie, il palazzo di Giustizia ed importanti sedi turistiche.

Il 10 settembre 2007 entra in servizio la linea *Star 2*, la quale si sviluppa nel centro città collegando importanti aree del Centro Storico, la stazione ferroviaria di Porta Susa e si interseca con altre importanti linee di trasporto pubblico, tra cui la *Star 1* e la linea 1 della metropolitana.

In Fig.5-1 e in Fig.5-2 sono riportati i percorsi delle due linee.



Figura 8-1: percorso linea Star 1

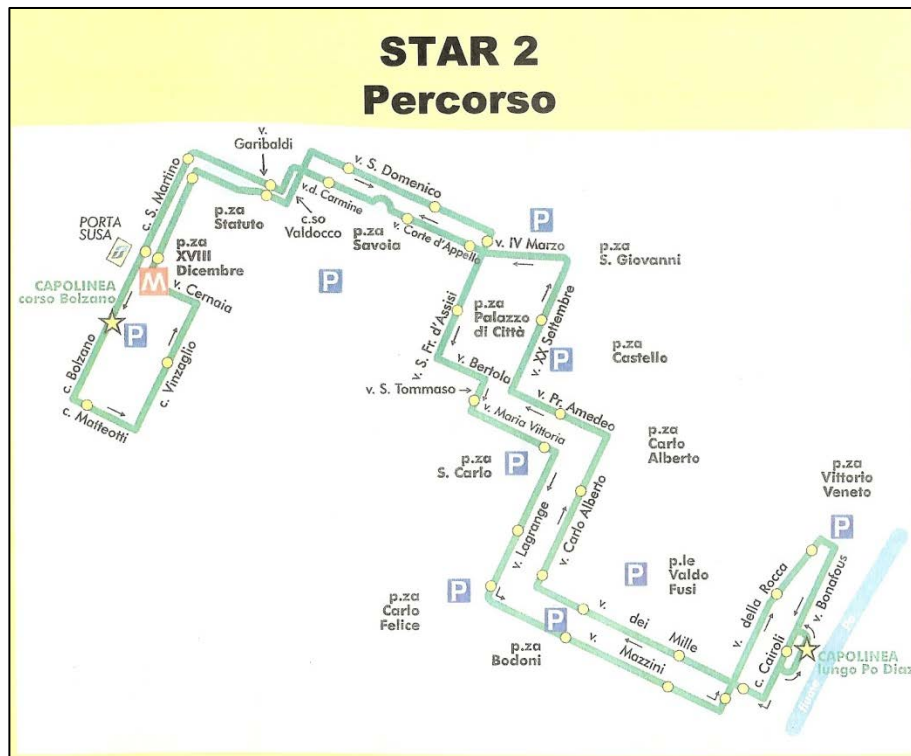


Figura 8-2: percorso linea Star 2

1. CARATTERISTICHE DELLE LINEE STAR

Il GTT fornisce i seguenti dati (aggiornati al 3-6-2008) riguardo le caratteristiche delle linee *Star*.

Tabella 8-1: Star 1

Lunghezza [km]	Operatività	Frequenza	n. Bus	n. turni
12,546	Dal lunedì al Venerdì dalle 7.00 alle 19.30	11',09" dalle 7.00 alle 9.00 12',51" dalle 9.00 alle 17.00 12'00 dalle ore 17.00 alle 19.30	8	16

Tabella 8-2: Star 2

Lunghezza [km]	Operatività	Frequenza	n. Bus	n. turni
10,486	Dal lunedì al Venerdì dalle 7.00 alle 19.30	10' dalle 7.00 alle 9.00 11' dalle 9.00 alle 17.00 12' dalle ore 17.00 alle 19.30	7	14

I costi di manutenzione delle linee sono equivalenti a 0,614€ al chilometro percorso dagli autobus.

I dati riguardanti il numero di chilometri percorsi e il numero di passeggeri trasportati sono riassunti nella tabella seguente.

Tabella 8-3: chilometri percorsi e passeggeri trasportati linee star

	Km percorsi	Passeggeri trasportati
Star 1	Anno 2007: 191.069 Anno 2006: 182.206	(dal 16-6-03 al 31-12-06): 1.037.259 Anno 2007: 475.103
Star 2	Anno 2007 (dal 9-09 al 31-12): 66.220	Anno 2007: 90.393

Ipotizzando una correlazione per ogni linea tra il numero di autobus adibiti, il chilometraggio del percorso, e il numero di chilometri percorsi annualmente, possiamo stimare il chilometraggio totale di un intero anno per la linea *Star 2*.

Possiamo ipotizzare il seguente procedimento di calcolo:

- Calcolo per la linea *Star 1* il numero di chilometri percorsi al giorno dagli autobus:

$$km_{tot_giorno} = km_{1turno} \cdot n_{autobus} = \frac{110km}{gg} \cdot 8_{autobus} = 880km/gg$$

- Calcolo il numero esatto dei giorni lavorativi dell'anno 2007:

$$n_{gg/anno2007} = \frac{km_{2007}}{km_{tot_giorno}} = \frac{191067}{880} \cong 217gg$$

- Ipotizzando che anche sulla linea *Star 2* ogni bus percorra 110km al giorno, calcolo il chilometraggio totale annuale della linea *Star 2*.

$$km_{tot_Star2} = km_{1bus} \cdot n_{autobusStar2} \cdot n_{\frac{gg}{anno2007}} = 110 \cdot 7 \cdot 217 = 167090km$$

Fatte queste premesse, possiamo calcolare i costi totali di manutenzione delle due linee. Tali costi possono essere calcolati come segue:

$$C_{tot_manutenzione} = C_{manutenzione/km} \cdot km_{tot} = \frac{0.614€}{km} \cdot (191069 + 167090)km \\ \cong 219910€/anno$$

2. GESTIONE ENERGETICA DEL SERVIZIO

La linea, come già anticipato, è percorsa interamente da autobus elettrici *Elfo*, i quali prevedono due tipi di ricarica: quella conduttiva, effettuata nel periodo di rimessaggio notturno, e quella induttiva, effettuata ai capilinea. Ogni autobus inizia il servizio con le batterie al 100% di carica, effettua quindi un turno di lavoro (comprensivi di 8 corse complete, 12 ricariche induttive e i tragitti dall'area di rimessaggio GTT-Tortona ai capilinea di Via Cavalli e di Corso Regina e viceversa per un totale di circa 110km/giorno) e rientra, al termine del servizio giornaliero, con una percentuale residua di carica compresa tra il 45-50%. Il ciclo di ricarica rapida induttiva, che avviene ai capilinea delle due linee Star, ha una durata di circa 11' e ha la funzione di ricaricare parzialmente le batterie dei mezzi dal 9 al 14% a seconda del livello residuo di energia posseduto all'inizio della ricarica induttiva. In tal modo è possibile garantire il funzionamento dell'autobus per un'intera giornata di lavoro senza le lunghe soste che sarebbero necessarie nel caso in cui le ricariche previste fossero solo quelle conduttive tradizionali. Un esempio di gestione operativa con ricarica induttiva ci è dato dal grafico a Fig.5-3.

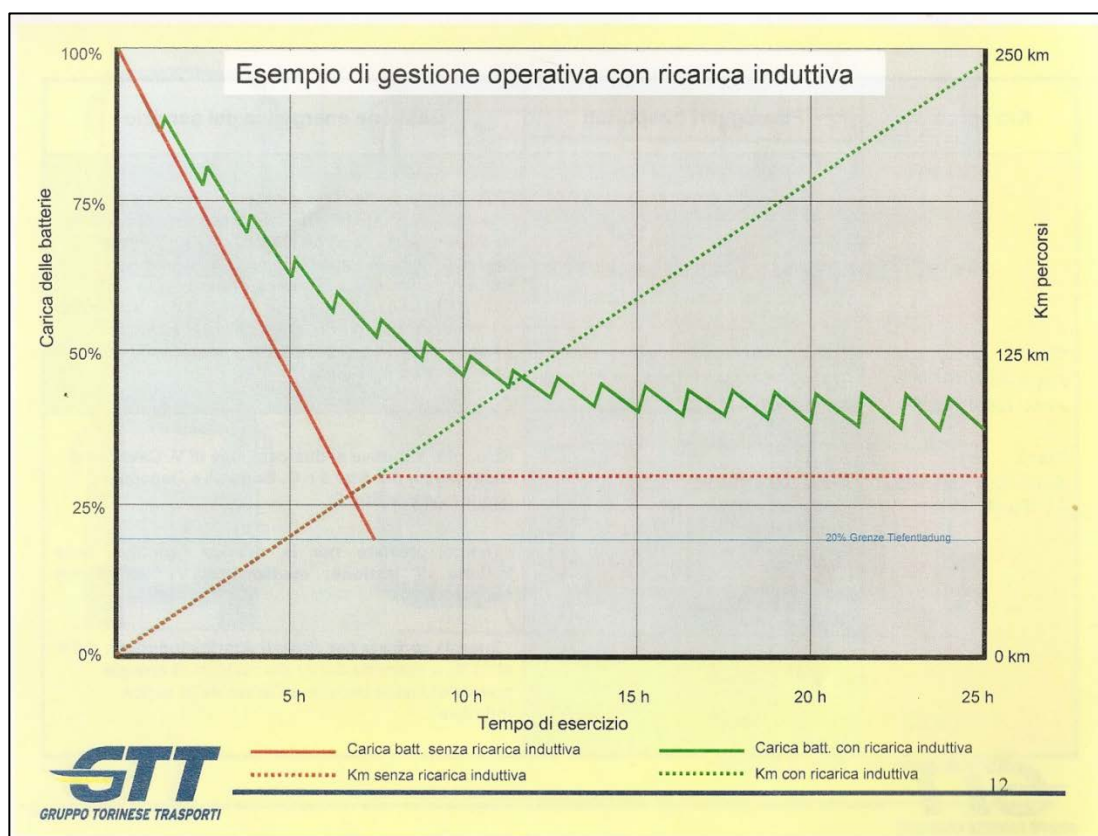


Figura 8-3: Esempio di gestione operativa con ricarica induttiva


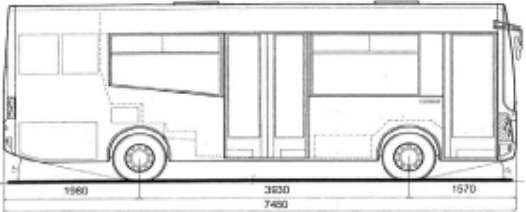



Dal grafico in fig.5-3 si vede chiaramente quanto l'impiego della sola ricarica conduttiva comporti un rapido esaurimento delle batterie, garantendo un'autonomia al mezzo inferiore ai 100km (segmenti color rosso), mentre

l'ausilio della ricarica induttiva garantisce un'autonomia molto più elevata (segmenti color verde).

3. SPECIFICHE TECNICHE

I principali dati tecnici relativi all'Elfo sono riassunti nella seguente tabella.

Tabella 8-4: caratteristiche Elfo

		AUTOBUS URBANO A 2 ASSI EPT - CACCIAMALI "ELFO"		Serie: 01E + 23E
				Scheda: UC02
				
				
Anno immatricolazione: 2002				
CARATTERISTICHE PRINCIPALI			CARATTERISTICHE MECCANICHE	
- autotelaio			- motore	ENOVA EDM 120
- lunghezza max	7.480	mm	- posizione	posteriore
- velocità max	70	km/h	- cilindrata	- cm ³
- passo	3.930	mm	- potenza max (a 1.800 g/min.)	120 kW (163 CV)
- carreggiata anteriore	-	mm	- coppia max (a 0 -1800 g/min.)	650 Nm
- carreggiata posteriore	-	mm	- rapporto al ponte	1/5.16
- raggio minimo di curvatura	6.187	mm	- idroguida	ZF8090
- tara (compreso conducente)	8.250	kg	- freno di servizio (2)	1° asse pneumoidraulico 2° asse pneumoidraulico
- massa complessiva	11.500	kg	-	-
- alimentazione	elettrica		- freno di soccorso	1° asse meccanico 2° asse meccanico
- capacità batterie	180	A/h	-	-
- consumo	85,00	kWh/100km	- freno di stazionamento (ruote motrici 2° assi)	meccanico
CARROZZERIA			- pneumatici	1° asse 225/75 R 17,5 2° asse 225/75 R 17,5
- tipo di carrozzeria			-	-
- colore (1)	giallo - blu - argento		CAPACITA' POSTI PER PASSEGGERI	
- lunghezza	7.480	mm	- posti a sedere (3)	11(+4) 11
- larghezza	2.260	mm	- posti in piedi	24 24
- altezza	2.800	mm	- posto carrozzella	- 1
- sbalzo anteriore	1.570	mm	- posti di servizio	1 1
- sbalzo posteriore	1.980	mm	- posti totali	40 37
- altezza pavimento min.	350	mm		
- altezza pavimento max	350	mm		
- porte rototraslanti	2			
NOTE: (1) colorazione esterna ed allestimento interno ideati da "CIUCIARO DESIGN" (2) veicoli dotati di dispositivo ABS-ASR (3) veicoli dotati di rampa per accesso disabili ad azionamento manuale				

Gli accumulatori elettrici presentano invece le caratteristiche seguenti:

ACCUMULATORI	
Batterie di trazione	Pb-gel
Capacità C5	180Ah
Quantità	56 pz. Da 6V in serie
Energia stimata:	60,4kWh
Raffreddamento:	ventilazione
CARICABATTERIA DI BORDO	6,6kW 320 Vac

Gli accumulatori sono montati sull'autobus come illustrato in Fig.5-4.

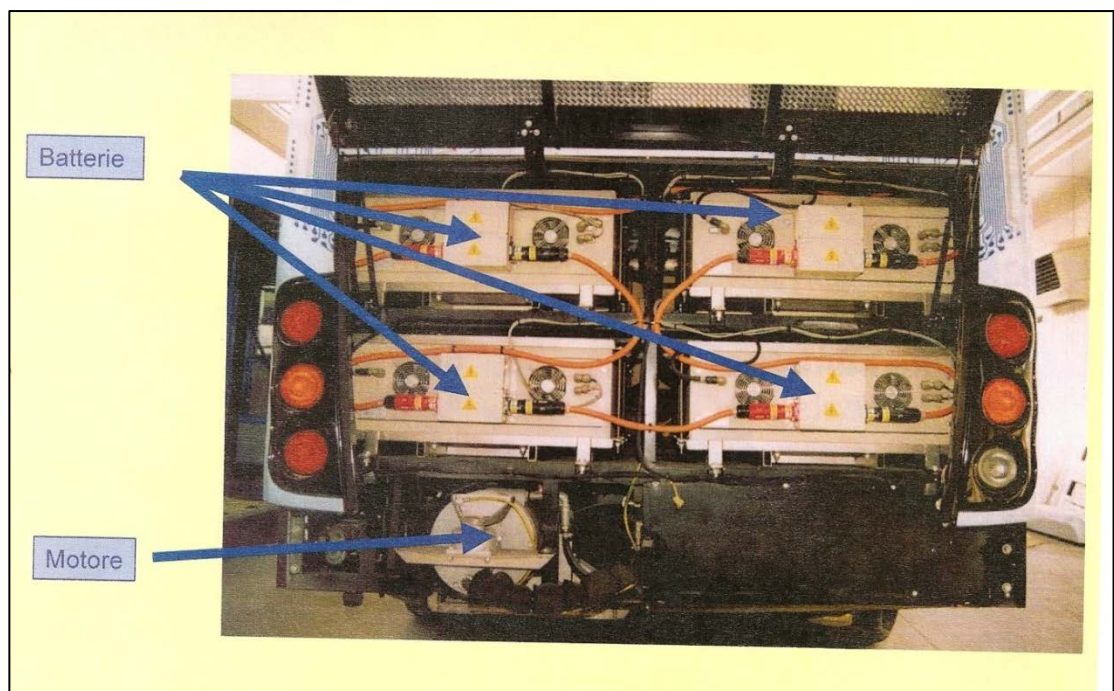


Figura 8-4: posizionamento motore elettrico e batterie sull'Elfo

Le caratteristiche del convertitore statico e della rete elettrica sono invece riassunte nella tabella seguente.

Tabella 8-5: caratteristiche convertitore statico e rete elettrica

CONVERTITORE STATICO	Inverter trifase
Max. potenza:	120kW
Max. tensione dc:	250-450 Vdc
Efficienza:	>95%
Raffreddamento:	liquido refrigerante
RETE ELETTRICA	
Convertitore DC/DC	100A
Batterie ausiliarie	2 in serie 12V 100Ah

4. PRESTAZIONI A PIENO CARICO

I dati relativi alle prestazioni del veicolo a pieno carico vengono forniti dal costruttore e sono riassunti nella seguente tabella.

Tabella 8-6: prestazioni a pieno carico

Velocità massima:	70 km/h
Livelletta massima	22% a 18km/h
Accelerazione 0-30 km/h:	7 s
Accelerazione 0-50 km/h:	18 s
Consumo a velocità costante:	0,65 kWh/km 60 Wh/(km*Ton)
Consumo (ciclo urbano ECE84):	1.013 kWh/km 94 Wh/(km*Ton)
Consumo effettivo (rilevato durante il servizio sulla STAR1):	1.25 kWh/km
Autonomia nel ciclo urbano:	60 km
Autonomia a velocità costante:	80 km (a 30km/h)

5. CALCOLO COSTI ED EMISSIONI

Noti ora i dati relativi alle prestazioni del suddetto autobus elettrico, e in particolare i dati relativi ai consumi, è sufficiente reperire i dati relativi al costo dell'energia elettrica.

Fonte: www.autorita.energia.it/allegati/dati/ele/prezzieleind.xls

Tabella 8-7: costo dell'energia elettrica industriale [11]

PREZZI DELL'ENERGIA ELETTRICA					
PRATICATI AI CONSUMATORI INDUSTRIALI					
€/kWh					
Fonte: Raccolta dei prezzi medi di fornitura ai clienti finali					
I trimestre 2010					
Fascia di consumo	Consumo annuo in MWh		Imposte e tasse escluse ^(A)	IVA esclusa	Imposte e tasse incluse
	DA	A	(LIVELLO 1)	(LIVELLO 2)	(LIVELLO 3)
IA	≤20		n.d.	0,2140	0,2522
IB	20	≤500	n.d.	0,1557	0,1838
IC	500	≤2 000	n.d.	0,1390	0,1600
ID	2.000	≤20 000	n.d.	0,1196	0,1347
IE	20.000	≤70 000	n.d.	0,1033	0,1131
IF	70.000	≤150 000	n.d.	0,0907	0,0999
IG		≥150 000	n.d.	0,0908	0,1010
II trimestre 2010					
Fascia di consumo	Consumo annuo in MWh		Imposte e tasse escluse ^(A)	IVA esclusa	Imposte e tasse incluse
	DA	A	(LIVELLO 1)	(LIVELLO 2)	(LIVELLO 3)

IA	≤20		n.d.	0,2458	0,2911
IB	20	≤500	n.d.	0,1554	0,1839
IC	500	≤2 000	n.d.	0,1388	0,1594
ID		≤20 2.000 000	n.d.	0,1222	0,1365
IE		≤70 20.000 000	n.d.	0,1077	0,1166
IF		≤150 70.000 000	n.d.	0,0989	0,1075
IG		≥150 000	n.d.	0,0995	0,1066
III trimestre 2010					
Fascia di consumo	Consumo annuo in MWh		Imposte e tasse escluse	IVA esclusa	Imposte e tasse incluse
	DA	A	(LIVELLO 1)	(LIVELLO 2)	(LIVELLO 3)
IA	≤20		0,2248	0,2590	0,3054
IB	20	≤500	0,1201	0,1551	0,1839
IC	500	≤2 000	0,1113	0,1441	0,1661
ID		≤20 2.000 000	0,1030	0,1288	0,1445
IE		≤70 20.000 000	0,0941	0,1146	0,1252
IF		≤150 70.000 000	0,0935	0,1079	0,1176
IG		≥150 000	0,0993	0,1105	0,1222
IV trimestre 2010					
Fascia di consumo	Consumo annuo in MWh		Imposte e tasse escluse	IVA esclusa	Imposte e tasse incluse
	DA	A	(LIVELLO 1)	(LIVELLO 2)	(LIVELLO 3)
IA	≤20		0,2126	0,2500	0,2929
IB	20	≤500	0,1145	0,1492	0,1753

IC	500	≤2 000	0,1120	0,1446	0,1666
ID	2.000	000	0,1059	0,1308	0,1464
IE	20.000	000	0,0975	0,1169	0,1302
IF	70.000	000	0,0934	0,1067	0,1156
IG	≥150	000	0,0986	0,1089	0,1195
ANNO 2010					
Fascia di consumo	Consumo annuo in MWh		Imposte e tasse escluse ^(A)	IVA esclusa	Imposte e tasse incluse
	DA	A	(LIVELLO 1)	(LIVELLO 2)	(LIVELLO 3)
IA	≤20		n.d.	0,2428	0,2859
IB	20	≤500	n.d.	0,1545	0,1825
IC	500	≤2 000	n.d.	0,1428	0,1644
ID	2.000	000	n.d.	0,1262	0,1414
IE	20.000	000	n.d.	0,1111	0,1218
IF	70.000	000	n.d.	0,1005	0,1096
IG	≥150	000	n.d.	0,1014	0,1113
(A) Questi prezzi non sono disponibili in quanto molti operatori non hanno separato i costi di rete dagli oneri generali di sistema.					
Aggiornamento: 28/11/2011					

Possiamo quindi calcolare i costi relativi ai consumi di energia elettrica relativi ai consumi degli autobus con il seguente procedimento, avendo ipotizzato per la GTT una fascia di consumo compresa tra *IE* e *IF*, che comporta un costo di circa 0,11€/kWh.

Noti i consumi effettivi (Tab 0-6), e noti i chilometri percorsi annualmente (noti per la linea *Star 1*, stimati per la linea *Star 2*), calcoliamo i chilowattora totali consumati dalle due linee in un anno. Moltiplicando questo valore per il costo al chilowattora della corrente elettrica, otteniamo il costo totale per il consumo di energia elettrica degli autobus.

$$kWh_{tot_{anno}} = (km_{anno_{star1}} + km_{anno_{star2}}) \cdot consumo \cdot costo_{kWh} =$$

$$= (191069 + 167090)[km] \cdot 1.25 \left[\frac{kWh}{km} \right] \cdot 0.11 \left[\frac{\text{€}}{kWh} \right] \cong 49247\text{€}$$

Gli autobus elettrici, come noto, presentano il grande vantaggio di non emettere in loco alcun gas inquinante, salvaguardando la qualità dell'aria, e di conseguenza la salute dei cittadini e l'integrità dei monumenti storici. Tuttavia, salvo la produzione da fonti completamente rinnovabili, il consumo di energia elettrica implica certamente l'emissione di un certo numero di inquinanti da parte delle centrali elettriche, emissioni che sono da attribuire al consumatore finale. In questo caso, quindi, gli autobus Elfo, in realtà inquinano in proporzione a quanta energia elettrica consumano. Sappiamo inoltre che la rete elettrica del comune di Torino non è alimentata da fonti rinnovabili, quindi possiamo stimare le emissioni degli autobus Elfo delle linee Star prendendo i dati di emissioni delle centrali a combustibili fossili.

In Tab.0-8 riportiamo i dati relativi ai principali inquinanti emessi in atmosfera. Tali dati si riferiscono al totale delle emissioni per produrre 4670GW, che corrisponde alla produzione annuale della centrale considerata [12].

Tabella 8-8: Emissioni in atmosfera di inquinanti primari da parte di turbine alimentate a gas naturale per la produzione di 4.670 GW di energia elettrica, calcolate dai fattori di emissione tabulati dalla US Epa [13]

Inquinante	t/anno
CO	1240
HC	0.02
particolato	48
NOx	2070

Dai dati di Tab.5-9, espressi in tonnellate all'anno, vogliamo calcolare le emissioni al chilowattora, in modo da poter fare un confronto con le emissioni generate da autobus a gasolio e valutarne i benefici. Ricordando l'equivalenza del rapporto [t/GWh] con il rapporto [g/kWh], per calcolare i grammi di inquinante per chilowattora prodotto è sufficiente dividere i valori in Tab.5-9

per il valore della produzione annuale in gigawatt della centrale, ossia per 4670 (dati riportati nella seconda colonna di Tab.5-10). In realtà, a causa delle inevitabili dispersioni che si verificano nella rete di trasmissione e distribuzione della corrente elettrica, si produce più energia rispetto a quella consumata. Tale aggravio, inversamente proporzionale al rendimento della rete η_{el} , pari al 93%, provoca un aumento delle emissioni riportati nella terza colonna di Tab.5-10.

Tabella 8-9: Calcolo delle emissioni in g/kWh

Inquinante	g/KWh (senza considerare η_{el})	g/kWh (considerando η_{el})
CO	0,265	0,285
HC	$4,28 \cdot 10^{-6}$	$4,60 \cdot 10^{-6}$
particolato	0,010	0,011
NOx	0,443	0,477

6. CONFRONTO CON AUTOBUS TRADIZIONALI

Per poter fare un confronto con autobus tradizionali occorrerebbe conoscere il costo di acquisto degli autobus e quello relativo alla loro manutenzione. Tuttavia, dato che i costi degli autobus elettrici sono ancora molto elevati rispetto agli autobus tradizionali dato che costituiscono una nuova applicazione tecnologica con ampi margini di sviluppo, limitiamo il confronto ai costi legati al consumo e alle emissioni di inquinanti prodotte.

Partiamo da un confronto sulla spesa per i **consumi** di carburante. Dalle schede del parco mezzi fornite dal GTT scegliamo il modello "Autodromo Cam Alé T154/2P SU 13 TH AC E3", che per dimensioni risulta paragonabile all'Elfo, il quale presenta un consumo su ciclo urbano pari a 43 l/100km. Vogliamo calcolare ora, utilizzando i chilometri annuali che vengono percorsi sulle linee Star, il costo per il carburante che si dovrebbe sostenere per le linee Star se queste fossero percorse dal modello sopra indicato.

Ipotizziamo inoltre che GTT abbia un contratto sulla fornitura del gasolio all'ingrosso che gli consenta un risparmio di circa il 25% rispetto al prezzo alla pompa. Tale prezzo nel 2010 (in modo da poter fare un corretto paragone rispetto al prezzo dell'energia elettrica, che è riferito a quell'anno) si attesta a circa 1,25€/l alla pompa. Applicando la riduzione del 25% possiamo ipotizzare che il costo al litro del gasolio per GTT ammonti a circa 0,94€/l.

Noti questi dati calcoliamo il costo annuale per l'azienda.

$$\begin{aligned} \text{costo}_{\text{gasolio}} &= km_{\text{tot}} \cdot \text{consumo} \cdot \text{costo}_{\text{gasolio_litro}} = \\ &= (191069 + 167090)[km] \cdot \left(\frac{43}{100}\right) \left[\frac{l}{100km}\right] \cdot 0,94 \left[\frac{\text{€}}{l}\right] \cong 144768\text{€} \end{aligned}$$

Confrontando il costo del gasolio con il costo della corrente per svolgere lo stesso tragitto appare evidente quanto la soluzione elettrica, in termini puramente legati ai consumi, sia conveniente. Per quanto riguarda la spese di manutenzione non riusciamo a fare un confronto in quanto bisognerebbe conoscere a quanto ammontano le spese di manutenzione per la stessa linea attrezzata per circolare con autobus a gasolio.

Per quanto riguarda le emissioni, confrontiamo la soluzione elettrica con un autobus conforme alla normativa Euro V.

Normativa Euro V						
Mezzo/classe veicolo	Motorizzazione	CO	HC	NO _x	Particolato*	Unità di misura
Autoveicolo e Autocarri leggeri M	Benzina	1	0,075	0,06	0,005	g/km
	Diesel	0,5	0,25 (HC+No _x)	0,02	0,005	
Autocarri leggeri N < 1250kg Autocarri leggeri N < 1700kg Autocarri leggeri N >1700kg	Benzina	1	0,075	0,06	0,005	g/km
		1,81	0,1	0,075		
	Diesel	2,27	0,12	0,082		
		0,5	0,25 (HC+No _x)	0,2		
Autocarri pesanti/Autobus	qualsiasi	0,63	0,32 (HC+No _x)	0,26	0,02	g/kWh
		0,74	0,38 (HC+No _x)	0,31		

Confronto le emissioni dei principali inquinanti nel seguente specchio riassuntivo (Tab.0-10).

Tabella 8-10: confronto emissioni tra Elfo e Autobus Euro V

	Elfo [g/kWh]	Autobus Euro V [g/kWh]
CO	0,285	1,5
HC	4,60*10 ⁻⁶	0,46
NO _x	0,477	2
Particolato	0,011	0,02

Osservando i dati in tabella si nota che anche il confronto tra le emissioni risulta nettamente a favore del modello di autobus elettrico Elfo rispetto al tradizione autobus a gasolio.

CONCLUSIONI

Nel nostro elaborato ci siamo posti l'obiettivo di analizzare le soluzioni innovative di autobus adibiti al trasporto pubblico urbano già presenti sul mercato. In particolar modo nei centri urbani, infatti, il livello spesso critico di concentrazione degli agenti inquinanti nell'aria richiede interventi strutturali che possano efficacemente fronteggiare questo problema.

La necessità di investire risorse per sostenere gruppi di ricerca orientati a sviluppare soluzioni tecnologiche a basso impatto ambientale è avvalorata da uno studio *dell'Ontario Medical Association*, il quale ha valutato che l'inquinamento dell'aria in Ontario è responsabile di gravi danni alla salute, a cui sono da associare danni economici quantificabili in circa 7800 milioni di dollari (dato 2005, mentre si prevedono spese pari a circa 12900 milioni di dollari nel 2026).

Gli studi, le ricerche e le sperimentazioni nel campo della ricerca su soluzioni ecocompatibili oggi risultano essere difficoltosi per mancanza di fondi. Inoltre, la scarsa diffusione degli autobus innovativi non permette l'implementazione di impianti di produzione di questi modelli su larga scala, contribuendo così a mantenerne decisamente elevato il costo di acquisto.

Abbiamo distinto due principali categorie di veicoli innovativi:

- Veicoli ibridi;
- Veicoli elettrici.

I **veicoli ibridi**, caratterizzati dalla combinazione di un motore endotermico (o di una microturbina) adibito a ricaricare il pacco batterie che alimenta il motore elettrico, responsabile della trazione, costituiscono una soluzione versatile per i centri urbani in quanto presentano i seguenti vantaggi:

- Non sono necessarie strutture ausiliarie o impianti di servizio;
- Presentano emissioni più contenute rispetto agli autobus tradizionali;
- Hanno costi di gestione e consumi di carburante contenuti.

I **veicoli elettrici** presentano molte varianti: esistono infatti autobus puramente elettrici, autobus elettrici a ricarica induttiva e autobus "fuel cell". Essi presentano la peculiarità di non emettere gas nocivi "in loco", caratteristica che li rende adatti ai centri storici, nei quali la qualità dell'aria è importante anche per la salvaguardia dei monumenti storici. I vantaggi e gli svantaggi di questi veicoli sono i seguenti:

- Non emettono gas di scarico a differenza dei modelli "ibridi";
- Nel caso di veicoli puramente elettrici o a ricarica induttiva, necessitano di strutture o impianti di ricarica che comportano elevati costi di investimento iniziali per realizzare la linea;

- Nel caso di veicoli “fuel cell” il costo per produrre l'idrogeno liquido è ancora molto elevato e assolutamente non concorrenziale.

Una valutazione complessiva dell'efficienza energetica raggiungibile oggi da queste categorie di veicoli ha permesso le seguenti valutazioni:

- Nel caso in cui la corrente elettrica disponibile fosse prodotta da combustibili fossili, le motorizzazioni puramente elettriche risultano, anche se di poco, le più efficienti rispetto alle motorizzazioni ibride con motore endotermico e rispetto alle motorizzazioni “fuel cell”.
- Nel caso di produzione di corrente elettrica da fonti rinnovabili invece l'efficienza energetica dei veicoli puramente elettrici raggiungerebbe valori molto più elevati (oltre il 60%) rispetto a ibridi (sempre 28%) e “fuel cell” (23%).

Per quanto riguarda gli sviluppi più avanzati abbiamo fatto un confronto tra gli innovativi veicoli ibridi a microturbina e i veicoli elettrici a ricarica induttiva circolanti a Torino sulle linee *Star*, cercando di valutarne le prestazioni, l'impatto ambientale e i costi.

Per quanto concerne i **veicoli a microturbina** abbiamo raggiunto risultati abbastanza attendibili, in quanto basati essenzialmente su dati dichiarati dall'azienda.

Tabella 9-1: principali emissioni inquinanti di un veicolo ibrido dotato di microturbina C30 a gasolio

HDE Standards	EPA (phase-in)	EPA	CARB	CARB Urban Bus	Capstone C30 Diesel Test Results		EU V	EU VI
Effective Date	2007-2010	2010					2008	2013
Emission Units	g/hp-hr				g/kWh			
NO _x	1.30	0.20	0.20	0.20	0.046	0.06	2.00	0.50
CO	15.50	15.50	15.50	5.00	0.87	1.17	1.50	1.50
NMHC	0.32	0.14	0.05	0.05	0.013	0.017	0.46	0.13
PM	0.01	0.01	0.01	0.01	0.003	0.004	0.020	0.01
HCHO				0.01	0.006	0.008		
Smoke							0.5 m ⁻¹	

Facendo un paragone con le emissioni consentite dalla normativa *Euro VI* si registra:

4. Un grande abbattimento degli NO_x, le cui emissioni sono pari a circa 10 volte inferiori ai valori limite della normativa;
5. Emissioni di CO inferiori del 20% rispetto a quelli ammessi;
6. Emissioni di NMHC e particolato notevolmente abbattute, pari a circa un ordine di grandezza in meno rispetto al consentito.

Ben più complesso è stato invece determinare le reali emissioni degli **autobus elettrici a ricarica induttiva** circolanti a Torino, in quanto, per fare ciò, si è dovuta fare una stima delle emissioni prodotte dalla centrale elettrica che alimenta le stazioni di ricarica in base ai consumi di energia elettrica dichiarati dal GTT.

I risultati ottenuti, per quanto riguarda le emissioni inquinanti, sono riassunti in Tab-9-2.

Tabella 9-2: emissioni inquinanti autobus a ricarica induttiva Elfo

Inquinante	g/kWh (considerando η_{el})
CO	0,285
HC	$4,60 \cdot 10^{-6}$
particolato	0,011
NOx	0,477

Notiamo come le due soluzioni analizzate presentino prestazioni ambientali molto incoraggianti: in particolare le linee elettriche a ricarica induttiva presenti a Torino risultano migliori per quanto riguarda le emissioni di CO e Idrocarburi incombusti, mentre gli ibridi a microturbina presentano emissioni molto più basse di particolato e di Ossidi di Azoto.

Confrontando infine le emissioni dei veicoli analizzati con i limiti imposti dalla normativa Euro V, si possono apprezzare grandi riduzioni di gas nocivi emessi in atmosfera ottenibili con le tipologie di autobus analizzate.

Tabella 9-3: confronto tra emissioni inquinanti di Elfo, autobus ibrido a microturbina e autobus Euro V

	Elfo [g/kWh]	Autobus Ibrido a Microturbina [g/kWh]	Autobus Euro V [g/kWh]
CO	0,285	1,17	1,5
HC	$4,60 \cdot 10^{-6}$	0,017	0,46
NOx	0,477	0,06	2
Particolato	0,011	0,004	0,02

Per quanto riguarda i costi di gestione risulta molto complesso fare una valutazione, anche perché stiamo analizzando soluzioni ancora allo stato embrionale e con bassa diffusione sul mercato, il che implica elevati costi di investimento iniziale, oggi sostenibili solo grazie a finanziamenti pubblici o privati. Tuttavia i risultati in termini di riduzione delle emissioni sono incoraggianti e ci portano ad auspicare un incremento degli investimenti nella ricerca per queste nuove tecnologie, al fine di salvaguardare l'ambiente, l'economia e, soprattutto, la nostra salute!

BIBLIOGRAFIA

- [1] «<http://www.tractorum.it/forum/tecnica-f32/emissioni-inquinanti-nei-motori-diesel-1873/>,» 2009. [Online].
- [2] G. Ferrari, *Motori a Combustione Interna*, Il Capitello, 2008.
- [3] D. 2. n°159, *Aggiornamento delle norme tecniche in materia di limiti di concentrazione e di livelli di attenzione*.
- [4] ISFORT, «Il trasporto urbano su rotaia,» Roma, 19 ottobre 2006.
- [5] L. Repubblica, «Tutti pazzi per Sirio, boom di viaggiatori in tram,» 18 gennaio 2011. [Online]. Available: http://firenze.repubblica.it/cronaca/2011/01/18/news/tutti_pazzi_per_sirio_boom_di_viaggiatori_in_tram-11379869/.
- [6] B. Mobilità, «Brescia Mobilità - documenti ambientali,» [Online]. Available: <http://www.bresciamobilita.it/?s=dati+ambientali&x=0&y=0>.
- [7] S. B. -. D. d. S. E. e. A. U. d. Pisa, «Sistemi di propulsione ibrida per autoveicoli,» [Online]. Available: <http://www.dsea.unipi.it/Members/ceraolow/Documentazione%20SEB/Sistemi%20Stradali/Documenti%20bibliografici/Ibridi.pdf>.
- [8] CEI CIVES, «Tecnica del veicolo elettrico,» [Online]. Available: <http://www.ceiweb.it/CIVES/home.htm>.
- [9] R. ASI, «Agenzia Stampa Italia,» 17 giugno 2012. [Online]. Available: http://www.agenziastampaitalia.it/index.php?option=com_content&view=article&id=8996:trasporto-publico-economia-dieci-anni-dimpiego-in-italia-atteano-lineaguagliabile-efficienza-tecnologica-ed-economica-degli-autobus-elettrici&catid=16:italia&Itemid=39.
- [10] «Autorità dell'energia,» [Online]. Available: www.autorita.energia.it/allegati/dati/ele/prezzieind.xls.
- [11] [Online]. Available: http://www.isof.cnr.it/sites/default/files/users/armaroli/chimind_2003a.pdf.
- [12] «Emission Factor Documentation of AP-42 Section 3.1, Stationary Combustion Turbines, US Environmental Protection,» Alpha-Gamma Technologies Inc., Raleigh, North Carolina, 2000.

- [13] D. 15/4/1994, *Norme tecniche in materia di livelli e di stati di attenzione e di allarme per gli inquinanti atmosferici.*
- [14] T. a. E. (T&E), «Regulating CO2 emissions of new cars - Response to the EU “Public consultation on the implementation of the renewed strategy to reduce CO2 emissions from passenger cars and light-commercial vehicles”».
- [15] *Regolamento (CE) N. 595/2009 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 18 giugno 2009.*
- [16] «Wikipedia,» [Online]. Available: http://it.wikipedia.org/wiki/Trasporto_pubblico_locale.
- [17] «Londra viaggi/storia metropolitana,» [Online]. Available: <http://www.londraviaggi.it/articoli/costruzione%20della%20metropolitana%20di%20londra.php>.
- [18] *UNI 8379-2000 (Allegato B).*
- [19] «Wikipedia/metropolitana,» [Online]. Available: <http://it.wikipedia.org/wiki/Metropolitana>.
- [20] «Wikipedia/tram,» [Online]. Available: <http://it.wikipedia.org/wiki/Tram>.
- [21] Wikipedia, «Wikipedia/veicolo ibrido,» [Online]. Available: http://it.wikipedia.org/wiki/Veicolo_ibrido.
- [22] Wikipeida, «Wikipedia/Auto Elettrica,» [Online]. Available: http://it.wikipedia.org/wiki/Auto_elettrica.
- [23] «Mercedes-Benz Autobus,» [Online]. Available: http://www.mercedes-benz.it/content/italy/mpc/mpc_italy_website/it/home_mpc/bus.flash.html.
- [24] Kaist, «Mondo elettrico,» 16 marzo 2010. [Online]. Available: <http://mondoelettrico.blogspot.it/2010/03/olev-veicolo-elettrico-ricarica.html>.
- [25] M. D. Carlo, «Mondo Elettrico - Bus elettrici a ricarica e alimentazione continua,» 5 giugno 2012. [Online]. Available: <http://mondoelettrico.blogspot.it/2012/06/bus-elettrici-ricarica-e-alimentazione.html>.
- [26] GTT, «Irisbus 491FCY.12 CITYCLASS Fuel Cell,» [Online]. Available: http://gtt.altervista.org/schede/scheda_027.pdf. [Consultato il giorno 10 febbraio 2013].

- [27] V. Hool, «Hybrid fuel cell buses,» [Online]. Available: <http://www.vanhool.be/FRA/transport-public/hybride-pile-a-combustible/Resources/folderFuelCell.pdf>. [Consultato il giorno 10 febbraio 2013].
- [28] «Comune di Torino,» [Online]. Available: <http://www.comune.torino.it/ambiente/bm~doc/tape-2.pdf>.
- [29] «Politesi,» aprile 2013. [Online]. Available: https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/6341/5/2010_07_Bartolo_05.pdf.
- [30] «Microturbine Capstone,» aprile 2013. [Online]. Available: <http://www.microturbine.com/news/turbinetalk.asp>.
- [31] aprile 2013. [Online]. Available: <http://www.arb.ca.gov/msprog/bus/zeb/meetings/0509workshops/designline.pdf>.