



IT9800596

ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E L'AMBIENTE

ISSN / 1124 - 7932

Dipartimento Energia

IL GAS NATURALE IN AUTOTRAZIONE, ASPETTI ENERGETICI ED AMBIENTALI

ANTONIO CIANCIA, GIOVANNI PEDE

ENEA - Dipartimento Energia
Centro Ricerche Casaccia, Roma

L

RT/ERG/98/1

29 - 49



ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E L'AMBIENTE

Dipartimento Energia

IL GAS NATURALE IN AUTOTRAZIONE, ASPETTI ENERGETICI ED AMBIENTALI

ANTONIO CIANCIA, GIOVANNI PEDE

ENEA - Dipartimento Energia
Centro Ricerche Casaccia, Roma

RT/ERG/98/1

Testo pervenuto nel febbraio 1998

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA
rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Ente.

SOMMARIO

Il rapporto è dedicato all'esposizione ed all'analisi delle principali tematiche afferenti all'introduzione del metano nel settore dell'autotrazione. Vengono quindi esaminati nell'ordine la situazione del mercato della domanda e dell'offerta di metano, le realizzazioni veicolari oggi disponibili, la tecnologia e le prestazioni dei motori alimentati a metano e quelle dei sistemi di accumulo a bordo, l'impatto ambientale di questi veicoli. Vengono infine trattati i temi dello sviluppo del mercato e degli attori di questo sviluppo, evidenziandone i possibili sbocchi insieme agli ostacoli che ne limitano la diffusione.

PAROLE CHIAVE : METANO, VEICOLI, EMISSIONI, SERRBATOI, MOTORI

SUMMARY

The present report deals with the analysis and the presentation of the main problems concerning the introduction of the natural gas as a fuel for vehicles. The offer and demand side of the NGV market are analyzed, together with the presently available NG fuelled vehicles and the status of the technology for engines and on-board storage systems, with particular regard to the energetic and environmental performance of the system.

Finally the NGV market development is presented, and the actors on the stage, showing the opportunities together with the possible obstacles to a wider diffusion of this technology.

KEY WORDS : METHANE, VEHICLES, EMISSION, STORAGE, ENGINES

**NEXT PAGE(S)
left BLANK**

INDICE

1. LO SCENARIO DEL GAS NATURALE IN ITALIA E NEL MONDO	7
1.1 Disponibilità, consumi ed impieghi	7
2. IL METANO IN AUTOTRAZIONE : TECNOLOGIA E PRESTAZIONI	10
2.1 Tecnologia motoristica, distribuzione e stoccaggio a bordo dei veicoli	10
2.2 Consumi energetici e gas naturale compresso.	14
2.2.1 Consumi diretti	14
2.2.2 Consumi indiretti	16
2.3 La sicurezza del metano	17
3. IL METANO E L'AMBIENTE	18
3.1 Trasporti ed emissioni	18
3.2 Normativa europea ed internazionale	19
3.3 Il metano come combustibile intrinsecamente a basso carico inquinante	21
3.3.1 Emissioni veicolari ed effetti sulla salute umana	21
3.3.3 Effetto serra	23
4. LA VIA DEL METANO	24
4.1 Il mercato dei veicoli a metano e la politica di supporto in Europa	24
4.2 Lo sviluppo normativo	25
BIBLIOGRAFIA	27

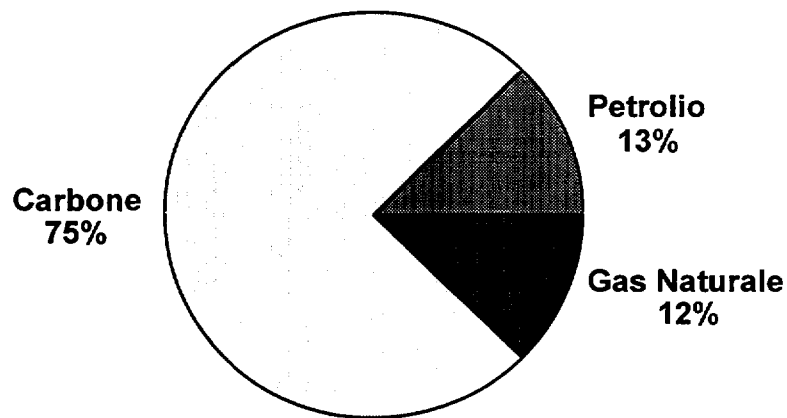
1. LO SCENARIO DEL GAS NATURALE IN ITALIA E NEL MONDO

1.1 *Disponibilità, consumi ed impieghi*

Come per ogni altro combustibile fossile, anche per il metano la disponibilità di riserve e la sicurezza di approvvigionamento sono tra i principali fattori che concorrono a determinarne costi e consumi.

La conoscenza di queste disponibilità costituisce quindi, per ogni decisore o pianificatore energetico, un parametro importante per definire in modo corretto una strategia energetica di lungo periodo. Il diagramma di seguito riportato mostra le riserve recuperabili, cioè quelle tecnologicamente ed economicamente estraibili, per le fonti energetiche fossili [1].

Distribuzione percentuale riserve accertate



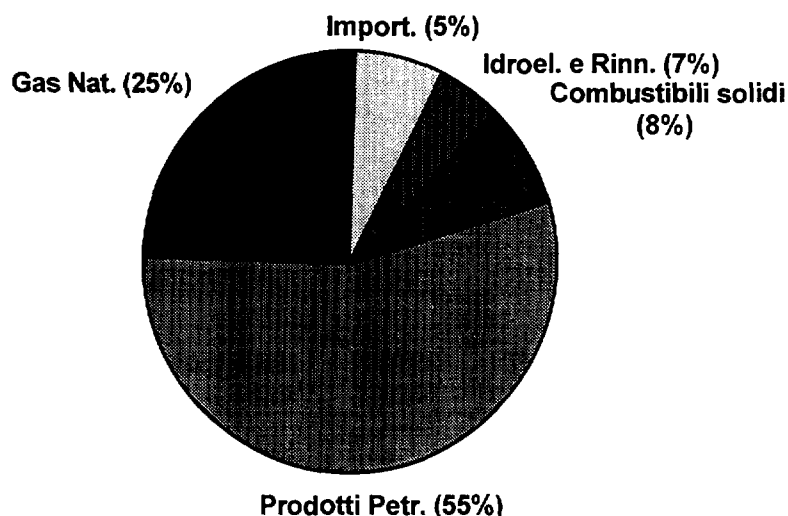
A fine '94, le riserve accertate di gas naturale ammontavano a 132.8 GTep, a fronte di un consumo mondiale nello stesso anno di 1824 MTep. Per il petrolio, a fronte di riserve pari a 137.3 GTep, il consumo è stato di 3209 MTep. Il rapporto tra riserve e consumi, per i due combustibili, indica una disponibilità di 76 anni per il gas naturale contro 43 anni per il petrolio. Il gas naturale può dunque essere visto come una risorsa energetica largamente disponibile e più sicura del petrolio, in quanto distribuita presso un gran numero di produttori molti dei quali già collegati da una estesa rete di gasdotti, oltre che a mezzo del trasporto via mare del gas liquefatto.

In effetti il consumo di gas naturale è in notevole crescita in tutti i paesi OCSE (eccetto gli USA).

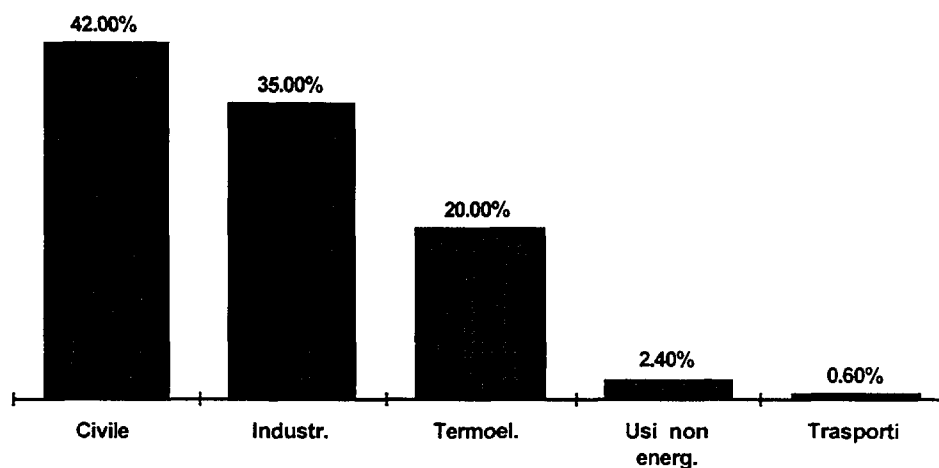
In Italia più della metà dell'energia consumata è di origine petrolifera, con una incidenza del 55 %, nel 1994, sui consumi globali. Questa percentuale è però andata diminuendo dall'inizio degli anni '70, contemporaneamente all'aumento dei consumi di gas naturale.

Nel 1995 il gas naturale (44.5 Mtep per il 34% di produzione interna) ha coperto il 26.2 % dei consumi energetici complessivi in Italia, risultati pari a 170 Mtep, con un incremento di circa il 6% rispetto al '94 [2]. Le previsioni sono poi di arrivare nel 2000 ad una percentuale maggiore del 30%. La distribuzione dei consumi riferita alle fonti è poi riportata in figura.

Distribuzione percentuale consumi energetici riferita alle fonti, 1994



Infine si riporta di seguito la distribuzione del gas naturale tra i vari settori di impiego in Italia, da cui risultano immediatamente gli ampi margini esistenti per una espansione dell'uso del metano nel settore dei trasporti, nel quale il nostro paese è stato per anni all'avanguardia sia nello sviluppo della tecnologia d'uso del metano in campo automobilistico sia per numero dei veicoli circolanti :



Già negli anni 30, infatti, grazie alla presenza nella pianura padana di alcuni giacimenti ed alla politica industriale autarchica del fascismo, le trasformazioni a metano si sono diffuse sia in campo automobilistico che ferroviario, arrivando in quest'ultimo, durante la guerra, alla metanizzazione di 130 automotrici, le famose "littorine". Nel dopoguerra, in anni di crescita tumultuosa anche per la larga disponibilità di petrolio e derivati, ma di scarso rispetto per l'ambiente, soltanto grazie ai bassi costi permessi da una legislazione favorevole il metano ha potuto conservare per lunghi anni una posizione di nicchia nel mercato, rimanendo l'Italia pur sempre al primo posto in Europa come parco circolante.

In Italia l'83,7% del parco circolante è costituito da autovetture a benzina, l'11,7% circa da autovetture con motore diesel, il 4,6% da autovetture con alimentazione diversa, cioè GPL, elettrica e CNG (gas naturale compresso)(0,9%), anche se non mancano punte di particolare sviluppo locale (10% nella provincia di Parma)[3].

Il parco veicolare è di circa 270.000 mezzi metanizzati (in massima parte veicoli leggeri a benzina adattati alla doppia alimentazione), la rete di distribuzione di circa 260 impianti, localizzati principalmente nel centro-nord della penisola, la vendita annua stabilizzata da alcuni anni sul valore di 300 milioni di metri cubi.

Si tratta di volumi di consumo importanti in valore assoluto ma piccoli in valore relativo, dello stesso ordine di grandezza del quantitativo giornaliero che la rete eroga in una giornata di freddo abbastanza intenso sul territorio nazionale. Per contro, considerando una singola utenza, una autovettura con una percorrenza annua di 15000 km equivale, in termini di consumi energetici (1200 litri di benzina), a quelli di due o tre abitazioni civili (2-3000 mc di gas).

In campo mondiale, l'impegno diretto in questi ultimi anni di alcune tra le più importanti industrie automobilistiche come la General Motors, la Ford, la Fiat, la BMW, la Toyota, la Isuzu, motivato dagli sviluppi legislativi in campo ambientale, ha consentito la progettazione di motori e veicoli pensati per questo combustibile, con l'introduzione dell'elettronica nel campo dell'alimentazione e dei nuovi materiali in quello delle bombole.

Si sono così raggiunti risultati di grande rilievo in campo tecnologico, come l'ottenimento della prima certificazione ULEV, ed in campo commerciale, come l'ingresso del metano in mercati difficili come quello tedesco, dove sono state omologate a metano le BMW 316 e 518, e quello giapponese, dove si è passati da 21 veicoli immatricolati nel 1990 ad oltre 800 nel '95, con una previsione di 200000 veicoli per il 2000 [4]. In Europa, le previsioni a medio-lungo termine (2025) stimano poi nel 10% la percentuale di sostituzione dei combustibili tradizionali con il complesso di tecnologie innovative costituite da metano, veicoli elettrici ed ibridi [5].

Sul mercato nordamericano il numero delle immatricolazioni ha rapidamente raggiunto gli 80000 veicoli, tra cui circa duecento autobus, a Los Angeles, Vancouver, New York etc, anche di tipo ibrido, mentre lo U.S. Postal Service dispone di 7000 veicoli a gas, la più grande flotta del paese [6].

La tabella seguente mostra la distribuzione di autoveicoli alimentati a gas e le stazioni di rifornimento nel mondo, con riferimento ai soli paesi con più di 100 veicoli immatricolati. I dati riportati sono ripresi dagli atti dal 6o Metanauto e da Natural Gas Fuel e sono aggiornati alla metà del '96.

VEICOLI A METANO NEL MONDO

Paese	Totale veicoli	Distributori	Veicoli pesanti
Argentina	365000	470	50
Australia	1000	20	140
Brasile	6000	7	300
Canada	39000	222 + 1800 VRA	65
Cina	2.000	10	2.000
Csi	315.000	350	
Colombia	1.000	12	
Francia	> 1000	2	5
Germania	2500	55	>13
Indonesia	500	5	
Iran	800	1	
Italia	270.000	260	30
Giappone	800	130	1
Olanda	420	11+20 VRA	30
Nuova Zelanda	42000	350	160
Pakistan	270	1	
Tailandia	130	3	
Trinidad	250	2	
Turchia	200	1	200
Gran Bretagna	290	20	8
USA	40000	350	100

VRA = Vehicle refuelling appliance, minicompressore da 3 mc/h

2. IL METANO IN AUTOTRAZIONE : TECNOLOGIA E PRESTAZIONI

2.1 Tecnologia motoristica, distribuzione e stoccaggio a bordo dei veicoli

In Europa c'è un buon numero di costruttori di veicoli con alimentazione a gas; la maggior parte di questi sono costruttori di autobus, ma ci sono anche costruttori di autoveicoli, come si vede dalla tabella sottoriportata.

VEICOLI A GAS NATURALE DI SERIE

<i>autovetture</i>	
BMW	316i compact bifuel, 518i touring bifuel
FIAT	Marea bi-fuel
VOLVO	Volvo 940 bifuel, 2.3 litri (disponibile in commercio); Volvo 850 bifuel, 2.5 litri 5 cilindri (entrambi i modelli hanno rispettato gli standards ULEV)
<i>veicoli leggeri trasporto merci</i>	
MERCEDES	T-1 Transporter 210/310, 4 cilindri 2.3 litri (disponibile in commercio)
VOLKSWAGEN	T-4 Transporter, 5 cilindri 2.5 litri (disponibile in commercio)
<i>veicoli pesanti trasporto merci</i>	
MAN	F90 camion della nettezza urbana
RENAULT	Modello RVI MIPR 062045, accensione a scintilla a gas naturale, turboalimentato con intercooler aria/acqua
VOLVO	Volvo FL-10 camion con motore di 9.6 litri (disponibile in commercio)
<i>autobus</i>	
DAF	DAF 895 Turbo, 8.195 litri, per servizio cittadino (in corso di sviluppo)
IVECO	Turbocity 480/490E, bus urbano di 12,22m (disponibile in commercio)
MAN	bus urbano NL232 e NG232 (disponibile in commercio)
MERCEDES	omnibus 0405N/405GN (disponibile in commercio)
SCANIA	111 lean-burn
VAN HOOL	bus assemblato da vari costruttori (disponibile in commercio)
VOLVO	9.6 lean-burn (disponibile in commercio)

Inoltre una ventina di aziende in Europa producono sistemi per convertire veicoli a benzina in veicoli a gas naturale bi-fuel, incluse anche alcune conversioni di motori diesel. Sono stati convertiti almeno 25 differenti modelli di veicoli; alcuni sistemi di conversione sono meccanici, ma la maggior parte sono sistemi controllati elettronicamente, per motori a miscelatore o ad iniezione, che operano con un sensore di ossigeno allo scarico.

I principali sistemi utilizzati sono tre, prodotti dalla Bosch, dalla Tartarini Injections System di Bologna, in collaborazione con il Centro Ricerche FIAT, e dalla GFI Control System Inc., quest'ultimo di origine canadese.

La Bosch ha in commercio un sistema di alimentazione a gas installabile parallelamente al sistema a combustibile liquido, adottando un miscelatore venturi a monte della valvola parzializzatrice del carico, il tutto gestito da una unità di controllo elettronica.

Il sistema della Tartarini, denominato Metafuel, utilizza una iniezione/accensione integrata, multipoint e fasata sequenziale del gas, che consente di ottenere un preciso riempimento di ogni cilindro. Il regolatore riduce la pressione dal serbatoio in due stadi da 200 a 13 bar e da 13 a 9 bar, inviando agli iniettori il gas ad una pressione di 9 bar. Utilizzando le stesse tecnologie dell'unità di controllo a benzina (digitale con microprocessore), l'unità di controllo elettronica a gas regola l'iniezione a gas elaborando i segnali provenienti dal motore e inviando un segnale modificato all'unità di controllo originale per ottimizzare l'anticipo dell'accensione. Il sistema è in grado di abbattere i limiti antinquinamento richiesti dagli standards per l'anno 2000; sono dichiarate accelerazioni e riprese fino al 6% migliori e consumi inferiori del 7% rispetto ai tradizionali sistemi di alimentazione CNG.

Il sistema della GFI Control System Inc. utilizza un comando motore computerizzato concepito specialmente per il funzionamento a gas. Il computer riceve segnali da sensori che misurano la pressione e la temperatura di ingresso del condotto di aspirazione, la posizione della valvola a farfalla, la velocità del motore ed il contenuto di ossigeno del gas di scarico; a partire da questi dati, calcola e poi controlla la portata del gas richiesta tramite elettrovalvole ad alta velocità, collocate in un gruppo di alimentazione/regolazione sistemato sul collettore. Il sistema di iniezione è composto da cinque valvole che dosano la quantità di gas richiesta in modo discreto, aprendosi sequenzialmente; due iniettori provvedono a modulare la portata del combustibile in maniera più precisa, eliminando gli scalini che deriverebbero dalla regolazione a gradino. Il sistema lavora ad una pressione normale di circa 7 bar (100 psi), con un tempo di risposta inferiore ai 5 millisecondi.

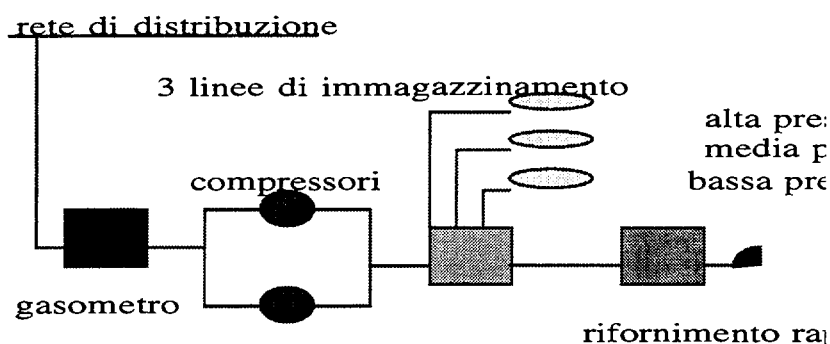
Se dal punto di vista motoristico i veicoli a metano si sono perciò allineati alle analoghe versioni a benzina, un serio ostacolo alla diffusione del metano in autotrazione è però rappresentato dai problemi di distribuzione, lì dove non esiste una rete sufficientemente sviluppata di metanodotti, e dai problemi di stoccaggio a bordo del veicolo.

La distribuzione del gas alle utenze avviene attraverso una rete di distribuzione, cioè un complesso di tubazioni interrate e non, che partendo dai centri di produzione giungono fino al consumatore, o con adatte autocisterne nel caso del gas naturale liquefatto.

Lo stoccaggio a bordo dei veicoli può avvenire in forma liquida, che richiede serbatoi criogenici (-160°C), o come gas compresso, il sistema più diffuso. In questo caso il gas deve essere compresso dalla pressione di distribuzione fino a 200 bar nei serbatoi cilindrici dei veicoli, e si può raggiungere tale scopo con un rifornimento rapido ovvero lento. Vi sono inoltre compressori per uso privato (VRA), che provvedono al rifornimento lento durante la sosta del veicolo a casa la notte.

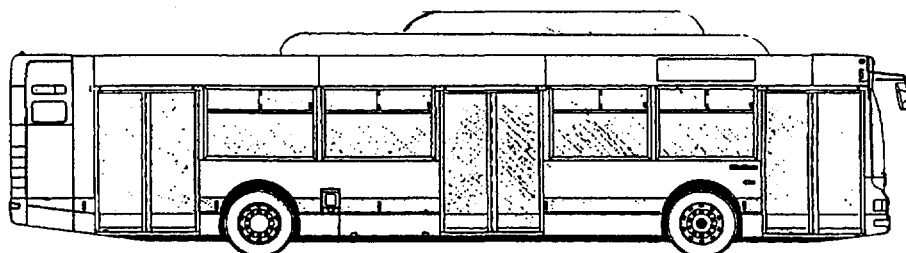
I progressi registrati con i moderni impianti di distribuzione consentono di effettuare il rifornimento di metano per i mezzi leggeri in tempi dell'ordine di alcuni minuti; per i mezzi pesanti si riscontrano tempi di 10-20 minuti.

In questi impianti il gas viene immagazzinato, dopo la compressione, a 250 bar in un serbatoio collegato a vari distributori di pressione, in modo che il veicolo può rifornirsi da questi in un intervallo di tempo che va da 1 minuto ai 5 minuti; quando la pressione nel serbatoio diminuisce il compressore provvede a ripristinarla.[7].



L'ingombro ed il peso delle bombole incidono però sensibilmente sulla portata utile e sull'autonomia del veicolo.

Circa l'ingombro, le bombole a 200 bar hanno una densità energetica pari ad un quarto di quella della benzina (2.5 kWh/l contro 10 kWh/l) e solo l'uso di pressioni più elevate può ridurne il volume. Nel caso degli autobus e degli autocarri, comunque, sistemandoli sul padiglione o sotto il pianale non si riduce il volume a disposizione del carico.



IVECO 491 CNG

Sulle vetture, una opportuna conformazione del sistema di stoccaggio, distribuendone il volume complessivo tra più serbatoi cilindrici di diametro ridotto, consente comunque di ridurre la penalizzazione ad una perdita di spazio utile dell'ordine del 20-30% [8].

Oltre ai problemi di volume, occorre considerare quelli legati al maggior peso delle bombole rispetto ai serbatoi tradizionali.

Nel caso del gasolio e della benzina il peso totale del serbatoio è dell'ordine di qualche kilogrammo, con un'energia specifica complessiva di 8.5 kWh/kg per la benzina; nel caso del metano, utilizzando serbatoi metallici riempiti alla pressione p, il peso unitario delle bombole (per litro) dipende dalla resistenza specifica del materiale, rapporto tra la resistenza a trazione sigma ed il suo peso specifico r, oltre che dalla tipologia di costruzione (sferico o cilindrico con un dato rapporto L/D). Infatti, considerando per semplicità il caso di un serbatoio cilindrico di diametro D con uno spessore di parete s , il peso unitario (per litro di volume interno del serbatoio) è dato dalla :

$$peso/volume \propto (\rho \times D^2 \times s) / D^3$$

mentre lo spessore del metallo necessario a resistere alla pressione p è dato dalla relazione di Mariotte :

$$s \propto p \times D / \sigma$$

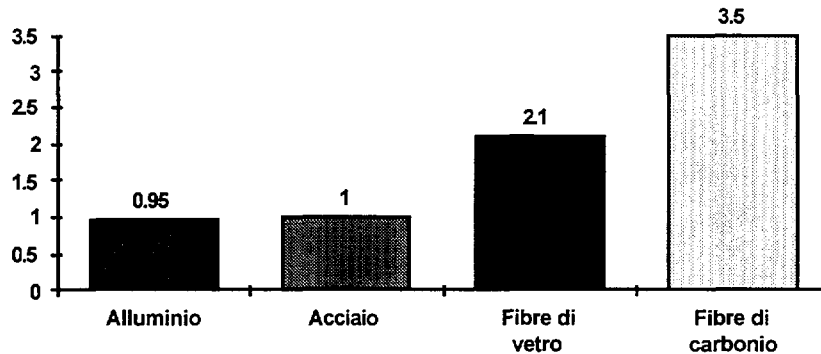
Sostituendo e semplificando, si ottiene :

$$peso/volume \propto p \times (\rho / \sigma) , \text{ c.v.d.}$$

Per i serbatoi metallici per autotrazione, in alluminio o acciaio ad alta resistenza, il peso unitario è pari a 0.9 kg/litro [9], con una corrispondente energia specifica di 2.4 kWh/kg, tenendo conto ovviamente anche del peso del metano oltre che del peso del serbatoio.

Questi valori migliorano, e di molto, se si adottano nuove tecnologie nel campo della realizzazione dei serbatoi in pressione, utilizzando cioè strutture composite dove la funzione di contenimento è affidata ad un liner metallico o plastico, mentre la funzione di resistenza strutturale è demandata ad un avvolgimento in fibre di vetro o di carbonio, la cui resistenza a trazione specifica è doppia o tripla di quella dell'acciaio [10].

Resistenza a trazione specifica, relativa all'acciaio



Riportiamo nella tabella sottostante peso e le energie specifiche ottenibili in questo modo per bombole di volume unitario di 50 e 120 litri, adoperando quattro tecnologie, disponibili commercialmente, di efficienza crescente. Le prime due bombole hanno un liner metallico, le altre due in polietilene ad alta densità:

	ACCIAIO	ACC. + FIBRA VETRO	HDPE + FIBRA ARAMIDICA	HDPE + FIBRA DI CARBONIO
50 litri	46 kg /2.4 kWh/kg		27 kg /3.5 kWh/kg	17 kg/5.5 kWh/kg
120 litri		79 kg/2.9 kWh/kg	51 kg /4.4 kWh/kg	35 kg/6.5 kWh/kg

A causa del maggior peso del sistema di accumulo, l'impiego del metano in l'autotrazione comporta in definitiva una riduzione del carico utile, e quindi un aumento del costo del trasporto per tonnellata e km di percorrenza, ed una ridotta autonomia, perchè non è comunque possibile ridurre il carico utile al di sotto di una percentuale minima. Per esempio, un autocarro con portata utile di

8.000 kg, con un consumo di 27 litri di gasolio per 100 km, richiede per funzionare a metano, con un'autonomia di 300 km, 95 m³ di gas, corrispondenti a 4 bombole da 120 litri: il maggior peso morto relativo all'impianto a metano va da circa 570 kg, pari al 7% della portata utile, per bombole tradizionali, fino a meno della metà per bombole in composito. Per le vetture la riduzione percentuale della portata utile passando all'alimentazione a metano è ancora più rilevante: il peso dell'installazione risulta mediamente di 140 kg per un'autonomia di 300 km, pari cioè al peso di due persone. In entrambi i casi, il maggior peso a vuoto dovuto alle bombole comporta un consumo aggiuntivo di energia quando il veicolo non è a pieno carico (a pieno carico la somma dei due pesi, carico utile e stoccaggio, è costante e determinata dal peso totale previsto all'atto dell'omologazione del veicolo). Infatti, specialmente nei cicli urbani dove sono predominanti le resistenze dovute alla massa (inerzia e rotolamento) rispetto a quelle aerodinamiche, un incremento di peso provoca un corrispondente incremento dei consumi. In un autobus, dove il peso dei serbatoi tradizionali raggiunge e supera i 1000 kg, i consumi energetici aumentano in misura anche maggiore, perché il veicolo viaggia spesso a carico ridotto, con una maggiore incidenza del peso a vuoto sui consumi che risultano mediamente maggiori del 25% rispetto al diesel [11].

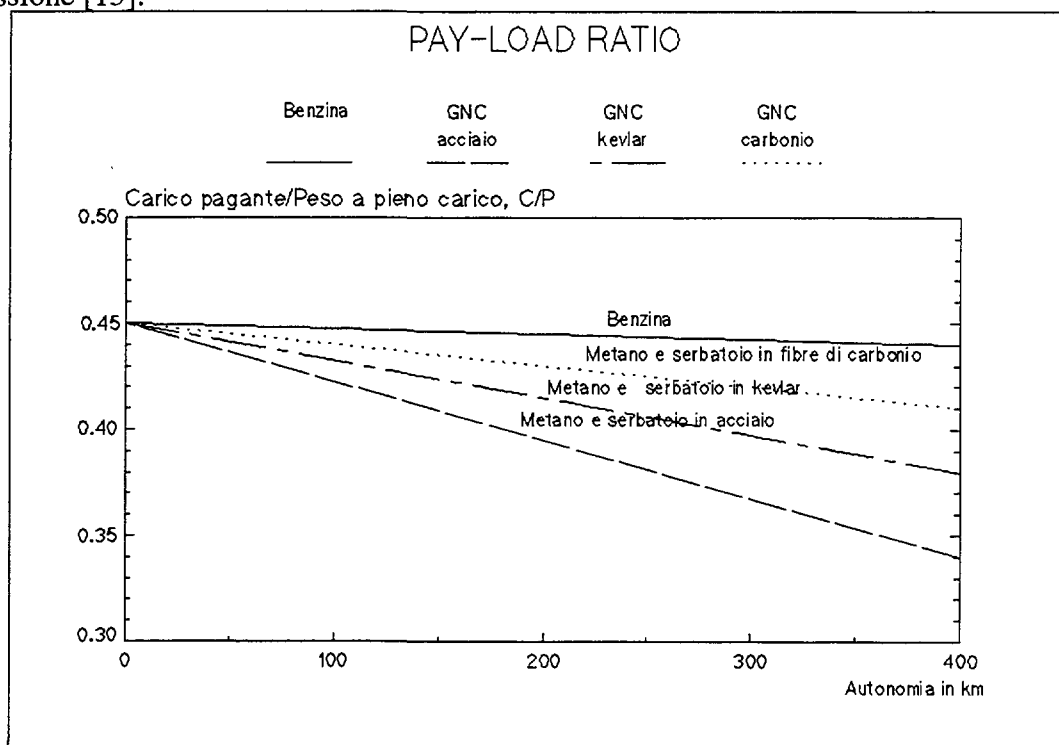
In un ciclo urbano (ECE-15), per un veicolo di peso totale di 1400 kg, questo consumo aggiuntivo si calcola in circa 4 Whmecc /km per ogni 100 kg di incremento del peso [12] e quindi del 3 % circa per i 140 kg dell'impianto, considerando consumi specifici di 140 Whmecc/tonn km ed un rendimento totale di 0.18 (15 litri per 100 km),.

E' evidente quindi che la convenienza all'impiego del metano come carburante rispetto al gasolio o alla benzina dipende dal rapporto tra i rispettivi costi unitari, corretti in relazione al rapporto di consumo (approssimativamente, con motori modificati si ha che 1 m³ metano = 0,85 litri gasolio = 1,3 litri benzina), e dall'autonomia richiesta, che determina il maggior costo iniziale (dovuto al costo dei serbatoi) e la riduzione di carico utile.

La relazione tra riduzione del carico utile ed autonomia richiesta è rappresentabile da diagrammi del tipo rappresentato nella figura riportata di seguito , dove in ascisse compare l'autonomia imposta in sede di progetto del veicolo, ed in ordinata la frazione del peso a pieno carico del veicolo devoluta al carico utile, detto Pay-load Ratio. Il diagramma è stato ottenuto utilizzando una relazione del tipo :

$$\text{Pay-load R.} = \text{Pay-load R.}_{\text{orig.}} - C_{\text{sp}} \times R / E_{\text{spec.}} \times \eta_{\text{tot.}}$$

dove C_{sp} è il consumo specifico in Whmecc/kgkm, R è l'autonomia, $E_{\text{spec.}}$ è l'energia specifica del sistema di accumulo ed η_{tot} è il prodotto del rendimento del motore per quello della trasmissione [13].



Le curve rappresentate, parametrizzate con l'energia specifica del sistema di stoccaggio, legano il carico utile all'autonomia del veicolo, e consentono di calcolare, noto il maggior costo del veicolo a gas ed il costo del combustibile, il costo unitario di trasporto. Si considera ovviamente il caso di veicoli che marciano a pieno carico, considerando costante la somma del carico utile e del peso dei serbatoi.

Il maggior costo dei serbatoi in composito, vedi tabella di seguito riferita a serbatoi da 100 l, viene quindi compensato da un minor aggravio del consumo di combustibile, perchè la differenza di peso a svantaggio del gas si riduce di molto, come già visto.

<i>Liner / avvolgimento</i>	<i>Costo</i>
<i>Acciaio</i>	<i>550000 £</i>
<i>Acciaio + fibra di vetro</i>	<i>700000 £</i>
<i>HDPE + fibre di vetro e carbonio (116 l)</i>	<i>1175 \$</i>

In Italia la Faber Industrie S.p.a. possiede una vasta esperienza da molti anni nella costruzione dei serbatoi cilindrici di gas naturale compresso per autoveicoli, ed è alla sua produzione che si riferiscono pesi e costi dei serbatoi con liner in acciaio riportati nelle tabelle precedenti; l'Alusuisse ha prodotto bombole di alluminio avvolte in fibre di vetro, che sono state adottate negli autobus cittadini all'estero ed in un prototipo IVECO in Italia. Altre aziende europee sono la Luxfer in Inghilterra, la Hullit in Francia e la ASEA in Svezia. In Nordamerica, il numero dei costruttori di bombole è elevato, e si ricordano la Lincoln Composites e la EDO Canada, le due società cui si riferiscono i due esempi citati nelle tabelle di bombole con liner plastico. Della EDO Canada sono i 1400 serbatoi in compositi della nuova flotta di autobus a metano (120 veicoli) di Los Angeles.

Infine, il mercato delle bombole di materiale più leggero del comune acciaio è ad oggi limitato anche per la carenza di normative al riguardo: infatti in alcuni paesi, tra cui il nostro, i veicoli che adottano bombole di materiale innovativo devono ottenere speciali approvazioni dalle autorità nazionali.

2.2 Consumi energetici e gas naturale compresso.

2.2.1 Consumi diretti

L'utilizzo del gas naturale nei motori a combustione interna per uso automobilistico, oltre ad avere forti motivazioni di carattere ambientale, è diventato in tempi recenti interessante anche dal punto di vista dei consumi.

Infatti l'applicazioni di nuove tecnologie, come la propulsione ibrida, i materiali compositi, l'iniezione multipoint e la combustione lean-burn, a veicoli e motori progettati in funzione delle caratteristiche specifiche di questo combustibile, riduce il consumo dei veicoli alimentati a gas, fino a valori paragonabili a quelli dei veicoli con motori a ciclo diesel.

Abbiamo già parlato della riduzione del peso del sistema di stoccaggio, esamineremo di seguito la questione del miglioramento del rendimento energetico del motore .

Confrontando il rendimento dei due cicli, Diesel e ciclo Otto, generalmente usato per il metano, le ragioni della superiorità del diesel sul motore ad accensione comandata risiedono in tre fattori :

migliore rendimento termico ideale, grazie al più alto rapporto di compressione

possibilità di lavorare in forte eccesso d'aria, che permette una combustione più completa, con ulteriore miglioramento del rendimento termodinamico

migliore rendimento meccanico, grazie alla riduzione del lavoro di pompaggio

Rendimento termico ideale

Il miglior rendimento termico dipende dalle più elevate pressioni raggiungibili in un diesel, per il più alto rapporto di compressione reso possibile dall'iniezione del combustibile (e quindi dalla formazione della miscela combustibile) solo alla fine della fase di compressione ; ora, se l'adozione

di un ciclo diesel è possibile anche il metano, e non manca qualche esempio di applicazione, l'iniezione ad alte pressioni è certamente più semplice e meno onerosa per un liquido, il gasolio, che per un gas.

Il metano gode però di forti caratteristiche antidetonanti, con un numero di ottani pari a 130, ed è così possibile adottare rapporti di compressione prossimi a quelli dei cicli diesel, fino a 13÷14:1. Si possono citare in proposito le esperienze dell'Istituto Motori del C.N.R., del Centro Ricerche Fiat e dell'IVECO; all'Istituto Motori si è ridisegnata la camera di combustione del 1200 cmc. "Boxer" dell'Alfa Romeo, adoperando un rapporto di compressione di 12:1, e riducendone così il consumo specifico da 320 gr/kWh a 260 gr/kWh, anche senza intervenire sul sistema di alimentazione, che è rimasto quello tradizionale a riduttore/regolatore di pressione e mixer [14]; analogamente in Fiat si è ottenuto un rendimento termico del 34% (ed una potenza specifica di 57 CV/litro) portando a 12:1 il rapporto di compressione della Croma a gas con iniezione multi-point, ed in IVECO si è arrivati al 35% nella modifica a gas del motore dell'IVECO Daily [15].

Completezza della combustione

Nei diesel il processo di combustione avviene gradualmente, grazie alla progressiva introduzione del gasolio nel cilindro a mezzo dell'iniettore alla fine della fase di compressione, ed è quindi possibile lavorare in forte eccesso d'aria; si riduce così la quantità di incombusti, e si utilizza in modo più completo il combustibile, ricavandone più energia.

Nei motori ad accensione comandata, invece, il cilindro si riempie durante l'aspirazione di una miscela di aria e combustibile, in un rapporto all'incirca stechiometrico. Si dicono poi magre le miscele dove il combustibile è in proporzione inferiore a quella stechiometrica. Con il metano, per la migliore omogeneità di miscelazione consentita dal combustibile gassoso e per l'assenza di fenomeni di condensazione nel collettore, è possibile l'uso di miscele magre che si riducono al 60% del rapporto stechiometrico, contro il 75% possibile con la benzina.

Parlando di veicoli ibridi, è poi possibile usare queste miscele molto magre che comportano una perdita di potenza specifica, perchè il motogeneratore di un ibrido è progettato per la potenza media richiesta in un ciclo di guida, che è molto inferiore alla potenza massima; non si richiede quindi un elevato valore della potenza specifica, bensì elevati rendimenti ed affidabilità. Inoltre la minore velocità di avanzamento del fronte di fiamma in una miscela metano-aria molto magra è compatibile con la bassa velocità di rotazione del motogeneratore (1500-2000 r.p.m.), una scelta che deriva dalla opportunità di ridurre la rumorosità. L'adozione di dispositivi di iniezione multipoint, dove un iniettore per cilindro assicura precisione ed uniformità del dosaggio, consente di sfruttare al meglio queste caratteristiche del combustibile, spingendo la magrezza ai limiti inferiori.

Lavoro di pompaggio

Il lavoro di pompaggio è quello compiuto dal pistone, ai regimi di carico parziali del motore, per pompare l'aria nel cilindro attraverso la strozzatura provocata dalla valvola a farfalla. A valle di questa perdita di carico la pressione d'alimentazione si riduce così ad una frazione della pressione atmosferica, e di conseguenza diminuisce la massa d'aria aspirata; è così possibile regolare il funzionamento del motore riducendo la portata di combustibile, e quindi la potenza, senza alterare il rapporto combustibile/comburente che rimane quello stechiometrico.

Nel diesel, lavorando in forte eccesso d'aria, si può ridurre la potenza aumentando la magrezza della miscela e non occorre strozzare il flusso d'aria in ingresso, evitando le perdite conseguenti.

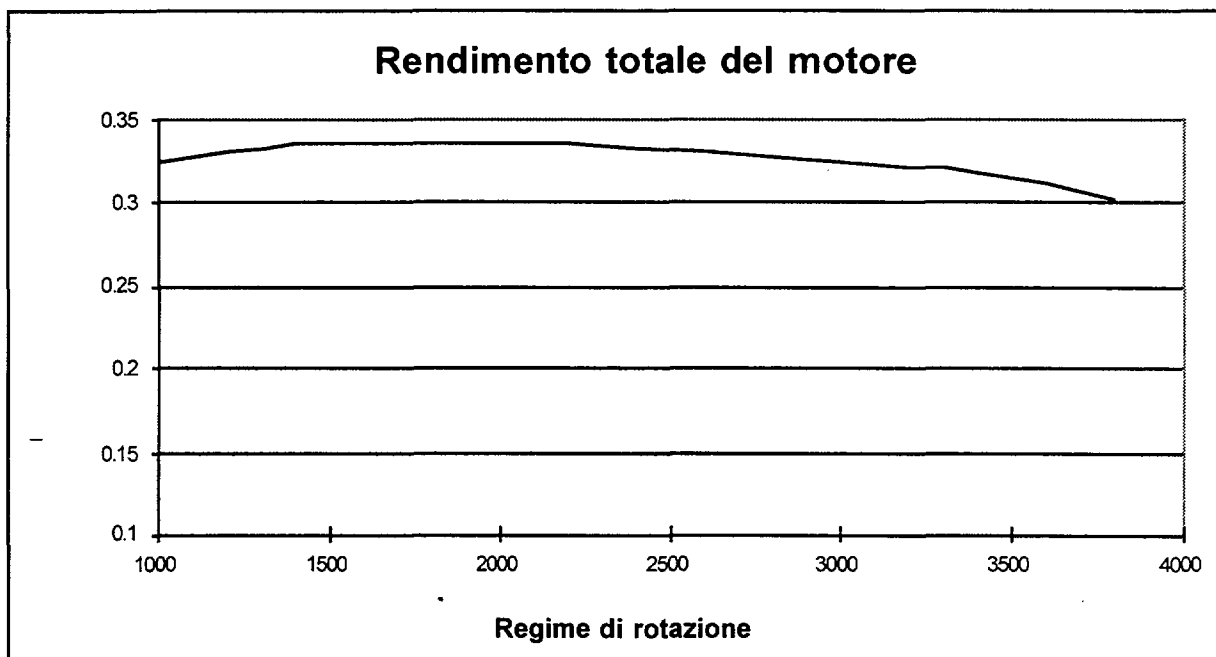
In un veicolo ibrido il motore lavora a punto fisso e quindi le perdite di pompaggio sono ridotte perchè è possibile dimensionarlo e regolarlo in modo che eroghi la potenza di progetto a tutta apertura, senza strozzare l'aspirazione. L'adozione di sistemi ad iniezione, poi, consente di evitare anche la caduta di pressione dovuta al Venturi, presente nei sistemi a miscelatore per l'ammissione del gas.

In definitiva, combinando alti rapporti di compressione, miscele magre e funzionamento a punto fisso a tutta apertura, il rendimento può arrivare al 40% ed oltre, paragonabili quindi a quelli dei migliori diesel.

Le considerazioni sopra esposte, oltre che dalle prove al banco dei motori a gas di nuova generazione, sono convalidate dalle prove su strada dell'autobus urbano ibrido con alimentazione a metano e bombole alleggerite dell'ALTRA, società a partecipazione IVECO-ANSALDO.

Le prove su strada del veicolo hanno infatti evidenziato una autonomia superiore al previsto ed una rumorosità molto ridotta, rispetto a quella già bassa dell'ibrido a gasolio. Si riportano di seguito i

rendimenti totali del motore alimentato a metano, evidenziando che nelle condizioni di funzionamento a punto fisso prescelte per l'uso nell'ibrido (2200 g/l') il rendimento supera il 33% [16]. Si osservi come il motore in oggetto non disponga ancora di sistema di iniezione multipoint, quale quello utilizzato sulle realizzazioni più recenti, che consente un ulteriore miglioramento dei rendimenti.



2.2.2 Consumi indiretti

Il consumo indiretto di energia, cioè l'energia per portare il combustibile dalla sorgente nel serbatoio del veicolo, è stimato per i combustibili convenzionali nella seguente tabella [17]:

<i>Combustibile</i>	<i>Consumo indiretto di energia</i>
<i>Benzina</i>	<i>16%</i>
<i>Diesel</i>	<i>12%</i>
<i>GPL</i>	<i>12%</i>
<i>Gas naturale</i>	<i>7%</i>
<i>Gas nat., rifornimento privato</i>	<i>16%</i>

Il consumo indiretto di energia del gas naturale stimato del 7% dipende soprattutto dal consumo di elettricità della stazione di rifornimento (6%); mentre il consumo del dispositivo del rifornimento privato è relativamente alto perchè è collegato alla rete del gas a bassa pressione, e deve quindi comprimere il gas da circa 100 mbar ai 200 bar. Le stazioni di rifornimento maggiori sono allacciate con la rete di gas ad alta pressione e comprimono il gas dagli 8 ai 200 bar.

Il consumo diretto di energia dei veicoli leggeri a gas dedicati è paragonabile a quello dei corrispondenti a benzina, perchè al maggior peso del veicolo a gas corrisponde un miglior rendimento termodinamico, per il più alto rapporto di compressione e la combustione più completa. Considerando quindi anche i consumi indiretti, già oggi il metano è vantaggioso rispetto alla benzina.

Per gli autobus, ad oggi è il diesel più vantaggioso, ma confrontando con i diesel i futuri autobus a gas naturale i consumi diretti diventano equivalenti, e la differenza di consumo di energia nel passaggio sorgente-ruota si aggira sul 5%, a vantaggio del gas naturale.

2.3 La sicurezza del metano

Nella valutazione degli aspetti circa la sicurezza di potenziali combustibili alternativi, con particolare riguardo al loro utilizzo in autotrazione, devono essere considerati i seguenti aspetti:

- a) tendenza a formare una miscela combustibile in seguito a fuoriuscite accidentali e caratteristiche di accensione, esplosione e diffusione della fiamma;
- b) caratteristiche di distribuzione e di immagazzinamento;
- c) impianti di bordo

Formazione di miscele combustibili, accensione ed energia rilasciata

A differenza della benzina e del GPL il gas naturale è più leggero dell'aria, fatto che gli permette di avere una spinta ascensionale tale da disperdersi velocemente quando avviene una fuoriuscita. Inoltre, la percentuale minima di metano in aria necessaria per sostenere una fiamma (5%), è maggiore di quella del propano (2%) e della benzina (1%). La sua energia minima di accensione (0,29 mJ) e la temperatura di autoaccensione (813°K) sono poi più elevate rispetto ai combustibili tradizionali, e riducono la possibilità che la miscela eventualmente formatasi si accenda. Poichè il metano puro è inodore, esso viene comunque odorizzato, cioè addizionato di piccole quantità di mercaptani che con il proprio odore marcato e sgradevole, fungono da rilevatori di una sua presenza molto prima del limite di esplosione. Infine l'energia teorica massima disponibile da una combustione di una miscela di aria e metano risulta del 50% inferiore al propano, e del 16% alla benzina [18]. Una perdita di un volume di gas in aria genera quindi una miscela combustibile con un contenuto energetico minore di quella che genererebbe una quantità analoga di propano e benzina.

Caratteristiche di distribuzione e di immagazzinamento

Il punto più delicato della tecnologia CNG risiede senz'altro nelle bombole, e per questo i serbatoi cilindrici, in cui il gas naturale viene immagazzinato, possiedono una elevatissima resistenza meccanica, di gran lunga superiore rispetto a quelli della benzina, e sono capaci di resistere a violenti urti.

Le bombole cilindriche per il gas naturale compresso sono normalmente testate almeno ogni 5 anni, ed il fattore di sicurezza per tali dispositivi è di 2,5 cioè due volte e mezzo la pressione di riempimento. Quindi una eventuale fuga accidentale, o una fuoriuscita per rovesciamento della bombola sono ridotte al minimo e poco probabili

Inoltre sono stati recentemente introdotte sul mercato (EMER e BRC) dispositivi di sicurezza costituiti da valvole meccaniche a chiusura inerziale, che intervengono in caso di rottura delle linee di alimentazione, e da fusibili termici contro il rischio di esplosione del serbatoio dovuta alla sovrappressione in caso di incendio, valvole che intervengono a temperature superiori ad un centinaio di gradi. Nell'incendio avvenuto nel 1990 in uno dei garage appartenenti alla Central Dutch Transport Company furono distrutti 35 autobus, tra cui due alimentati a gas naturale; una volta domato l'incendio, le bombole del gas sono state ritrovate meccanicamente integre, perchè i dispositivi di sicurezza sulle bombole del gas naturale avevano funzionato correttamente, scaricando il gas in pressione ed evitando lo scoppio.

Impianti di bordo

La normativa italiana sugli impianti a gas prevede che i veicoli muniti di dispositivi per l'alimentazione con combustibili in pressione o gassosi (valvole, tubazioni ad alta pressione, riduttori di pressione, apparecchi di carburazione, rubinetti e bombole), devono essere sottoposti a visite e prove di accertamento dei requisiti di idoneità, controllando che non possa verificarsi, anche a motore fermo, uscite di gas o possibili deterioramenti; l'officina che ha provveduto all'installazione dell'impianto deve certificare, conformemente ad un modello approvato dalla Direzione Generale della Motorizzazione Civile e dei Trasporti, che le tubazioni siano state sottoposte con esito favorevole a prova idraulica.

Uno dei problemi per gli installatori di impianti autogas è rappresentato dal backfiring o ritorno di fiamma, le cui cause sono imputabili nella gran parte dei casi a problemi di accensione, legati soprattutto a non adeguata manutenzione; anche la combinazione miscela magra + ritardo di

accensione può generare backfiring (il ritardo accensione è conseguenza di un'improvvisa accelerata). Il backfiring si presenta anche nel funzionamento a benzina, ma poiché gli iniettori sono molto prossimi alla valvola di aspirazione, il volume di miscela combustibile interessato è modesto. Nel funzionamento a gas con impianti di tipo tradizionale, invece, esso può produrre effetti spiacevoli perché il collettore di aspirazione e parte del condotto a monte della farfalla sono pieni di miscela gas-aria. Il problema non esiste invece con gli impianti ad iniezione gassosa. L'applicazione del gas naturale compresso (CNG) in autotrazione appare quindi, particolarmente in incidenti ed in presenza di incendi, significativamente più sicuro dei sistemi a benzina, a propano ed ai sistemi di combustibili criogenici, quali il gas naturale liquefatto o l'idrogeno liquefatto.

3. IL METANO E L'AMBIENTE

3.1 Trasporti ed emissioni

L'attuale numero di veicoli in circolazione sulle strade europee è pari a 224 milioni e, anche se saranno introdotte soluzioni alternative quali veicoli elettrici o ibridi nelle grandi concentrazioni urbane, la maggior parte di questi mezzi sarà sempre equipaggiata da motori a combustione interna alimentati con idrocarburi di origine fossile. Dal punto di vista ambientale, la crescita del settore dei trasporti ha portato, in particolare nei centri urbani dove spesso il traffico è congestionato, ad un pericoloso aumento delle sostanze inquinanti e ad elevati livelli di inquinamento acustico. I principali inquinanti considerati per i motori a combustione interna sono :

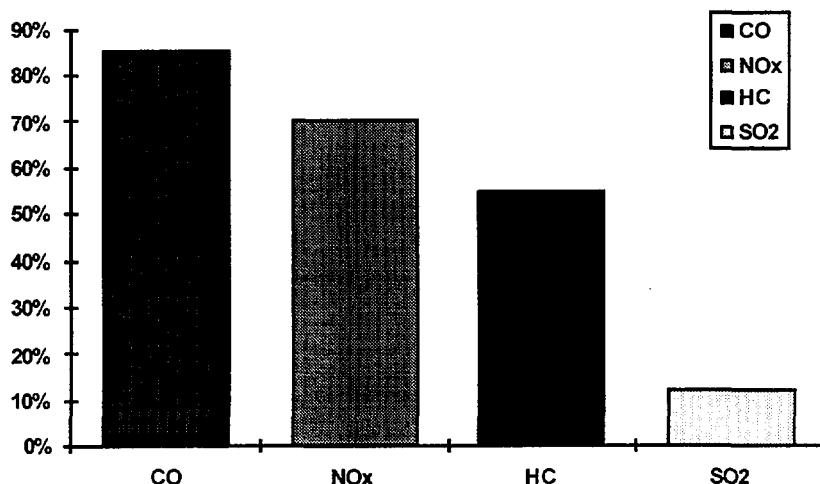
<i>motori ad accensione comandata</i>	<i>motori ad accensione spontanea</i>
- ossido di carbonio (CO)	- ossido di carbonio (CO)
- idrocarburi incombusti (HC)	- idrocarburi incombusti (HC)
- ossidi di azoto (NOx)	- ossidi di azoto (NOx)
- composti organici volatili (VOC)	- particolato (PM)
	- anidride solforosa (SO ₂)

Queste sostanze si formano poiché il motore brucia una miscela di idrocarburi ed aria in cui l'ossigeno determina la combustione e l'azoto, benchè teoricamente inerte, viene parzialmente ossidato dalle elevate temperature nella camera di combustione. Percentuali tipiche dei gas di scarico di un motore ad accensione comandata privo di controllo delle emissioni, secondo varie condizioni di funzionamento [19].

	<i>minimo</i>	<i>acceleraz.</i>	<i>vel. cost.</i>	<i>deceleraz.</i>
<i>CO₂ %</i>	<i>9,5</i>	<i>10,5</i>	<i>12,5</i>	<i>9,5</i>
<i>CO %</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>0,4</i>	<i>2</i>
<i>HC (ppm CI)</i>	<i>4000</i>	<i>2500</i>	<i>2000</i>	<i>20000</i>
<i>NOx (ppm NO)</i>	<i>100</i>	<i>1500</i>	<i>1000</i>	<i>100</i>

Nelle aree urbane con la loro elevata densità di traffico autoveicolare incanalato tra i palazzi, i vapori dei combustibili e le emissioni allo scarico degli autoveicoli devono ritenersi estremamente pericolosi per la salute. Nei paesi dell'Europa Occidentale le emissioni inquinanti, quali ossido di carbonio (CO), idrocarburi incombusti (HC) ed ossidi di azoti (NOx) prodotti dai trasporti sono molto elevate, specialmente nelle aree urbane, dove è concentrata oltre il 60% della popolazione.

Contributo del settore trasporto all'inquinamento di aree urbane mediamente industrializzate



Le principali misure adottate dai governi riguardano :

- limiti alle emissioni atmosferiche dei veicoli;
- standard di qualità dei carburanti;
- requisiti di efficienza dei propulsori.

Esamineremo di seguito la normativa relativa alla riduzione delle emissioni.

3.2 Normativa europea ed internazionale

Per l'omologazione dei veicoli nel rispetto dell'ambiente, al fine di poter procedere a misure realistiche, ripetibili ed affidabili, è stata definita una procedura di prova su banco a rulli che consenta di misurare le emissioni di una vettura in un ciclo di guida prevalentemente cittadino. Tra le condizioni di peggiore funzionamento dell'autoveicolo nei confronti delle emissioni inquinanti primeggiano le partenze a freddo, le frequenze elevate di "stop and go" e le basse velocità medie; prelevando direttamente dalla tubazione di scarico una piccola porzione dei gas da inviare agli analizzatori, oppure, con la procedura più recente, effettuando il prelievo totale dei gas emessi, si misurano direttamente le emissioni gassose HC, CO e NOx in gr/km.

Negli Stati Uniti il ciclo di guida scelto a rappresentare il tipo di guida prevalente è identificato come USA-FTP'75 (Federal Test Procedure).

Il ciclo Europa utilizzato nei paesi della Comunità Europea ha subito una sua evoluzione passando da quello urbano ECE 15, in vigore fino al 31/12/1992, a quello aggiornato ECE 15-08 (ECE+EUDC), utilizzato a partire dalla Direttiva 94/12. Questo prevede la partenza con motore freddo, una prima parte di marcia cittadina a bassa velocità ed una seconda di marcia extraurbana.

LIMITI VIGENTI RIFERITI AGLI LDV [20]

(Light Duty Vehicles = Veicoli Leggeri)

	CO	HC+NOx	PM Die	Evap.
<i>unità di misura</i>	<i>g/km</i>	<i>g/km</i>	<i>g/km</i>	<i>g/km</i>
CEE 96 Otto	2,2	0,5		2
CEE 96 Diesel DI	1	0,9	0,1	
CEE 96 Diesel IDI	1	0,7	0,08	

Per i veicoli pesanti, con peso in ordine di marcia superiore ai 35 ql, è invece prevista la cosiddetta prova dei 13 modi, dove si misurano le emissioni del motore in prova al freno, considerando 13 condizioni di funzionamento stazionarie. I limiti per le emissioni sono indicati in gr/kWh, calcolando la media ponderale dei valori misurati ai vari regimi.

La evoluzione dei limiti delle emissioni viene illustrata nella tabella , che evidenzia la sequenza delle Direttive europee : sono state richieste riduzioni per gli ossidi di azoto NOx, l'ossido di carbonio CO, gli idrocarburi incombusti HC, il particolato dei Diesel PM e le emissioni per evaporazione VOC dei motori a ciclo Otto.

LIMITI VIGENTI E FUTURI RIFERITI AGLI HDV [20]
(Heavy Duty Vehicles = Veicoli Pesanti)

	HC	CO	NOx	PM Dies
unità misura	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
CEE 88/77	2,4	11,2	14,4	
CEE 88/89	2,45	9,8	14,4	
CEE 91/542 (92/93)	1,1	4,5	8	0,36
CEE EURO 2	1,1	4	7	0,15
CEE EURO 3	0,6	2	5	0,15

Negli Stati Uniti sono in vigore i CAAA 1990 (Clean Air Act Amendments del 1990) che rappresentano la più completa legislazione in tema di ambiente sino ad ora concepita negli USA per ottenere concreti risultati in termini di qualità dell'aria. Essi costituiscono un pacchetto integrato di provvedimenti che comprende limiti di emissione più severi per gli autoveicoli e regole per carburanti alternativi. I CAAA 1990 prevedono che gli standards di emissione di HC, CO e NOx per automobili ed autocarri di piccole dimensioni vengano ridotti entro il 2004 del 99%, 98% e 95% rispettivamente; attualmente gli standards in vigore corrispondono a loro volta a riduzioni del 96%, 97% e 90% rispetto alla situazione precedente. All'avanguardia in questa politica è la California; nel settembre 1990 i due enti governativi preposti alla regolamentazione nel settore, il California Air Resources Board (CARB) e la South Coast Air Quality Management District (SQACMD), hanno imposto un programma per la produzione di veicoli a bassa emissione e la diffusione di carburanti ecologici. Dal 1994 i nuovi veicoli prodotti rientrano nelle seguenti 4 classi con limiti sempre più restrittivi: TLEV (transitional low emission vehicles), LEV (low emission vehicle), ULEV (ultra low emission vehicle), ZEV (zero emission vehicle).

Limiti attuali CARB

tipo di veicolo	HC	CO	NOx	NMOG	PM Dies.	FORM
limiti emissioni a 50000 mglia	g/miglio	g/miglio	g/miglio	g/miglio	g/miglio	g/miglio
passenger car		3,4	0,4	0,25	0,08	0,015
TLEV		3,4	0,4	0,13	0,08	0,015
LEV		3,4	0,2	0,08	0,08	0,015
ULEV		1,7	0,2	0,04	0,08	0,008

Il confronto con la situazione europea per le emissioni di idrocarburi conferma la distanza che separa la Direttiva americana da quella europea, e tuttavia c'è da sottolineare il fatto che il livello di inquinamento americano è scaturito da un ciclo rilievo di emissioni diverso da quello europeo, dettato dalla diversità delle strade e del traffico caratteristico; studi in proposito hanno evidenziato un maggiore traffico nella circolazione europea del 30% rispetto a quella americana, comportando più frequenti accelerazioni e decelerazioni medie. Il variare di regime del motore così frequentemente aumenta le emissioni nocive nei gas di scarico, rendendo la situazione europea più critica e più difficilmente limitabile nelle direttive rispetto alla situazione americana.

Ma la differenziazione maggiore risiede sulle rilevanti emissioni di idrocarburi incombusti: le prescrizioni europee prevedono soltanto un valore limite cumulativo per tutti gli idrocarburi, per cui i diversi componenti degli HC vengono trattati alla medesima maniera, mentre in California ed in altri stati degli USA esiste una differenziazione, nel senso che i singoli composti sono considerati in funzione della effettiva, specifica funzione inquinante che essi esercitano. Viene messo in primo piano il loro potenziale di produzione di ozono, che è uno dei costituenti principali dello smog fotochimico. Tra i precursori dell'ozono, che si forma a seguito di complesse reazioni che coinvolgono l'ossigeno atmosferico, figurano in primo luogo gli ossidi di azoto e gli idrocarburi incombusti, mentre la molecola del metano è più stabile e quindi ha un debole potenziale di

produzione di ozono. Di conseguenza nella normativa delle emissioni si distingue tra idrocarburi metanici e non metanici, per i quali i limiti sono più rigorosi.

Recente è poi l'attenzione che la comunità scientifica internazionale rivolge con metodi standardizzati agli inquinanti non regolamentati quali le aldeidi, il benzene, l'1,3 butadiene, il toluene e gli idrocarburi policiclici aromatici, nocivi alla salute ed all'ambiente altrettanto quanto gli inquinanti regolamentati. Vedremo di seguito come considerando anche questi agenti inquinanti, i vantaggi per la salute dell'uso del metano risultino ancora più evidenti.

3.3 Il metano come combustibile intrinsecamente a basso carico inquinante

3.3.1 Emissioni veicolari ed effetti sulla salute umana

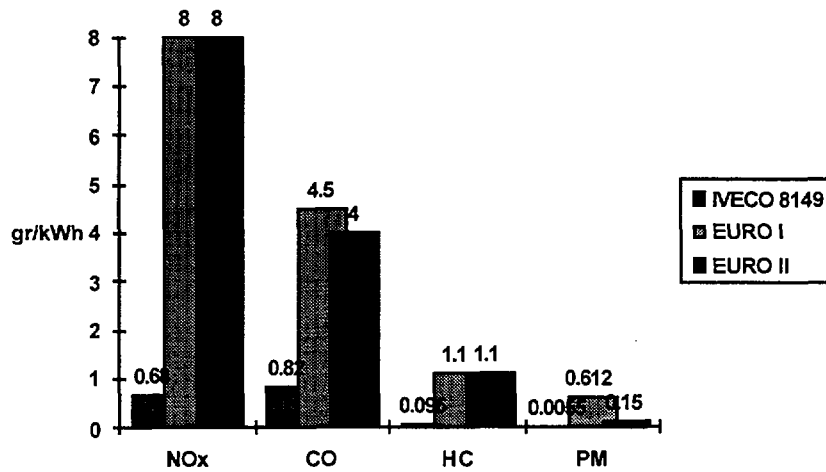
Da un punto di vista ecologico il metano si presenta attualmente come il più interessante combustibile alternativo.

Le motivazioni che conducono all'utilizzo del metano nel settore automobilistico vanno ricondotte alle sue caratteristiche intrinseche: assenza di impurità, di zolfo, di composti di piombo e di idrocarburi policiclici aromatici così da ottenere con adeguata tecnologia motoristica bassissimi livelli di emissioni gassose inquinanti allo scarico, con sostanziale assenza di odori e di particolato.

Circa l'aspetto ambientale il gas naturale possiede dei vantaggi indiscutibili, i più importanti dei quali sono [11],[15]:

- 1) basse emissioni di CO, da 1/2 a 1/5 rispetto al diesel, in particolare per gli autoveicoli a gas naturale compresso dedicati;
- 2) emissioni di HC ridotte dal 50 al 70% rispetto al diesel e costituite all'85% da metano, poco reattivo
- 3) emissioni di NOx ridotte fino al 30% di quelle del diesel
- 4) emissioni di SO2 e particolato trascurabili se confrontato al diesel;
- 5) emissioni di CO2 dal 20% al 30% inferiori alla benzina e dal 4% al 20% inferiori rispetto al diesel, grazie al favorevole rapporto idrogeno/ carbonio del metano (75% C e 25% H in massa del metano contro, mediamente, 86% C e 14% H in massa della benzina);
- 6) emissioni di idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e di 1,3 butadiene del tutto trascurabili; soltanto la formaldeide è confrontabile con il livello della vettura a benzina, mentre le altre aldeidi, in particolare quelle aromatiche, come la benzaldeide, sono decisamente più basse
- 7) minime perdite per evaporazione di composti organici volatili (VOC), costituite comunque per il 90-95% da metano.
- 8) ridottissime quantità di depositi carboniosi, da cui deriva fra l'altro una maggiore durata per l'olio lubrificante.

Per quel che attiene alle emissioni regolamentate, a titolo di esempio si riportano di seguito i risultati della sperimentazione effettuata presso il TNO sul motore utilizzato sull'ibrido ALTRA da 12 m, confrontati con i rispettivi limiti EURO I ed EURO II [16].



Una valutazione quantitativa dei benefici di natura ambientale derivanti dall'adozione del metano in sostituzione dei combustibili tradizionali deve tener conto anche della presenza nei gas di scarico di sostanze chimiche che, pur non essendo a tutt'oggi sottoposte ad alcuna regolamentazione, sono responsabili di attività mutagena e cancerogena.

Al fine di tradurre in termini di impatto igienico-sanitario l'effetto delle emissioni gassose v'è quindi stimata la tossicità relativa delle specie chimiche, e questo può essere fatto in base ai valori limite di concentrazione stabiliti per ambienti di lavoro dall'Associazione Americana degli Igienisti Industriali (AICGH).

Si riportano di seguito le conclusioni di due articoli pubblicati in tempi diversi su questa tematica, il primo dei quali [21] ha il pregio di confrontare le emissioni relative allo stesso motore con alimentazione a gasolio e trasformato a metano, il secondo [22] di esporre una graduatoria di 13 diversi carburanti in base alla tossicità delle emissioni.

Nell'analisi condotta dall'Istituto Motori del CNR, attribuito all'ossido di carbonio un valore di "tossicità relativa" pari ad 1 (TLV 55 mg/mc), sono dapprima mostrati i fattori relativi agli altri inquinanti.

Concentrazioni limite ammesse in ambiente di lavoro e fattori di tossicità relativa rispetto all'ossido di carbonio

Inquinante	TLV-TWA	Fattore toss. relat.
CO	55 mg/mc	1
NOx (come NO)	30 mg/mc	2
S (come SO ₂)	5 mg/mc	11
Aldeidi (HCHO)	1,5 mg/mc	37
IPA (come BP)	0,15 µ/mc	367000

Per quanto riguarda gli HC è stata concentrata l'attenzione sugli IPA, ovvero la sola quota parte di HC tossicologicamente importante e appositamente determinata con specifico campionamento. Come limite di concentrazione ammissibile per gli IPA ci si è riferiti al valore fissato nella normativa vigente in Russia e proposto in Francia per il benzo pirene BP. Le aldeide totali sono state espresse come aldeide formica HCHO.

Le emissioni orarie medie sono state associate ai propri fattori di tossicità ed è stato calcolato l'indice di tossicità complessiva per i fumi reflui dal motore IVECO 8460 con le due diverse alimentazioni.

Indice di tossicità delle emissioni gassose da motore IVECO 8460 alimentato a gasolio e trasformato a metano

Inquinante	Gasolio	Metano
CO	69,2	102,3

<i>NO</i>	1162	1062
<i>SO2</i>	453,2	<i>trascurabile</i>
<i>HCHO</i>	11,5	63,6
<i>BP</i>	426,5	8,2
<i>Totale</i>	2122,4	1236,1

Con la motorizzazione a metano si ottiene una riduzione del 42% dell'indice complessivo di tossicità; ulteriore vantaggio per il metano è l'abbattimento della fumosità pressochè totale, con conseguente riduzione della concentrazione atmosferica di particelle solide sospese e minore formazione di depositi carboniosi sugli edifici.

Nel recente articolo a cura dei ricercatori dell'ENEA, si perviene alla conclusione che dei carburanti esaminati, i meno inquinanti sono senza dubbio il GPL ed il metano, mentre i più inquinanti sono proprio quelli tradizionali, la benzina super ed il diesel, risultati al 1o e 2o posto. Si riporta di seguito la tabella finale riassuntiva, dove i carburanti sono elencati dal più inquinante al meno inquinante, in base all'entità ed alla tossicità delle emissioni.

1. Benzina super
2. Diesel
3. Benzina senza piombo
4. Biodiesel
5. Benzine ossigenate senza marmitta catalitica
6. Benzine ossigenate con marmitta catalitica
7. Benzina "verde" con catalizzatore
8. GPL
9. Metano

Si riporta anche un estratto della tabella che espone una valutazione qualitativa (A = emissioni alte, M medie, B basse, N nulle) delle emissioni per alcuni dei combustibili tradizionali.

Inquinanti	Benzina Super	Verde catal.	Diesel	Biodiesel	GPL	Metano
<i>CO</i>	A	B	B	B	B	B
<i>NO2</i>	M	B	B	B	M	M
<i>SO2</i>	B	B	A	B	B	N
<i>Particolato</i>	M	B	A	M	B	B
<i>Benzene</i>	A	B	B	B	N	N
<i>IPA</i>	A	B	A	M	N	N
<i>Pb</i>	A	B	N	N	N	N
<i>Formaldeide</i>	M	B	M	A	N	N
<i>Acetaldeide</i>	B	B	M	M	N	N

3.3.3 Effetto serra

Il ciclo di impiego del metano presenta poi aspetti atipici rispetto ad altri carburanti, il cui apporto risulta ulteriormente positivo sul piano ambientale. Riguardo la fase "a monte" del veicolo va considerato che il metano:

- può essere direttamente utilizzato come carburante già allo stadio dell'estrazione (dopo i normali trattamenti a bocca di pozzo di disidratazione e filtrazione di inerti), non richiede quindi impianti di raffinazione o aggiunta di additivi;
- la sua movimentazione avviene attraverso la rete di metanodotti, può quindi essere reso disponibile con continuità alle stazioni di servizio sino nei centri urbani, senza necessità di accumulo nei depositi e senza nessun impatto sul traffico e sui trasporti;
- con il metano risultano sostanzialmente assenti le perdite evaporative di combustibile, sia nel sistema di rifornimento che in quello di alimentazione del veicolo, già necessariamente realizzati a tenuta di pressione.

Per contro il metano è un gas che promuove l'effetto serra, dal momento che la sua molecola è più efficace di quella dell'anidride carbonica nell'assorbire e reirradiare verso la terra le radiazioni nel campo dell'infrarosso.

Il contributo di un combustibile all'effetto serra è espresso tramite l'indice di riscaldamento globale, Global Warming Index, che esprime il potenziale di riscaldamento globale di un gas rapportato a quello dell'anidride carbonica, scelta come gas di riferimento, con riferimento ad un prefissato orizzonte temporale (20, 100 e 500 anni).

Questi indici sono soggetti a revisione, e l'ultima edizione del rapporto dal Comitato Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (IPCC) considera il metano 62 volte più attivo, a 20 anni, dell'anidride carbonica. Tuttavia, tenendo conto della riduzione del 25% di CO₂ e della bassissima emissione di metano (0,1% di quella di CO₂) che si ha allo scarico della vettura a CNG dotata di un catalizzatore innovativo, questa caratteristica negativa del gas naturale diviene del tutto trascurabile.

Considerando le emissioni di autoveicoli a benzina ed a metano, ed applicando ad esse gli indici GWI, risulta un vantaggio del 14% circa a favore del metano, come riportato in tabella [17]:

Contributo all'effetto serra della benzina rispetto al gas naturale

	CO ₂ (g/km)	CH ₄ (g/km)	equival. effetto serra
benzina	220	0	220
gas naturale	175	0.25	191

4. LA VIA DEL METANO

4.1 Il mercato dei veicoli a metano e la politica di supporto in Europa

In Europa le autorità cominciano a riconoscere in maniera implicita nei provvedimenti ed in maniera esplicita col varo delle nuove strategie, l'importanza della diffusione dei veicoli a metano per la riduzione dell'inquinamento da traffico.

Circa la politica dei prezzi, attualmente non c'è molta coerenza nella tassazione dei combustibili puliti in Europa.

L'ENGVA (European Natural Gas Vehicle Association) ha completato un'indagine sui prezzi e le tasse sui combustibili nel settembre 1995 [23]. I dati ricavati da dodici nazioni indicano una grande variazione sia dei prezzi sia delle imposte sui carburanti: il gas naturale ha un prezzo vantaggioso, dal 6% al 195% in meno, in confronto con il GPL, la benzina ed il diesel in Danimarca, Svezia, Gran Bretagna, Italia, Croazia e Repubblica Ceca. Il GPL è competitivo e talvolta più economico del gas naturale in Belgio e nei Paesi Bassi; in Germania il prezzo del diesel per il consumatore è più basso del 27%, mentre in Svizzera il gas naturale è dal 4% al 13% più costoso della benzina e dal 0,5% al 12% più del diesel.

Il settore ottimale d'impiego del carburante metano è poi identificato dal ENGVA's Marketing/Communication nel trasporto merci leggero in ambito urbano e negli autobus urbani, poichè consumano una grande quantità di combustibile in aree cittadine congestionate pesantemente dal traffico, e dove quindi il problema dell'inquinamento è più stringente.

Sono già disponibili autobus a gas naturale da parte di cinque costruttori europei, in modo da avere una discreta scelta di veicoli a prezzi competitivi. Si può quindi concretamente individuare una potenziale utenza di veicoli in grado di massimizzare i benefici ambientali ottenibili con l'uso del metano, in particolare ricorrendo alla tecnologia dedicata, minimizzando nel contempo i disagi di utilizzazione. Tale utenza comprende gran parte dei veicoli, sia leggeri che pesanti, facenti parte delle flotte di servizio e di trasporto collettivo, quali:

- autobus urbani e suburbani,
- taxi,
- furgoncini per il trasporto e la distribuzione urbana di merci,
- veicoli delle aziende operanti nei servizi urbani (gas, acqua, elettricità, poste, etc.),
- veicoli dell'amministrazione locale (servizi comunali, polizia urbana, etc.),
- autocompattatori e raccoglitori di rifiuti,

- la quota di mezzi privati che possono presentare esigenze di mobilità analoghe a quelle sopra delineate.

La caratteristica critica di queste flotte è la centrale di rifornimento, problema affrontato seriamente solo dall'Italia e dalla Russia con un'infrastruttura adeguata. Se gli sforzi per promuovere le flotte degli NGV avranno successo, la prime flotte richieste ad operare a gas quelle di servizio delle compagnie che distribuiscono il gas naturale.

Le maggiori compagnie nel settore in Europa, come la Distrigaz (Belgio), Gasunie (Olanda), Ruhrgas (Germania), British Gas (Gran Bretagna), Gaz de France (Francia) e la SNAM (Italia), stanno incrementando il numero di veicoli a gas nelle loro flotte aziendali; la Gaz de France, già oggi con i suoi oltre 600 veicoli al primo posto in Europa, ha un programma di tutto rilievo, con l'intenzione di mettere in strada 30.000 veicoli a gas entro il 2000. La Germania è poi molto attiva nell'installare stazioni di compressione e c'è un crescente interesse per gli NGV, con un potenziale mercato di più di 600 compagnie di gas; insieme a BMW, anche la Mercedes e la Man sono impegnati nella costruzione di veicoli a gas, la MAN come fornitore di motori, tra l'altro alla Breda per i 14 autobus di Firenze. Dopo il 1995 in Germania il numero dei veicoli a metano è raddoppiato, arrivando a 2500 veicoli nel 1997.

Riguardo infine l'intervento pubblico, consideriamo il ruolo svolto dalla Comunità Europea per lo sviluppo del settore.

La problematiche relative agli NGV impegnano sette differenti Direttorati-Generali (DG) della Commissione Europea; i più importanti concernenti gli NGV ed i combustibili alternativi, sono il DG III-Industria, il DG XI sull'ambiente, il DG XII-Science Research and Development ed il DG XVII sull'energia.

La Commissione Europea ha affidato i problemi energetici legati al trasporto urbano al DG XVII-Energia che, dal 1979, ha supportato più di 80 progetti sotto il programma RUE, Rational Use of Energy in Transport.

Dal 1990 è stato avviato il programma Thermie destinato a definire importanti obiettivi riguardanti la limitazione dei gas a effetto serra, la sicurezza degli approvvigionamenti energetici, l'uso di tecnologie nuove, pulite ed efficienti; grazie ai cofinanziamenti comunitari (148 milioni di Ecu) il programma Thermie ha realizzato 196 progetti inerenti al risparmio energetico, all'utilizzo razionale dell'energia, all'uso delle fonti di energia rinnovabili.

Il Motor Vehicle Emission Group and Task Force (MVEG), creato dal DG III-Industria (Direttorato E, Industrial Affairs), mette a fuoco i problemi specifici relativi allo sviluppo di emissioni standard per autoveicoli. L'ENGVA ha poi una rappresentanza tecnica e politica nel gruppo dove, insieme al TNO Road-Vehicles Institute ed alla Dutch LPG Association, sta sviluppando un progetto per identificare un veicolo urbano che possa rendere più pulita l'aria in un ambiente cittadino congestionato. La Task Force on the Car of Tomorrow, nata nel giugno 1995 sotto l'egida del DG XII-Science Research and Development, ha l'obiettivo di facilitare gli sforzi necessari nella ricerca e la dimostrazione per la realizzazione della "Car of the Future", un veicolo efficiente e poco inquinante che sia economicamente competitivo entro il 2005.

Sono stati coinvolti i maggiori costruttori di automobili europei ed un numero di compagnie incaricate nella ricerca di celle a combustibile e batterie elettriche; il veicolo a gas naturale attualmente farebbe da ponte all'auto ibrida, o a celle combustibile del futuro alimentata da idrogeno riformato dal gas naturale.

4.2 Lo sviluppo normativo

Esistono, nell'ambito della stessa Europa, varie e differenti norme standard che esigono, per i diversi paesi, procedure di omologazione separate e onerose per le installazioni delle infrastrutture, e per i loro singoli componenti: la molteplicità delle pratiche di omologazione impedirebbe lo sviluppo innovativo del prodotto e la produzione in serie, traducendosi in costi elevati, senza che per questo le caratteristiche delle installazioni vengano migliorate o rese più sicure.

Queste difficoltà possono rendere il ricorso ai veicoli a gas naturale antieconomico, al punto da impedirne la pratica attuazione, nonostante il loro riconosciuto potenziale di riduzione delle emissioni nocive.

Sono largamente disponibili in tutta Europa sofisticate stazioni di compressione e attrezzature per la distribuzione, ma lo sviluppo di uno standard per l'installazione di stazioni per gli NGV è essenziale

per il progresso tecnologico e l'entrata nel mercato europeo. Una normativa sui collegamenti dell'alimentazione e sulle bombole di CNG è stata realizzata dall'International Standards Organization (ISO), sulla base degli standards Nord Americani NGV-1 e NGV-2 rispettivamente. Sebbene esistano normative circa le stazioni di compressione per gli NGV in Belgio, Francia, Germania, Italia, Olanda e Gran Bretagna, basati sugli standards canadesi, italiani e neozelandesi, ogni paese le ha modificate per conformarle alle proprie norme nazionali. Pertanto il CEN Bureau Technique, un'associazione dell'Unione Europea, insieme all'ISO, hanno stabilito dal maggio '95 un nuovo Technical Committee (TC-326) sul rifornimento di gas per NGV, al fine di stabilire una normativa riconosciuta tra tutte le nazioni membre dell'EU.

BIBLIOGRAFIA

- [1] “ BP Statistical Review of World Energy”, BP Group Media e Publications, June 1995
- [2] “ Verifica dei fabbisogni di gas del parco elettrico italiano e della relativa copertura”, Documento congiunto dei Ministeri dell’Industria e dell’Ambiente, presentato al Presidente del Consiglio dei Ministri il 29/6/95, da “ Energia e Materie Prime”, Maggio 96
- [3] La Rivista dei Combustibili, n. 3,7,8,9,10 (marzo, luglio-agosto, settembre, ottobre) 1995
- [4] “ Present Situation and Future Prospects for Natural Gas Vehicle”, Minoru Akimoto, Japan Gas Association, 6o Metanauto, Marzo 1996
- [5] ” Tecnologie Energetiche emergenti, con particolare riferimento alle ricadute sul mercato petrolifero”, ENEA, Funzione Centrale Studi, 1996
- [6] “ Database to Track U.S. Postal Service’s Huge NGV Fleet”, Natural Gas Fuel, Settembre 1996
- [7] “Progettazione e sperimentazione di sistemi di alimentazione ad iniezione per motori a combustione interna con combustibile gassoso”, Tesi di Laurea, Maurizio De Marco, Roma 1996
- [8] “TUFFSHELL TM Tanks Make Compact Passengers NGVs a Reality”, Brunswick Composites, 1995
- [9] Listino prodotti Industrie Faber, 1996
- [10] “ La resistenza dei materiali” James E. Gordon, Mondadori, 1976
- [11] “The Use of Compressed Natural Gas as a Fuel in Urban Buses”, Maxibrochure dal Thermie Programme Action NO. T98, 1995
- [12] Ing. Ennio Rossi, ENEA
- [13] “ Applicazioni dell’Idrogeno negli autoveicoli con motore a combustione interna”, G.Pede, V.Sglavo, RTI-ENE (91) 01, ENEA
- [14] “ Tecnologia costruttiva per una specifica motorizzazione a metano “, M.Gambino, S.Iannaccone, A.Unich, 4o Metanauto, 1990
- [15] “ Strategie di impiego del CNG nei trasporti” R. Gozzellino, R. Rinolfi, E. Volpi Centro Ricerche Fiat, R.Gaudio, IVECO, G.Cornetti, 6o Metanauto, Marzo 1996
- [16] Ing. G. Mantovani, ALTRA, comunicazione personale
- [17] M.van Rij (GASTEC), Today’s position of natural gas vehicles, European Conference on new fuels and vehicles for clean air, Amsterdam June 1993
- [18] “ Some consideration of the safety of Methane, (CNG), as an automotive fuel”, G.A. Karim, SAE Paper 1983
- [19] G.Ferrari, Motori a combustione interna, Ed.Il Capitello, Torino 1995
- [20] “ Database ed ipotesi di standard per le emissioni degli autoveicoli alimentati a metano”, F.Merigo, F.Mariani, P.Vettori, 5o Metanauto, Settembre 1995

[21] “Abbattimento delle emissioni inquinanti regolamentate e non regolamentate nelle aree urbane con mezzi di trasporto pubblico alimentati a metano”, M.Gambino, P.Corbo, R.Cericola, S.Iannacone, Istituto Motori CNR, Firenze Maggio 1992

[22] “Impatto ambientale e sanitario dei carburanti per autotrazione”, Raffaella Uccelli, Carmine Ciro Lombardi, Francesco Mauro, Energia, Ambiente e Innovazione, Maggio-Giugno 1996

[23] “European Natural Gas Vehicle Association : Strategic Plan 1994-1996, Jeffrey Sisler, 60 Metanauto, Marzo 1996

Edito dall' **ENEA**
Unità Comunicazione e Informazione
Lungotevere Grande Ammiraglio Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
Stampa: Centro Stampa Tecnografico - C. R. Frascati

Finito di stampare nel mese di marzo 1998