

MANUALE MHYBUS

LINEE GUIDA TECNICHE PER LA CONVERSIONE DI AUTOBUS PER IL TRASPORTO PUBBLICO DA METANO AD IDROMETANO

Autori

Andrea Normanno (Regione Emilia-Romagna)

Stefano Valentini, Sara Picone (ASTER)

Antonino Genovese, Fernando Ortenzi (ENEA)

Vittorio Cazzola (consulente START Romagna)

Massimo Beccalli, Maurizio Rea (SOL S.p.A.)


Progetto finanziato nell'ambito del programma LIFE+ 2007-2013
DG Ambiente, Commissione Europea

Info

www.mhybus.eu

mhybus@aster.it

Durata progetto: 2009-2013



Le presenti linee guida sono rivolte alle aziende di trasporto pubblico locale ma anche a professionisti e tecnici del settore, ed illustrano i necessari passi tecnici, autorizzativi ed i costi necessari per la conversione di veicoli per il trasporto pubblico urbano da metano ad idrometano sulla base dell'esperienza e dei risultati raggiunti nel progetto EU LIFE+ Mhybus.

These technical guidelines address local public transport companies, but also to experts and technicians, to illustrate the technical and administrative steps, and the costs which are necessary for the conversion of urban transport vehicles from methane to hydromethane based on the experience and the results reached by the EU LIFE+ project Mhybus.

Mhybus Team

Regione Emilia-Romagna, Direzione Generale Reti Infrastrutturali, Logistica e Sistemi di Mobilità, coordinatore del progetto Mhybus, è da tempo impegnata nella riduzione dell'inquinamento atmosferico, ha promosso già dal 2007 il sesto "Accordo sulla qualità dell'aria" tra le città della regione Emilia-Romagna con oltre 50.000 abitanti.

<http://mobilita.regione.emilia-romagna.it/>

ASTER S.cons.p.a. è il consorzio per l'innovazione dell'Emilia-Romagna. Sviluppa e coordina la Rete Alta Tecnologia, costituita da laboratori di ricerca industriale e da centri per l'innovazione tecnologica, organizzati in Piattaforme Tematiche e sostiene iniziative di alta formazione e di valorizzazione del capitale umano ai fini del loro impiego nella ricerca condotta dalle imprese.

www.aster.it

ENEA, l'Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo economico Sostenibile, è un ente pubblico operante nel campo dell'energia, dell'ambiente e delle nuove tecnologie al supporto della competitività e dello sviluppo sostenibile.

www.enea.it

START Romagna Spa è la società nata il 1° gennaio 2012 dalla fusione delle tre aziende del trasporto pubblico locale delle province di Rimini (Tram Servizi S.p.A.), Ravenna (A.T.M. S.p.A.) e Forlì-Cesena (A.V.M. S.p.A.). La nuova azienda, con i suoi 700 mezzi e la professionalità di più di 900 dipendenti, serve un territorio di c.a. 5.100 Km² e 1.100.000 abitanti.

www.startromagna.it

SOL Spa è un Gruppo multinazionale italiano che opera in Europa, in Turchia e in India in due settori distinti: quello della produzione, ricerca applicata e commercializzazione di gas tecnici, puri e medicinali (Area Gas Tecnici) e quello dell'Assistenza Medica a Domicilio (Area Home Care). SOL è presente in Emilia Romagna dal 1973 con tre sedi, di cui una a Ravenna.

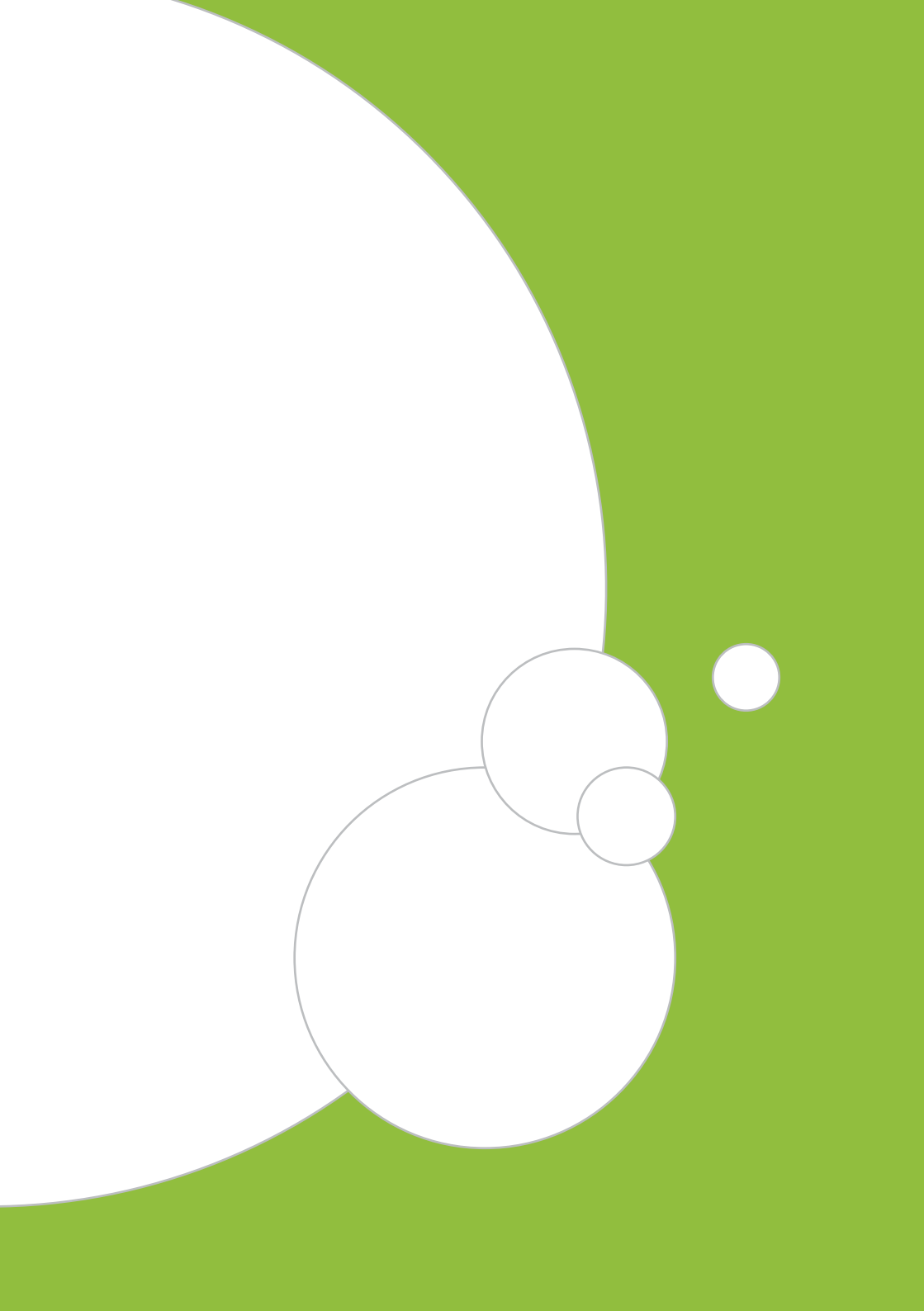
www.sol.it

**TECHNICAL GUIDELINES FOR THE CONVERSION
OF NATURAL GAS FUELLED BUSES FOR URBAN
CIRCULATION INTO HYDROMETHANE FUELLED ONES**

Executive summary **7**

**LINEE GUIDA TECNICHE PER LA CONVERSIONE
DI AUTOBUS PER IL TRASPORTO PUBBLICO
DA METANO AD IDROMETANO**

1. Introduzione	13
2. Aspetti tecnici	17
3. Produzione e distribuzione della miscela idrometano	29
4. Risultati ottenuti	33
5. Conversione di una mini-flotta di autobus a idrometano	39
6. Conclusioni	47
7. Riferimenti Bibliografici	49



TECHNICAL GUIDELINES FOR THE CONVERSION OF NATURAL GAS FUELLED BUSES FOR URBAN CIRCULATION INTO HYDROMETHANE FUELLED ONES

Executive summary

Mhybus performed all the necessary steps - in terms of studies, technical tests and administrative procedures - to design and operate the first hydromethane fuelled bus for public urban transport. The project is a EU cofounded LIFE+ Project which was implemented in Emilia-Romagna.

The different work phases which lead to the circulation of the hydromethane fuelled vehicle have been:

- Bench tests to optimize the engine for the use of hydromethane
- Preparation of the prototype vehicle
- Design and realization of a dedicated fuelling station
- Road tests.

The optimal hydromethane blend composition has been identified in 15% Hydrogen and 85% methane in volume. One methane fuelled bus vehicle has been converted to hydromethane with a dedicated fuelling station in Ravenna, and it has run for more than 45.000 km on public roads.

The objectives of the project have been to use this vehicle as leverage to start a virtuous circle towards a widespread use of hydromethane by regional public transport utilities. Moreover, Mhybus has provided data for air quality and climate change policy measurements in Emilia-Romagna, and increased the citizens' awareness to air quality topics by exploiting the demonstrative potential of the prototype vehicle.



Mhybus Team

One of the solutions to increase the sustainability of public urban transport is the use of alternative fuels, among which hydromethane. The Mhybus project has obtained data to demonstrate the technical feasibility and the real environmental benefits of a blend consisting of 15% hydrogen and 85% methane in a methane fuelled engine of a urban public transport bus.

The application of the hydromethane blend is appealing because experimental results prove the following:

- Engine's performances with respect to the natural gas configuration are maintained;
- CO₂ emissions, net from hydrogen production emissions, are reduced;
- Air quality standards for air pollutants are respected;
- Operational costs lower than the cost-benefits analysis.

The bench tests performed within the Mhybus project have indicated that the engine's performances have not been hindered by the use of hydro-

methane in comparison with methane. This has been obtained with the only adjustment of the settings of the engine's electronic control unit.

The comparison of data obtained during road tests have indicated that the vehicle was fully operational in public transport service without technical difficulties or reduced performances. In particular, values of power and copy were found to comply with those expected.

Considering the records of the MHYBUS PROTOTYPE BUS obtained thanks to the LIFE+ programme, the use of hydromethane determines a 13% saving on fuel consumption and 15% reduction of CO₂ emissions with respect to a methane fuelled engine.


Thanks to this empirical evidence and the positive results an extension of the experimentation to a bigger bus fleet is feasible with positive environmental benefit and no technical/administrative barriers. In addition the saving on fuel consumption and limited additional estimated cost for the conversion makes this technology attractive.

In fact based on MHYBUS data, the additional cost for the converted bus €/km is equal or only slightly higher than the cost of natural gas fed vehicles (additional 800-1000 €/vehicle per year¹ for 45.000 km). Moreover, it is clear how this difference in cost is very limited compared to other technologies which are available to reduce CO₂ emissions from the transport sector. In fact, considering the costs of each avoided ton of CO₂ emission, hydromethane costs 4000 €/ton CO₂.

Mhybus project overpassed all the technical and administrative obstacles to the conversion of the natural gas fuelled bus into hydro-methane one. This demonstrative work developed from 2009 to 2013 opens the door to other public transport companies willing to adopt the technology and to the future application of the hydromethane for public transport.

The work has focused mainly on the conversion of bus and the refueling operation using the hydrogen production technology available in the experimental site. A following demonstrative project could be developed focusing on emerging technologies for hydrogen production with nearly zero emission.

1 Considering on average 45.000 Km per year

The image features a minimalist, abstract design. At the top, a thin grey line curves across the page. Below this, a solid dark grey horizontal band contains the title text in a bold, light green font. The bottom half of the page is white, with several thin grey lines and circles of varying sizes scattered across it, creating a sense of movement and depth. One large circle is positioned in the lower-left, with a smaller one overlapping its top-right edge. Another circle is to the right, and a fourth, even smaller one is further to the right and higher up. A thin line extends from the top of the page down to the top of the largest circle, and another line extends from the right side of the page towards the middle circle.

**Linee guida tecniche per la conversione
di autobus per il trasporto pubblico
da metano ad idrometano**



1.

INTRODUZIONE

L'aumento della sostenibilità del trasporto pubblico necessita di interventi atti a ridurre l'impatto ambientale in termini di emissioni di CO₂ e di inquinanti atmosferici. Una delle vie verso questi obiettivi è la transizione verso la "hydrogen economy". Nel settore del trasporto stradale le iniziative per l'utilizzo dell'idrogeno come sostitutivo dei combustibili fossili mostra un interesse in via di accrescimento ma che sconta le difficoltà di decollo della tecnologia delle fuel-cell (FC) per applicazioni veicolari. In attesa di una crescita in affidabilità tecnologica e di una diminuzione dei costi della tecnologia FC, l'opportunità di utilizzo dell'idrogeno si propone tramite l'adozione delle miscele di metano ed idrogeno. Le caratteristiche delle miscele metano e idrogeno sono tali da facilitare quel salto verso l'impiego di idrogeno in tempi brevi e a costi di investimento contenuti. L'idrometano può rappresentare un carburante di transizione che consente, con investimenti ridotti in termini di adattamento dei veicoli, di ottenere significativi benefici ambientali.

Il progetto LIFE+ Mhybus

Il progetto Mhybus ha svolto tutti i necessari passi tecnici, amministrativi ed approfondimenti per progettare e far circolare su strada un veicolo per il trasporto pubblico urbano alimentato ad idrometano. Il progetto è cofinanziato dal Programma Europeo LIFE+ ed è stato implementato in Emilia-Romagna.

Le fasi di lavoro che hanno portato alla circolazione su strada del veicolo sono state:

- Le prove a banco per l'ottimizzazione del motore
- La preparazione del veicolo prototipo
- La realizzazione di una stazione di rifornimento dedicata
- L'esecuzione dei test su strada.

La composizione ottimale dell'idrometano per autobus del trasporto pubblico è stata identificata nel 15% di idrogeno e 85% di metano in volume. Un autobus per il trasporto pubblico è stato convertito ad idrometano e, supportato da una stazione di rifornimento dedicata, ha circolato su strada a Ravenna per oltre 45.000 km svolgendo servizio su regolare linea pubblica.

Gli obiettivi del progetto sono stati quelli di utilizzare questo veicolo come innesco di un circolo virtuoso per l'estensione della sperimentazione ad altre flotte regionali. Inoltre, Mhybus ha fornito dati precisi per misure strategiche a livello regionale rispetto alle tematiche di qualità dell'aria e cambiamenti climatici, ed ha sensibilizzato la cittadinanza rispetto a queste tematiche grazie al potenziale dimostrativo del veicolo.

Mhybus in cifre

1 autobus convertito ad idrometano

1 stazione di rifornimento idrometano realizzata

45.898 km percorsi su strada

Oltre **10.000** passeggeri trasportati

5,98 tonnellate di CO₂ di emissioni evitate in atmosfera

12,6 tonnellate di idrometano prodotte

1,8 tonnellate di metano risparmiate

15 eventi di networking dedicati di interesse nazionale e internazionale

33 articoli, pubblicazioni scientifiche, video ed interviste

37 presentazioni ad eventi del settore e partecipazione ad eventi divulgativi

12 eventi specifici organizzati

62 esperti tecnici e professionisti partecipanti alla Community Idrometano

Normativa di riferimento

La normativa rilevante per l'omologazione degli autoveicoli che utilizzano carburanti alternativi è disciplinata dalle normative ONU e CE. In particolare:

1. Il recente Reg. 630/2012/CE con prescrizioni relative all'omologazione dei veicoli a motore alimentati a idrogeno e a miscele di idrogeno e gas naturale riferito alle emissioni e l'inclusione di informazioni specifiche sui veicoli muniti di un motopropulsore elettrico nella scheda informativa ai fini dell'omologazione CE.
2. Reg. 406/2009/CE recante disposizioni di applicazione del regolamento 79/2009/CE relativo all'omologazione di veicoli a motore alimentati a idrogeno indica quali requisiti sono necessari per il veicolo ed i suoi componenti per il conseguimento dell'omologazione. Il regolamento europeo tuttavia non specifica se i veicoli ad idrometano debbano essere equiparati, ai fini omologativi, ai veicoli ad idrogeno puro.
3. Reg. ECE/ONU n.110 relativo all'omologazione di componenti e veicoli alimentati a gas naturale.
4. Reg. ECE/ONU n.115, che ha armonizzato le procedure di omologazione dei sistemi di alimentazione a gas naturale.

2.

ASPETTI TECNICI

2.1 IDROMETANO: DEFINIZIONE DELLA MISCELA OTTIMALE

Lo smagrimiento eccessivo della carica nei motori lean burn è ostacolato dalla insorgenza di fenomeni di instabilità della combustione e di mancate accensioni comportanti un aumento delle emissioni di HC e un calo del rendimento e della potenza erogata. Le caratteristiche fisiche del gas naturale, composto in larga parte da metano, sono ideali per l'utilizzo insieme all'idrogeno che sarebbe in grado di migliorare le caratteristiche di combustione nei motori a miscela magra.

La velocità di combustione dell'idrogeno risulta essere sino a 10 volte più grande rispetto al metano e quindi la combustione si dimostra più rapida.

Questa rapidità può consentire una riduzione del contenuto di combustibile nella formulazione della miscela all'interno del cilindro essendo in grado di mantenere una buona diffusione della fiamma nella miscela aria-combustibile. L'energia necessaria per l'accensione è anche notevolmente minore e quindi più facilmente innescabile la miscela aria-combustibile anche in condizioni di smagrimiento elevato. Tuttavia la minore densità dell'idrogeno riduce il contenuto energetico in volume ad $1/3$ di quello del metano.

Le superiori caratteristiche di combustione presentate dall'idrogeno hanno condotto alla sperimentazione di miscele di metano ed idrogeno in modo da poter sfruttare i vantaggi del metano insieme alle interessanti caratteristiche di combustione dell'idrogeno. Da qualche anno gli studi sull'utilizzo dell'idrogeno in formulazione miscelata con il metano hanno indicato la possibilità di sviluppi interessanti per il trasporto stradale ed hanno condotto alla commercializzazione di un combustibile denominato Hythane® (marchio registrato Hydrogen Components Inc. USA) la cui composizione tipica prevede la presenza di un 20% in volume di idrogeno.

Le possibilità di utilizzo di miscele idrogenate (di seguito denominate idrometano) trova sostegno sotto diversi aspetti:

- opportunità di utilizzo in motori a gas senza alcuna modifica dei parametri motoristici (a bassi tenori di idrogeno in miscela);
- riduzione delle emissioni di inquinanti (soprattutto NOx) utilizzando lo smagrimento della miscela e/o la regolazione dell'anticipo di accensione;
- miglioramento dell'efficienza di combustione con conseguente riduzione dei consumi energetici;
- riduzione dell'emissione dei gas serra (CO₂) sia per la minore presenza di carbonio nel combustibile che per la migliorata combustione;
- sfruttamento della rete di rifornimento con modifiche non complesse.

Le esperienze condotte hanno mostrato i vantaggi ricavabili dall'introduzione dell'idrogeno in miscelazione con il metano per l'alimentazione dei motori. Possiamo indicare che:

- la riduzione delle emissioni e il contenimento dei consumi energetici può essere conseguito con una rimodulazione delle condizioni di mappa del motore;
- in particolare occorre ridurre l'anticipo di accensione e aumentare lo smagrimento della miscela aria/combustibile;
- le perdite di potenza possono essere recuperate con la regolazione della sovralimentazione se presente;
- occorre rispettare la condizione di lavoro del motore se appositamente progettato per lavorare in condizioni stechiometriche in quanto la configurazione della camera e del pistone non garantiscono buone prestazioni in condizioni magre;

- l'aumento della turbolenza in aspirazione migliora le condizioni di lavoro della miscela di idrometano;
- l'aumento del quantitativo di idrogeno a piccole percentuali apporta piccoli benefici ma non richiede operazioni di rimappatura;
- al crescere del quantitativo di idrogeno non si ha un parallelo aumento del rendimento del motore in quanto possono aumentare le perdite per calore;
- l'incremento del rendimento energetico del motore non aumenta linearmente con il contenuto di idrogeno ma assume un andamento quasi stabile al variare del tenore di idrogeno dal 15% in volume;
- le emissioni di NO_x crescono sensibilmente al crescere del contenuto di idrogeno ed occorre intervenire pesantemente sullo smagrimiento per compensare questo aumento;
- una miscela molto magra può tuttavia ridurre la potenza disponibile e modificare visibilmente le caratteristiche del motore;
- la produzione di idrogeno se attuata da fonti rinnovabili non introduce emissione addizionale di CO₂;
- se l'idrogeno viene prodotto da fonti fossili la riduzione di emissione di CO₂ risente dell'aumento addizionale di emissione nella fase di produzione di idrogeno, con conseguente riduzione dei benefici offerti dall'utilizzo dell'idrogeno;
- la produzione di idrogeno aggiunge un costo addizionale in termini energetici e questo abbatte le riduzioni dei consumi energetici che saranno tanto più marcate quanto maggiore è il quantitativo di idrogeno utilizzato.

Il costo per la produzione dell'idrogeno potrebbe superare il vantaggio economico derivato dal risparmio energetico e non essere più competitiva in termini economici la spesa sostenuta.

Per quanto evidenziato l'utilizzo di miscele ad alti tenori di idrogeno non appare conveniente nella fase di sostituzione del gas naturale con le miscele in modo da garantire la piena operabilità del motore, la possibilità di eseguire con successo regolazioni ottimali, essere certi di ridurre le emissioni, poter ricavare il massimo del risparmio energetico al netto del consumo energetico per la produzione dell'idrogeno, non aggravare la spesa per il combustibile. Il tenore di miscela che appare ottimale dalle rilevanze sperimentali risulta essere il 15% in volume. Tale composizione: 15% di idrogeno e 85% di metano è quella utilizzata nella sperimentazione Mhybus.

2.2 ADATTAMENTI NECESSARI PER L'UTILIZZO CON IDROMETANO

Ottimizzazione dei parametri di combustione

L'utilizzo ottimale delle miscele di metano-idrogeno nei motori ad accensione comandata richiede una preliminare messa a punto del motore per ottimizzare le prestazioni mantenendo le emissioni entro i limiti normativi. In particolare, l'introduzione dell'idrogeno incrementa le emissioni di NOx in relazione alla maggiore temperatura di combustione sviluppata. La messa a punto del motore può consistere nella ottimizzazione dell' anticipo di accensione ed eventualmente nella variazione del coefficiente lambda. Questo coefficiente regola il rapporto tra aria e combustibile effettivo rispetto a quello stechiometrico. Nel progetto Mhybus la miscela idrometano utilizzata si basa su una percentuale di idrogeno del 15% in volume ed 85% di gas naturale.

L'autobus utilizzato nella sperimentazione del progetto Mhybus è dotato di motore ad accensione comandata heavy duty lean burn DAIMLER CHRYSLER - MERCEDES M 906 LAG EEV, potenza massima 170 kW (231 CV) a 2.200 giri/min e coppia massima 808 Nm (82 Kgm) a 1.400 giri/min.

Il veicolo prototipo

Veicolo

VivaCity BredaMenarinibus 7,90 m

Motorizzazione

DAIMLER CHRYSLER - MERCEDES M 906 LAG

Classe emissiva

EEV

Potenza massima

170 kW (231 CV) a 2.200 giri/min

Coppia massima

808 Nm (82 Kgm) a 1.400 giri/min

Numero di passeggeri totali

61, di cui 11 seduti, 49 in piedi, 1 di servizio.

L'ottimizzazione dei parametri di combustione del motore è stata svolta in condizioni stazionarie presso ENEA Casaccia e in condizioni dinamiche presso l'Istituto Motori del CNR di Napoli. Per ottenere parametri di riferimento, sia nel test statico che in quello dinamico è stato inizialmente caratterizzato il motore alimentato a metano con la relativa centralina di controllo BredaMenariniBus. Da tale caratterizzazione le emissioni di NOx sono risultate vicine ai limiti emissivi anche con alimentazione a solo metano.

Sono state testate diverse combinazioni di riduzione dell'anticipo e di coefficiente lambda. I risultati delle varie combinazioni testate sono mostrati in Tabella 1. La combinazione più soddisfacente in condizioni statiche è stata quella di introdurre un ritardo dell'anticipo di 5° e un aumento del coefficiente lambda di 0.05.

	Fuel consumption	Energy consumption	CO ₂ emission	NOx emission	THC emission
	g/kWh	MJ/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
	Δ%	Δ%	Δ%	Δ%	Δ%
Metano	0	0	0.0	0	0
3°BMC+2°AC	-5.2	-3.5	-4.5	226.9	21.5
4°	-4.3	-2.6	-4.5	170.0	26.3
5°	-6.7	-5.0	-6.2	131.5	17.6
5°+0.05λ	-4.6	-2.9	-5.2	2.6	49.9
5°+0.02λ	-2.3	-0.6	-3.6	6.2	45.2
3.5°+0.02λ	-3.4	-1.7	-4.9	14.1	68.5

Tabella 1 - Risultati dei test per ottimizzare i parametri di combustione in condizioni statiche - test ETS (Mhybus Deliverable 1.1 A)

Nella fase di ottimizzazione in condizioni dinamiche, per non innalzare eccessivamente le emissioni di HC è stato deciso di mantenere un ritardo dell'anticipo di 5° ma di non smagrire la miscela variando il coefficiente lambda. Poiché in condizioni dinamiche è stato riscontrato un aumento delle emissioni di NOx rispetto alle prove statiche, è stato ulteriormente ritardato l'anticipo sino ad un valore di 8.5°.

I risultati del test ETC in condizioni dinamiche con metano e idrometano sono mostrati in Tabella 2.

	CO	NMHC	CH4	NOx	PT	CO ₂	BSFC
	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
ECU Breda Menarinibus	0.01	0.15	3.04	1.44	<0.001	703	265
ECU HCNG	0.00	0.00	2.47	1.41	<0.001	649	244
EEV	3.00	0.40	0.65	2.00	0.02		

Tabella 2 - Risultati del test ETC con motore alimentato a metano e centralina originaria (ECU Breda Menarini Bus) e con motore alimentato ad idrometano e centralina modificata (ECU HCNG).

Fonte: Iannaccone, 2012.

Con i parametri definitivi per l'ottimizzazione della combustione, le emissioni di CO sono significativamente inferiori ai limiti normativi, mentre gli NOx sono nei limiti e praticamente coincidenti con quelli ottenuti con alimentazione a metano. Gli idrocarburi incombusti, principalmente costituiti da CH₄, superano tuttavia i limiti per entrambi i combustibili, anche se con la miscela idrometano i valori si abbassano. Il particolato emesso è risultato oltre un ordine di grandezza inferiore ai limiti EEV.

Anche con la miscela di idrometano, i valori massimi di potenza e coppia del motore previsti con alimentazione a metano (170 Kw a 2200 giri/minuto) sono stati utilmente raggiunti. I test sono descritti in dettaglio nel rapporto dell'Istituto Motori di Napoli (Iannaccone, 2012).

Preparazione del veicolo prototipo

Successivamente alle prove a banco, si è provveduto alla vera e propria preparazione del veicolo. Il veicolo utilizzato nel progetto MhyBus è un BredaMenariniBus M231/GV Vivacity CNG con motorizzazione Mercedes descritta precedentemente.

Il motore originale è stato smontato e sostituito con quello testato sul banco motore ottimizzato per il funzionamento con la miscela idrometano.

L'impianto è stato munito di uno sfiato aggiuntivo di sicurezza al tetto dal riduttore di pressione, ed è stato chiuso e piombato il rubinetto di alimentazione combustibile del preriscaldatore in quanto complessivo da non sottoporre a test con miscela idrogeno-metano.

Ai fini della sperimentazione, si è provveduto ad installare sull'autobus un sistema di monitoraggio in continuo delle prestazioni meccaniche. Inoltre al fine di verificare l'eventuale decadimento delle prestazioni ambientali sono state eseguite campagne di rilevazioni delle emissioni con appositi strumenti collocati a bordo durante questi test specifici.

Dopo la sostituzione del motore è stata eseguita una prova di tenuta dell'impianto combustibile con Azoto a 300 bar mantenendolo a tale pressione per 12 h, ed un controllo dei dispositivi di sicurezza.

Verifica della compatibilità dei materiali con l'idrogeno

Il regolamento europeo 406/2010/CE stabilisce che tutti i componenti del veicolo a contatto con l'idrogeno siano soggetti a prove di compatibilità con l'idrogeno in modo da indicare la possibilità di infragilimento del componente. L'infragilimento è un fenomeno che nel tempo può generare su alcuni metalli una riduzione delle caratteristiche meccaniche con determinazione di fessurazioni o rotture che possono essere potenzialmente fonte di perdite di combustibile. L'infragilimento è un fenomeno tipico dei soli metalli, mentre sui materiali plastici a contatto con l'idrogeno si può determinare deterioramento per permeabilità o porosità. A tale riguardo è indicato l'impiego di plastiche a fibra rinforzata (FRP) per valvole e elementi di tenuta.

Le prove di compatibilità devono essere eseguite per i vari materiali metallici ad eccezione di:

1. leghe di alluminio conformi ai paragrafi 6.1 e 6.2 della ISO 7866;
2. acciai conformi ai paragrafi 6.3 e 7.22 della ISO 9809-1.

In ultima sintesi, nella selezione dei materiali si deve tener conto sia della compatibilità all'impiego dell'idrogeno che delle condizioni di esercizio a cui saranno esposti. Le considerazioni sui materiali in un sistema idrogeno coinvolgeranno sia materiali metallici che non metallici (quali i polimeri ed i composti). I principali fattori da prendere in considerazione nella selezione dei materiale includono: effetti di temperatura, infragilimento da idrogeno, hydrogen attack, permeabilità, porosità e compatibilità dei metalli dissimili se usati insieme.

E' stata svolta una rassegna dei componenti dell'impianto che sono a contatto con l'idrogeno ed una successiva analisi dei materiali ci cui sono costituiti i vari componenti. Dall'indagine è risultato che la componentistica montata sull'impianto di alimentazione è certificata secondo il Reg. ECE/ONU n.110 rispetto al metano, quindi i componenti, la sensoristica, le tubazioni e i fittings sono certificati come compatibili con il funzionamento a gas naturale nelle condizioni di esercizio (temperature e pressioni). L'acciaio inossidabile austenitico AISI 316 è compatibile all'utilizzo con idrogeno, come anche i raccordi di tipo Swagelok. I prodotti con

resine di PTFE caratterizzate da alti carichi di rottura e rivestiti con treccia in acciaio inox AISI 316 ad alta tenacità sono adatti al trasporto gas per alte temperature e pressioni, poiché possono tollerare un'alta gamma di temperature (da -73°C a +260°C) e sono compatibili con l'idrogeno. La particolare struttura del PTFE assicura al tubo buoni valori di permeabilità ed una elevata resistenza alle sollecitazioni meccaniche.

Dall'inventario dei componenti del circuito di alimentazione (Mhybus Deliverable 1.B) è emerso che la membrana del riduttore di pressione presente nel circuito a valle del riduttore necessita approfondimenti poiché non se ne conosce nello specifico la composizione. In prima istanza, per motivi precauzionali, nel Tavolo Tecnico era stato stabilito di sostituire periodicamente la membrana del riduttore di pressione. Tuttavia esaminando i risultati sperimentali nel tavolo tecnico dei primi 15.000 km percorsi (riunione 10/06/2013 c/o CPA Bologna) non sono emerse criticità che facessero pensare all'esigenza di sostituirla, per cui è stato deciso di verificarne lo stato al termine dell'esercizio sperimentale.

Per verificare la compatibilità dei materiali alla miscela idrometano sono stati testati i seguenti componenti dell'impianto di alimentazione:

- valvola Swagelock SSCHS 12MM
- tubazioni flessibili Swagelock SSTC8TM12
- tubazioni rigide SP.1.5 MM.

Questi componenti sono stati analizzati al raggiungimento dei 45.000 km percorsi con idrometano presso un laboratorio specializzato (Omeco, Monza). I componenti sono stati sottoposti a prove comparative con componenti identici non eserciti. Le prove di tenuta e di scoppio sono state eseguite per verificare il rispetto della norma Reg. UNECE 110 riguardante l'omologazione di componenti specifici di motori che utilizzano alimentati a gas naturale.

Individuazione del rischio e procedure di sicurezza

La miscela idrometano a bordo del veicolo viene immagazzinata a 200 bar nei serbatoi posti sul tetto del bus a temperatura ambiente. Dallo studio sul comportamento e sulla pericolosità della miscela idrometano alle condizioni di utilizzo nel bus, svolte dall'Università di Pisa (Carcassi, 2011), è emerso innanzitutto che le dimensioni delle bombole ed il tempo di stazionamento della miscela non ne influenzano la miscibilità.

Dallo stesso studio, è emerso che la pericolosità della miscela e le procedure di sicurezza da adottare sono identiche a quelle da utilizzare per il solo metano. Le caratteristiche relative alla combustione della miscela idrometano, pur differenti rispetto a quelle dei singoli gas, sono più prossime a quelle del metano: limiti di infiammabilità, energia di ignizione, temperatura di autoaccensione, indice di deflagrazione, velocità di bruciamento, etc. Analogamente, le fenomenologie susseguenti a rilasci di miscele di idrogeno e metano, ovvero i fenomeni di esplosione e jet-fire, sono, in termini di effetti essenzialmente simili a quelli del solo metano.

Si identificano inoltre come buone precauzioni a maggiore garanzia di sicurezza quelle di:

- chiudere la testa delle bombole quando non in uso
- spiazzare i volumi dove le perdite potrebbero accumularsi con aria compressa prima di ogni operazione.

2.3 PROCEDURE AUTORIZZATIVE

Il prototipo di veicolo è stato ammesso alla circolazione in esercizio sperimentale in unico esemplare dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT), Direzione Generale per la Motorizzazione con una serie di prescrizioni specifiche (MIT, 2010):

- con una percorrenza minima di 45000 km e per un periodo di due anni
- con particolare cautela nelle valutazioni di compatibilità dei componenti dell'impianto in relazione all'infragilimento
- considerando l'opportunità di prevedere eventuali sensori per la segnalazione di fuoriuscite di gas in ambienti confinati
- prevedere la presenza di dispositivi sensibili alla pressione all'interno delle bombole, tali da poter intervenire, in parallelo con i termo fusibili, per rendere più efficace lo svuotamento delle bombole in caso di incendio
- non eccedere la pressione di esercizio di 200 bar
- verificare i dispositivi di sicurezza a bordo del veicolo dopo i primi 5000 Km percorsi con zavorra
- monitorare durante l'esercizio sperimentale i parametri di esercizio, quali pressioni, le temperature, etc.



Installazione degli strumenti di misura delle emissioni gassose

Sulla base delle prescrizioni del MIT, il Centro Prove Autoveicoli ha predisposto un piano sperimentale che prevede una serie di verifiche suddivise in tre fasi: previa immissione alla circolazione, nel corso dell'esercizio sperimentale, e finali (Mhybus Deliverable 2.2).

Le prescrizioni previa immissione alla circolazione consistono nella verifica:

- dell'allestimento e delle prescrizioni costruttive nel rispetto delle indicazioni del MIT
- a banco delle prestazioni del motore alimentato a metano ed alimentato ad idrometano
- della compatibilità dei componenti all'utilizzo con idrogeno
- della presenza e funzionalità dei dispositivi di sicurezza
- di tenuta di pressione dell'intero impianto idrometano
- della predisposizione di un adeguato programma di formazione del personale
- della predisposizione di un manuale di sicurezza
- delle masse e della distribuzione dei posti.

Le verifiche in corso di esercizio sperimentale sono descritte nel paragrafo seguente con maggiore dettaglio.

Le verifiche conclusive previste sono le seguenti:

- assenza di modificazioni dell'allestimento non in conformità alla documentazione presentata
- verifica della potenza e delle emissioni inquinanti al banco motore
- prova di tenuta dell'intero circuito idrometano per le pressioni di esercizio definite
- verifica del corretto funzionamento dei dispositivi di sicurezza/allarme
- prove specifiche sui singoli componenti se necessario.

2.4 ESERCIZIO SPERIMENTALE

Il Centro Prove Autoveicoli di Bologna ha prescritto durante l'esercizio sperimentale le seguenti attività (Mhybus Deliverable 2.2):

1. definizione percorsi di prova (Figura 1), della lunghezza media di 20 Km, lungo una regolare linea urbana.
 - predisposizione di un manuale di sicurezza ed attività di formazione del personale
 - rilievo emissioni con strumenti di misura installati a bordo del bus
 - rilievo on-line delle prestazioni del motore
2. monitoraggio giornaliero servizio e compilazione Giornale di Bordo (percorrenza chilometrica, e parametri di esercizio)
 - rapporto trimestrale a CPA
 - verifiche dopo primi 5.000 Km
 - verifiche ogni 15.000 km durante 45.000 km per:
 - tenuta impianto sottoposto a una pressione di 300 bar
 - usura del motore tramite indagine endoscopica
 - corretto funzionamento dispositivi di sicurezza
 - monitoraggio emissioni inquinanti
 - rilievo on-line delle prestazioni del motore.

Tali verifiche vengono eseguite in un circuito di prova della lunghezza di 5 km senza passeggeri a bordo (Figura 2). I risultati delle verifiche ogni 15.000 km vengono discussi con il CPA in un apposito tavolo tecnico.

3.

PRODUZIONE E DISTRIBUZIONE DELLA MISCELA IDROMETANO

3.1 PRODUZIONE DI IDROGENO

La produzione di idrogeno può partire da una fonte primaria fossile oppure rinnovabile, attraverso i processi descritti in Figura 3.

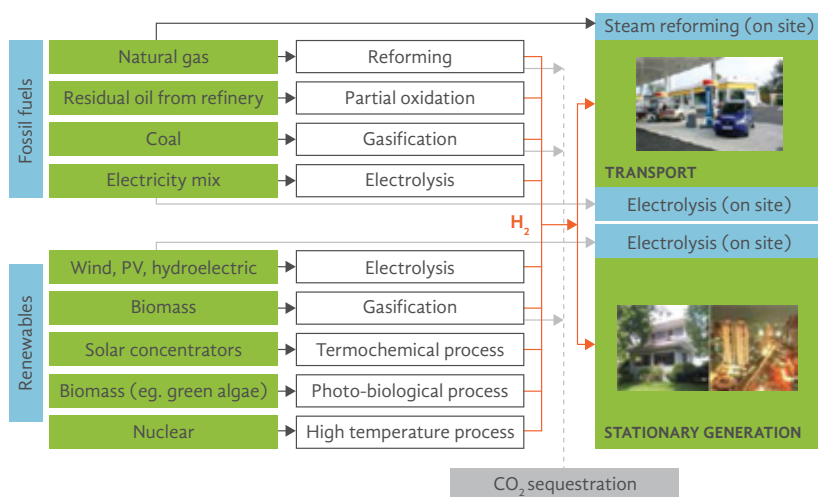


Figura 3 - Schema riassuntivo delle principali tecnologie di produzione dell'idrogeno (MhyBus Deliverable 1.2, ENEA, 2010).

La produzione di idrogeno da fonti fossili (idrocarburi) ad oggi copre circa il 95 % del totale. La produzione dagli idrocarburi sfrutta principalmente il gas naturale quale fonte primaria utilizzando il processo di “steam reforming” catalizzato. Lo steam reforming consiste in una reazione che avviene ad alta temperatura e separa il gas naturale in anidride carbonica ed idrogeno. L'efficienza energetica dello steam reforming da gas naturale è del 76 % per impianti di grande taglia con una emissione di CO₂ eq pari a 72.4 g CO₂ eq/ H₂. L'idrogeno può venire prodotto dal carbone per gassificazione, anche se con minore efficienza (55%).

L'elettrolisi è il procedimento che produce idrogeno per scomposizione della molecola d'acqua nei suoi componenti elementari sfruttando l'energia elettrica. Poiché il processo necessita di un'immissione di energia elettrica, è più costoso rispetto alla produzione di idrogeno da idrocarburi. L'energia elettrica necessaria può a sua volta derivare da fonti fossili o rinnovabili. Diverse sono le tecnologie disponibili per l'elettrolisi, che si differenziano principalmente per il tipo di catalizzatore utilizzato (Mhybus Deliverable 1.2, ENEA, 2010). Il rendimento della produzione di idrogeno per via elettrolitica oscilla tra il 60% e l'80%, le emissioni di CO₂ vengono azzerate.

Tuttavia, la produzione di idrogeno per via elettrolitica utilizzando energia elettrica da fonti convenzionali comporta emissioni di CO₂ più elevate rispetto alla produzione di idrogeno da gas naturale (JRC, 2011).

La produzione di idrogeno a partire da fonti primarie rinnovabili sfrutta biomasse provenienti da rifiuti o reflui urbani, agricoli o industriali. I processi di produzione a partire dalle biomasse sono di tipo biologico, ovvero per digestione anaerobica, oppure processi di tipo termochimico. La digestione anaerobica per la produzione di idrogeno tuttavia non appare ad oggi commercialmente validata, ed allo stesso tempo la produzione di idrogeno per via termochimica, sebbene promettente dal punto di vista ambientale, è ancora ad uno stadio sperimentale (Mhybus Deliverable 1.2, ENEA, 2010).

Per quanto riguarda il tipo di rete di produzione, la produzione può essere centralizzata oppure decentralizzata presso i centri di utilizzo.

3.2 MISCELAZIONE E DISTRIBUZIONE DI IDROMETANO

Nel progetto Mhybus, la stazione di rifornimento di idrometano è stata progettata e realizzata all'interno dell'impianto SOL S.p.A. di Ravenna (Figura 4) dove l'idrogeno viene prodotto per steam reforming dal

metano. La stazione di rifornimento, descritta in dettaglio nel Deliverable MhyBus 2_d, 2012, è composta dalle seguenti unità:

- linea di distribuzione del metano
- stock di idrogeno in bombole per un volume totale di 800 l WC
- unità di miscelazione idrogeno/metano: la miscelazione avviene ad una pressione di 12 bar e l'unità di miscelazione è munita di uno strumento che monitora la composizione della miscela (Figura 4)
- unità di compressione della miscela: la miscela viene compressa a 200 bar attraverso compressori idraulici
- unità di stoccaggio della miscela: la miscela viene stoccata in bombole per un volume totale di 2400 l WC
- connettore per il rifornimento
- sistema di alimentazione elettrica e pannello di controllo, comprendente il pannello di controllo dell'unità di miscelazione e di quella di compressione.



Figura 4 - Schema di flusso della stazione di rifornimento idrometano

Tutte le linee di distribuzione sono munite di valvole di sicurezza. La stazione può operare in due modalità: in modalità rifornimento (Figura 5) ed in modalità ripristino. Il rifornimento, eseguito da personale adeguatamente formato, avviene in due fasi: una prima fase in cui il compressore riempie il serbatoio per trasferimento di gas dall'unità di stoccaggio ad alta pressione, ed una seconda fase in cui viene riempito il compressore fino alla pressione desiderata.

Per la costruzione della stazione è stata inoltre compilata una specifica scheda di sicurezza dell'idrometano contenente tutte le indicazioni circa la pericolosità della miscela. E' stata inoltre richiesta ed ottenuta l'autorizzazione al Comando Competente dei Vigili del Fuoco per l'intera infrastruttura sia in fase progettuale che una volta completata la costruzione.



Figura 5 - L'autobus nella stazione di rifornimento idrometano e dettaglio del rifornimento presso SOL SpA.

4.

RISULTATI OTTENUTI

4.1 ESERCIZIO SPERIMENTALE

All'inizio dei primi 5000 km percorsi con zavorra, sono state effettuate con esito positivo le misure iniziali delle emissioni e dei consumi prescritte dal CPA, mediante strumenti ENEA installati a bordo del veicolo. Lo scopo di dette misure era di costituire un benchmark per verificare eventuali scostamenti nel corso della successiva sperimentazione su strada. Durante la circolazione sperimentale di 5.000 km senza passeggeri a bordo eseguita nel periodo dal 16/10/2012 al 23/11/2012 non sono stati rilevati inconvenienti al motore, all'impianto di alimentazione e ai dispositivi di sicurezza riconducibili all'uso della miscela idrometano. Al termine dei 5mila km sono state ripetute le misure di cui sopra senza riscontrare scostamenti rispetto ai dati inizialmente rilevati.

La circolazione sperimentale con passeggeri a bordo ha avuto inizio il 19/01/2013 ed è proseguita sino all'8/09/2013 lungo la linea 8 del regolare servizio START Romagna, svolto nel centro urbano di Ravenna. I dati relativi alla percorrenza ed ai consumi sono stati regolarmente raccolti in una scheda apposita denominata giornale di bordo (Figura 6). In totale il veicolo ha percorso 45898 km, in media durante il servizio ha percorso 212 km giornalieri trasportando complessivamente circa 10.000 passeggeri.

SETTORE OPERATIVO			PERFORMANZA								CONSUMO			ANOMALIE O INTERVENTI PROGRAMMATI				
Data servizio	Km iniziale	Km finale	Km percorso	Velocità media	Velocità minima	Velocità massima	Km al litro	Costo litro	Costo km	Consumo Litri/100 Km	Consumo Litri/kWh	Consumo Litri/kWh	Consumo Litri/kWh	Consumo Litri/kWh	Consumo Litri/kWh	Consumo Litri/kWh	Consumo Litri/kWh	Consumo Litri/kWh
02/04/2012	20000	20072	2000	60	15	82,3	10,4	23999	232	66,6	0,20	68,47	68,47	0,20				
02/04/2012	20072	22000	2000	45	14	69,4	22952	224	65,9	0,19	69,39	69,67	0,20					
02/04/2012	22000	22900	2000	127	100	170	44,68	22896	79	65,70	0,29	25,50	27,74	0,30	Study test drive			
02/04/2012	22900	23600	2300	45	18	67,7	68,76	23667	208	65,6	0,18	61,44	66,90	0,18				
02/04/2012	23600	22900	250	59	104	57,4	105,6	22929	239	65,6	0,18	67,36	66,70	0,20			24 cent. operazione	
02/04/2012	22900	23970	2200	60	18	67,3	105,7	23959	247	65,70	0,19	67,26	67,80	0,20				
02/04/2012			0						0									
02/04/2012	23970	22960	2290	64	105	57,5	105,6	22970	271	65,60	0,19	64,80	63,27	0,20			Mantenzione	
02/04/2012			0						0									
02/04/2012	22960	23000	34	55	105	57,5	105,6	22999	224	65,60	0,19	69,90	70,42	0,20				
02/04/2012	23000	23030	234	48	105	57,5	105,6	23047	204	65,70	0,19	63,66	63,85	0,20			26 cent. operazione	
02/04/2012	23030	23999	666	65	105	57,3	107,7	23979	198	65,8	0,19	62,90	63,80	0,20				
02/04/2012			0						0									
02/04/2012	23999	23000	201	59	104	57,4	107,4	23008	259	65,7	0,19	79,82	76,27	0,20				
02/04/2012	23000	23000	222	43	105	57,4	105,6	23004	237	65,60	0,18	77,60	77,60	0,20				
02/04/2012	23000	23600	224	47	105	57,5	105,6	23677	232	65,6	0,18	74,62	74,68	0,20				
02/04/2012	23600	23900	222	40	106	57,4	106,4	23899	226	65,50	0,18	74,00	74,27	0,20			26 cent. operazione	
02/04/2012	23900	23970	2367	51	104	57,4	107,4	23962	248	65,70	0,19	71,00	73,00	0,20				
02/04/2012	23970	23970	0	23	105	57,5	106,8	23976	237	65,50	0,18	80,60	79,36	0,20				
02/04/2012	23970	23200	246	42	105	57,4	105,6	23200	234	65,50	0,18	77,60	77,60	0,20				
02/04/2012	23200	23200	0	27	105	57,5	106,8	23209	229	65,50	0,18	80,60	80,60	0,20				
02/04/2012	23200	232670	226	42	105	57,5	105,6	23265	230	65,50	0,18	66,60	66,60	0,20				
02/04/2012	232670	23290	241	43	102	57,3	106,7	23276	221	65,6	0,18	71,82	74,00	0,20			27 cent. operazione	
02/04/2012	23290	23296	217	41	104	57,4	107,4	23292	246	65,50	0,18	77,60	77,60	0,20				
02/04/2012	23296	23330	226	43	102	57,3	106,8	23338	234	65,6	0,18	76,50	77,24	0,20				
02/04/2012	23330	23390	236	40	104	57,4	106,4	23390	230	65,70	0,19	74,64	72,60	0,20				
02/04/2012	23390	23392	236	46	105	57,4	106,8	23394	247	65,65	0,18	70,90	70,83	0,20				
02/04/2012	23392	23440	224	54	105	57,5	107,5	23410	239	65,65	0,18	70,67	70,67	0,20				
02/04/2012	23440	234270	227	52	105	57,5	107,5	23404	223	65,50	0,18	71,94	70,83	0,20			28 cent. operazione	
02/04/2012	234270	234970	247	47	104	57,4	107,4	23474	230	65,70	0,19	76,90	74,00	0,20				
02/04/2012	234970	23470	299	39	103	57,3	106,8	23462	240	65,60	0,18	80,60	79,36	0,20				
02/04/2012	23470	23484	224	44	104	57,4	106,4	23474	230	65,70	0,19	76,60	76,40	0,20				
02/04/2012	23484	23500	237	41	100	57,2	107,2	23471	228	65,60	0,19	79,44	70,70	0,20				
02/04/2012	23500	235420	24	46	105	57,5	107,5	23500	234	65,60	0,18	78,36	76,83	0,20				
02/04/2012	235420	23590	167	52	106	57,4	107,4	23575	230	65,6	0,18	72,41	70,67	0,20			29 cent. operazione	
02/04/2012	23590	23670	244	63	104	57,4	107,4	23666	230	66,0	0,19	71,70	71,00	0,20				
02/04/2012	23670	23670	249	39	105	57,5	107,5	23668	234	65,6	0,18	80,60	80,60	0,20				

Figura 6 - Esempio di giornale di bordo

Durante il periodo di circolazione con passeggeri a bordo non si sono riscontrati problemi tecnici di nessun tipo riconducibili all'utilizzo della miscela, ed il veicolo ha potuto circolare regolarmente per l'intero periodo di sperimentazione.

Secondo il programma definito con il Centro Prove Autoveicoli di Bologna, al raggiungimento dei primi 15.000 km è stata eseguita una verifica delle emissioni e dei consumi, di concerto con il Centro Prove Autoveicoli di Bologna, che è stata superata positivamente (START Romagna, 2°- Rapporto sull'andamento della sperimentazione, ver 1.0). Nessuno scostamento significativo è stato rilevato rispetto alle misure effettuate in precedenza.

Alla conclusione della sperimentazione sono state eseguite le ultime misure delle emissioni e la verifica del corretto funzionamento dei dispositivi di sicurezza alla presenza del CPA. Vista la mancanza di anomalie di funzionamento del motore e dell'impianto nel corso dei primi 20.000 km, in accordo con il CPA, la verifica è stata fatta a 45.000 km e non a 30.000 km in deroga a quanto previsto nel programma. Anche a seguito delle

ultime misure nessuno scostamento significativo è stato rilevato rispetto a quelle effettuate in precedenza, segno che l'impiego della miscela al posto del metano non ha inficiato le prestazioni del motore.

La prestazione del motore (potenza, coppia, pressione e temperatura olio, energia erogata, consumo) è stata monitorata in continuo. L'erogazione della potenza e della coppia è stata sottoposta a variazioni a causa dei molteplici fattori che influenzano la dinamica del veicolo: il traffico, le condizioni meteo, l'autista. Sostanzialmente però non si sono registrate variazioni significative tali da indicare anomalie nella loro erogazione. La temperatura e la pressione dell'olio motore non hanno subito variazioni particolari tra i campioni rilevati e rispetto alle misure precedenti.

Nel corso di ogni ispezione del CPA è stata effettuata un'indagine endoscopica del motore per rilevare una eventuale sovra-usura arrecata alle parti della camera di combustione dovuta all'impiego dell'idrogeno. Sono stati inoltre effettuati prelievi di campioni d'olio lubrificante da sottoporre ad analisi di laboratorio. Tutte le indagini hanno evidenziato una normale usura delle parti meccaniche interessate al processo di combustione paragonabile a quella che si verifica con l'alimentazione a metano.

4.2 DATI SU EMISSIONI E CONSUMI OTTENUTI NEL TEST SU STRADA

La possibilità di utilizzo delle miscele idrometano trova un interesse verso un reale utilizzo se si prospettano risultati sperimentali che portino a:

- invarianza delle prestazioni motoristiche rispetto alla configurazione a gas naturale;
- riduzione delle emissioni di CO₂ al netto delle emissioni introdotte dal ciclo produttivo dell'idrogeno;
- rispetto dei limiti emissivi degli inquinanti normati;
- costi di operativi non superiori alle percentuali individuabili dall'analisi costi-benefici.

I test al banco hanno indicato che le prestazioni massime del motore non sono variate in modo tangibile da rendere evidente insufficienze di prestazioni del combustibile idrometano in confronto al gas naturale.

Il confronto dei parametri su strada ha indicato che il veicolo è stato in grado di operare nel servizio di trasporto senza defezioni particolari e non ha mostrato segni di inadeguatezza in termini di potenza o di autonomia.

In particolare sono stati mostrati valori di erogazione di coppia e potenza che sono stati perfettamente in linea con i valori previsti dal propulsore.

Di sicuro interesse è la rilevazione dei consumi in quanto capace di fornire quelle informazioni di valutazione sulle voci relative alle emissioni di CO₂ e sui costi operativi essendo strettamente correlate ai consumi.

Ai fini di un corretto confronto si è provveduto ad espletare una campagna di rilevamento dei consumi su un veicolo uguale alimentato a gas naturale reso operativo in servizio nella medesima linea su cui è stato inserito in servizio il veicolo alimentato ad idrometano.

I risultati di questa campagna di verifiche hanno costituito il riscontro con cui valutare le differenze in prestazioni energetiche e di emissione di CO₂. Il rilevamento dei consumi è stato eseguito con il metodo della registrazione alla pompa ossia mediante la registrazione dei quantitativi di gas naturale immessi durante le operazioni di rifornimento. La determinazione delle emissioni di CO₂ è eseguita indirettamente dai quantitativi di gas naturale consumati tramite le relazioni stechiometriche riferite al tipo di combustibile. Il riferimento è pertanto valutato in 322 g/km per il consumo specifico di gas naturale con una emissione di CO₂ pari a 883 g/km.

Utilizzando i dati di riferimento per il gas naturale ENEA ha sviluppato un modello termodinamico della ricarica del serbatoio del veicolo in grado di fornire il quantitativo di gas caricato in base ai dati relativi alla pressione iniziale e finale del serbatoio oltre alla temperatura ambiente di rifornimento. I risultati del modello sono stati validati con una accuratezza dello 0.2% rispetto alle letture del contatore massico al distributore di gas naturale.

Lo stesso modello, aggiornato nei parametri del combustibile, è servito a stabilire i quantitativi di miscela caricati nella fase di rifornimento.

I risultati hanno evidenziato un consumo medio di 280 g/km con una riduzione del 13 % rispetto a quello a gas naturale. Le emissioni di CO₂ rilevate sono di 750 g CO₂/km, con una riduzione del 15% rispetto al veicolo alimentato a gas naturale (883 gCO₂/km), che al netto delle emissioni per la produzione dell'idrogeno corrisponde all'8%.

4.3 VERIFICHE CONCLUSIVE

Al termine della sperimentazione su strada, sono state eseguite le verifiche del motore su banco dinamico presso l'Istituto Motori del CNR di Napoli. Il motore Mercedes, conclusa la sperimentazione su strada è stato inviato a Napoli presso il CNR Istituto Motori e si è condotta a fine Novembre 2013 una seconda campagna di misurazioni per raffrontarla con la prima del Novembre 2011. I risultati (Iannaccone, 2013) validati dal CPA di Bologna mostrano che l'uso dell'idrometano non ha alterato i parametri motoristici.

I test sui componenti dell'impianto di alimentazione, svoltisi nel dicembre 2013 presso i laboratori specializzati OMECO hanno dato esito positivo, dimostrando che le caratteristiche tecniche dei materiali sono rimaste inalterate dopo l'esposizione alla miscela idrometano e quindi conformi alla normativa.

5.

CONVERSIONE DI UNA MINI-FLOTTA DI AUTOBUS A IDROMETANO

Mhybus ha dimostrato la fattibilità tecnica ed autorizzativa della conversione ad idrometano di un autobus alimentato a gas naturale.

I risultati positivi dei test su strada confermano che la tecnologia è matura per una diffusione su più larga scala.

Il primo passo da compiere in questa direzione a seguito del progetto Mhybus è dunque quello di estendere la sperimentazione ad una mini-flotta di veicoli. Al fine di agevolare aziende di trasporti, enti pubblici, tecnici ed esperti in una valutazione approfondita dell'introduzione della tecnologia, si è proceduto ad analizzare i principali elementi e relativi costi stimati per la conversione ad idrometano di un parco mezzi circolante a metano (well to wheel):

1. raccomandazioni
2. autorizzazioni
3. conversione mezzi
4. esercizio
5. infrastruttura.

1. RACCOMANDAZIONI²

• **Organizzazione aziendale**

Un'azienda di trasporti che voglia sviluppare una flotta di autobus "sostenibile" deve considerare che la sostenibilità non ha solo implicazioni tecnologiche, ma ha anche un impatto culturale sulla organizzazione aziendale.

Prima dell'acquisto sul mercato di autobus a basso impatto ambientale, l'azienda deve migliorare i propri processi interni per quanto riguarda:

- La formazione del personale- Adattamento del processo di manutenzione
- Adeguamento/realizzazione di infrastrutture
- Logistica per la fornitura di combustibili innovativi.
- L'impatto culturale spiega perché l'introduzione di nuovi veicoli sostenibili è possibile solo nel medio-lungo periodo. Senza un approccio "culturale", la società dovrà affrontare ad alti costi di funzionamento e basso livello di servizio di autobus nuovi.

• **Scelta di una tecnologia «matura»**

Per un'azienda di trasporti, è importante migliorare costantemente la flotta con mezzi innovativi a basso impatto ambientale, allo stesso tempo è fondamentale che la tecnologia innovativa scelta sia una tecnologia "matura" che permette di avere gli autobus in servizio reale in città ogni giorno e non solo prototipi parcheggiato in un deposito. Da questo punto di vista la soluzione idrometano, sulla base dei risultati di Mhybus, appare come una scelta praticabile.

2. AUTORIZZAZIONI E PROCEDURE AMMINISTRATIVE PER CONVERSIONE DI AUTOBUS A METANO

Sulla base dell'esperienza di Mhybus, il percorso autorizzativo per la conversione di autobus può procedere secondo due differenti modalità per veicoli del tutto analoghi a quello utilizzato per la sperimentazione o per veicoli a metano con motorizzazione o allestimento differente.

- **Veicoli BredaMenarinibus (VivaCity e Avancity) con motorizzazione MERCEDES M 906 LAG CNG EEV** si ritiene possibile un

² Raccomandazioni che l'Azienda di trasporti TPER cita nel deliverable del progetto EU MIMOSA relativamente alla sperimentazione del veicolo elettrico, che possono essere estese a considerazioni più generali sulla sostenibilità del trasporto pubblico

percorso autorizzativo semplificato, sempre operando nel contesto sperimentale, alla luce dell'esperienza prodotta da Mhybus. Trattandosi di veicoli con motorizzazione analogica, non si renderebbe necessario ripetere interamente tutti i test condotti in Mhybus, ma si potrebbe procedere con una procedura semplificata da definire di concerto con il CPA;

- **Altri veicoli** con motori ad accensione comandata alimentati a CNG ma con motorizzazione diversa da Mercedes, Mhybus ha comunque fornito gli elementi tecnologici della trasformazione da metano a idrometano e le procedure autorizzative che il programma sperimentale del Ministero dei Trasporti potrebbe richiedere.

3. COSTI PER INTERVENTO SUI VEICOLI

Ipotizzando la trasformazione di veicoli di tipo Vivacity, è possibile stimare i costi sulla base dell'esperienza di Mhybus.

L'intervento sul veicolo è mirato al ritardo dell'accensione dovuto al fatto che la presenza dell'idrogeno rende la combustione più rapida. Questo settaggio è ottenibile attraverso due modalità:

- settaggio della centralina elettronica attraverso l'utilizzo di un apposito software. Il software è normalmente in uso presso le aziende di trasporto, e può avere un costo massimo intorno ai 500/1000 €.
- In alternativa, l'utilizzo di un ritardatore, ovvero un dispositivo apposito che ritardi l'accensione. Tale dispositivo può avere un costo massimo di 500 € - questa opzione non è stata però inserita nella sperimentazione di Mhybus.

Una seconda voce di costo è rappresentata dai costi per le autorizzazioni ed i test delle dotazioni di sicurezza e/o prove di tenuta impianto gas. Nell'ipotesi di conversione di una flotta di veicoli analoghi a quello testato in MHyBus si tratterebbe di applicare, in accordo con il CPA, una procedura sperimentale semplificata che dovrebbe tenere conto di uno stato acquisito di compatibilità con l'idrogeno del motore e dell'impianto di alimentazione, di adeguatezza dei dispositivi di sicurezza, di emissioni e prestazioni del motore a norma e quindi di una condizione acquisita di autorizzazione alla circolazione in servizio del veicolo modificato. Pertanto in tale ipotesi non sarebbero da ripetere i test MHyBus, ma semplicemente si tratterebbe di verificare, tramite una revisione straordinaria della Motorizzazione Civile, che il motore, il sistema di alimentazione e il sistema di sicurezza sia inal-

terato rispetto al veicolo MHyBus. Inoltre poiché si tratterebbe di sperimentazione in esemplare unico si dovrebbe definire un periodo e/o una percorrenza minima di sperimentazione al termine della quale, in assenza di anomalie, pervenire all'autorizzazione definitiva alla circolazione con idrometano, previa la verifica dei dispositivi di sicurezza e della conformità dell'allestimento con la documentazione tecnica.

4. COSTI DI ESERCIZIO

Il costo della miscela varia a seconda di una serie di fattori legati sia alla tecnologia di produzione che al tipo di soluzione che si intende adottare per il rifornimento (allacciamento ad una rete, fornitura tramite stoccaggio in bombole). Queste considerazioni verranno approfondite nel paragrafo dedicato ai costi dell'infrastruttura.

Ai fini dell'analisi economica qui sviluppata si ritiene quindi congruo fornire un intervallo di costi dell'idrometano, utilizzando due valori di riferimento per i due componenti (idrogeno e metano), valutati come segue.

Per quello che riguarda l'idrogeno, il primo valore di riferimento è definito basandosi su quanto viene espresso in media dal mercato industriale a livello di Comunità Europea ed a tal proposito si ritiene opportuno e valido quale valore del costo dell'idrogeno inclusivo dei costi di infrastruttura di produzione quello utilizzato nel progetto Europeo Zero Regio- che ben si adatta anche al contesto regionale in cui si è sviluppato il progetto Mhybus - pari a 0,65 €/Nmc (escluse tasse e accise), pur ribadendo che tale valore, come detto, al variare dei vari fattori sopra citati può essere soggetto a variazioni anche importanti sia in diminuzione che in aumento.

Poiché a Ravenna è possibile effettuare economie di scala sulla base della taglia dell'impianto e sulla base della ridotta distanza tra il sito di produzione e quello di utilizzo, il costo dell'idrogeno si abbassa a 0,55 €/Nmc (escluse tasse ed accise).

Per quel che riguarda il metano:

- Prezzo medio italiano alla pompa, diminuito di un opportuno fattore di sconto medio normalmente concordato: costo pari a 0,91 €/kg;
- Prezzo medio disponibile da rete, aumentato di un opportuno fattore per tenere conto dei costi di compressione (esempio START c/o deposito Ravenna): costo pari a 0,61 €/kg.

Oggetto	Valore	Unità di misura	Note
Densità Metano	0,7168	kg Nmc-1	Gas Naturale con il 99% di metano
Densità Idrogeno	0,0899	kg Nmc-1	
Percentuale H ₂ in CH ₄	15%	in volume	
Percentuale H ₂ in CH ₄	2,4%	in peso	
Densità Idrometano	0,6139	kg Nmc-1	
Consumo kg/km			
Metano	0,324	kg/km	±3%
Idrometano	0,286	kg/km	±3%

Tabella 3 - Parametri di rilievo dei consumi sulla base della sperimentazione Mhybus.

Applicando le forcelle dei costi definite sopra e i dati ottenuti sulla base dei consumi, si delineano sostanzialmente tre fasce di costo:

Costo dell'idrogeno [€/mc]					
Costo al Kg di Metano [€/kg]	0,55	0,575	0,6	0,625	0,65
0,61				Fascia 3	
0,66		Fascia 2			
0,71					
0,76					
0,81	Fascia 1				
0,86					
0,91					

Tabella 4 - Fasce di costo della miscela idrometano

Fascia 1 Verde - Costo al chilometro sostanzialmente invariato (ovvero variazioni del costo inferiori all'errore delle misure) alimentando il bus ad idrometano (15% H₂) oppure a metano;

Fascia 2 Grigia - Costo al chilometro superiore non più del 5% alimentando il bus ad idrometano (15% H₂) con un extra costo su percorrenza dell'autobus sulla linea in oggetto inferiore a ca. 500 €/anno/bus;

Fascia 3 Azzurra - Costo al chilometro dell'idrometano superiore non più del 7% alimentando il bus ad idrometano (15% H₂) con un extra costo su percorrenza dell'autobus sulla linea in oggetto inferiore a ca. 700 €/anno/bus.

5. COSTO DELL'INFRASTRUTTURA

In questa categoria di costi vengono considerati i costi necessari alla realizzazione della infrastruttura per il rifornimento presso l'area in cui vengono depositati i veicoli. Come in parte dettagliato nel Deliverable 1.2 (ENEA, 2010), la definizione dei costi di produzione ed utilizzo relativi all'idrogeno non è di immediata determinazione poiché la sua composizione è un insieme di molteplici centri di costo le cui variazioni sono rilevanti, in relazione ai fattori sotto riportati, e possono comportare altrettanto rilevanti variazioni del costo del prodotto, anche di alcune decine di punti percentuali.

Premesso che l'idrogeno può essere reso disponibile o tramite una produzione centralizzata collegata all'utenza tramite tubazione, o tramite una produzione dedicata all'utenza e quindi con un impianto realizzato presso l'utenza stessa, oppure in forma compressa (normalmente a 200 bar) in appositi recipienti in pressione di varie taglie anche idonei per il trasporto su strada, a titolo esemplificativo e non esaustivo i principali fattori che concorrono al costo dell'idrogeno sono i seguenti:

Fornitura in forma compressa (200 bar) in pacchi bombole o carri bombolai:

- tecnologia di produzione (steam reforming da metano, da altro idrocarburo od alcool, da elettrolisi) ed investimenti necessari per la realizzazione e la manutenzione dell'impianto;
- costo delle raw material utilizzate (principalmente idrocarburo/energia/acqua demineralizzata);
- volumi di idrogeno utilizzati;
- distanza geografica dal punto di produzione;
- tipologia e dimensioni dei mezzi di stoccaggio e trasporto;
- impianti di stoccaggio presso il sito utilizzatore;
- autorizzazioni.

Fornitura tramite produzione dedicata all'utenza (on-site) o tramite pipeline:

- tecnologia di produzione (steam reforming o elettrolisi) ed investimenti necessari per la realizzazione e la manutenzione dell'impianto;
- costo delle raw material utilizzate (principalmente idrocarburo/energia/acqua demineralizzata);

- volumi di idrogeno prodotti (dimensioni dell'impianto);
- impianti a corollario (es. compressori e buffers per l'erogazione in pressione, stoccaggi locali di back-up);
- autorizzazioni.

A questi fattori va naturalmente aggiunto il costo di eventuali tasse ed accise.

In generale, all'aumentare della taglia dell'impianto di produzione di idrogeno si ottengono economie di scala, per contro una produzione centralizzata obbliga ad una successiva e costosa distribuzione dell'idrogeno prodotto. Impianti di produzione di taglia più piccola dedicati alla singola utenza comportano viceversa incidenze dei costi più elevate.

In conclusione, in Tabella 5 vengono riassunte le voci di costo da considerare per la conversione ad idrometano di veicoli per il trasporto pubblico urbano con motorizzazione ed allestimento identici a quelli di quello utilizzato per Mhybus. I costi sono calcolati sulla base di 10 veicoli per una percorrenza annua di 45.000 km. I costi qui indicati sono da ritenersi come ordini di grandezza, per i costi di esercizio dell'idrometano si è considerato un costo massimo superiore al 10% del costo più alto calcolato sulla base della sperimentazione Mhybus.

Voce di costo	Range di costi annui per veicolo €	Range di costi per flotta annuo €
Interventi sul veicolo	500 - 1.000	5.000 - 10.000
Costi di esercizio rispetto al normale esercizio a metano	500 - 800	5.000 - 8.000
Costi per l'infrastruttura Stoccaggio idrogeno da steam reforming		200.000
Costo totale investimento		210.000 - 218.000
Tonnellate di CO ₂ evitate sulla base di una percorrenza annuale di 45.000 km per veicolo		59,8

Tabella 5 - Tabella di sintesi sui costi di investimento ipotizzando la conversione di una flotta di 10 autobus Vivacity con motorizzazione Mercedes per il trasporto urbano.

6.

CONCLUSIONI

Una delle soluzioni per aumentare la sostenibilità del trasporto pubblico urbano è l'utilizzo di combustibili alternativi, tra cui l'idrometano. Il progetto Mhybus grazie ad un approccio molto pragmatico, ha ottenuto dati volti a dimostrare la fattibilità tecnica ed i reali benefici ambientali raggiungibili con l'utilizzo di una miscela al 15% di idrogeno e 85% di metano per alimentare un autobus per il trasporto pubblico urbano con motorizzazione originale a metano.

La possibilità di utilizzo della miscela idrometano trova un interesse reale sulla base di risultati sperimentali che hanno dimostrato:

- il mantenimento delle prestazioni motoristiche rispetto alla configurazione a gas naturale;
- la riduzione delle emissioni di CO₂ al netto delle emissioni introdotte dal ciclo produttivo dell'idrogeno;
- il rispetto dei limiti emissivi degli inquinanti;
- costi operativi non superiori alle percentuali individuabili dall'analisi costi-benefici.

I test al banco hanno indicato che le prestazioni massime del motore non sono variate in modo tangibile da rendere evidente insufficienze di prestazioni del combustibile idrometano in confronto al gas naturale. Questo è stato ottenuto attuando, come unico intervento per l'adeguamento del veicolo, l'aggiustamento della regolazione dell'anticipo della centralina elettronica.

Il confronto dei parametri su strada ha indicato che il veicolo è stato in grado di operare nel servizio di trasporto senza defezioni particolari e non ha mostrato segni di inadeguatezza in termini di potenza o di autonomia. In particolare sono stati mostrati valori di erogazione di coppia e potenza che sono stati perfettamente in linea con i valori previsti dal propulsore.

L'idrometano consente un risparmio del 13% del combustibile e del 15% delle emissioni di CO₂ rispetto al metano. Sulla base di questi dati, è stato stimato che il costo per la conversione di una flotta di 10 veicoli, considerando il costo necessario all'infrastruttura, è compreso tra i 210 e 220 k€. Il risultato ambientale è un risparmio di 59,8 tonnellate di CO₂.

Dai dati raccolti, risulta che il costo al chilometro rispetto al metano, quando non identico, è comunque di poco superiore. Inoltre, è evidente come tale differenza di costo, rispetto ad altre tecnologie per la riduzione delle emissioni di CO₂ nel settore dei trasporti, sia sostenibile con un costo annuo fortemente contenuto.

I risultati di Mhybus confermano che **la tecnologia è matura per una diffusione su più larga scala.**

7.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI³

Carcassi, 2011. Progetto Life+ Mhybus. Caratteristiche e pericolosità di miscele di gas infiammabili Idrogeno/Metano. Pisa, Luglio, 2011

ENEA, 2013. Risultati del test su strada del 11/04/2013

Iannaccone, 2012. Relazione conclusiva dell'attività di ricerca relativa al contratto stipulato tra Istituto Motori CNR ed ENEA, avente per oggetto "Rilievo di prestazioni ed emissioni di un motore heavy duty ad accensione comandata su ciclo ETC nell'alimentazione con miscele idrogeno metano", nell'ambito del progetto Europeo MHYBUS. CNR, Istituto Motori di Napoli

JRC, 2001. Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and power-trains in the European Context. European Commission, Joint Research Center, Institute for Energy and Transport

MhyBus Deliverable 1.A, ENEA, 2010. Individuation of the optimal hydro-methane blend

³ I deliverable e i documenti tecnici sono scaricabili sul sito www.mhybus.eu

MhyBus Deliverable 1.B, ENEA, 2011. Compliance of the fuel supply system components with the Hydromehane blend

MhyBus Deliverable 1.2, ENEA, 2010. Analysis of the up-to-date best technologies for hydrogen production from RES and scenarios for Regione Emilia Romagna

MhyBus Deliverable 2.2 CPA approval released at the end of the homologation procedure. First Authorisation for circulation on public roads

MhyBus Deliverable 2_d, SOL, 2012. Installation and start up report of the functionality of the “ad hoc” hydromethane refueling station

START Romagna, 2013. START_130411-2°- Giornale di Bordo_parte C (ver. 1.0)

Maibach, M. Schreyer, C. Sutter D., van Essen, H.P. Boon, B.H. Smokers, R. Schroten A., C. Doll Pawlowska, B., Bak, M., 2008. Handbook on estimation of external costs in the transport sector Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport (IMPACT). Version 1.1

Delft, CE, Publication Number 07.4288.52

