Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea

Il sistema Hydromoving: sostenibilità e vantaggi dell'utilizzo dell'idrogeno come additivo nei motori a combustione interna

Relatore

Prof. Spessa Ezio

Candidato

Frassanito Giuseppe

Anno Accademico 2022/2023

A mio padre,

per l'appoggio economico e soprattutto morale, per avermi sempre indirettamente spronato a dare il massimo e mantenere un impegno costante

A mia madre,

per essermi sempre stata accanto e sollevato nei momenti più duri, consigliato e motivato quando ce n'era bisogno

A loro devo tutto

Sommario

1. Introduzione 1
2. Sistemi, trasformazioni e cicli termodinamici 3
   2.1. Ciclo motore ideale e rendimenti 5
   2.2. Ciclo di Carnot 8
   2.3. Motori a combustione interna 9
      2.3.1. Numero di tempi 10
      2.3.2. Tipologia di movimento 11
      2.3.3. Tipologia di combustione 12
   2.4. Ciclo Otto: ciclo ideale per motori a combustione ad accensione comandata 13
   2.5. Ciclo Diesel: ciclo ideale per motori a combustione ad accensione per compressione 15
3. I prodotti della combustione interna 18
   3.1. Inquinanti emessi in atmosfera 19
      3.1.1. Ossidi di azoto (NOx) 19
      3.1.2. Idrocarburi incombusti (HC) 21
      3.1.3. Particolato (PM) 24
      3.1.4. Monossido di carbonio (CO) 26
   3.2. Effetti sulla salute e sull'ambiente 27
      3.2.1. Idrocarburi incombusti e monossido di carbonio 27
      3.2.2. Anidride carbonica (CO_2) 28
      3.2.3. Particolato 30
      3.2.4. Ossidi di azoto e di zolfo 31
4. Soluzioni differenti dal tradizionale ICE 32
   4.1. Metodi e combustibili alternativi 33

4.2. L'idrogeno 34
4.2.1. Le prime applicazioni 38
4.2.2. Impiego veicolare attuale 41
4.2.3. L'idrogeno impiegato come additivo 43
4.2.4. La produzione di idrogeno mediante elettrolisi 47
5. La miscela idrogeno-ossigeno 50
5.1. Bilanci energetici per la produzione on board 51
5.1.1. I domini di coerenza dell'acqua 53
5.2. Incremento di potenza e riduzione di consumi 56
6. Il sistema Hydromoving 60
6.1. Descrizione del sistema e funzionamento 62
6.2. Rendimento e costi 67
6.3. Applicazione del sistema su veicoli 69
6.4. Risultati ottenuti 71
6.4.1. Motore a benzina 71
6.4.2. Motore Diesel 79
7. Conclusioni 87
Bibliografia 89

Capitolo 1
Introduzione

Durante gli ultimi anni, il cambiamento delle condizioni atmosferiche e la situazione globale riguardante il clima sono sempre più evidenti e necessitano un'attenzione sempre maggiore con il passare del tempo. Difatti, la sensibilità dei governi e dell'opinione pubblica verso i problemi ambientali è notevolmente cresciuta. Diversi studi dimostrano che l'attività industriale e civile, alimentata principalmente dai combustibili fossili, ha un effetto dannoso sia sugli esseri viventi, sia sull'ambiente.

Questi combustibili fossili inoltre sono in quantità limitata e non rinnovabile, dato che hanno impiegato milioni di anni per formarsi, quindi non possono essere prodotti in breve tempo. Con l'attuale regime di consumi, queste riserve di combustibili finiranno con l'esaurirsi entro poche centinaia di anni, immettendo nell'atmosfera quantità di inquinanti nocivi sia per la salute umana che del pianeta.

Queste emissioni derivano da varie fonti, la maggior parte delle quali sfrutta appunto queste riserve di combustibili fossili in forme più o meno elaborate; basti pensare, per esempio, all'impiego del petrolio e carbone in vari settori: dalle industrie, passando alla produzione di energia elettrica e termica, a quella utilizzata per produrre combustibili atti ad alimentare i motori della moltitudine dei mezzi di trasporto esistenti.

Infatti, l'inquinamento atmosferico è dovuto principalmente all'utilizzo quotidiano dei veicoli e velivoli per qualsiasi motivo, che sia trasporto di persone o di merci, oppure dovuto all'impiego di macchine per uso lavorativo, ognuno dei quali fatto in maniera più o meno frequente ed intensa.

La politica europea dei trasporti procede ormai chiaramente verso una ben precisa direzione: entro il 2035 infatti, il consiglio europeo ha approvato lo stop alla vendita dei veicoli muniti di motore endotermico alimentati a benzina e a diesel. [1] Questa decisione, seppur giustificata e relativamente necessaria, deriva dal fatto che esistono e ci si potrebbe affidare a modi alternativi per far muovere un veicolo, equipaggiandolo di sistemi e motori diversi dai convenzionali, che inquinino meno e ricorrano a quantità di combustibile minori, o addirittura totalmente nuovi e innovativi. La tendenza sarebbe quella di spingere la produzione di veicoli alimentati da motori elettrici a

batterie, poiché il costo di proprietà totale è inferiore rispetto alle attuali alternative presenti sul mercato. Ad esempio, la produzione di idrogeno e combustibili verdi (a partire da elettricità e idrogeno e convertiti in benzina sintetica) è più costosa, poiché richiede molta elettricità. Tuttavia, le batterie sono pesanti e questo significa che alcuni mezzi di trasporto non possono essere facilmente alimentati dalle batterie, quindi l'idrogeno o i combustibili verdi possono essere una buona soluzione alternativa per navi, aerei o veicoli pesanti. [2]

Per comprendere al meglio gli effetti dell'inquinamento dovuti alla combustione degli idrocarburi presenti nei combustibili usati nei motori endotermici attuali e valutare possibili soluzioni alternative, bisogna analizzare i principi termodinamici, fisici e chimici che governano il funzionamento dei cicli motore, nonché gli effetti di tale combustione a seconda di vari aspetti di natura diversa.

Questa tesi vuole proporre un sistema alternativo di produzione di idrogeno on board e on demand, basandosi sul principio dell'elettrolisi dell'acqua e che sfrutti alcune proprietà e reazioni chimiche e fisiche di quest'ultima.

Capitolo 2

Sistemi, trasformazioni e cicli termodinamici

Un sistema termodinamico è una porzione di spazio materiale, separata dal resto dell'universo termodinamico (ovvero dall'ambiente esterno) mediante una superficie di controllo (o confine) reale o immaginaria, rigida o deformabile; può essere sede di trasformazioni interne e scambi di materia e/o di energia con l'ambiente esterno (ovvero tutto ciò di esterno al sistema che interagisce con esso).

Esistono tre tipi principali di sistemi termodinamici: aperto, chiuso e isolato. In particolare:

- un sistema si dice aperto se consente un flusso con l'ambiente esterno, sia di massa sia di energia (tramite calore e/o lavoro e/o altra forma di energia), attraverso il suo confine; un esempio di sistema aperto è una piscina piena d'acqua, in cui l'acqua può entrare o uscire dalla piscina e può essere riscaldata da un sistema di riscaldamento e raffreddata dal vento;
- un sistema si dice chiuso se consente un flusso di energia con l'ambiente esterno, attraverso il suo confine, (tramite calore e/o lavoro e/o altra forma di energia), ma non di massa; ne è un esempio una bombola tenuta chiusa da una valvola, che può scaldarsi o raffreddarsi ma non perde massa (mentre la stessa bombola si comporta da sistema aperto se apriamo la valvola).
- un sistema si dice isolato se non permette un flusso ne' di energia ne' di massa con l'ambiente esterno.

Inoltre:

- un sistema si dice parzialmente isolato se consente un flusso di massa con l'ambiente esterno, attraverso il suo confine, ma non di energia;
- un sistema si dice adiabatico quando non scambia calore con l'ambiente.

Il sistema si trova in equilibrio termodinamico nel momento in cui le principali variabili di sistema, come pressione, volume e temperatura, risultano costanti nel tempo.

Qualora una o più di queste variabili dovesse variare, si ha una trasformazione termodinamica, raggiungendo una nuova condizione di equilibrio; in particolare una trasformazione termodinamica può avvenire:

- mantenendo la stessa pressione (trasformazione isobara);
- mantenendo la stessa temperatura (trasformazione isoterma);
- mantenendo lo stesso volume (trasformazione isocora).

Si definisce termodinamico un ciclo durante il quale in un sistema avviene un numero finito di trasformazioni, al termine delle quali il sistema ritorna nella sua condizione iniziale da dove era partito il ciclo; una trasformazione termodinamica può essere reversibile oppure essere irreversibile, ma tutte le trasformazioni reali sono irreversibili, in quanto non si possono eliminare totalmente gli attriti; quindi la condizione di reversibilità è solo un'approssimazione teorica.

2.1 Ciclo motore ideale e rendimenti

Sulla base di definizione di ciclo termodinamico, è bene anche definire il concetto di macchina termica, ovvero un dispositivo meccanico in grado di convertire energia da una forma all'altra, nello specifico in grado di scambiare calore e lavoro con l'ambiente circostante o un altro sistema. Il nome di una macchina termica di solito è quello del ciclo termodinamico associato. Il lavoro è prodotto sfruttando il gradiente termico tra una sorgente calda e una sorgente fredda. Il trasferimento di questo calore tra le due sorgenti avviene di solito tramite un fluido di lavoro.

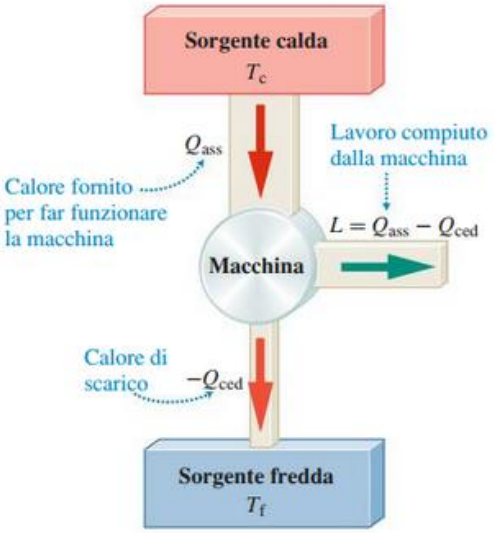


Figura 1 Macchina termica

Inoltre, una macchina termica può anche essere una macchina ciclica, ovvero capace di subire una trasformazione ciclica, formando quindi un ciclo che può ripetersi un numero finito di volte. Un ciclo termodinamico si definisce motore se, rappresentato nel piano di Clapeyron (pressione-Volume), viene percorso in senso orario, quindi il lavoro sarà positivo e sarà compiuto dal sistema sull'ambiente.

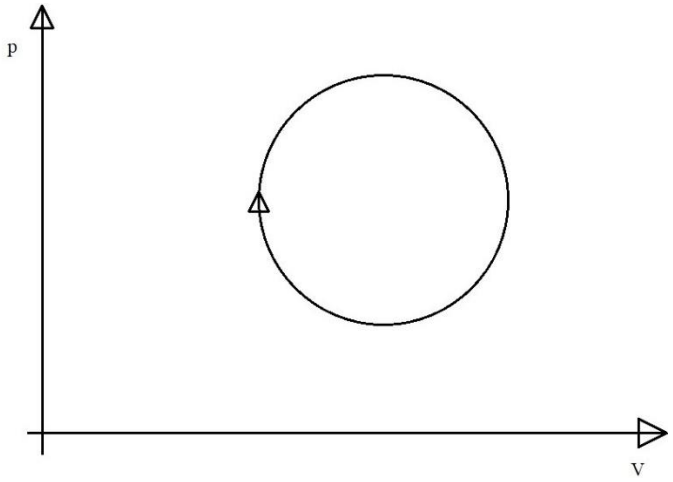


Figura 2 Ciclo motore

Per definizione, il lavoro è il prodotto tra una forza e lo spostamento che essa induce.

$$dL = F \cdot ds$$

Ovvero:

$$dL = p \cdot A \cdot ds = p \cdot dV$$

Secondo il primo principio della termodinamica, in ambiente ideale il lavoro è la differenza tra il calore fornito al sistema e il calore rilasciato:

$$\Delta L = \Delta Q = Q_+ - Q_-$$

Quindi nel piano di Clapeyron, il lavoro è:

$$L = \int p\, dV$$

cioè la differenza tra l'area rappresentante il calore in entrata:

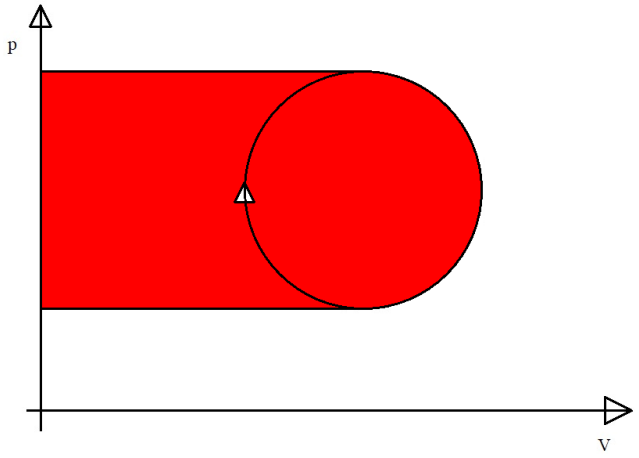


Figura 3 Calore in entrata

e il calore in uscita:

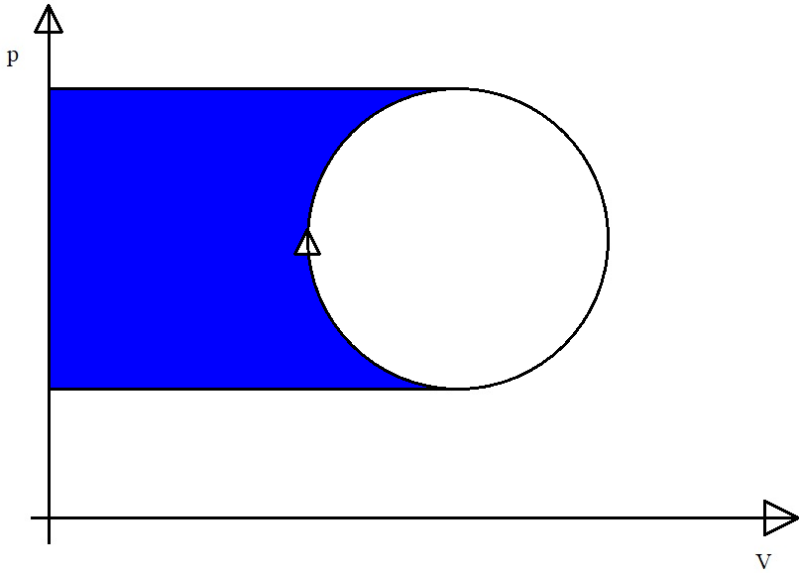


Figura 4 Calore in uscita

In altre parole, il lavoro è rappresentato dall'integrale nel piano pressione-Volume dell'area delimitata dal "contorno" della linea che rappresenta il ciclo termodinamico:

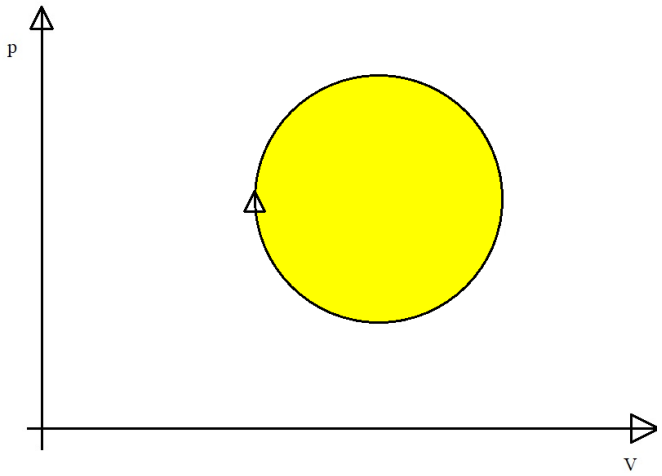


Figura 5 Lavoro

L'efficienza di una macchina termica si misura calcolando il rapporto tra l'effetto utile e la spesa energetica. Per una macchina termica motrice, l'efficienza viene chiamata rendimento, ovvero il rapporto tra quanto lavoro la macchina riesce a produrre rispetto a quanto calore gli viene fornito.

$$\eta = \frac{\mathrm{L}}{Q_+} = \frac{Q_+ - Q_-}{Q_+} = 1 - \frac{Q_-}{Q_+}$$

2.2 Ciclo di Carnot

In termodinamica, il ciclo termodinamico motore più semplice (ma anche il più efficiente a livello teorico) è il cosiddetto ciclo di Carnot, un ciclo formato da due trasformazione adiabatiche reversibili e due trasformazioni isotermiche.

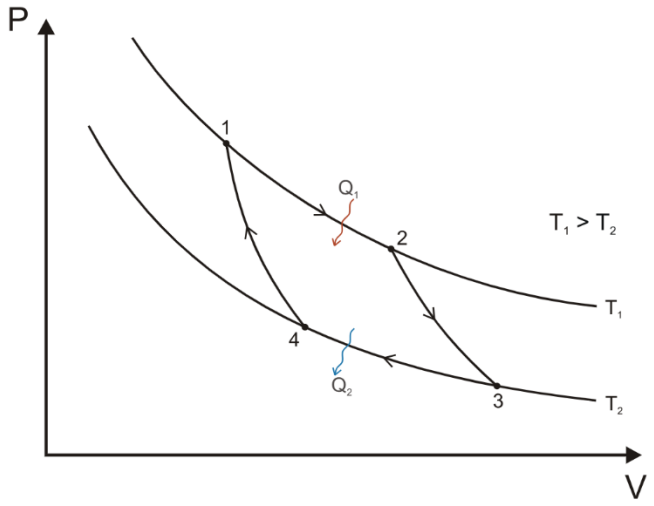


Figura 6 Ciclo di Carnot

Il ciclo di Carnot è un ciclo teorico, la sua realizzazione richiede lo studio di una macchina termica teorica in cui un gas altrettanto teorico è soggetto ad un ciclo termodinamico. Questa affermazione lascia intendere che è impossibile realizzare una macchina termica reale a cui si può applicare il ciclo di Carnot.

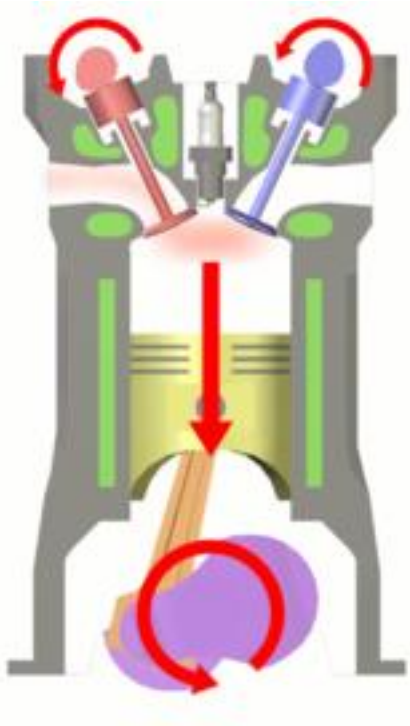
La macchina teorica si dice macchina di Carnot. Essa necessita di due sorgenti di calore a temperature differenti e si schematizza generalmente come un cilindro chiuso con un pistone con le pareti isolate come un sistema adiabatico contenente del gas che può scambiare calore solo attraverso il fondo del cilindro.

Il suo rendimento è pari al massimo ottenibile a livello teorico, ovvero il rapporto tra la differenza dei calori in entrata e uscita e il calore fornito al sistema; perciò questo ciclo viene preso come riferimento per applicazioni reali, quali gli attuali motori, ma anche macchine frigorifere e pompe di calore.

Da questo ciclo, attraverso delle opportune modifiche, si vengono a generare quelli che sono i cicli usati negli attuali motori a combustione interna (o ICE, internal combustion engine), alcuni dei quali rientrano nelle macchine termiche motrici che alimentano i veicoli. Essi si differenziano innanzitutto per il tipo di ciclo che effettuano, poi per la modalità di trasmissione del moto, ma anche per il numero di fasi, chiamati anche "tempi", con cui riescono a completare il ciclo.

2.3 Motori a combustione interna

I motori a combustione interna sono delle macchine termiche motrici atti a trasmettere lavoro, generalmente a un albero al quale sono meccanicamente collegate. Il loro funzionamento consiste generalmente in una camera chiamata “cilindro” nel quale viene immessa una miscela di combustibile (benzina, diesel, etc.) e un comburente (ossigeno presente nell’aria generalmente), la quale viene compressa attraverso un pistone e fatta bruciare; la combustione generata produce un’espansione di questa miscela che spinge e il pistone, esercitando una spinta sugli organi mobili, i quali a loro volta trasmettono il moto.



Le fasi che descrivono il ciclo, ovvero il modo in cui i motori a combustione interna lavorano, sono generalmente 4:

1. Aspirazione;
2. Compressione;
3. Espansione;
4. Scarico.

Attualmente esistono vari modelli di motori a combustione interna, ognuno dei quali si distingue per il modo in cui trasmette il lavoro e il tipo di ciclo che effettua. La differenza maggiore è data da:

- Numero di tempi;
- Tipologia di movimento;
- Tipologia di accensione.

2.3.1 Numero di tempi

Ogni motore impiega un certo numero di fasi per completare il ciclo per il quale è stato progettato, di solito i motori attuali vengono costruiti in modo da effettuare il ciclo in 2 o 4 tempi.

Il motore a 4 tempi è attualmente il motore più diffuso ed utilizzato dalla maggior parte dei veicoli e ognuna delle 4 fasi è descritta dalla rotazione di 180° dell'albero motore, quindi il ciclo viene completato dopo una rotazione di 720° dal punto iniziale. Qui di seguito viene riportata una rappresentazione delle fasi.

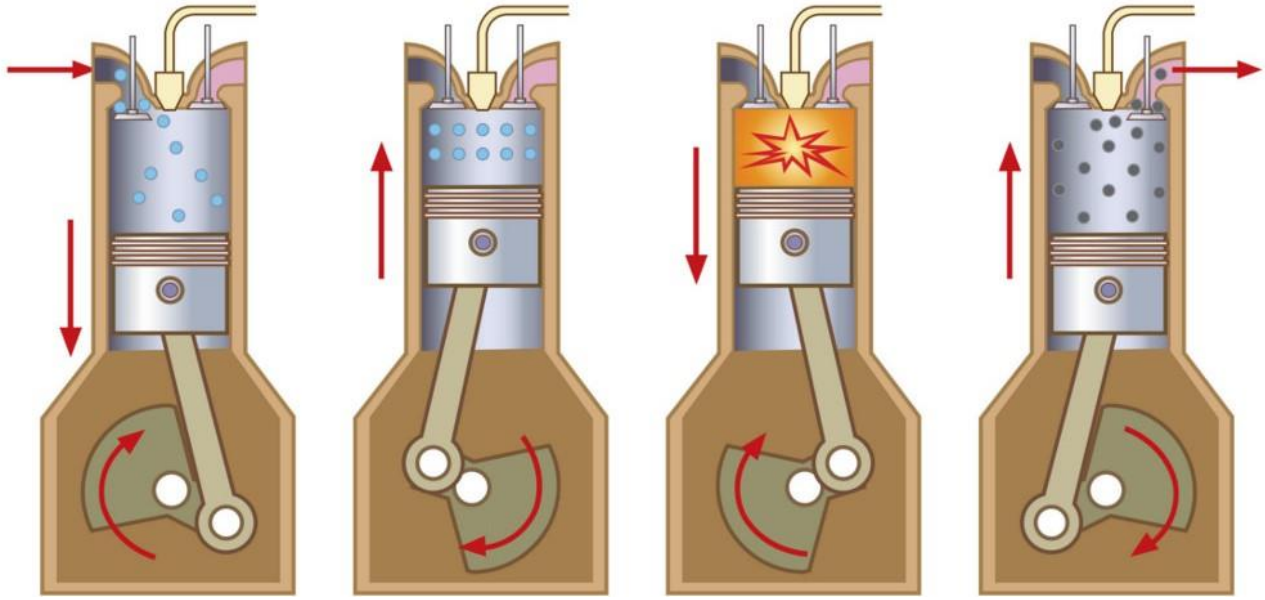


Figura 7 Fasi di un motore a 4 tempi: aspirazione, compressione, espansione, scarico

Esistono poi alcuni motori a combustione interna, chiamati motori a 2 tempi, che riescono a compiere un ciclo motore in una rotazione completa dell'albero anziché in due: nella prima fase effettuano l'aspirazione e la compressione e nella seconda l'espansione e lo scarico.

Figura 8 Fasi di un motore a 2 tempi

2.3.2 Tipologia di movimento

Un'altra distinzione per la quale i motori a combustione interna si differenziano è il modo in cui il pistone si muove per trasmettere il moto all'albero motore; le due maggiori categorie sono:

- Macchine alternative;
- Macchine rotative.

Le prime sono costituite da un pistone che sale e scende in maniera alternata all'interno di un cilindro e trasmette il moto all'albero tramite un altro organo attraverso il meccanismo "biella-manovella".

Le seconde invece sono caratterizzate da un moto rotativo di uno o più cilindri attorno all'asse di rotazione dell'albero motore, anche se questa rotazione dà luogo ad un effetto giroscopico che si oppone all'inclinazione dell'asse di rotazione, rendendo difficoltosa la manovra dei velivoli o veicoli.

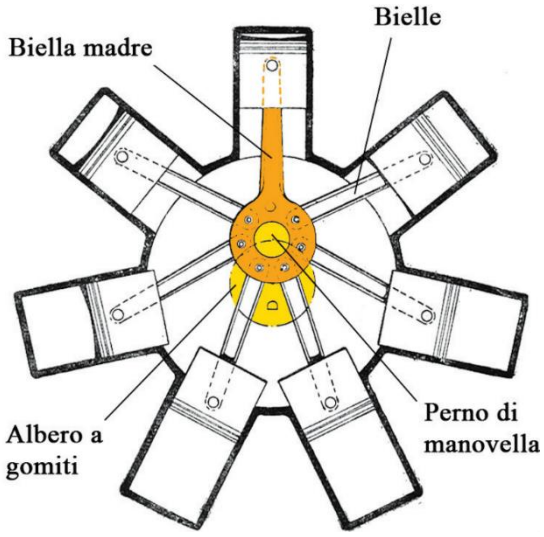


Figura 9 Esempio di motore rotativo: motore radiale

Una tipologia di motori rotativi è data dalla sostituzione del pistone con rotore che ruota in maniera eccentrica rispetto all'albero motore (motore Wankel).

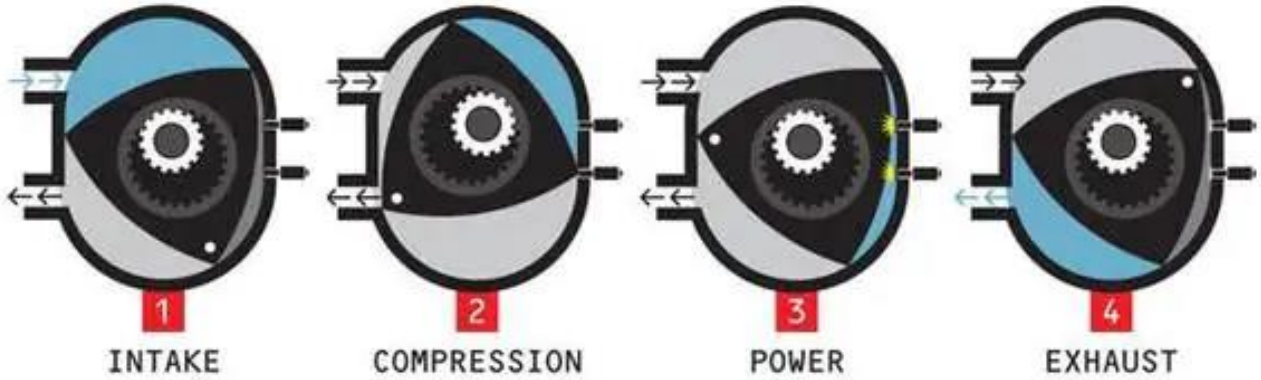


Figura 10 Fasi di un motore rotativo Wankel

2.3.3 Tipologia di combustione

Un altro modo rilevante per distinguere i motori a combustione interna, specificatamente quelli alternativi, è il diverso modo di innesco della miscela nel cilindro. Esistono due diversi processi di accensione della miscela, ovvero:

- Accensione comandata (SI o spark ignition);
- Accensione spontanea (CI o compression ignition).

Il primo modo è caratterizzato dal fatto che la miscela, una volta compressa, ha bisogno di un innesco forzato, cioè di un "evento" che faccia avviare la reazione di combustione. Questo evento è generato da un dispositivo, chiamato candela, che produce una scintilla in modo da provocare l'innalzamento locale della temperatura per far partire il processo di combustione.

Figura 12 Candela di accensione

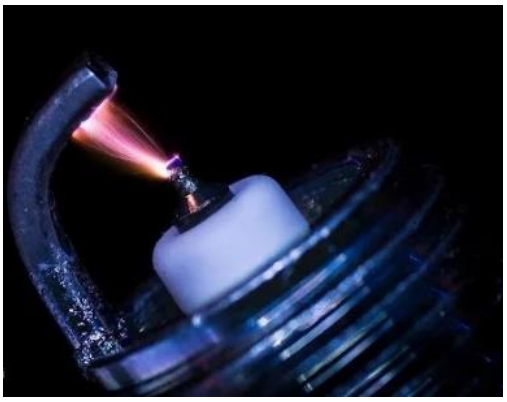


Figura 11 Particolare sullo scocco della scintilla

In generale, è il tipo di miscela che governa e caratterizza il tipo di accensione, e in base ad essa ne dipende la necessità o meno di utilizzare questo strumento. Infatti, i motori ad accensione comandata sono quei motori nei quali al loro interno viene immessa una miscela il cui combustibile è a bassa reattività, quindi bisognoso di avere, per esempio, una scintilla per far sì che bruci.

Il secondo modo, a differenza del primo, è definito dal fatto che la miscela in questione è formata da combustibili ad alta reattività, ovvero che sono in grado di autoaccendersi: la miscela viene immessa nel cilindro solo quando nello stesso il comburente raggiunge livelli di pressione e temperatura per i quali il combustibile reagisce con esso in maniera spontanea, facendo avvenire la combustione.

Di solito, i combustibili utilizzati per i motori della prima categoria sono: benzina, metanolo, etanolo, gas naturale, GPL (gas di petrolio liquefatti); per la seconda sono generalmente gasolio o biodiesel.

2.4 Ciclo Otto: ciclo ideale per motori a combustione ad accensione comandata

Il ciclo Otto è il ciclo termodinamico di riferimento per i motori a combustione interna ad accensione comandata. Il nome "ciclo Otto" deriva dal nome dell'ingegnere tedesco Nikolaus August Otto che realizzò il primo motore a quattro tempi effettivamente funzionante nel 1876; consiste in un ciclo formato da 4 trasformazioni, a 2 a 2 uguali tra loro:

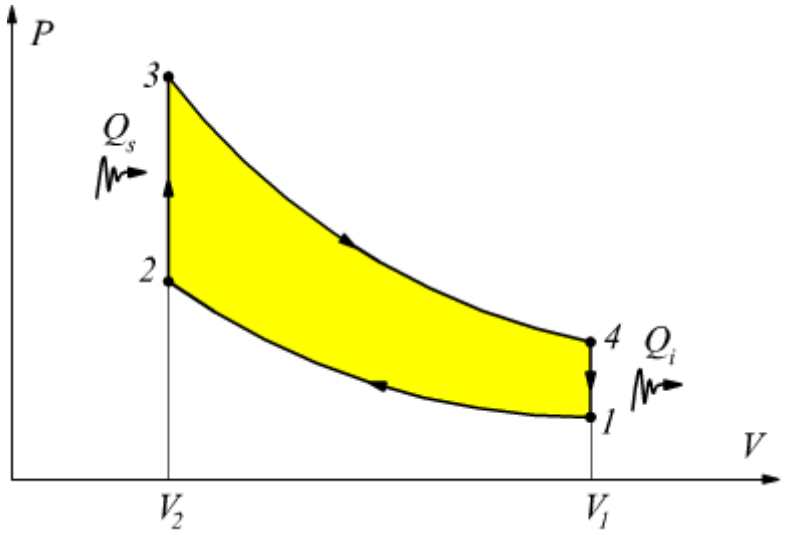


Figura 13 Ciclo Otto

- Compressione adiabatica reversibile (1-2);
- Isocora con aggiunta di calore (2-3);
- Espansione adiabatica reversibile (3-4);
- Isocora con sottrazione di calore (4-1).

Il lavoro generato da questo ciclo, come tutti gli altri cicli termodinamici, è dato dalla differenza tra il calore fornito e il calore sottratto al sistema.

$$L = Q_+ - \ Q_- = c_v \cdot (T_3 - T_2) - c_v \cdot (T_4 - T_1)$$

Dove c_v è il calore specifico a volume costante e le T sono le temperature nei rispettivi stati termodinamici. Di conseguenza, il rendimento di questo ciclo è uguale a:

$$\eta = \frac{\mathrm{L}}{Q_+} = \frac{c_v \cdot (T_3 - T_2) - c_v \cdot (T_4 - T_1)}{c_v \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

Dalle due trasformazioni adiabatiche reversibili, si ha che:

$$T_3 V_2^{k-1} = T_4 V_1^{k-1}$$
$$T_2 V_2^{k-1} = T_1 V_1^{k-1}$$

dove $k=c_p/c_v$ è il "coefficiente di dilatazione adiabatica" o "rapporto tra calori specifici". Dividendo membro a membro:

$$\frac{T_2}{T_3} = \frac{T_1}{T_4}$$

Quindi il rendimento si può riscrivere come:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1} = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Cioè:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}$$

β indica il rapporto p_2/p_1 ed è chiamato "rapporto di compressione", mentre ε indica il rapporto V_1/V_2 ed è chiamato "rapporto di compressione volumetrico".

È evidente che il rendimento e il lavoro dipendono dalle condizioni e dai livelli di temperatura e pressione in cui avviene il ciclo; nello schema sottostante è rappresentato l'andamento del rendimento rispetto a β.

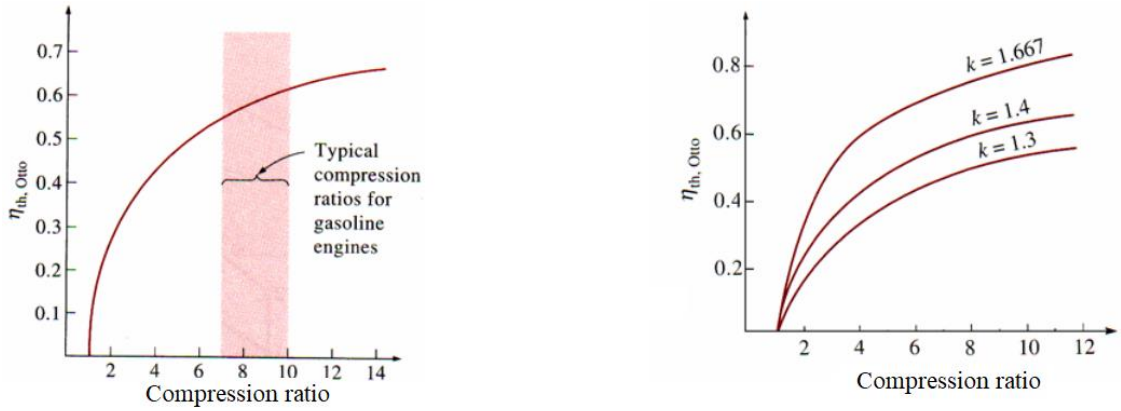


Figura 14 Rendimento ciclo Otto

Come mostrato nella figura a sinistra, valori di rapporto di compressione volumetrico tipici di lavoro per un motore operante il ciclo Otto sono compresi tra 7 e 10.

2.5 Ciclo Diesel: ciclo ideale per motori a combustione ad accensione per compressione

Il ciclo Diesel è il ciclo termodinamico di riferimento per i motori a combustione interna ad accensione per compressione. A differenza del ciclo Otto, questo ciclo si distingue per il fatto che, al posto di una somministrazione di calore per effetto di una differenza di pressione, la si ha in corrispondenza di una differenza di volume: la miscela viene portata a una temperatura superiore, ma ad una pressione costante, per effetto dell'accensione della stessa in maniera spontanea nello stesso volume in cui è stata immessa. Il comburente viene inizialmente compresso fino ad arrivare al volume minimo nel cilindro, corrispondente alla posizione del pistone nel punto morto superiore, portandolo a una temperatura tanto elevata da far reagire la miscela, la quale viene immessa proprio successivamente; la stessa, essendo ad alta reattività, reagisce accendendosi, facendo partire il processo di combustione. Perciò, il ciclo è rappresentato in questo modo:

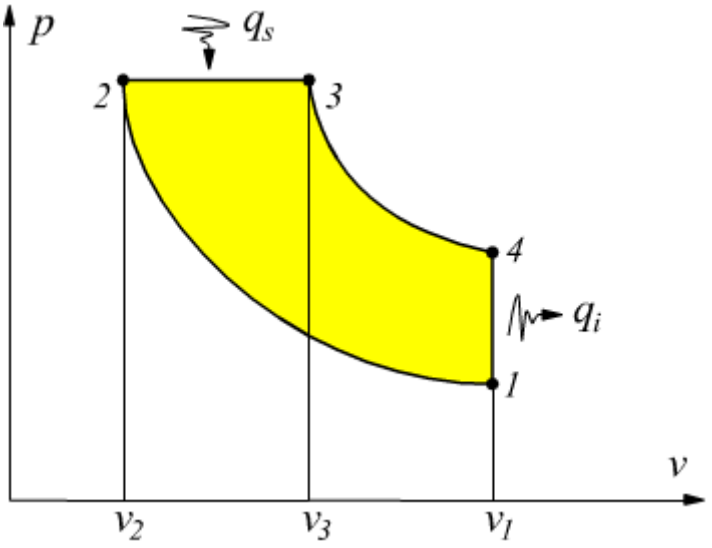


Figura 15 Ciclo Diesel

- Compressione adiabatica reversibile (1-2);
- Isobara con aggiunta di calore (2-3);
- Espansione adiabatica reversibile (3-4);
- Isocora con sottrazione di calore (4-1).

Il lavoro è definito dall'area circoscritta dalla linea del ciclo:

$$L = Q_+ - Q_- = c_p \cdot (T_3 - T_2) - c_v \cdot (T_4 - T_1)$$

Dove c_p è il calore specifico a pressione costante. Di conseguenza, il rendimento di questo ciclo è uguale a:

$$\eta = \frac{L}{Q_+} = \frac{c_p \cdot (T_3 - T_2) - c_v \cdot (T_4 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{k} \cdot \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{k} \cdot \frac{T_1}{T_2} \cdot \left(\frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \right)$$

Lungo una trasformazione isobara, il rapporto delle temperature equivale al rapporto dei volumi; perciò, il rapporto T_3/T_2 equivale a V_3/V_2, chiamato anche "rapporto volumetrico di combustione" ed indicato con il simbolo δ. Attraverso passaggi matematici, si ha che il rapporto T_4/T_1 è uguale a δ^k. Quindi il rendimento viene riscritto nella forma:

$$\eta = 1 - \frac{1}{k} \cdot \frac{T_1}{T_2} \cdot \left(\frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \right) = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{\delta^k - 1}{\delta - 1}$$

Come si può notare, la parte della definizione evidenziata in rosso corrisponde al rendimento del ciclo Otto, ma il termine negativo, ovvero l'inverso del rapporto di compressione, viene moltiplicato per la quantità in giallo, una quantità maggiore di 1, in quanto k è un valore positivo; ciò significa che il rendimento del ciclo Diesel è sempre minore del ciclo Otto a parità di rapporto di compressione.

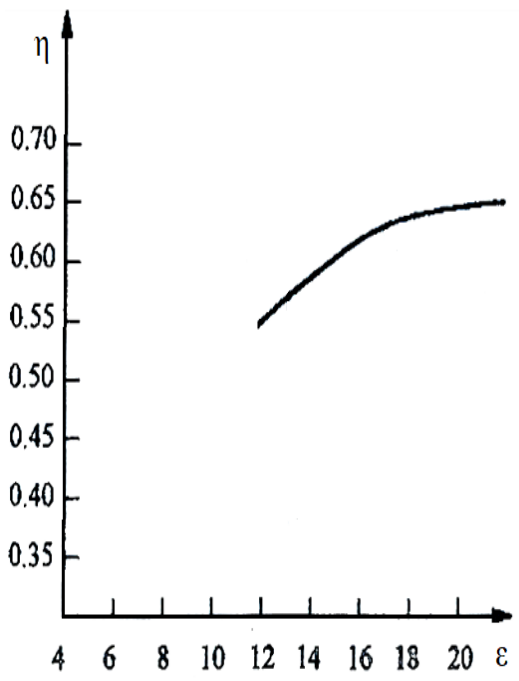


Figura 16 Rendimento ciclo Diesel

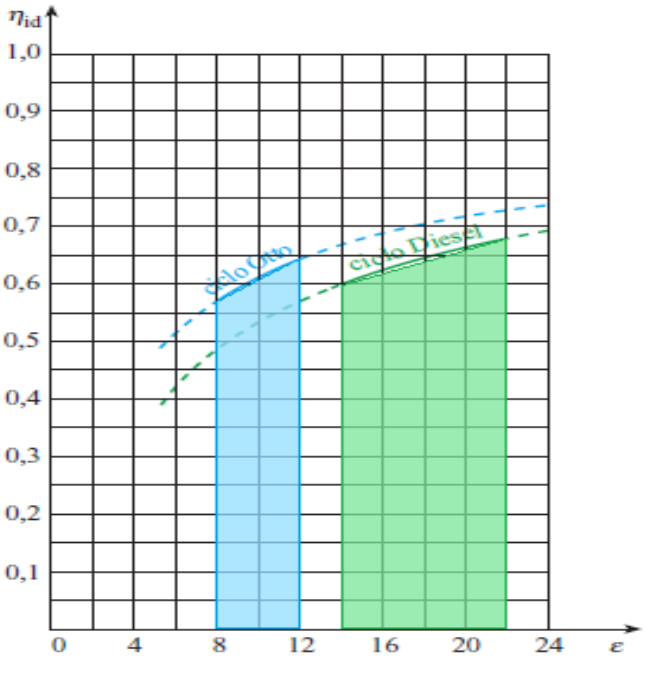


Figura 17 Confronto rendimento cicli Otto e Diesel

Nella realtà dei fatti, i motori operanti il ciclo Diesel lavorano in un intervallo di valori di rapporto di compressione volumetrico compreso tra 14 e 22; in queste condizioni, il rendimento del ciclo Otto risulta essere inferiore.

Capitolo 3

I prodotti della combustione interna

Il funzionamento dei motori a combustione interna si basa sull'energia sprigionata dalla reazione di combustione da parte della miscela, la quale fornisce la spinta al pistone per muovere l'albero motore e produrre lavoro. Ma questa reazione non è chimicamente equilibrata e completa: le miscele in questione sono formate da combustibile e comburente, ma non sempre la reazione è stechiometrica per via di condizioni e fattori esterni che difficilmente possono essere controllati, come l'imperfetta composizione chimica del combustibile oppure la non idealità del processo di combustione. Come conseguenza di ciò, la combustione non sempre avviene completamente, generando dei prodotti indesiderati allo scarico che poi vengono immessi nell'atmosfera, con conseguenze dannose. La tipologia di prodotti inattesi varia da semplici ossidi e biossidi a vere e proprie sostanze solide o liquide anche di dimensioni importanti, come il particolato. Solitamente le sostanze reagenti sono gli elementi presenti sia nell'aria che nel combustibile, ovvero cioè azoto, ossigeno, idrocarburi, quindi carbonio e idrogeno, e in maniera contenuta anche zolfo. In base al tipo di motore e alle condizioni operanti, la quantità di inquinanti prodotte può variare in maniera significativa o trascurabile. Per esempio, il tipo di combustibile utilizzato nei motori a benzina (ciclo Otto) o nei motori Diesel ha una sostanziale differenza di composizione chimica: i combustibili ad alta reattività, quindi usati nei Diesel, hanno un maggior numero di atomi di carbonio nella catena molecolare, fattore che incide sulla probabilità e quantità della formazione di idrocarburi incombusti (non completamente ossidati) allo scarico. Un altro esempio potrebbe essere la temperatura raggiunta in camera di combustione, determinata dalla regolazione del motore (alzata valvole, tempi di apertura, ritardo o anticipo dello scocco della scintilla, etc.), ma anche dalla dosatura della miscela (rapporto aria/combustibile): in base ad essa, la reazione di combustione potrebbe favorire di più la formazione di determinati prodotti piuttosto che di altri.

3.1 Inquinanti immessi in atmosfera

3.1.1 Ossidi di azoto (NOx)

Durante il processo di combustione, per effetto delle alte temperature le molecole di ossigeno e di azoto, presenti nel combustibile e provenienti principalmente dall'aria aspirata dal motore, vengono decomposte in atomi di ossigeno ed azoto. Questi ultimi, a loro volta, si ricombinano, dando luogo principalmente a monossido di azoto (NO) e diossido di azoto (NO_2). Meno frequente, ma comunque altrettanto possibile, è la formazione di ossido di diazoto (o protossido di azoto, N_2O), triossido di azoto (N_2O_3) e pentossido di azoto (o anidride nitrica, N_2O_3).
Nei motori ad accensione comandata che operano in condizioni di funzionamento prossime a quelle stechiometriche, le emissioni di NOx sono in pratica costituite unicamente da NO. L'NO_2 è presente in quantitativi importanti principalmente nei motori ad accensione per compressione.

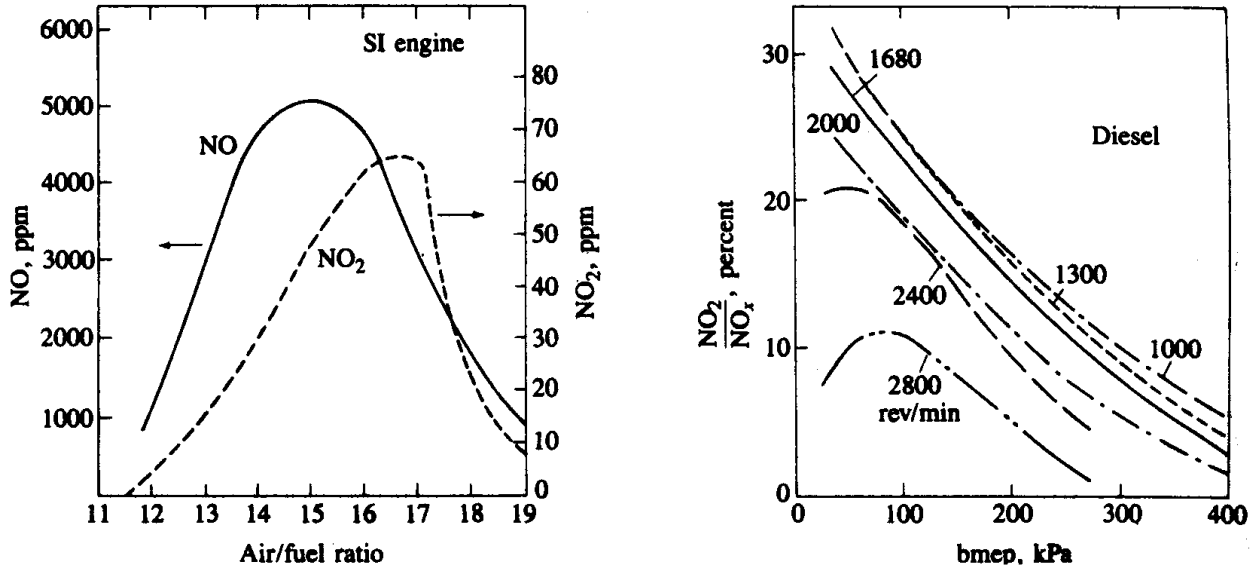


Figura 18 Quantità di NOx emesse dai motori benzina e diesel

Durante il processo di combustione, le elevate temperature raggiunte nella zona di reazione spezzano il legame molecolare di ossigeno ed azoto contenuti nell'aria di aspirazione. I prodotti risultanti si ricombinano nei gas combusti alle spalle del fronte di fiamma per dare NO. Infatti, i principali fattori che determinano la formazione degli ossidi di azoto sono il picco di temperatura raggiunto in camera di combustione e la concentrazione di ossigeno presente nel cilindro, anche se altri parametri potrebbero influenzare il processo come dosatura, frazione di gas residui, anticipo di accensione, velocità angolare dell'albero motore, temperatura delle pareti del cilindro, geometria del sistema di combustione e umidità dell'aria ambiente.
Nella successiva fase di espansione, quando i gas combusti si raffreddano, le reazioni chimiche che coinvolgono gli NOx si bloccano, pertanto i livelli degli NO rilasciati

allo scarico del motore sono molto maggiori rispetto a quelli che si avrebbero nelle condizioni di equilibrio chimico alla temperatura di scarico del motore.
Esistono vari meccanismi di formazione degli NOx, in particolare per la formazione dell'ossido di azoto NO si utilizza il modello cinetico a 6 equazioni proposto da Lavoie et al. (1970); le sei equazioni sono le seguenti:

(1)	$NO + N \leftrightarrow N_2 + O$	+361 kJ
(2)	$N + O_2 \leftrightarrow NO + O$	+133 kJ
(3)	$N + OH \leftrightarrow NO + H$	+165 kJ
(4)	$H + N_2O \leftrightarrow N_2 + OH$	+ 261 kJ
(5)	$O + N_2O \leftrightarrow N_2 + O_2$	+332 kJ
(6)	$O + N_2O \leftrightarrow NO + NO$	+152 kJ

Le 6 equazioni introdotte da Lavoie et al. permettono di distinguere due meccanismi di formazione termica degli NO: il principale meccanismo di formazione degli NO è costituito dalle equazioni (1)-(3) ed è detto meccanismo termico di Zeldovich-Keck, detto anche meccanismo di Zeldovich esteso (EZM: Extended Zeldovich Mechanism); il secondo meccanismo termico, descritto dalle equazioni (4)-(6), coinvolge come intermediario l'N_2O.

3.1.2 Idrocarburi incombusti (HC)

Gli idrocarburi incombusti (indicati con HC, abbreviazione di hydrocarbons) sono quegli idrocarburi presenti nei combustibili che, per varie ragioni o fattori, hanno subito un'incompleta combustione, ovvero non hanno completato il loro processo di ossidazione; le emissioni costituiscono l'1-2% della quantità di combustibile introdotto in camera di combustione. Ne esistono di diverso tipo: alcuni di questi sono inerti e non reattivi per quanto riguarda la formazione dello smog fotochimico, altri invece lo sono, e altri ancora nuocciono alla salute umana. I motori ad accensione per compressione emettono idrocarburi incombusti con varietà maggiore rispetto a quelli ad accensione comandata (oltre 400 diversi composti organici).

Tranne che per il metano, se il tempo fosse sufficiente, tutti gli idrocarburi riuscirebbero completare il processo di ossidazione. Per questo si possono dividere in due classi:

- Idrocarburi incombusti totali (THC);
- Idrocarburi incombusti non metanici (NMHC).

Generalmente, si hanno diverse cause attribuite alla formazione di HC incombusti, alcune delle quali possono essere: depositi in camera di combustione oppure intrappolati negli interstizi, assorbimento da parte dell'olio lubrificante, spegnimento della fiamma dovuto alla vicinanza con la parete del cilindro o semplice incompleta combustione, combustibile non nebulizzato correttamente attraverso gli iniettori o anche il trafilamento, per esempio attraverso la valvola di scarico teoricamente chiusa o attraverso le fasce di ritenuta del pistone. Ogni fattore ha la sua percentuale di THC prodotta che ovviamente varia in base alle condizioni in cui il motore sta operando.

Gli idrocarburi, che subiscono una combustione incompleta e che sono stati "immagazzinati" nelle varie sorgenti, hanno comunque modo di completare il processo di ossidazione durante la post-combustione, ovvero diffondendosi e mescolandosi con i gas combusti; se la temperatura locale è ancora sufficientemente alta, il processo di ossidazione riprende e può continuare anche al di fuori della camera di combustione, come per esempio nei collettori e nel sistema di scarico. In ogni caso, gli idrocarburi che non partecipano al normale processo di combustione rappresentano dal 5% al 10% della quantità di combustibile introdotto e rappresentano una perdita importante per quanto riguarda la coppia e l'efficienza del motore.

Source	% of fuel escaping normal combustion	% of total HC engine-out emissions
Crevices	5.2	38*
Quench	0.5	5
Oil layers	1.0	16
Deposits	1.0	16
Liquid fuel	1.2	20
Exhaust valve leakage	0.1	5
TOTAL	9.0	100

*Blowby (0.6%) subtracted

Figura 19 Sorgenti e quantità emesse di idrocarburi incombusti

Esistono vari parametri motoristici che influenzano la formazione degli HC, alcuni dei quali sono molto rilevanti rispetto ad altri, come la dosatura piuttosto che l'anticipo di accensione: una dosatura leggermente più ricca, quindi con una quantità maggiore di combustibile nel cilindro, favorisce il raggiungimento di una temperatura più alta, positiva per il processo di ossidazione, anche se con una maggiore concentrazione nello strato di spegnimento a parete e negli interstizi, oltre che di una maggiore diffusione nello strato di olio a parete, ma una dosatura più povera crea una situazione per la quale ci sia più ossigeno che combustibile in camera, compensando quindi le minori temperature raggiunte. Quindi una buona soluzione sarebbe mantenere una dosatura prossima a quella stechiometrica.

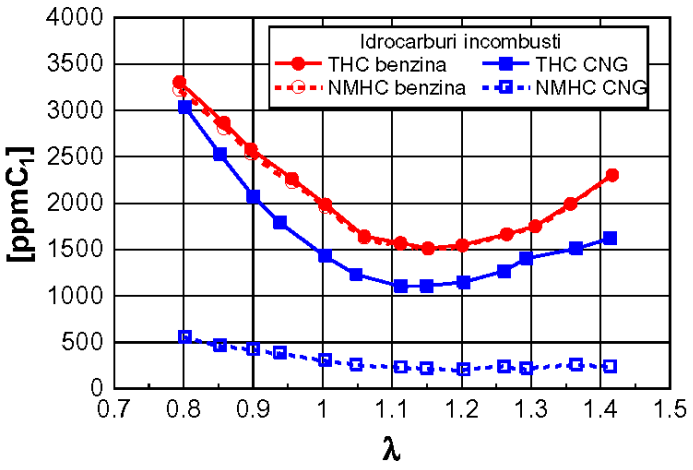


Figura 20 Idrocarburi incombusti in rapporto alla dosatura

Per quanto riguarda l'anticipo di accensione, un ritardo rispetto all'MBT timing (maximum brake torque timing, tempo di accensione ottimale per la massima potenza ed efficienza) favorisce minori picchi di pressione e quindi di immagazzinamento negli interstizi, ma al tempo stesso quegli HC immagazzinati vengono rilasciati con meno

intensità; una combustione ritardata, però, determina maggiori temperature dei gas combusti sia nella fase di espansione/scarico che nel sistema di scarico e un rapporto superficie/volume maggiore, quindi riduce le emissioni di HC. In sintesi, quest'ultimo effetto è quello prevalente, ma come si può vedere nel grafico sottostante, l'effetto rispetto alla dosatura è meno marcato.

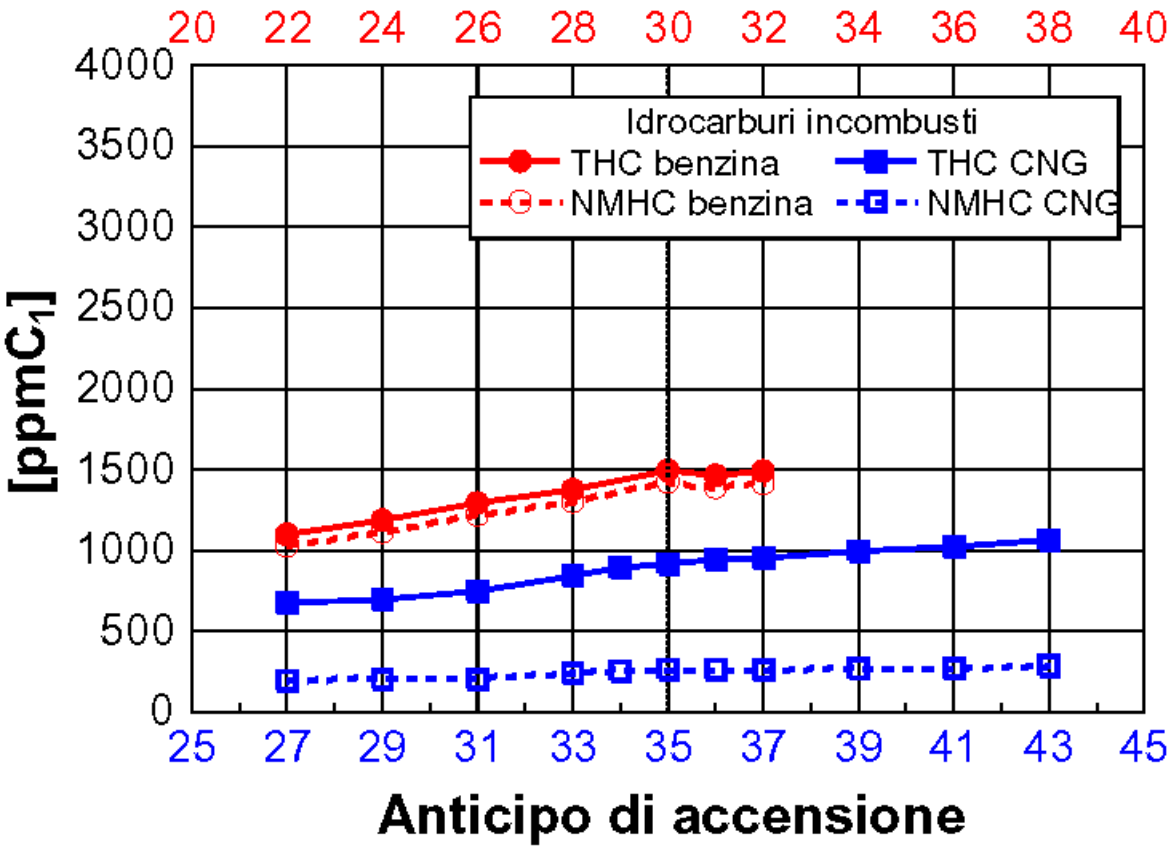


Figura 21 Effetto dell'anticipo di accensione sulle emissioni di HC

Altri effetti che contribuiscono alla formazione di HC sono la velocità angolare dell'albero motore, la temperatura delle pareti della camera di combustione, la geometria del sistema di combustione e l'EGR, cioè il ricircolo di gas esausti (Exhaust Gas Recirculation).

3.1.3 Particolato (PM)

Il particolato è definito come qualsiasi materiale presente nello scarico di un motore a combustione interna che può essere intrappolato su un mezzo filtrante di campionamento a 125° F (52° C).

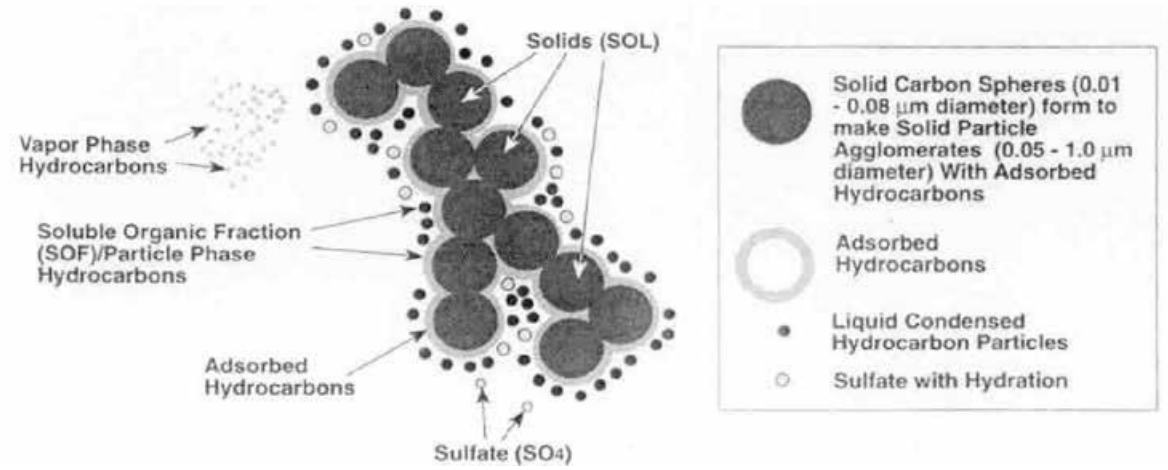


Figura 22 Composizione del particolato

Basandosi sull'analisi di metodi fisici e chimici, il PM può essere suddiviso in 3 gruppi:

- Frazione solida: carbonio o cenere;
- Frazione organica solubile (SOF): materiale organico derivato da olio lubrificante o combustibile;
- Particelle di solfato (SO_4): interazione tra acido solforico e acqua.

La composizione del particolato dipende principalmente dalla tecnologia del motore e dalle condizioni in cui viene eseguito il test; la maggior parte del particolato deriva principalmente dal carbonio presente nel combustibile, mentre la restante deriva perlopiù dall'olio lubrificante, ceneri e solfati. Tra tutti gli idrocarburi, quegli aromatici incidono in maniera significante e preponderante rispetto agli altro: 80% nella frazione secca e il 20% in quella solubile.

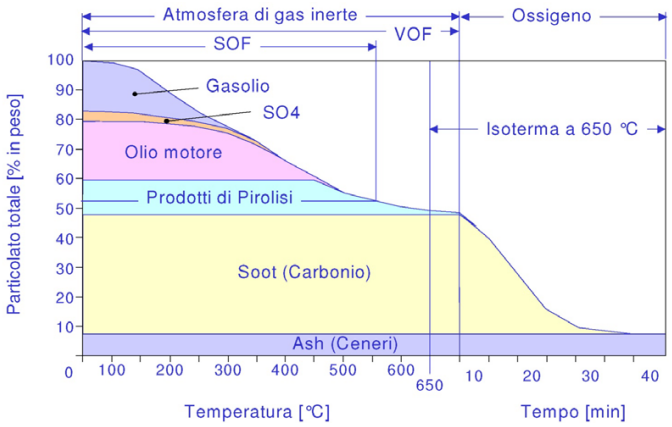


Figura 23 Composizione del particolato Diesel

In base alla loro dimensione, misurata tramite il diametro atmosferico (diametro di una sfera di densità unitaria con la stessa velocità di decantazione della particella nel fluido al riposo), le particelle che formano il particolato possono essere suddivise in tre gruppi:

- Nucleazione: sono le più numerose in termini di quantità, hanno un diametro compreso tra i 3 e i 40 nm e sono formate principalmente da idrocarburi e condensati di acido solforico idratato;
- Accumulazione: sono le più "pesanti" tra le particelle presenti, con una dimensione tra 0.03 e 0.5 μm, formate dall'agglomerazione di particelle carboniose e altri materiali, per esempio da carbonio solido e idrocarburi pesanti condensati, con presenza di composti solforici e metallici;
- Grossolano: queste particelle si formano attraverso la deposizione e successivo trascinamento del materiale particolato dal cilindro, dallo scarico o dal sistema di campionamento.

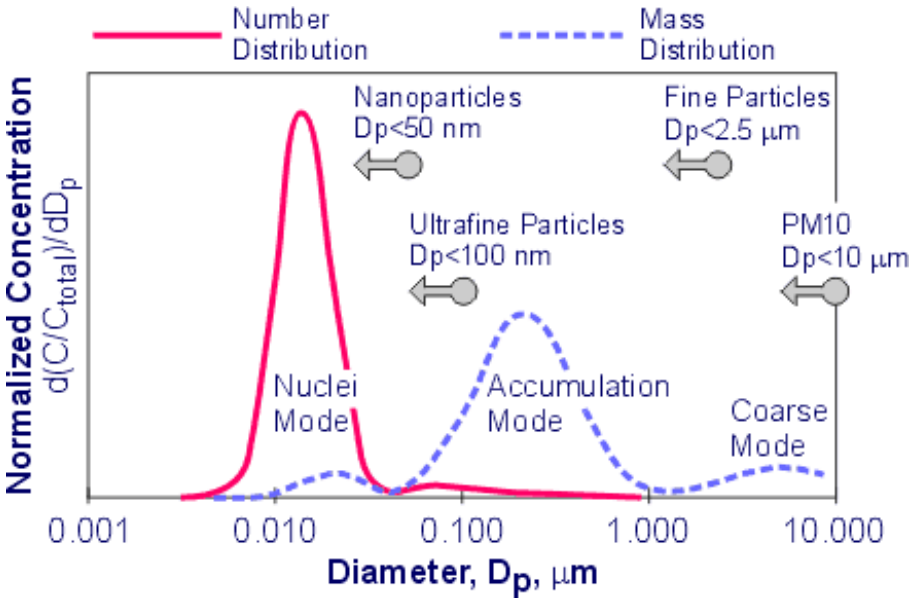


Figura 24 Distribuzione del particolato

3.1.4 Monossido di carbonio (CO)

La combustione, ovvero il processo di ossidazione del combustibile, avviene in tre fasi distinte: divisione degli idrocarburi primari in intermedi, ossidazione di questi ultimi in aldeidi, chetoni e monossido di carbonio (CO) ed infine ossidazione finale di esso in anidride carbonica, quindi CO in CO_2. Quest'ultima fase è molto lenta paragonandola alle altre due, quindi le emissioni di CO allo scarico derivano proprio dall'incompleta ossidazione in CO_2. Un fattore che determina l'elevata concentrazione di CO allo scarico è la rapida espansione dei gas combusti che, difatti, congela della reazione di ossidazione. Dato che questo processo si basa sulla reazione di un elemento con l'ossigeno, le emissioni di monossido di carbonio prodotte da motori Diesel sono trascurabili confrontandole con un motore a benzina, in quanto i primi operano prevalentemente in campo povero, ovvero con eccesso di aria, quindi di ossigeno. Infatti, il controllo delle emissioni di CO può risultare critico nei transitori lenti e veloci, come per esempio gli avviamenti a freddo e le accelerazioni, dove serve una miscela con dosatura ricca.

Il processo di ossidazione degli idrocarburi, studiato da Bowman nel 1975, è descritto con la seguente reazione:

$$RH \rightarrow R \rightarrow RO_2 \rightarrow RCHO \rightarrow RCO \rightarrow CO$$

dove la lettera R indica il radicale di un idrocarburo. Successivamente il CO reagisce a sua volta per formare CO_2:

$$CO + OH \xleftrightarrow{k_1^+, k_1^-} CO_2 + H$$

$$CO_2 + O \xleftrightarrow{k_2^+, k_2^-} CO + O_2$$

k_1^+, k_1^-, k_2^+ e k_2^- sono le costanti di velocità di reazione delle reazioni dirette ed inverse.

A causa di queste costanti, per tutti i livelli di dosatura bisogna aspettarsi concentrazioni significative di CO allo scarico: alle alte temperature raggiunte durante la combustione (T≈2800K), le velocità di reazioni sono abbastanza elevate da raggiungere un equilibrio chimico. Quindi anche se è presente una quantità di ossigeno sufficiente a ossidare tutto il CO in CO_2, quest'ultima può dissociarsi in CO ed OH oppure in CO e O_2 per effetto dell'equilibrio chimico.

3.2 Effetti sulla salute e sull'ambiente

Tutte le emissioni dagli scarichi dei motori inevitabilmente hanno un impatto nocivo, sia per la salute degli esseri umani, sia per l'ambiente e l'atmosfera terrestre. Ogni inquinante emesso influisce in maniera più o meno importante riguardo l'inquinamento, sia a livello di quantità che di pericolosità.

3.2.1 Idrocarburi incombusti e monossido di carbonio

Data la loro alta tossicità, quelle di HC e CO sono le emissioni che più vengono tenute sotto controllo e si cerca di contenere al massimo. Gli idrocarburi e il monossido di carbonio hanno un effetto molto negativo sulla salute umana, in quanto provocano effetti altamente dannosi al corpo umano, quali malattie e, in certi casi, anche la morte.

Infatti, alcuni composti a base di HC sono cancerogeni: gli idrocarburi incombusti dalla più alta pericolosità appartengono in maggioranza alla famiglia degli "aromatici", come il benzene. Si tratta di una sostanza che viene assorbita nel sangue attraverso la respirazione e che, come confermano studi dell'Organizzazione Mondiale della Sanità, ha elevate proprietà cancerogene e favorisce l'insorgere di malattie ematologiche gravi, come la leucemia. Anche altri tipi di aromatici, i policiclici o IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici), hanno proprietà cancerogene. Tra questi il più tossico, dannoso anche a concentrazioni modeste, risulta il benzopirene, peraltro presente anche nel fumo delle sigarette.

Il monossido di carbonio, invece, è un gas incolore, inodore e insapore, perciò non può essere "rilevato" dal corpo umano se viene inspirato, il che lo rende ancora più pericoloso. Ha un effetto estremamente nocivo per la salute umana, in quanto è un'emotossina: entrando nel sistema circolatorio, si lega all'emoglobina presente nei globuli rossi, la quale ha il compito di trasportare l'ossigeno in tutto il corpo, formando un legame molto più stabile e impedendo la sua naturale funzione.

3.2.2 Anidride carbonica (CO_2)

L'anidride carbonica è un altro ossido del carbonio immesso nell'atmosfera come prodotto della combustione interna; è formato da un atomo di carbonio e due di ossigeno. A temperatura ambiente si presenta come un gas incolore e inodore ed è naturalmente presente nell'atmosfera, nell'idrosfera e nella biosfera. Questo, insieme ad altri gas, è considerato un gas "serra", ovvero un gas capace di trattenere, in maniera consistente, una parte considerevole della componente nell'infrarosso della radiazione solare che colpisce la Terra ed è emessa dalla superficie terrestre, dall'atmosfera e dalle nuvole. Tale proprietà causa il fenomeno noto come "effetto serra", cioè la situazione per la quale tutti questi gas, trattenendo parte dell'energia termica rilasciata dal Sole, contribuiscono alla regolazione della temperatura dell'atmosfera terrestre, in questo caso facendola innalzare. Come risultato, si ha che da qualche decennio, in particolare dall'inizio dell'era industriale, le emissioni di CO_2 sono state via via maggiori, contribuendo all'innalzamento della temperatura terrestre fino ad arrivare ad una situazione di surriscaldamento globale:

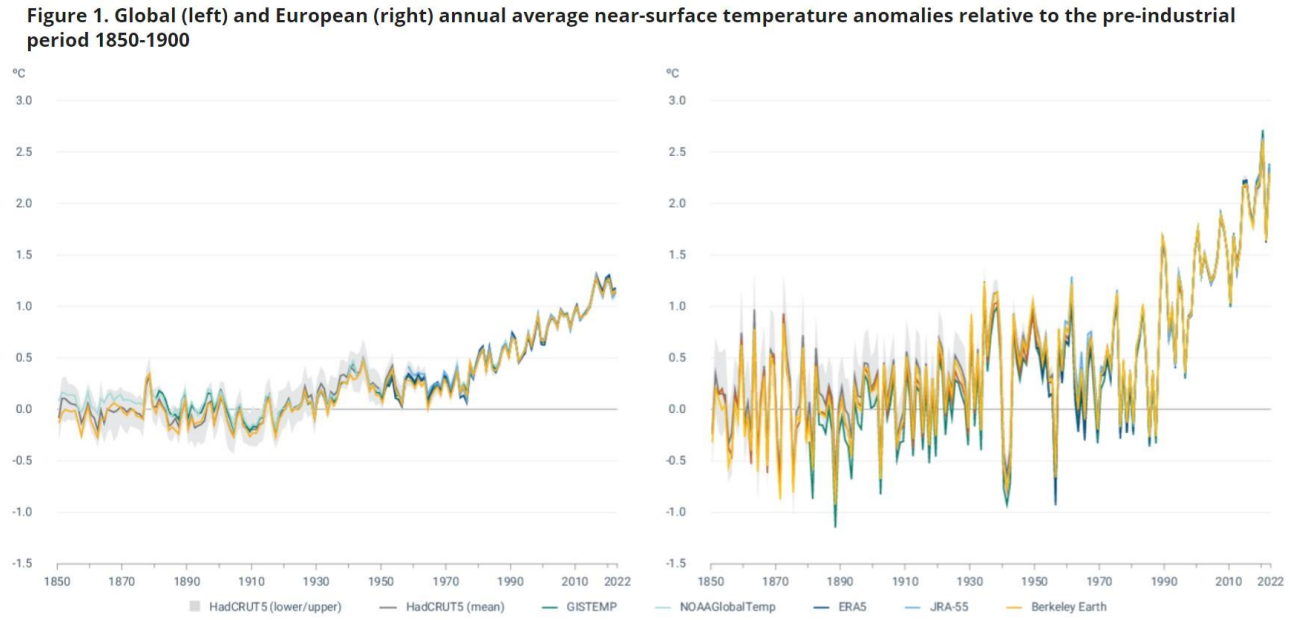


Figura 25 Andamento temperatura terrestre [4]

Ecco perché la quantità di emissioni di questo inquinante occupa un posto rilevante per quanto riguarda il suo contenimento e la necessità di ridurne il valore: nel 2021, le emissioni di gas a effetto serra generate dalle attività economiche nell'UE hanno raggiunto i 3,6 miliardi di tonnellate di CO_2 equivalente, il 22% in meno rispetto al 2008. L'anidride carbonica ha rappresentato quasi l'80% del volume di tutte le emissioni di gas a effetto serra. [3]

I valori di emissioni di anidride carbonica sono rappresentati dall'immagine sottostante:

Figura 26 Emissioni di anidride carbonica [5]

Nel grafico sono indicati due indicatori: in blu le emissioni registrate attraverso il ciclo di guida NEDC (New European Drive Cycle), mentre in rosso quelle registrate attraverso il ciclo WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure). Come si può evincere, quest'ultimo ha sostituito il primo, entrando in vigore nel 2018.

Anche se il grafico mostra un andamento negativo, i valori attuali sono comunque abbastanza importanti, seppur accettabili, ma bisogna considerare che questo grafico mostra unicamente le emissioni di CO_2 dovute ai nuovi veicoli prodotti, adibiti al trasporto di persone, non considerando tutte le altre fonti di emissioni di anidride carbonica, come anche il trasporto di beni materiali o altri modalità di trasporto, come quello marittimo ed aereo; quindi sarebbe in ogni caso positivo se si riuscisse a far diminuire questi valori il più possibile.

3.2.3 Particolato

Il particolato ha effetti diversi sulla salute umana e animale a seconda dell'origine (naturale, antropica, ecc.) e delle dimensioni delle polveri; nella maggior parte dei casi il particolato ha effetti negativi sulla salute umana, anche mortali. In particolare, le particelle di dimensioni minori di 10 μm sono potenzialmente più pericolose, in quanto possono penetrare i polmoni e addirittura essere convogliate all'interno del flusso sanguigno. In base all'analisi dell'AEA (Agenzia Europea dell'Ambiente), l'inquinamento atmosferico continua a rappresentare un rischio significativo per la salute in Europa, causando malattie croniche e decessi prematuri. Nel 2020 il 96 % della popolazione urbana dell'UE è risultato esposto a concentrazioni di particolato fine ($PM_{2,5}$) superiori alla soglia di 5 microgrammi per metro cubo ($\mu g/m^3$) d'aria stabilito dalle linee guida dell'OMS. [6] Tra i disturbi attribuiti al particolato fine e ultrafine (PM_{10} e soprattutto $PM_{2,5}$) vi sono patologie acute e croniche a carico dell'apparato respiratorio (asma, bronchiti, enfisema, allergia, tumori) e cardio-circolatorio (aggravamento dei sintomi cardiaci nei soggetti predisposti).

L'inquinamento atmosferico nuoce anche alla biodiversità e danneggia le colture agricole e le foreste; in questo, il particolato ne è partecipe, in quanto produce vari effetti negativi, quali modifiche del clima, aumento di piogge acide, danni alla vegetazione, ma anche sui beni materiali che avvengono in termini di corrosione, piuttosto sentiti nel caso di monumenti. Inoltre, il particolato influisce sulla propagazione e sull'assorbimento delle radiazioni solari, sulla visibilità atmosferica e nei processi di condensazione del vapore acqueo, favorendo smog e nebbie. Difatti, si parla di "oscuramento globale", un'espressione che sta ad indicare la graduale riduzione dell'intensità dell'irraggiamento diretto sulla superficie terrestre. Tale fenomeno, che varia a seconda delle aree coinvolte, è stato osservato a partire dagli anni 1950 e ha fino ad ora compensato (e dunque attenuato) parzialmente gli effetti del riscaldamento globale, in termini difficilmente quantificabili. La diminuzione dell'emissione di particolato in atmosfera in aree come l'Europa sta riducendo tale fenomeno.

3.2.4 Ossidi di azoto e di zolfo

Gli ossidi di azoto, in particolar modo il biossido di azoto (NO_2) sono sostanze inquinanti dell'atmosfera e aggravano le condizioni dei malati di asma, bambini e chi soffre di malattie respiratorie croniche o di malattie cardiache, in ogni caso superata la soglia di 10 ppm (da considerare essere una concentrazione migliaia di volte maggiore anche di ambienti urbani in cui difficilmente si superano i 0.05 ppm) insorgono problemi nella respirazione polmonare ed edemi polmonari, mentre già con 15 ppm si ha irritazione delle mucose e degli occhi, mentre la presenza nell'aria è avvertibile a 3 ppm con un odore pungente. Tra gli effetti a lungo termine si possono annoverare le alterazioni del tessuto e delle cellule dei polmoni e aumento della suscettibilità alle infezioni agli stessi, mentre si sospettano possibili danni sull'apparato cardio-vascolare quali ischemie, aritmie e scompensi cardiaci. A livello ambientale, alcuni di essi in presenza di radiazione solare possono reagire con l'ossigeno formando ozono e altri composti del cosiddetto "smog fotochimico" se in presenza anche di idrocarburi incombusti (HC). Il triossido ed il pentossido di diazoto sono solubili in acqua e con l'umidità atmosferica possono formare acido nitroso e acido nitrico, entrambi presenti nelle cosiddette "piogge acide".

Gli ossidi di zolfo, invece, derivano principalmente dalla combustione dei combustibili fossili, utilizzati per alimentare i motori, nei quali vi è dello zolfo, il quale si presenta come impurezza; i principali inquinanti sono il biossido (o anidride solforosa, SO_2) e il triossido di zolfo (o anidride solforica, SO_3); quest'ultima è un composto chimico molto pericoloso a causa della sua reattività. Essa, infatti, emette modeste quantità di fumo reagendo con l'aria ed esercita un'energica azione disidratante su molte sostanze organiche, carbonizzandole. Se inalata, può reagire con l'acqua delle mucose nasali e della saliva trasformandola in acido solforico (H_2SO_4), sostanza che può formarsi anche reagendo con l'acqua piovana tramutandola in pioggia acida. Il biossido di zolfo è un forte irritante delle vie respiratorie: un'esposizione prolungata a concentrazioni anche minime (alcune parti per miliardo, ppb) può comportare faringiti, affaticamento e disturbi a carico dell'apparato sensoriale (come occhi e naso). Inoltre, se combinato con il particolato, l'anidride solforosa è in grado di arrivare nelle parti più interne dei polmoni, comportando danni all'apparato respiratorio anche in concentrazioni minime. La concentrazione di SO_2 nell'atmosfera può influenzare l'idoneità dell'habitat per le comunità vegetali, così come per la vita animale. Inoltre, le emissioni di questo inquinante sono un precursore delle piogge acide e del particolato atmosferico.

Capitolo 4

Soluzioni differenti dal tradizionale ICE

I motori a combustione interna offrono una soluzione per quanto riguarda la propulsione dei mezzi di trasporto. Ma come ben noto, questi motori utilizzano dei combustibili derivati da fonti fossili, la quale energia generata è responsabile dell'incremento di sostanze inquinanti e gas serra nell'atmosfera, nonché di sostanze nocive per la salute umana.

La produzione di questi combustibili fossili non è infinita: i giacimenti da cui si estraggono le materie dalle quali si producono i combustibili sono limitati e prima o poi non saranno più sufficienti a soddisfare la domanda mondiale. Inoltre, questi giacimenti sono situati in Paesi dove sono spesso soggetti a tensioni geopolitiche, dato che sono contesi dalla maggior parte delle nazioni che vorrebbero accaparrarsene. Come risultato, si hanno delle conseguenze e ripercussioni sulle persone e sulla società dei Paesi più poveri, specialmente in Medio Oriente.

Per questo, si è alla ricerca di soluzioni differenti e innovative rispetto al tradizionale motore a combustione interna, sia per affidarsi a fonti di energia rinnovabili, quindi di durata maggiore rispetto ai combustibili fossili, sia soprattutto per cercare di utilizzare le stesse per fare in modo di impattare in maniera molto minore sull'inquinamento ambientale, immettendo nell'atmosfera ridotte quantità di emissioni nocive o addirittura cercare di azzerarle: a questo proposito, di parla di "mobilità sostenibile", ovvero cioè di produrre mezzi di trasporto muniti di propulsori che utilizzino queste energie "pulite" per salvaguardare l'ambiente e la salute umana.

4.1 Metodi e combustibili alternativi

Attualmente, la ricerca in questo ambito ha prodotto delle soluzioni innovative, per esempio migliorando gli attuali motori a benzina e Diesel, quindi migliorandone l'efficienza e introducendo nuovi sistemi di alimentazione (Common Rail e Multijet, iniezione diretta, dosatura e fasatura delle valvole variabili in funzione della domanda da parte del guidatore) e nuovi sistemi di post-trattamento dei fumi di scarico (filtri SCR ed antiparticolato, catalizzatori ossidanti).

Altre soluzioni ricorrono a sistemi parzialmente o totalmente innovativi, come l'introduzione di uno o più motori elettrici in grado di lavorare in maniera sinergica con il motore a combustione interna o addirittura sostituirlo del tutto: in questo caso si parla rispettivamente di HEV (Hybrid Electric Vehicle) o di PEV (Pure Electric Vehicle). In realtà, la distinzione tra le varie tipologie di veicoli elettrici è molto più vasta, differenziandosi per il grado di ibridizzazione del veicolo oppure per il tipo di alimentazione dei motori elettrici a bordo di esso: esistono propulsori la quale alimentazione proviene direttamente dalla batteria, chiaramente più potente, montata nell'autovettura, altri invece sono alimentati da celle a combustibile (altresì dette fuel cell). Il grado di ibridizzazione riguarda invece quanto è preponderante il motore elettrico in termini di potenza e fornimento di autonomia rispetto al motore a combustione interna: dal semplice supporto in fase di avvio di marcia o riserva di potenza in caso di scarsità di combustibile (range extender) alla piena combinazione dei due sistemi per far muovere il veicolo, o ancora al totale affidamento al propulsore elettrico per quanto riguardo la marcia, con variante che può riguardare l'installazione di un piccolo motore a combustione interna che funge da generatore di energia elettrica in grado di ricaricare all'occorrenza la fonte di energia elettrica: in questo caso il ruolo di range extender è ricoperto proprio dall'ICE.

Un'altra soluzione consiste nell'utilizzare altre fonti di energia con cui alimentare i motori a combustione interna da sostituire o aggiungere agli attuali combustibili, senza dover ricorrere a propulsori ausiliari, come per esempio l'utilizzo del GPL (Gas di Petrolio Liquefatti), del metano o del GNC (gas naturale compresso). In particolare, il GPL è usato come combustibile alternativo alla benzina, che sostituisce totalmente quest'ultima come fonte di energia, mentre il metano e il GNC possono essere usati su motori alimentati a benzina come combustibile aggiuntivo, stoccati in serbatoi opportuni e dedicati; anche in quest'ultimo caso si può parlare di veicolo ibrido, ma in termini di combustibile utilizzato, ovvero cioè di vetture bi-combustibili.

4.2 L'idrogeno

Come ulteriore alternativa ai combustibili tradizionali, potrebbe rivelarsi utile e interessante l'impiego di idrogeno nei sistemi di alimentazione degli attuali motori a combustione interna.

L'idrogeno è il primo elemento della tavola periodica, nonché il più leggero e più abbondante nell'universo osservabile. Il suo isotopo più comune è il prozio, un atomo formato da un protone e un elettrone, ma allo stato libero, a temperatura ambiente (298 K o 25 °C) e pressione atmosferica, l'idrogeno si trova sottoforma di gas biatomico incolore, inodore, insapore ed altamente infiammabile, avente formula H_2. Sulla Terra è scarsamente presente allo stato libero e molecolare, ma lo si può trovare nell'acqua (H_2O) e in tutti i composti organici ed organismi viventi; deve quindi essere prodotto artificialmente ed è utilizzato in vari modi, come per esempio per la produzione di ammoniaca, nell'idrogenazione degli oli vegetali ed è già impiegato come combustibile in altri settori come nell'aeronautica (in passato nei dirigibili) e nelle reazioni termonucleari allo stato di plasma.

Proprietà	**H_2 (idrogeno)**	**CH_4 (metano)**	**C_8H_{18} (ottano)**
Peso molecolare (kg/kmol)	2.016	16.043	114.236
Densità (kg/m^3)	0.08	0.65	692
Coefficiente di diffusione in aria (cm^2/s)	0.61	0.16	~0.07
Energia minima per l'accensione (mJ)	0.02	0.28	0.28
Potere calorifico inferiore (MJ/kg)	120.0	50.0	44.3
Rapporto stechiometrico aria-combustibile in peso	34.2	17.1	15.0
Rapporto stechiometrico molecolare aria-combustibile	2.387	9.547	59.666
Intervallo di infiammabilità in aria (vol %)	4-75	5-15	1.1-6
Temperatura di auto-accensione in aria (K)	858	723	550
Velocità di fiamma (m/s)	1.85	0.38	0.37-0.40
Punto di ebollizione (K)	20.39	/	/
Calore specifico a pressione costante (kJ/kg K)	14.89	2.22	1.20
Temperatura di fiamma in aria (K)	2118	1948	2370
Energia di esplosione (g TNT/kJ)	0.17	0.19	0.25
Emissività di fiamma (%)	17-25	25-33	34-43

Figura 27 Proprietà dell'idrogeno comparate con metano ed ottano [7]

Dalle caratteristiche presenti nella tabella si può notare come un rilascio di idrogeno in atmosfera richieda una bassa energia di innesco e risulti facilmente infiammabile: a temperatura standard in un vasto intervallo di concentrazioni in aria è esplosivo per concentrazioni che vanno dal 4 al 75%; ciò significa che l'idrogeno è un combustibile assai reattivo, da trattare con molta attenzione durante il suo impiego per evitare esplosioni o incendi indesiderati e improvvisi, pertanto qualsiasi sorgente d'innesco dev'essere isolata.

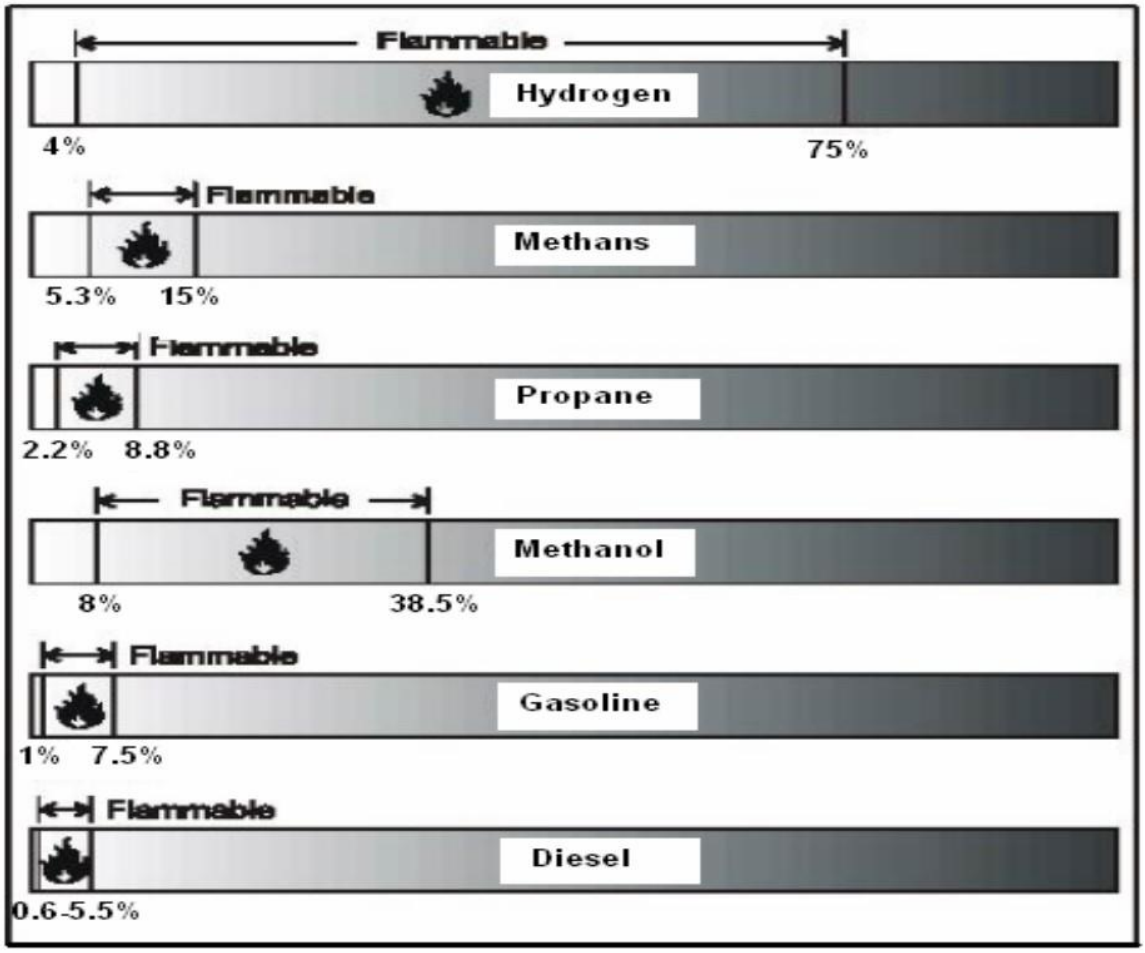


Figura 28 Intervalli di infiammabilità di alcuni combustibili

Come si può notare dalla figura soprastante, che mette a confronto gli intervalli di infiammabilità di diversi combustibili, l'idrogeno ha quello più esteso, nonché possiede anche il più alto contenuto energetico rispetto alla massa, ma il più basso in rapporto al volume, data la sua bassa densità (tabella successiva). Apparentemente, quindi, l'idrogeno sembra avere le caratteristiche più sfavorevoli, ma, come si vede, la benzina e il gasolio (o, meglio, i loro vapori) iniziano a bruciare molto prima, già con concentrazioni inferiori all'1%, risultando quindi molto più pericolosi da questo punto di vista.

	Idrogeno	Metano	Benzina*	Gasolio	GPL	Metanolo
Contenuto di energia per unità di massa [MJ/kg]	119,9	49,89	44,48	2,6	46,44	19,85
Contenuto di energia per unità di volume [MJ/l]	8,47(liq.)	20,88(liq.)	31,15	35,7	25,5	15,88

Figura 29 Contenuti energetici di diversi combustibili

Property	H_2–air $\lambda=1$ $\varphi=1$	H_2–air $\lambda=4$ $\varphi=0.25$	CH_4–air $\lambda=1$ $\varphi=1$	C_8H_{18}–air $\lambda=1$ $\varphi=1$
Volume fraction fuel (%)	29.5	9.5	9.5	1.65
Mixture density (kg/m^3)	0.85	1.068	1.123	1.229
Kinematic viscosity (mm^2/s)	21.6	17.4	16	15.2
Auto-ignition temperature (K)	858	>858	813	690
Adiabatic flame temperature (K)	2390	1061	2226	2276
Thermal conductivity (10^{-2} W/mK)	4.97	3.17	2.42	2.36
Thermal diffusivity (mm^2/s)	42.1	26.8	20.1	18.3
Ratio of specific heats	1.401	1.4	1.354	1.389
Speed of sound (m/s)	408.6	364.3	353.9	334
Air-to-fuel ratio (kg/kg)	34.2	136.6	17.1	15.1
Mole ratio before/after combustion	0.86	0.95	1.01	1.07
Laminar burning velocity, $\sim$360 K (cm/s)	290	12	48	45
Gravimetric energy content (kJ/kg)	3758	959	3028	3013
Volumetric energy content (kJ/m^3)	3189	1024	3041	3704

Figura 30 Proprietà di miscele idrogeno-aria, metano-aria e ottano-aria

L'idrogeno, avendo una densità relativamente più bassa, ha la tendenza a spostarsi verso l'alto molto velocemente, rendendo meno probabile il raggiungimento della soglia di concentrazioni minima per l'innesco, al contrario dei vapori di benzina che hanno una densità maggiore perfino dell'aria e aumentano la probabilità di arrivare più rapidamente al limite inferiore di infiammabilità. La sua potenza esplosiva è pari a circa 2.5 volte quella di un generico idrocarburo, ovvero cioè che la sua esplosione è molto più distruttiva e la sua durata è inversamente proporzionale all'energia liberata.

Alcuni pericoli derivanti dall'uso di tale elemento potrebbero nascere considerando la sua scarsa conducibilità elettrica, il che potrebbe portare all'accumulo di cariche elettrostatiche, fattore determinante alla formazione di scintille che potrebbero innescare la combustione, oppure che la fiamma della combustione dell'idrogeno è praticamente invisibile alla luce, caratteristica che può rivelarsi abbastanza critica nel momento in cui non ci si può rendere conto immediatamente che si stia sviluppando un incendio. Inoltre, ha la caratteristica di infragilire i metalli con cui viene a contatto, quindi bisogna scegliere con cura i materiali da mettere in gioco nel momento in cui si decide di farne uso.

Per quanto riguarda l'utilizzo come combustibile nei motori endotermici, l'idrogeno può essere usato nei motori SI in tre modi:

1. Introduzione attraverso il collettore di aspirazione:
   Viene introdotto dell'idrogeno freddo nel collettore attraverso una valvola;
2. Iniezione diretta nel cilindro:
   L'idrogeno è stoccato in forma liquida in un cilindro criogenico; una pompa manda questo liquido attraverso un piccolo scambiatore di calore dove è convertito in gas; l'idrogeno freddo previene il fenomeno della detonazione e riduce la formazione di NOx;
3. Come additivo alla benzina:
   In questo modo, l'idrogeno viene mescolato alla benzina prima di entrare nel cilindro e fatto reagire insieme ad essa, venendo innescato tramite la scintilla. [7]

4.2.1 Le prime applicazioni

Già a partire dagli anni ’70, il Jet Propulsion Laboratory della NASA pubblicò una serie di articoli sui benefici dell'aggiunta d'idrogeno nella combustione di idrocarburi nei motori termici convenzionali. Il sistema HFI (Hydrogen Fuel Injection) della NASA genera idrogeno durante la marcia e lo aggiunge alla benzina (costituita prevalentemente da isoottano, ma anche da benzene, cicloesano, n-decano, toluene, ecc.), creando una miscela di combustibile con un comportamento paragonabile ad un migliore numero di ottano. Il sistema si basava sulla generazione on board di idrogeno utilizzando il combustibile presente a bordo secondo la reazione di reforming con vapore, già all’epoca molto utilizzata nei processi industriali.

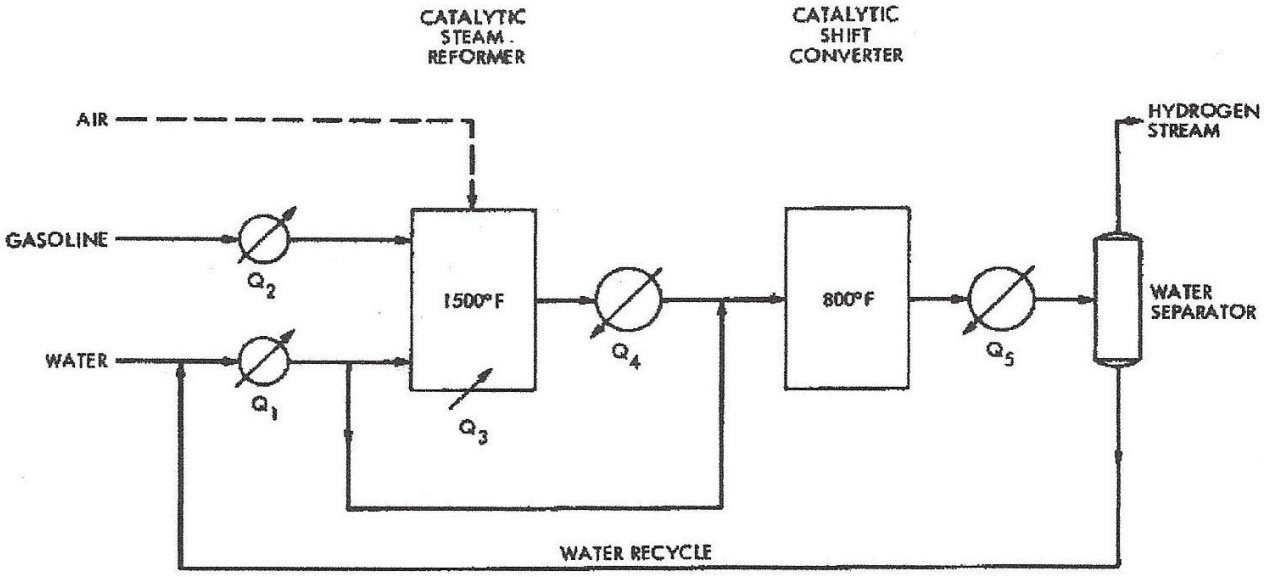


Figura 31 Processo industriale per la produzione di idrogeno

La miscela di vapore acqueo e idrocarburo viene riscaldata fino alla temperatura di 700°C a contatto con un catalizzatore al nickel per produrre una miscela di idrogeno e monossido di carbonio secondo una reazione endotermica (le lettere Q rappresentano gli scambiatori di calore).

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3CH_2$$

La miscela di gas ottenuta contiene CH_4 residuo, CO, H_2O e H_2. Il monossido di carbonio viene successivamente fatto reagire con vapore acqueo in una reazione esotermica di shift-conversion a temperatura inferiore, producendo altro idrogeno e anidride carbonica.

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

L’eccesso di vapore è fatto condensare e separato dal flusso di idrogeno prodotto.

Il Jet Propulsion Laboratory sviluppò inizialmente un primo sistema su scala ridotta che incontrò molti problemi legati soprattutto alle alte temperature di esercizio e alla difficoltà di separare i prodotti delle reazioni in piccoli spazi. Venne quindi semplificato il progetto utilizzando solo il primo step endotermico della reazione; il calore Q3 necessario venne fornito dell'aggiunta di aria ai reagenti permettendo all'idrocarburo di ossidarsi parzialmente e rilasciare calore.

Il generatore del progetto finale vantava, alle condizioni operative ottimali, un'efficienza termica dell'80%. L'incremento di efficienza del motore termico produceva una quantità di energia superiore a quella necessaria per la produzione di idrogeno, con conseguente risparmio di carburante. Si ottenne una migliore combustione, che comportava l'aumento della potenza, la riduzione dei consumi e un minore inquinamento. Inoltre, aumentava la durata del motore dal momento che riduceva i depositi carboniosi nei cilindri e nei condotti di scarico, dovuti all'incompleta combustione degli idrocarburi.

Tuttavia, è evidente come questo primo approccio al veicolo a idrogeno non rispecchi appieno la filosofia della mobilità sostenibile: se da un lato vengono effettivamente ridotte le emissioni dirette di NOx e CO_2 del motore termico utilizzando l'idrogeno, è altresì vero che per produrre quest'ultimo viene comunque impiegato un combustibile fossile, non rinnovabile.

Un'altra sperimentazione fu l'utilizzo di una miscela in fase gassosa chiamata idrometano, composta da idrogeno (fino al 30%) e metano. Questa miscela è utilizzata anche come combustibile nei motori a combustione interna per vari mezzi di trasporto, ed ha il vantaggio di una più rapida accensione, dal momento che l'idrogeno provoca l'accelerazione del fronte di fiamma, portando ad una più completa combustione. Lo si reputa in grado di abbattere del 50% le emissioni di ossido di azoto e di CO. Nel 2006 la Regione Emilia-Romagna, l'ENEA e Aster (consorzio tra Regione Emilia-Romagna, Università, Enti di Ricerca e Imprese) hanno avviato la sperimentazione sull'idrometano per autobus per il trasporto pubblico urbano. La sperimentazione, realizzata su due autobus urbani delle aziende dei trasporti ATM Ravenna e ATR Forlì, ha esplorato empiricamente la possibilità di impiegare miscele differenti di metano ed idrogeno, con risultati molto incoraggianti. A seguire, dal 2009 è attivo il "progetto MHyBus", finanziato dalla Commissione Europea, che ha l'obiettivo di indagare scientificamente il comportamento di un autobus per trasporto urbano, alimentato con una miscela di idrometano al 15% di idrogeno. Al progetto lavorano Regione Emilia-Romagna, ENEA, ATM Ravenna, SOL ed ASTER. Oltre alla verifica di emissioni ed efficienza del motore, il progetto si prefigge l'ottenimento dell'autorizzazione a circolare in esercizio ed ha per questo istituito un tavolo tecnico con il Centro Prove Autoveicoli di Bologna. Nel settembre 2007 La Fiat ha presentato il prototipo della Fiat Panda Aria, dotata di un motore bicilindrico da 900 cc. in grado di marciare

con una miscela di metano e idrogeno (al 30%), con emissioni di 69 g/km di CO_2 e possibilità di tornare alla benzina, grazie al motore flex-fuel. Il progetto incorpora molte altre "tecnologie verdi", come la riduzione di peso grazie all'utilizzo di pannelli in eco-resina trasparente, alluminio in alcune strutture portanti, sedili rivestiti di cotone, imbottiture in fibra di cocco e altri accorgimenti ecologici.

4.2.2 Impiego veicolare attuale

Al giorno d'oggi, l'utilizzo dell'idrogeno nei veicoli è limitato a tecnologie relativamente semplici, ma difficilmente realizzabili o inconvenienti dal punto di vista energetico e di efficienza. Una di queste tecnologie è definita dall'utilizzo di pile a combustibile (o anche dette celle a combustibile, dall'inglese fuel cells), ovvero dei dispositivi in grado di funzionare come delle pile o batterie.

Per definizione, una batteria è un dispositivo in grado di fornire energia elettrica proveniente da una fonte che è immagazzinata al suo interno. Le celle a combustibile, invece, hanno la propria fonte di energia custodita all'esterno, per esempio in un serbatoio contenente idrogeno: la generazione di energia elettrica proviene dalla reazione dello stesso con l'ossigeno dell'aria.

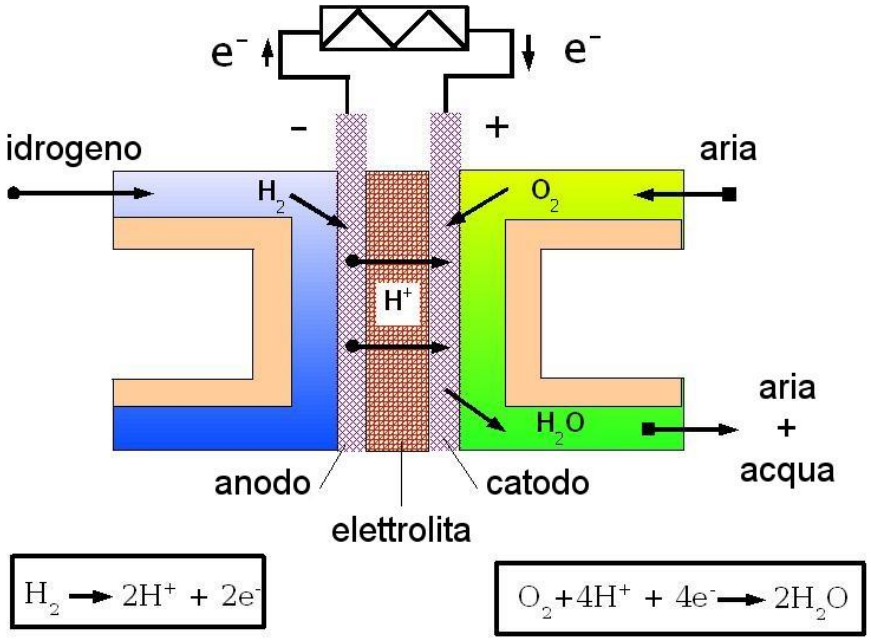


Figura 32 Schema di funzionamento di una cella a combustibile

In questo caso, non è corretto definire la durata di una pila a combustibile, in quanto la durata della stessa è determinata dalla quantità della fonte di energia (in questo caso idrogeno) contenuta all'esterno. La cella, quindi, funge da convertitore di energia più che di una batteria in sé, e svolge il suo ruolo fino a quando non si smette di fornire nuovo combustibile. L'energia elettrica prodotta da questa pila viene poi utilizzata per alimentare il motore o i motori elettrici presenti a bordo del veicolo, permettendo la trazione, ed essendoci presente un powertrain elettrico, non sarebbero presenti gli eventuali attriti dovuti ai cambi meccanici e alla trasmissione di energia meccanica, organi fondamentali in un veicolo dotato di motore endotermico. Un altro aspetto positivo consisterebbe nel lavorare in maniera costante al valore di rendimento massimo, al contrario dei motori a combustione interna, la quale efficienza dipende dal numero di giri: questo valore è di circa 45%-50%, ma aggiungendoci un eventuale

processo di generazione on board di idrogeno (come il fuel reforming) con efficienza del 70%, si ha come risultato finale un rendimento del 30%, valore relativamente basso se confrontato con i motori a benzina (25%) e diesel (fino al 45%). Quindi, queste fuel cells vengono implementate negli attuali veicoli a tecnologia ibrida al fine di aumentarne l'autonomia: attraverso il comando dell'acceleratore, il controllo elettronico, in collegamento al motore elettrico, trasforma l'energia elettrica in meccanica e ne trasmette la potenza.

Tuttavia, bisogna tener conto del fatto che l'idrogeno è un vettore energetico e per questo non lo si può avere a disposizione come fonte di energia primaria a cui attingere in caso di bisogno, ma bisogna produrlo. Questo processo di produzione richiede una fonte di energia, per esempio elettrica proveniente dalla conversione dell'energia chimica contenuta nel combustibile fossile, che poi sarà contenuta nell'idrogeno stesso, che verrà rinconvertito in energia elettrica per alimentare il motore. Ipotizzando che questo processo di produzione sia esente da perdite energetiche, tenendo conto dell'intero procedimento, il bilancio energetico finale evidenzierà comunque un risultato scarso: a seconda del modo in cui l'idrogeno viene prodotto, si può arrivare ad avere una perdita di oltre il 70% dell'energia in entrata). Inoltre, le celle a combustibile sono soggette ad elevati costi e scarsa affidabilità.

Un altro modo per poter sfruttare l'idrogeno è di usarlo direttamente come combustibile, utilizzando dei motori progettati appositamente, dai costi elevati, in fase di sviluppo e non prodotti in grosse quantità. Gli attuali motori non sarebbero compatibili se alimentati ad idrogeno: la combustione di quest'ultimo raggiunge temperature talmente elevate che l'azoto molecolare (N_2) si dissocia in atomi, diventando molto reattivo con il metallo costituente il motore. Inoltre, la reazione di combustione dell'idrogeno necessita di un grosso quantitativo di ossigeno, il che rende necessario l'aggiunta di un compressore per aumentare l'apporto di aria, nonché di un intercooler per raffreddarla.

4.2.3 L’idrogeno impiegato come additivo

Un ulteriore opzione di utilizzo per quanto riguarda l’idrogeno consiste nell’impiegarlo come additivo nei combustibili utilizzati per alimentare i motori endotermici. Come negli altri sistemi, per esempio l’aggiunta di un’alimentazione a metano o GPL, quello a idrogeno necessita di opportune modifiche all’impianto veicolare, e dato che l’elemento è un vettore energetico, occorre produrlo prima di poter essere utilizzato. Per questo, le alternative possibili sarebbero di avere a disposizione idrogeno puro stoccato in un serbatoio oppure produrlo direttamente a bordo del veicolo, scelta più conveniente per motivi impiantistici e di sicurezza.

Quindi, il sistema prevederebbe l’utilizzo di:

- Una fonte di idrogeno;
- Uno o più generatori on board, all’occorrenza anche la presenza di un serbatoio;
- Attrezzatura ed impianto di monitoraggio e controllo dei vari parametri, sia di combustione che di diagnostica.

È bene specificare che questa opzione di alimentazione può essere attuata sia su motori a benzina che motori diesel, seppur con qualche differenza per l’introduzione di idrogeno all’interno di essi. L’idrogeno, infatti, può essere miscelato con l’aria e compresso prima di entrare all’interno del motore e la portata varia in base all’arricchimento voluto, ovvero cioè per stabilire la quantità di idrogeno e di combustibile che devono reagire insieme. Per fare questo, le più recenti tecnologie utilizzano un sistema di controllo computerizzato, tramite per esempio delle centraline programmate per lo scopo, in grado di stabilire la quantità di idrogeno che deve essere inviato in base a uno o più parametri stabiliti a priori, come per esempio il comando dell’acceleratore, che stabilisce il carico istantaneo del veicolo.

Impiegare l’idrogeno come additivo aumenta l’efficienza termica del motore, in quanto:

1. Ha una bassa energia di accensione, che permette un’ignizione veloce;
2. La miscela in sé incrementa la sua temperatura di autoaccensione; ciò consente di poter aumentare il rapporto di compressione, aumentando conseguentemente il rendimento teorico e reale;
3. La velocità di combustione della miscela idrogeno/combustibile diventa più alta sia della miscela aria/combustibile che di quella aria/idrogeno, avvicinando il fenomeno della combustione a quello isocoro del ciclo ideale;
4. Si ha una diffusività elevata che favorisce una migliore miscelazione con l’aria comburente.

Il tutto ha ovviamente bisogno di regolazioni e calibrazioni per poterne trarre il massimo dei benefici: la pressione di iniezione dell'idrogeno dev'essere adattata, bisogna installare dei sensori che monitorino le condizioni per evitare l'autocombustione, le turbolenze in camera di combustione devono essere eliminate.

Le prove svolte fino ad ora hanno condotto all'evidenza che l'aggiunta di idrogeno promuove la riduzione del consumo di combustibile, che è strettamente collegato all'efficienza termica.

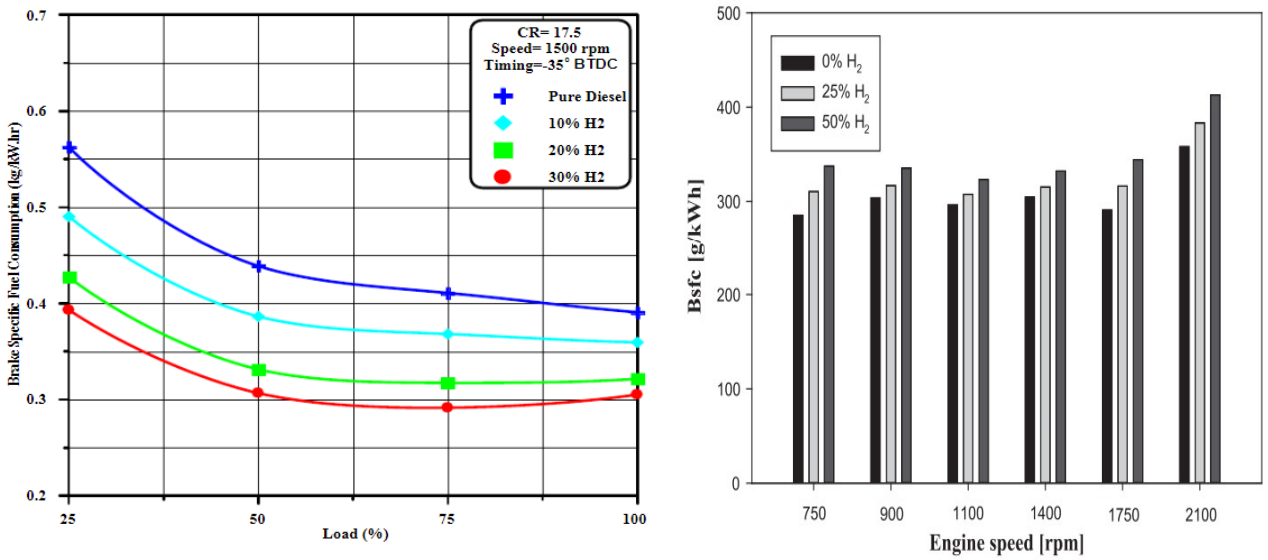


Figura 33 Andamento dei consumi in base al carico [8] e al numero di giri del motore [9] a diversi rapporti idrogeno/gasolio

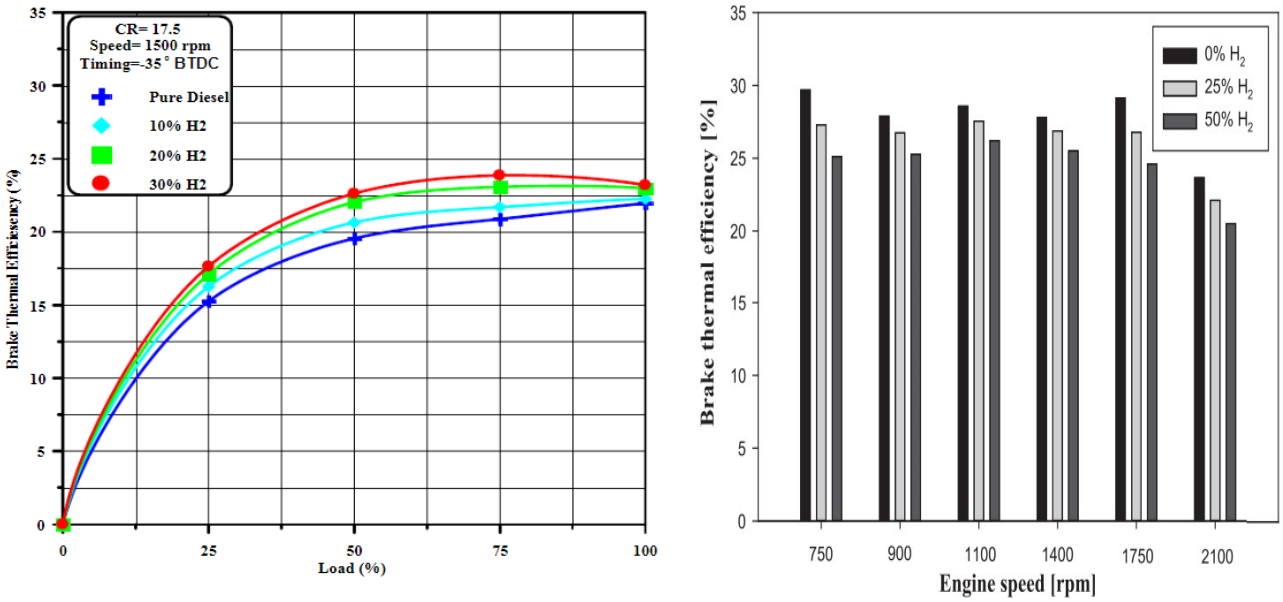


Figura 34 Andamento dell'efficienza termica in base al carico [8] e al numero di giri del motore [9] a diversi rapporti idrogeno/gasolio

L'aggiunta di idrogeno consente al motore di operare in condizioni di dosatura molto magra, ovvero con eccesso di aria rispetto al combustibile, specificatamente al di sotto dei normali valori per i quali la miscela non riuscirebbe a reagire e bruciare: si parla di "ultralean combustion". In questo modo, il risultato è una fiamma di combustione a

bassa temperatura che aumenta l'efficienza del motore, e una delle conseguenze è la riduzione di emissioni di CO, CO_2 e HC grazie anche alla velocità di propagazione di questa fiamma.

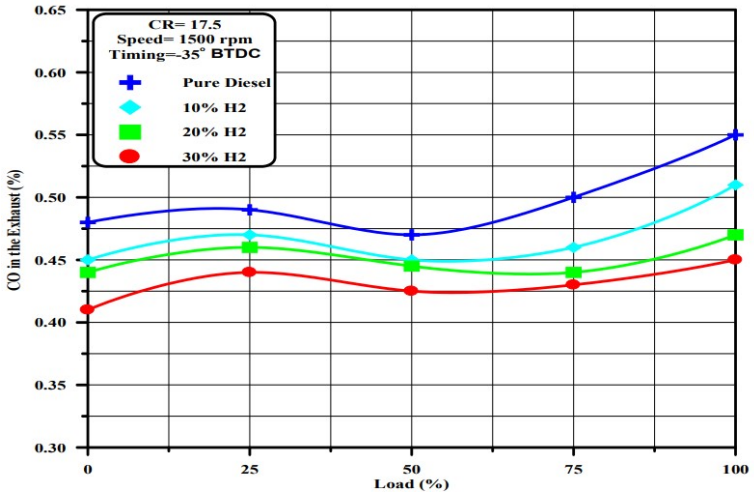


Figura 35 Andamento delle emissioni di CO allo scarico in base al carico [8]

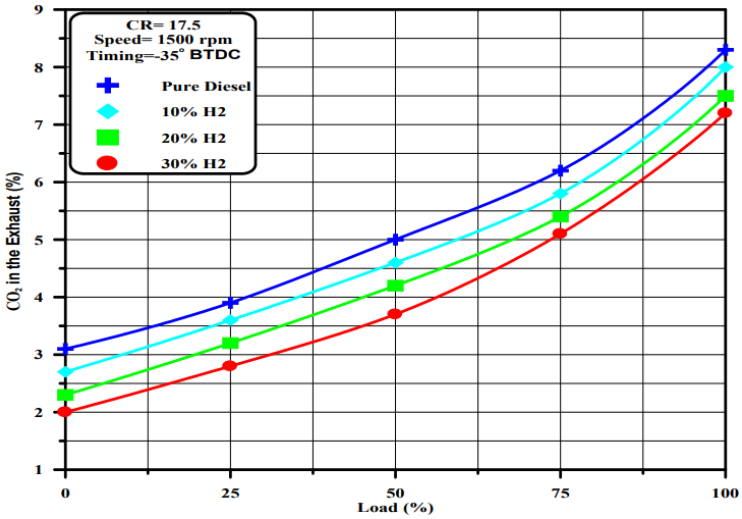


Figura 36 Andamento delle emissioni di CO_2 allo scarico in base al carico [8]

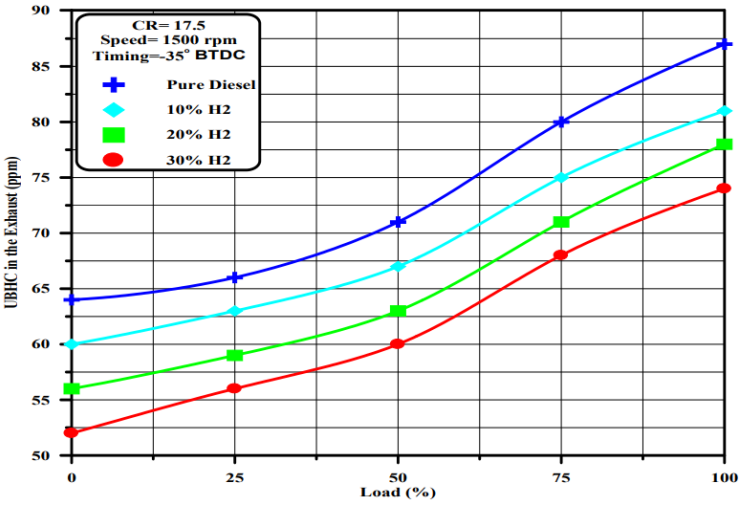


Figura 37 Andamento delle emissioni di HC incombusti allo scarico in base al carico [8]

Anche le emissioni di NOx possono essere diminuite, ma per farlo è necessario intervenire sul SOI (start of injection): in base alla quantità di idrogeno e soprattutto all'istante in cui la miscela viene iniettata, si può creare la situazione per la quale la temperatura massima raggiunta in camera non sia molto elevata, fattore determinante nella formazione di ossidi di azoto. Infatti, si può notare nel grafico seguente come anticipando l'iniezione prima del punto morto superiore (bTDC, before top down center) si raggiungano emissioni maggiori, in quanto l'anticipo favorisce pressioni e quindi temperature più elevate; viceversa ritardandolo, le emissioni risultano minori.

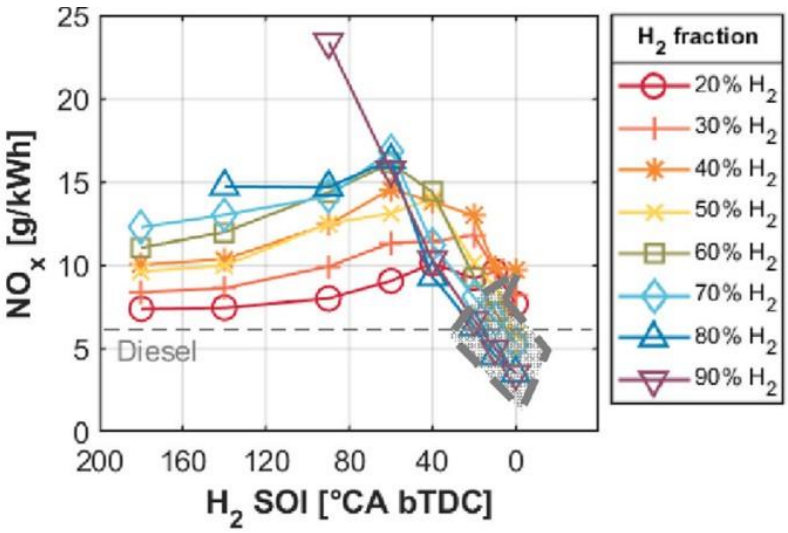


Figura 38 Andamento delle emissioni di NOx in base al SOI a diverse frazioni di idrogeno [10]

Inoltre, anche l'opacità dei fumi di scarico viene ridotta e, dato che questi di solito presentano un aspetto scuro, tendente al nero dovuto alla presenza di materiale carbonioso, ovvero il soot, o idrocarburi incombusti, questo significa che la presenza dell'idrogeno favorisce una migliore miscelazione tra combustibile e aria e quindi una migliore reazione di combustione, ma incide anche sulla quantità di atomi di carbonio presenti totalmente nel cilindro, in quanto parte di questi vengono sostituiti da atomi di idrogeno. [8]

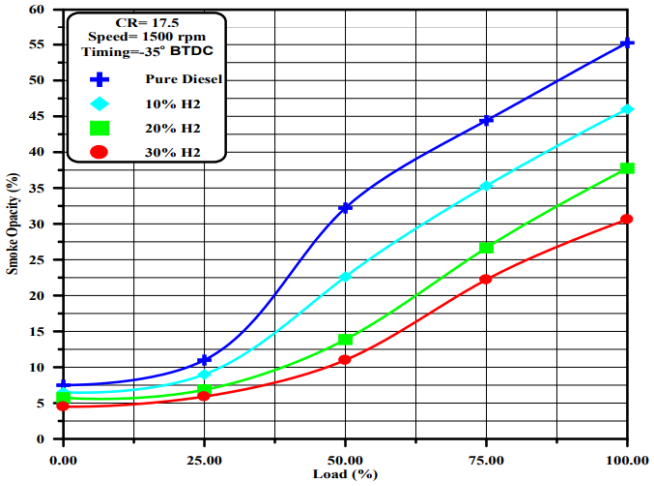


Figura 39 Andamento delle emissioni di NOx in base al SOI a diverse frazioni di idrogeno [8]

4.2.4 La produzione di idrogeno mediante elettrolisi

Come già detto, essendo un vettore energetico, l'idrogeno ha bisogno di essere prodotto per poter essere utilizzato e per far ciò esistono vari metodi:

- Produzione esterna al veicolo e stoccaggio on board in appositi serbatoi;
- Produzione direttamente on board mediante elettrolisi sfruttando l'energia elettrica prodotta dall'alternatore.

La prima soluzione comporterebbe la creazione di impianti di distribuzione stradale, come avviene per gli altri combustibili, tramite le stazioni di servizio; da ciò ne deriverebbe la redazione di alcune regole di buona tecnica per la sicurezza e la corretta distribuzione in quanto, come per gli altri combustibili, le sostanze in questione sono altamente pericolose perché molto infiammabili. Inoltre, per poter essere stoccato, l'idrogeno ha bisogno di particolari accorgimenti e dispositivi adatti, dato che ha delle caratteristiche chimico-fisiche per le quali porterebbe al deterioramento dei materiali e che per poter essere stabile allo stato liquido, deve essere portato ad una temperatura di -253 °C. In più, le pressioni alle quali l'idrogeno deve essere immagazzinato si aggirano intorno alle decine di MPa, che porterebbe all'impiego di serbatoi particolari in grado di resistere a tali livelli di pressione, ma in Italia le norme di sicurezza impongono il limite di 236 bar, valore troppo basso per la convenienza dello stoccaggio. Per fare ciò, si potrebbero utilizzare degli speciali serbatoi criogenici costruiti con materiali appositi in grado di resistere all'azione corrosiva dell'idrogeno e alle basse temperature in questione, ma ciò comporterebbe delle spese ingenti, oltre che di un particolare accorgimento sulla sicurezza, il che rende tutto poco conveniente dal punto di vista realizzativo.

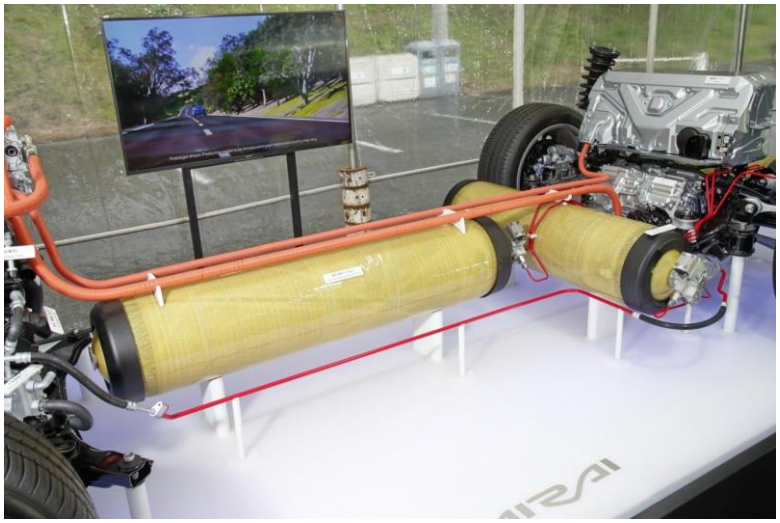


Figura 40 Bombole di idrogeno a bordo di un veicolo

La seconda, invece, rappresenta una soluzione alquanto innovativa e conveniente se si pensa al non dover stoccare e rifornire l'idrogeno in nessun serbatoio, seppur necessita di avere una fonte di produzione a bordo, come per esempio l'acqua. L'elettrolisi consiste nello scindere la molecola dell'acqua, H_2O, utilizzando la corrente elettrica e si presenta come un processo "pulito", ovvero esente da emissioni di inquinanti. Per fare ciò, occorre una cella elettrolitica, ovvero un dispositivo che svolge la funzione di convertitore di energia elettrica in energia chimica.

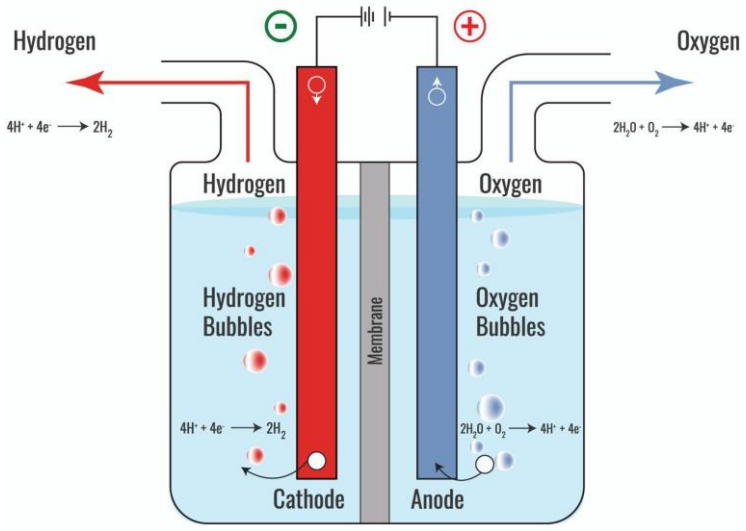


Figura 41 Cella elettrolitica

Una cella elettrolitica è formata principalmente da una fonte di corrente elettrica, come per esempio un generatore di tensione (o batteria) e due elettrodi; questi ultimi sono posizionati in un contenitore diviso in due parti da una membrana, oppure in due cilindri messi in comunicazione tra loro alla base, e immersi nella sostanza da scindere, in questo caso l'acqua. Il principio di funzionamento dell'elettrolisi consiste nel collegare i due elettrodi, di solito costituiti da grafite o un metallo inerte, come il platino, ai poli positivo (anodo) e negativo (catodo) del generatore di tensione e il circuito viene chiuso attraverso il mezzo liquido. Nel caso dell'acqua, essendo troppo poco dissociata in ioni H^+ e OH^- per permettere un apprezzabile passaggio di corrente, bisogna ricorrere ad altre sostanze che catalizzino il processo, ovvero degli elettroliti; come risultato finale si avrà una soluzione elettrolitica formata da uno di questi ultimi ed acqua. La scelta dell'elettrolita richiede cura perché gli anioni (ioni con carica negativa) ed i cationi (ioni con carica positiva) introdotti possono entrare in competizione con il processo di elettrolisi dell'acqua. Un anione con un potenziale standard di riduzione inferiore a quello dell'idrossido (OH^-) sarà ossidato al suo posto e non ci sarà sviluppo di ossigeno all'anodo. Analogamente, se viene introdotto un catione con un potenziale standard più grande del H^+ si ridurrà al suo posto e non ci sarà sviluppo di idrogeno al catodo. I più usati per l'elettrolisi dell'acqua sono acido solforico (H_2SO_4), idrossido di sodio (o soda caustica, NaOH) e idrossido di potassio

(KOH). Sinteticamente, dal punto di vista chimico avviene una reazione di tipo "redox", ovvero di riduzione-ossidazione: attraverso il collegamento con il generatore di tensione, l'acqua presente nella soluzione si dissocia in ioni H^+ e OH^-; al catodo gli ioni idrogeno acquistano elettroni in una reazione di riduzione che porta alla formazione di idrogeno gassoso:

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$$

mentre all'anodo, gli ioni idrossido subiscono ossidazione, cedendo elettroni:

$$4OH^- - 4e^- \rightarrow 4OH \rightarrow 2H_2O + O_2$$

Si formerà idealmente quindi un volume di idrogeno quasi doppio del volume di ossigeno, in quanto secondo la legge dei gas perfetti il numero di moli e il volume sono in proporzionalità diretta e un egual numero di ioni H^+ e OH^- devono essere ridotti/ossidati agli elettrodi. Come conseguenza del passaggio di corrente, si nota un fenomeno di effervescenza, cioè il formarsi di bolle di gas alla base dei due cilindri, in corrispondenza degli elettrodi. Essendo leggeri, i gas si accumulano nella parte superiore dei rispettivi cilindri e all'aumentare dell'energia potenziale (agendo sulla manopola dell'alimentatore) si nota un corrispondente aumento della quantità di gas sviluppati.

L'elettrolisi ha il vantaggio di rifornire il tutto di sola acqua mischiata ad un elettrolita, generando idrogeno ed ossigeno quasi totalmente puri (99.95%), ma ha l'inconveniente di essere molto dispendioso a livello energetico; questo problema può derivare dal tipo di elettrolizzatori utilizzati, ma il consumo di energia rimane comunque abbastanza rilevante, al contrario invece della miscela di gas idrogeno-ossigeno.

Capitolo 5

La miscela idrogeno-ossigeno

Quella di idrogeno e ossigeno, detta anche ossidrogeno, è una miscela gassosa stechiometrica solitamente nel rapporto 2:1, quindi per ogni atomo di ossigeno ne saranno presenti due di idrogeno. Questa miscela viene prodotta attraverso il processo dell'elettrolisi dell'acqua, con la differenza che invece di avere due cilindri separati da cui fuoriescono distintamente idrogeno e ossigeno, questi ultimi vengono immessi nella stessa camera senza essere separati. La reazione che descrive questo processo è la somma delle semireazioni descritte in precedenza:

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$$

L'idrogeno e l'ossigeno prodotti non necessitano di essere divisi e questo permette di minimizzare la resistenza elettrica tra catodo e anodo, da cui ne deriva che la velocità di reazione elettrolitica è maggiore rispetto a quella della produzione di idrogeno e ossigeno separati.

La temperatura di autoaccensione di questa miscela è di 580 °C quando è stechiometrica e l'energia minima per far partire il processo di combustione con una scintilla è veramente molto bassa: solo 0,02 mJ. Quando brucia, la fiamma dell'ossidrogeno raggiunge i 2000 °C e a temperatura e pressione standard (1 bar=100000 Pa, 273 K= 0 °C) il campo di infiammabilità va dal 4% al 94% di volume in idrogeno. In determinate situazioni, questa miscela può reagire in maniera implosiva: questo è dovuto quando la quantità di aria presente con cui viene miscelata è inferiore al 5%, ma anche dalla possibile presenza di ossigeno e idrogeno in forma atomica. La temperatura della fiamma di combustione, sotto circostanze specifiche, per esempio quando si tratta di ossidrogeno puro, può raggiungere un massimo di 2800 °C, ma diviene minore quando la miscela non è stechiometrica o è presente del gas inerte, tipo l'azoto presente nell'aria, che va ad assorbire parte del calore sviluppato.

5.1 Bilanci energetici per la produzione on board

La reazione che avviene in camera di combustione è esotermica ed avviene secondo l'equazione:

$$H_{2(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(g)} + 242\ \text{kJ/mol}$$ (2,5 eV se riferito alla singola molecola)

Il che significa che la combustione della miscela idrogeno-ossigeno allo stato gassoso sprigiona 242 kJ per ogni mole di idrogeno (H_2). Prodotto mediante elettrolisi, l'energia necessaria da fornire a temperatura di 298 K (25 °C) e pressione 1 bar è espressa nelle seguenti reazioni:

1. $H_2O_{(l)} + 44{,}1\ \text{kJ/mol} \rightarrow H_2O_{(g)}$ (44,1 kJ/mol→0,46 eV se riferito alla singola molecola)
2. $H_2O_{(g)} + 242\ \text{kJ/mol} \rightarrow H_{2(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)}$ (242 kJ/mol→2,5 eV se riferito alla singola molecola)

In totale, per produrre ossigeno e idrogeno gassoso partendo da una molecola di acqua allo stato liquido occorrono 286,1 kJ/mol (o circa 3 eV per ogni molecola), energia necessaria sia per far evaporare che scindere la molecola nei suoi rispettivi componenti, corrispondente al valore del calore latente di vaporizzazione.

Quindi, mettendo a rapporto le due energie, ovvero quella ricavata dalla combustione dell'ossidrogeno e di quella dell'elettrolisi necessaria per la sua formazione, in condizioni standard ed efficienze ideali il risultato è inferiore a 1:

$$\frac{242}{286{,}1}\ \text{kJ/mol} \approx 0.84$$

Se si considerano efficienze reali, questo valore scende ulteriormente. Prendendo per esempio in esame un motore operante il ciclo Otto, il rendimento globale è di 0,25; questo significa che si otterrebbero solo 60,5 kJ/mol trasformati in energia meccanica dalla combustione, invece che di 242 kJ/mol. Inoltre, quest'ultima verrà utilizzata anche per ricaricare la batteria, con un'efficienza intorno al 90%, la quale sarà sfruttata per alimentare l'elettrolizzatore, convertendo l'energia elettrica in energia chimica con un'efficienza pari all'80%. E ancora, l'elettrolizzatore avrà la sua efficienza: in particolare quelli ad uso veicolare si aggirano al 65-70%:

	AEL	PEMEL	AEMEL	SOEL
Elettrolita	Soluzione acquosa di idrossido di potassio (20-40%$_{wt}$ KOH)	Membrana polimerica	Soluzione acquosa di idrossido di potassio (<1-5%$_{wt}$ KOH) + membrana polimerica	Ossido ceramico, generalmente Yttria stabilized Zirconia (YSZ)
Ione trasferito	OH^-	H^+	OH^-	O^{2-}
Materiali impiegati	Ni, leghe Ni-Mo, Ni-Co, acciaio inox	Pt, Pt-Pd, RuO_2, IrO_2, Leghe di Ti	Ni, leghe Ni, Fe, Co, acciaio inox	Ni/YSZ , LSM/LSC, Leghe Fe-Cr-Mn
Temperatura operativa [°C]	60-80	50-70	30-60	600-900
Densità di corrente [A/cm²]	0.2-1.2	0.6-3.0	0.2-1.0	0.5-1.5
Rendimento elettrico [%, rif. PCI]	45-75	50-70	50-70	>80-85
Impianto di capacità massima dimostrato o in costruzione [MW]	100	10-20	0.1-0.2	~ 1
Vita utile dimostrata [h]	60'000 – 90'000	30'000 – 80'000	< 30'000	< 30'000

Figura 42 Caratteristiche di diversi elettrolizzatori

Quindi in sostanza, tra alternatore, batteria ed elettrolizzatore, solo 30,5 kJ/mol vengono usati per alimentare quest'ultimo, in grado alla fine di produrre solo l'8% della quantità calcolata inizialmente con rendimenti ideali. Quando il ciclo ricomincia, la quantità prodotta sarà ancora minore dell'8%, rendendo l'intero processo poco conveniente all'utilizzo.

Una soluzione a questo problema potrebbe essere ricercata nella struttura dell'acqua e delle sue proprietà: si parla di domini di coerenza dell'acqua.

5.1.1 I domini di coerenza dell'acqua

Attraverso gli studi degli ultimi decenni, compiuti sulla materia condensata e in particolare sull'acqua e sulla sua struttura, si è arrivati ad un risultato tale per cui si può affermare che la molecola dell'acqua può essere scissa nei suoi componenti ottimizzando di gran lunga e rendendo molto più efficiente il processo di elettrolisi convenzionale. Questo miglioramento si basa sullo sfruttamento della teoria dei domini di coerenza.

Figura 43 Rappresentazione di struttura a cluster dell'acqua

I professori Emilio Del Giudice e Giuliano Preparata hanno condotto delle ricerche, portando avanti studi ed esperimenti, arrivando alla conclusione che il modello elaborato afferma che l'acqua liquida è formata da due stati di aggregazione o, meglio definiti, domini; questi si dividono in coerenti e incoerenti:

1. A temperatura ambiente, l'acqua liquida è costituita da una miscela di acqua coerente e incoerente. A 0 °C è coerente al 50% e 50% incoerente; a 30 °C è coerente al 40% e incoerente al 60%.
2. L'acqua coerente è organizzata in domini di coerenza, di cui la dimensione è di circa 1000 Å (0,1 μm), ciascuna contenente circa 5,5 milioni di molecole che oscillano, in fase con un campo elettromagnetico intrappolato nel dominio, tra due configurazioni della nube elettronica molecolare: quella fondamentale in cui gli elettroni sono fortemente legati (potenziale di ionizzazione 12,60 eV) e una configurazione eccitata (12,06 eV) in cui un elettrone per molecola è "quasi libero" ed è quindi suscettibile di ulteriore eccitazione.
3. Nella massa d'acqua le oscillazioni elettromagnetiche e le fluttuazioni termiche si accoppiano reciprocamente, tanto che ciascuna molecola può spostarsi nel tempo dal regime coerente a quello non coerente e viceversa. La serie di domini coerenti della massa d'acqua è quindi oscillante e i domini coerenti non possono esibire in modo permanente le loro caratteristiche.

4. Se le parti di acqua coerente e incoerente vengono separate nello spazio, si crea un accumulo redox fino a centinaia di millivolt, in cui l'acqua coerente, il donatore di elettroni, è il polo negativo (elemento riducente) e l'acqua incoerente il polo positivo (elemento ossidante).
5. In virtù dei suoi elettroni quasi liberi, il dominio di coerenza dell'acqua ha proprietà uniche rispetto a tutti gli altri liquidi. Ha un ricco spettro di stati eccitati corrispondenti a vortici di elettroni quasi liberi. Questi vortici hanno momento angolare (quantizzato a valori interi) e momenti magnetici similmente quantizzati (questa proprietà spiega perché l'acqua turbolenta può essere scoperta da animali e esseri umani, i cui sistemi nervosi sono noti per essere rilevatori molto sensibili di campi magnetici). In presenza di campi esterni, come il campo magnetico della Terra, questi vortici si allineano e si sommano. [11]

Quando l'energia immagazzinata nel campo elettromagnetico di un dominio di coerenza diventa uguale (risuona con) all'energia di attivazione di una specifica molecola non acquosa catturata nel dominio dal fatto che risuona alla frequenza di oscillazione del dominio (il criterio per le biomolecole), il dominio si scarica trasferendo la sua energia alla singola molecola che riceve una specifica eccitazione (attivazione enzimatica) che la rende capace di compiere una specifica reazione chimica (accoppiamento dei modi elettromagnetico e chimico). Se il dominio viene immerso in un campo energetico, si ricarica nuovamente e si crea un'oscillazione permanente in cui la carica è elettromagnetica e la scarica è chimica. [11]

In altre parole, i legami tra le molecole d'acqua all'interno dei domini di coerenza possono essere pensati come antenne che ricevono energia elettromagnetica dall'esterno. Con tale energia, le molecole d'acqua possono rilasciare elettroni, rendendoli disponibili per le reazioni chimiche.

Nello specifico, quando si trovano nel loro stato di equilibrio naturale, le molecole dell'acqua sono soggette ad oscillazioni varie, tra cui anche elettromagnetiche, con relative emissioni. Quando queste oscillazioni elettromagnetiche entrano in fase con quella del campo di materia della molecola d'acqua, quest'ultima attrae ad essa altre molecole: questa attrazione segue l'interazione attraverso la fase per la quale una molecola oscillante con una frequenza f è tanto più attratta da una molecola che oscilla a frequenza f_0 con un andamento inversamente proporzionale alla differenza di f- f_0. Questi aggregati di molecole occupano un determinato dominio nello spazio, da qui il termine "dominio di coerenza": per coerenza si intende la proprietà che hanno le molecole, appartenenti tutte a uno stesso dominio, di oscillare in maniera coerente. I domini hanno dimensione variabile dipendente dalla lunghezza d'onda e alterazione termica che sono responsabili dei moti vibratori, i quali rendono stabile o meno il dominio stesso e quindi ne limitano le dimensioni. Qualsiasi molecola non appartenente a uno di questi domini coerenti, bensì a quelli incoerenti, ovvero

quegli spazi tra un dominio di coerenza e l'atro, può unirsi alle oscillazioni di quest'ultimo o interagire con esso provocando urti, alterandone la stabilità. Proprio per questo i domini di coerenza sono considerati strutture mesoscopiche, ovvero intermedie tra microscopiche e macroscopiche. Le molecole all'interno di questi domini oscillano all'unisono, risultando più stabili in quanto a un livello di energia inferiore rispetto alle molecole "libere", non appartenenti a nessun dominio. Sulla frontiera di questi domini coerenti, però, vi sono quelle molecole energicamente "eccitate", ovvero "pronte" per essere ionizzate o dissociate, in quanto hanno già tutta l'energia necessaria. Ad ogni grado di temperatura (quindi per un certo numero di collisioni) alcune di queste molecole non oscillano più in maniera sincrona con le altre appartenenti al dominio e si "distaccano", andando a finire nei domini incoerenti; la grandezza dei domini coerenti, quindi, dipende dalla temperatura: più quest'ultima è alta, più si riduce la loro dimensione. La presenza di questi domini è agevolata quando il liquido in questione è a contatto con un materiale microporoso, che può essere la piastra di una cella elettrolitica, considerando le imperfezioni cristallografiche.

Le molecole al confine dei domini di coerenza, essendo a un livello di energia superiore a quelle "all'interno", hanno la caratteristica di poter rilasciare un elettrone con meno energia rispetto a quella necessaria per una molecola d'acqua non eccitata (l'energia descritta nel fenomeno dell'elettrolisi dell'acqua). Considerando una temperatura di 300 K (circa 25 °C) e una pressione di 1 bar, si calcola che il 13% delle molecole appartenenti a un dominio coerente siano disposte lungo il confine [11], e per queste servono solo 0,5 eV per poter essere dissociate in idrogeno e ossigeno, che corrispondono a 48,4 kJ per ogni mole di H_2O, pari a circa 1/6 di quella che servirebbe per dissociarne una non eccitata. Dopodiché, queste molecole sulla frontiera appena scisse vengono sostituite da altre con le stesse caratteristiche in tempi estremamente rapidi, circa $1*10^{-8}$ secondi. Tutto questo processo si suppone sia svolto in condizioni ideali.

Attraverso l'attuazione di questa procedura "alternativa", si può ottenere un'elettrolisi molto più efficiente rispetto a quella "convenzionale": se si alimentassero le piastre delle celle elettrolitiche con degli impulsi, aventi un'onda con lo stesso periodo del tempo di ripristino delle molecole, si andrebbero a "colpire" miratamente solo quest'ultime.

5.2 Incremento di potenza e riduzione di consumi

Facendo un calcolo preliminare sull'effetto dell'iniezione della miscela idrogeno-ossigeno, si può osservare alcune variazioni in termini di potenza e consumi di combustibile. Come già detto nei paragrafi precedenti, il rendimento è il rapporto tra lavoro utile e calore fornito al sistema, che può essere riscritto come:

$$\eta = \frac{L}{Q_+} = \frac{L}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta t}{Q_+} = \frac{P}{\frac{Q_+}{\Delta t}} = \frac{1}{\frac{Q_+}{P \cdot \Delta t}} \text{ dove } \frac{Q_+}{P \cdot \Delta t} = H_i \cdot c_s$$

dove P è la potenza, H_i è il potere calorifico del combustibile e c_s è il consumo specifico. Quindi in altre parole, più sono alti il valore di H_i e il rendimento, più è basso il valore di c_s. Il consumo specifico è il dato che costituisce la quantità di combustibile consumata dal motore nell'unità di tempo in rapporto all'unita di potenza (unità di misura $[\frac{kg}{kW \cdot h}]$). Valori ottimali per questo parametro vanno da 0,22 a 0,35 in relazione alla dimensione del motore, dato che più è piccolo, maggiori saranno i consumi e viceversa.

Esistono alcuni metodi per aumentare il rendimento, quali variare il numero di giri che teoricamente è il migliore, ma con alcuni effetti sfavorevoli nella realtà, come la diminuzione del coefficiente di riempimento (quantità di aria che entra in camera di combustione rapportata alla quantità in entrata ideale che si avrebbe in assenza di perdite di carico) oppure del rendimento meccanico (le alte rotazioni sollecitano maggiormente gli organi meccanici in movimento); un altro metodo potrebbe essere la scelta di combustibili di qualità più alta, ma ciò implicherebbe intervenire sulla dosatura, che potrebbe rivelarsi un vincolo per alcuni motori che lavorano a un valore ben preciso; si potrebbe però considerare ciò che viene definito "tonalità termica", ovvero il rapporto tra il potere calorifico e la dosatura ($\frac{H_i}{\alpha}$). I comuni combustibili derivati dal petrolio hanno un rapporto che si aggira attorno ai 650-700 $\frac{kcal}{kg}$; si potrebbe cercare di aumentare questo valore tramite l'addizione nel combustibile di sostanze esplosive che contengono anche quantità di comburente (sovralimentazione chimica), ma ad oggi è vietato in quanto pericoloso.

I calcoli e i risultati effettuati si basano considerando coefficiente volumetrico e rendimento globale costanti (0,25 benzina e 0,45 diesel). È stato preso in considerazione un motore a 4 tempi avente cilindrata 3000 cm^3 e una potenza di 80 kW (109 CV).

Nella tabella seguente sono riportate le caratteristiche del motore e del combustibile utilizzato:

Rendimento globale (η)	0,25
Cilindrata	3000 cm^3
Numero di giri massimo (rpm_{max})	6000 rpm
Potenza (P)	80 kW
Coefficiente volumetrico (λ_v)	0,7
Potere calorifico inferiore benzina (H_i)	43,6 MJ/kg
Potere calorifico inferiore idrogeno massico (H_{i-H2})	119,9 MJ/kg
Potere calorifico inferiore idrogeno volumetrico (H_{i-H2-v})	10,05 MJ/ m^3
Rapporto stechiometrico (RS)	14,7

Il potere calorifico superiore (H_s) è la quantità di calore che viene sprigionata per effetto della combustione completa a pressione costante della massa unitaria di combustibile, quando i prodotti della combustione tornano alla temperatura iniziale del combustibile e del comburente. Il potere calorifico inferiore (H_i) è invece il potere calorifico superiore diminuito del calore di condensazione del vapore d'acqua formatosi durante la combustione; il coefficiente volumetrico (λ_v) è un parametro che varia in base a diversi fattori, come la cilindrata, fasatura e alzata delle valvole oltre che il loro diametro, dimensioni dei condotti di aspirazione e scarico, tipologia motore (aspirato o sovralimentato) e anche numero di giri del motore; in questo caso si è scelto un valore tipico da letteratura per motori fino a 6000 cm^3.

Il coefficiente volumetrico serve a calcolare la portata volumetrica di aria introdotta in camera di combustione, definita dalla seguente formula:

$$\dot{V} = \lambda_v i V \frac{n}{2} = \lambda_v i \frac{\pi D^2}{4} C \frac{n}{2}$$

Dove i è il numero di cilindri, D è il diametro della camera di combustione, C è la corsa del pistone e n è il numero di giri del motore, dove viene dimezzato in quanto in un motore a 4 tempi servono due giri dell'albero per compiere un ciclo, cioè solo nella metà delle rotazioni vi è immissione di aria in camera. Attraverso la precedente formula, si può calcolare la portata volumetrica della carica (combustibile+aria) totale:

$$\dot{V}_{tot} = \frac{\dot{V} \cdot rpm_{max}}{\frac{n}{2} \cdot 60000000} = 0{,}11\ m^3/s$$

Per calcolare la portata di combustibile è stata usata la formula motoristica utilizzata per calcolare il rendimento della macchina:

$$\eta = \frac{P}{\dot{m}_c \cdot H_i}$$

Da cui si può ricavare la portata di combustibile:

$$\dot{m}_c = \frac{P}{\eta \cdot H_i} = 7{,}34\ g/s$$

e quella di aria, attraverso il rapporto stechiometrico:

$$\dot{m}_a = \dot{m}_c \cdot RS = 107{,}89\ g/s$$

Ipotizzando di introdurre una quantità di ossidrogeno pari al 30% della massa di combustibile, si possono calcolare i volumi sia di idrogeno che di ossigeno:

$$\dot{m}_{oxy} = \dot{m}_c \cdot 0{,}3 = 2{,}2\ g/s$$

$$\dot{V}_{H2} = \frac{\dot{m}_{oxy}}{\left(\frac{H_{i-H2-v}}{H_{i-H2}}\right) \cdot 1000} = 0{,}026\ m^3/s$$

$$\dot{V}_{O2} = \frac{\dot{V}_{H2}}{2} = 0{,}013\ m^3/s$$

Quindi si può calcolare la portata volumetrica della carica totale residua semplicemente sottraendo queste ultime due quantità alla portata volumetrica della carica totale iniziale:

$$\dot{V}_{tot,res} = \dot{V}_{tot} - \dot{V}_{H2} - \dot{V}_{O2} = 0{,}066\ m^3/s$$

Quindi la portata di aria che serve per questa nuova quantità è uguale a:

$$\dot{m}_{a,res} = \dot{m}_a \cdot \frac{\dot{V}_{tot,res}}{\dot{V}_{tot}} = 67{,}40\ g/s$$

Da cui si ricava anche la nuova portata di combustibile residuo:

$$\dot{m}_{c,res} = \frac{\dot{m}_{a,res}}{RS} = 4{,}59\ g/s$$

Con questi nuovi valori di portata, sia di combustibile che di aria, ma anche di ossidrogeno, la nuova potenza sarà equivalente a:

$$\mathrm{P_{new}} = \eta \cdot ((\dot{m}_{c,res} \cdot \mathrm{H_i}) + (\dot{m}_{oxy} \cdot \mathrm{H_{i-H2}})) = 115{,}98\ \mathrm{kW}$$

Rapportando le due quantità, si osserva un incremento del:

$$\mathrm{Incremento} = \frac{\mathrm{P_{new}} - P}{\mathrm{P}} \cdot 100 \approx 45\%$$

Quindi sostituendo il 30% del combustibile con la miscela idrogeno-ossigeno, si può osservare un incremento di potenza del 45%. Essendo la potenza collegata al consumo specifico di combustibile attraverso la formula del rendimento, se si volesse che il motore fornisca una determinata potenza con l'aggiunta di ossidrogeno, lo si potrebbe far lavorare ad una condizione di carico inferiore rispetto alla situazione iniziale, avendo un risparmio sull'utilizzo del combustibile; in particolare ipotizzando di voler avere una potenza pari a quella iniziale (80 kW) utilizzando la stessa quantità di ossidrogeno iniettato (2,2 g/s), si potrebbe calcolare il consumo specifico finale:

$$\dot{m}_{c,new} = \frac{\frac{P}{\eta} - (\dot{m}_{oxy} \cdot \mathrm{H_{i-H2}})}{\mathrm{H_i}} = 4{,}62\ \mathrm{g/s}$$

Ovvero un risparmio di combustibile pari a:

$$\mathrm{Risparmio} = \frac{\dot{m}_c - \dot{m}_{c,new}}{\dot{m}_c} \cdot 100 = 37\%$$

Capitolo 6
Il sistema Hydromoving

Il sistema Hydromoving è un sistema in grado di produrre ossidrogeno on board e on demand e di alimentare il motore del veicolo su cui è montato. Il progetto è interamente italiano, nato da un'idea dell'ingegnere Lorenzo Errico, che negli anni si è impegnato a sviluppare un sistema che potesse soddisfare in maniera efficiente la produzione della miscela idrogeno-ossigeno ottimizzando il processo di elettrolisi tradizionale, basandosi sugli studi e sulle ricerche dei professori Emilio Del Giudice e Giuliano Preparata. Il progetto Hydromoving System nasce dall'esigenza assoluta, in questo periodo di caro petrolio, scarsità di risorse, limitazioni della quantità di combustibili disponibile (di origine fossile o rinnovabile), di diminuire i consumi e la produzione d'inquinanti determinati dall'impiego dei motori a combustione interna alimentati a benzina, gasolio, gpl, metano, kerosene, olii vegetali, biogas, syngas, etanolo, etc…

Lo scopo di Hydromoving è quello di creare un vantaggio competitivo, in termini di consumi specifici dei carburanti summenzionati, un'emissione d'inquinanti in atmosfera fortemente ridotta tale da essere migliorativa se applicata a veicoli rispondenti ai limiti emissivi imposti dai regolamenti Nazionali, Regionali e Provinciali e, per quanto riguarda i trasporti, per ridurre le emissioni fino ad adeguamento dei limiti imposti dalle normative EU da Euro 3 ad Euro 6.

Aggiungendo il gas ossidrogeno alla combustione del motore, si abbattono gli inquinanti e i consumi, consentendo ai produttori di motori a combustione interna ed ai produttori dei combustibili, di mantenere ancora una validità accettabile sulle tecnologie emergenti alternative ottenendo, a parità di combustibili di partenza, consumi ridotti, ridotto inquinamento e un globale upgrade tecnologico. La tecnologia Hydromoving consente alle applicazioni automotive, trasporti terrestri, navali e in genere ai generatori, alle caldaie domestiche ed industriali di avere ampio margine di riduzione di consumi ed emissioni inquinanti, oltre a consentire la pulizia dei FAP/DPF o Filtri Antiparticolato, dispositivi di post trattamento presenti, su cui è stato testato con successo. [12]

Il progetto è giunto a maturazione nel 2007 e nel 2009 la Marangoni SPA, azienda italiana a capo di un gruppo con stabilimenti produttivi e sedi commerciali in tutto il mondo nel settore dello pneumatico, interessata fortemente all'idea dell'ingegner

Errico, gli commissiona uno studio di fattibilità su una vettura; l'auto scelta in questione è la Nissan 370 Z, divenuta poi la Nissan Z-Hydro dopo l'installazione del sistema, vettura tutt'ora posseduta e guidata dallo stesso ingegnere.

Figura 44 Nissan Z-Hydro by Marangoni Spa

Il sistema Hydromoving utilizza la tecnologia e i vantaggi derivati dall'impiego di ossidrogeno come additivo nei combustibili presenti a bordo dei veicoli muniti di motori a combustione interna, sfruttando e confermando i risultati ottenuti in maniera sperimentale per quanto riguarda la riduzione delle emissioni di inquinanti e il risparmio sul consumo dei combustibili, nonché un modesto ma apprezzabile aumento delle prestazioni.

6.1 Descrizione del sistema e funzionamento

Il sistema è costituito da un impianto di generazione ed iniezione del gas ossidrogeno generato da acqua distillata adoperando un processo di elettrolisi non convenzionale, basato su due innovazioni tecnologiche brevettate dallo stesso ingegner Errico:

1) Introduzione di un sistema innovativo pulsante per la fornitura di corrente elettrica alle celle elettrolitiche che favorisce la rottura dei legami molecolari dell'acqua. Brevetto N. 0001404965;
2) Sistema di alimentazione e controllo ad iniezione "on demand" del gas ossidrogeno che migliora l'utilizzo e la sicurezza dell'impianto. Brevetto N.0001405327.

L'impianto è costituito da alcuni componenti, quali:

- Serbatoi per l'immagazzinamento dell'acqua;
- Una o più celle elettrolitiche;
- Unità di controllo elettronica (centralina);
- Rail di iniettori montati a monte dei cilindri;
- Sensoristica per il monitoraggio (sensori lambda, di temperatura e pressione).

La descrizione del sistema fa riferimento all'impianto montato sulla Nissan per avere un'idea dell'installazione e del funzionamento dei vari dispositivi collegati.

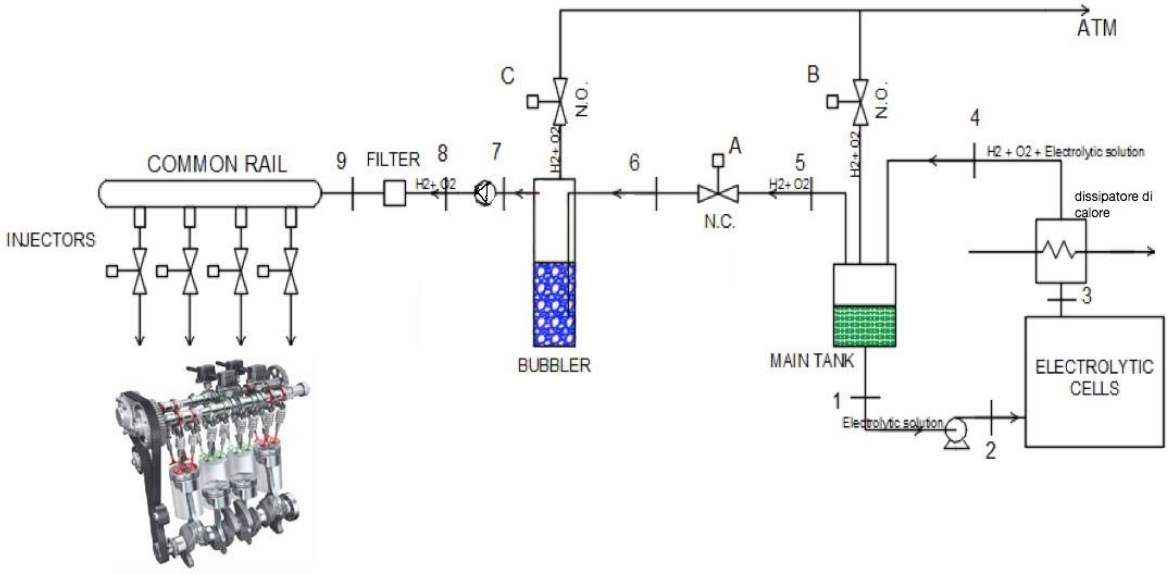


Figura 45 Schema di funzionamento

Il dispositivo di stoccaggio consiste in un serbatoio posizionato nel bagagliaio dalla capacità di 6 litri, contenente una soluzione elettrolitica formata da acqua distillata e idrossido di sodio. Sopra il serbatoio vi è una pompa che ha il compito di trasferire la miscela alla parte anteriore del veicolo attraverso dei tubi, in un altro serbatoio denominato “main tank”.

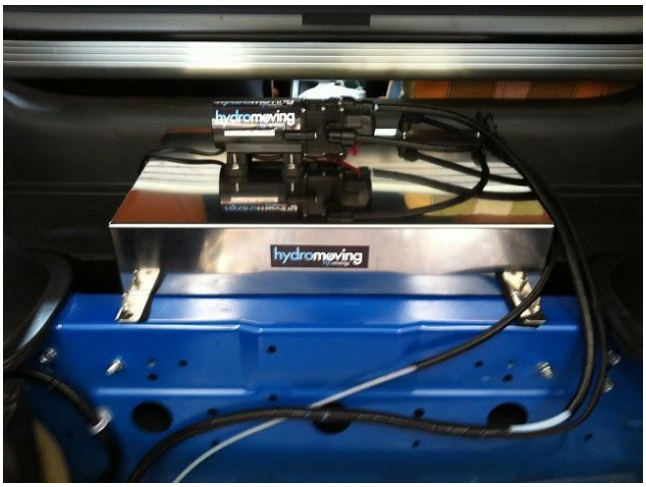


Figura 46 Serbatoio posteriore e pompa

Il contenuto dell’elettrolita è del 3% rispetto al contenuto totale del serbatoio, necessario a rendere sufficientemente conduttiva l’acqua e permettere l’elettrolisi. La soluzione viene poi pompata dal main tank attraverso le celle elettrolitiche e reimmessa in esso, insieme al gas ossidrogeno creato durante la circolazione nelle celle, creando una produzione un ricircolo continui.

Ogni cella elettrolitica è costituita da:

- telaio esterno in plexiglass forato per il passaggio della soluzione;
- 9 piastre in acciaio austenitico 14404 forate, rivestite con nanoparticelle di nikel-cobalto, avente un prolungamento per il collegamento elettrico;
- Guarnizioni in neoprene atte a separare una piastra e l’altra per evitare correnti indotte;
- Condotti di collegamento con gli altri componenti;
- Barre filettate e dadi per il fissaggio della cella e per il collegamento elettrico.

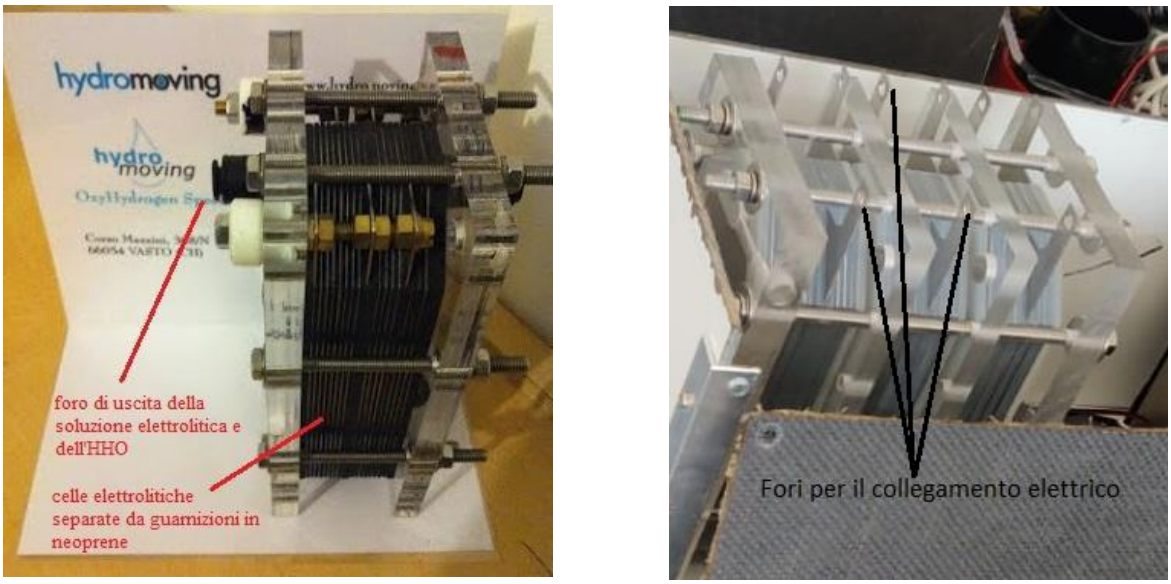


Figura 47 Celle elettrolitiche

Prima di assemblare la cella, ogni piastra subisce una lavorazione con degli orbitali abrasivi atta a diminuire la rugosità in modo da aumentare la superficie di scambio tra la soluzione e la piastra, massimizzando la produzione. Queste celle sono posizionate sotto il radiatore del veicolo e sono alimentate da una corrente pari a 1,5 A e una tensione di 13,8 V, prodotte dall'alternatore. Ogni cella è formata da 9 piastre, di cui solo 3 sono alimentate in maniera "attiva", ovvero ricevendo corrente direttamente da quella prodotta dall'alternatore, mentre l'alimentazione delle restanti è data dagli impulsi elettrici trasmessi dalle piastre attive: questi impulsi sono a particolari frequenze, variabili tra i 25 e i 70 kHz, gestite da una centralina elettronica programmabile che viene alimentata dalla batteria dell'auto. Questo particolare processo di alimentazione delle sei celle "passive" permette una produzione da parte di quest'ultime di circa 0,85 m^3 l'ora di gas ossidrogeno; viene definito "alimentazione volano" in quanto l'alimentazione di sole 3 celle permette di alimentare le altre sottoforma di impulsi prodotti dalle prime. Consiste fondamentalmente in due fasi: la prima è composta da cinque macroimpulsi di intensità crescente e la seconda da ulteriori cinque macroimpulsi, ma di intensità decrescente; ognuno di essi, nell'intorno del picco di tensione, è modulato da un'onda sottoportante che si realizza in una serie di sottoimpulsi di minore intensità (5 per ogni macroimpulso ad onda quadra); ogni sottoimpulso stimola la frontiera dei domini di coerenza dell'acqua, predisponendola alla scissione, la quale avviene subito dopo con l'impulso finale più forte di onda quadra. Simultaneamente avviene lo stesso processo dall'altro capo di alimentazione, ma in maniera invertita: i primi a presentarsi sono i macroimpulsi di intensità decrescente e poi quelli crescenti.

L'unità di controllo sincronizza queste due alimentazioni in modo tale che ad un avvio di segnale per la generazione di macroimpulsi ad un lato dell'alimentazione, ne corrisponda uno stop all'altro lato, ovvero i PWM dei due capi di alimentazione sono

complementari: durante l'impulso ON dell'uno corrisponde l'impulso OFF dell'altro e viceversa. In questo modo, si riesce ad ottenere un risparmio energetico del 35% rispetto ai metodi convenzionali di produzione di ossidrogeno, che sono alimentati in modo continuo.

Il gas prodotto viene reimmesso nel main tank, posizionandosi nella parte superiore di quest'ultimo, essendo più leggero rispetto alla soluzione elettrolitica; dopodiché l'ossidrogeno viene fatta passare attraverso due filtri bubbler che hanno sia il compito di evitare eventuali ritorni di fiamma dal cilindro, sia di eliminare eventuali vapori di soluzione elettrolitica, i quali possono formarsi qualora la cella dovesse riscaldarsi, superando i 40 °C. Una volta filtrato, il gas, attraverso due rail montati a ridosso delle camere di combustione, viene immesso nei cilindri mediante degli iniettori ad una pressione di 0,5 bar; questi ultimi sono progettati appositamente, calibrati e gestiti da un software contenuto all'interno della centralina.

Figura 48 Particolare dei rail

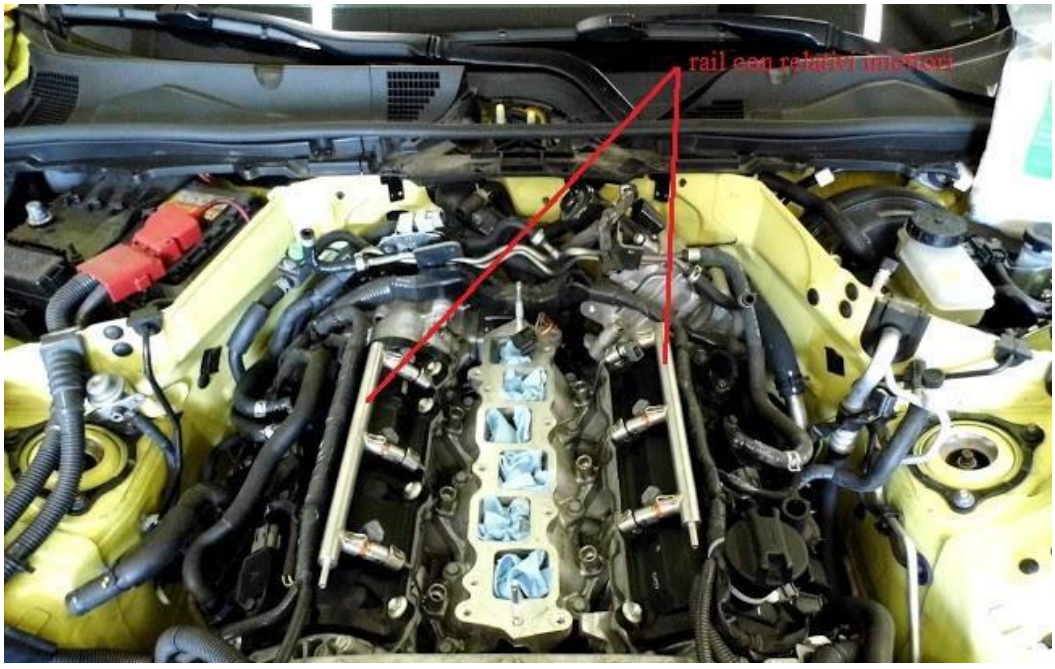


Figura 49 Rail montati sulla vettura

L’unità di controllo monitorizza la quantità di ossidrogeno con un sensore di pressione e calibra i tempi di apertura degli iniettori sia del gas che della benzina, in base al carico del motore; in pratica sostituisce una certa quantità di miscela aria/benzina con la medesima quantità di miscela idrogeno-ossigeno.

Figura 50 Il sistema Hydromoving

Per quanto riguarda la sicurezza, occorre specificare che il sistema risulta più sicuro di altri sistemi tradizionali come, per esempio, lo stoccaggio di quantità non indifferenti di idrogeno a bordo in serbatoi appositi messi sotto pressione; i volumi di accumulo nel sistema Hydromoving sono molto limitati: i condotti di collegamento e la parte superiore del main tank. In ogni caso, anche se dovessero verificarsi impatti frontali o ribaltamento del veicolo, un sistema di elettrovalvole di sicurezza assicura l’immediata espulsione del gas (2,5 millisecondi) dai principali componenti, ovvero il serbatoio principale nel bagagliaio, il main tank e i bubblers; queste valvole sono collegate a interruttori inerziali, i quali sono in comunicazione con un accelerometro e un sensore giroscopico.

6.2 Rendimento e costi

Sulla base della descrizione dell'impianto preso in esame precedentemente, analizzando l'andamento della corrente assorbita dal sistema, si può esaminare la quantità di gas prodotto, come mostrato nel grafico seguente.

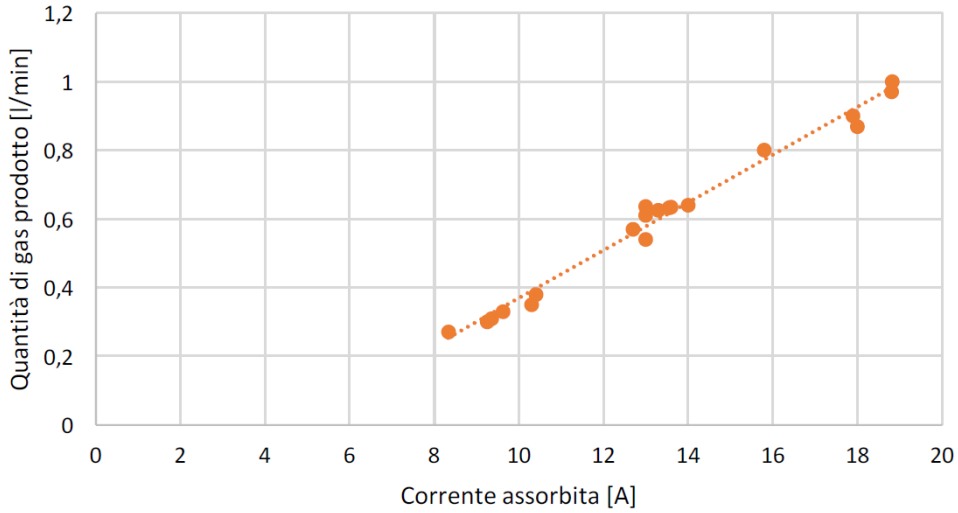


Figura 51 Portata di ossidrogeno in base alla corrente assorbita

Come si può notare, l'andamento è piuttosto lineare, quindi la quantità di gas prodotto è direttamente proporzionale alla corrente assorbita dal sistema, che varia da un minimo di 8 A ad un massimo di 19 A. Anche la temperatura delle celle elettrolitiche ha una dipendenza lineare rispetto alla quantità di gas prodotto, e lo si può osservare dal grafico in basso.

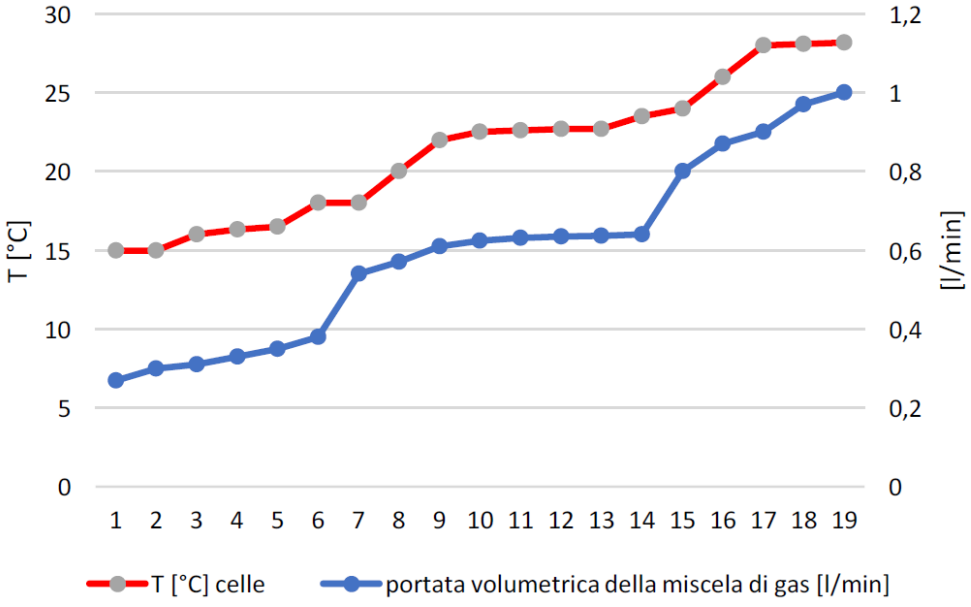


Figura 52 Andamento della temperatura e della portata di gas

L’aumento di temperatura delle celle è dovuto principalmente alla conduttività ionica dell’elettrolita, anche se una temperatura più alta rende più efficace il processo di elettrolisi, ma per una specifica densità di corrente ed una soluzione con l’1% di idrossido di sodio, la produzione di gas è alquanto sufficiente; inoltre, quest’ultima è direttamente proporzionale con il numero di elettrodi, quindi con la quantità di celle elettrolitiche impiegate, perciò mettendo più unità in serie, maggiore sarà la produzione.

Il sistema Hydromoving ha un rendimento medio di produzione pari a circa il 40%, facendo una stima delle misurazioni e di seguito vi è una rappresentazione (il leggero decremento è dato da imperfezioni durante la fase di misurazione).

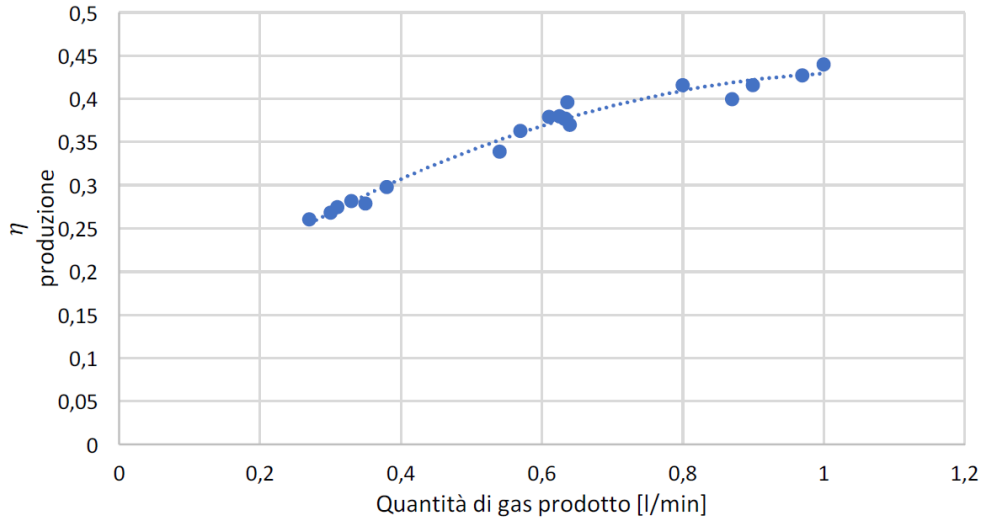


Figura 53 Rendimento in funzione della quantità di gas prodotto

Per quanto riguarda i costi, il sistema varia in base alla vettura sulla quale dovrà essere montata, in quanto da essa dipende la portata che dev’essere prodotta dall’impianto: viene da sé che un veicolo munito di un propulsore con una cilindrata importante richieda una quantità di gas maggiore rispetto a un motore con una cilindrata modesta. Per questo motivo, la quantità di celle insieme ad un maggiore controllo da parte del sistema sono i fattori che determinano i costi, in quanto sia per adattabilità e produzione, sia per necessità di ulteriori dispositivi di controllo, le spese di produzione possono variare. Anche il tipo e il modello di vettura possono influire sui costi del sistema, dato che su alcuni veicoli è più facile adattare il sistema dovendo praticare meno operazioni di montaggio e calibratura, piuttosto che su altri in cui bisogna trovare le condizioni migliori per poter montare l’impianto e garantire la sicurezza.

Riferendosi a costi medi ed ipotizzando il montaggio su di un veicolo in cui non si hanno particolari condizioni e situazioni di adattamento, la spesa necessaria per l’installazione del sistema si aggira intorno alle 2 o 3 migliaia di euro.

6.3 Applicazione del sistema su veicoli

Sono stati eseguiti delle prove e dei test su due vetture, una munita di un motore a benzina e l'altra avente un motore Diesel. Le prove sperimentali sono state eseguite presso la Control System di Pianezza (TO) e sono stati misurati i parametri principali, come le emissioni allo scarico e il consumo di combustibile; per entrambi i motori sono stati effettuati dei test su banco dinamometrico.

Il test è stato eseguito in quella che viene chiamata "camera climatica", dove un sistema di controllo costituito da vari sottosistemi, quali il sistema di controllo centralizzato dell'aria condizionata, sistema di monitoraggio e controllo della ventola, misuratore del consumo di carburante, sistema di acquisizione e controllo dei dati, monitora la misurazione; chiaramente, gli strumenti utilizzati vengono opportunamente calibrati per l'accuratezza e l'affidabilità dei dati. Il combustibile utilizzato per lo svolgimento di queste prove è quello di uso commerciale e durante i test tutte le porte del veicolo sono state mantenute chiuse.

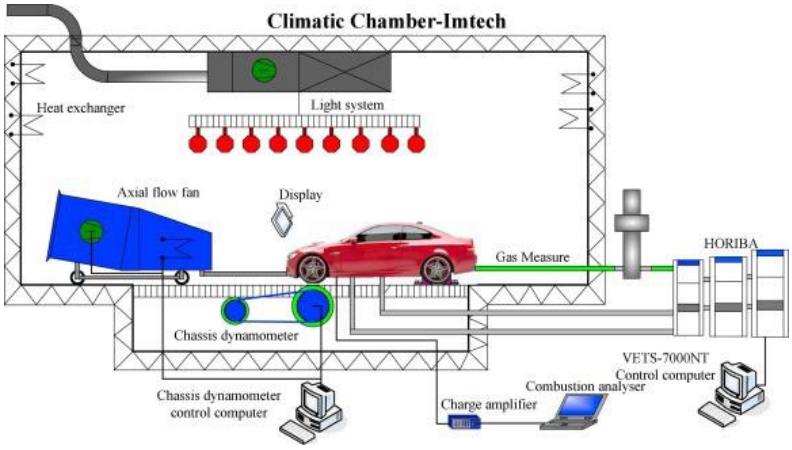


Figura 54 Schema della camera climatica

Per avere una simulazione di utilizzo su strada, sono stati effettuati alcuni cicli di guida, dei test che si propongono di rappresentare l'uso tipico di una vettura in Europa, definiti da determinati sottocicli svolti in maniera consecutiva: uno di questi è il NEDC.

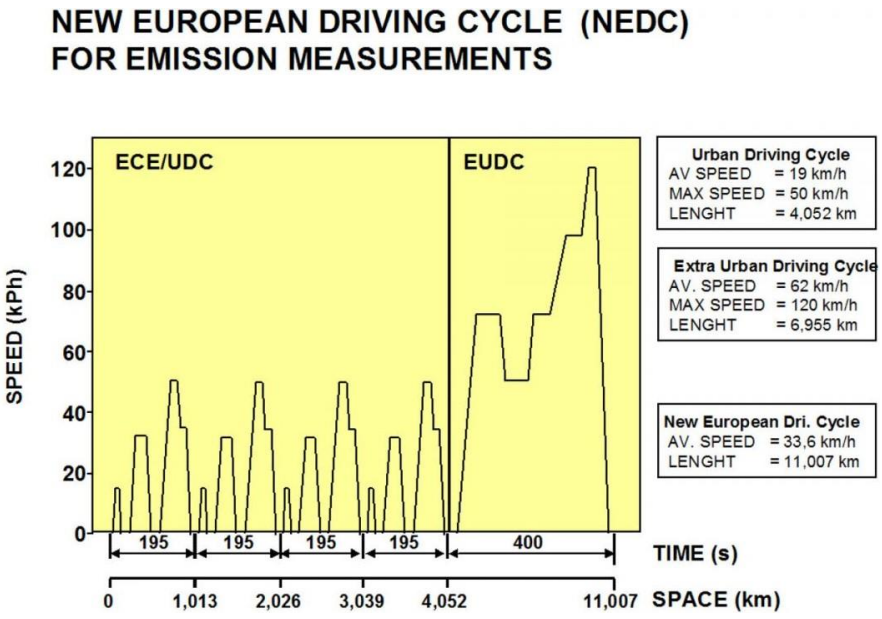


Figura 55 Rappresentazione del ciclo guida NEDC

Come è evidenziato nello schema, il test si suddivide in 5 sottocicli:

- 4 cicli urbani consecutivi identici, caratterizzati da picchi di velocità di 50 km/h e accelerazioni modeste;
- 1 ciclo extra urbano, caratterizzato da una distanza percorsa maggiore del singolo ciclo urbano e con un picco di velocità di 120 km/h.

Prima della prova, il veicolo è stato mantenuto nella camera climatica per 24 ore ad una temperatura di 25 °C, in modo da uniformarne la temperatura; anche il ventilatore posto anteriormente al veicolo viene impostato per soffiare aria alla stessa temperatura.

Questo ciclo di guida è stato effettuato sulla Nissan Z-Hydro, che nello specifico è una Nissan 370Z Coupè 3.7 V6, alimentata a benzina; l'altro veicolo ad essere stato sottoposto a test è un furgone Nissan, modello NV200 1.5 DCI da 64 kW, alimentato con un motore Diesel.

6.4 Risultati ottenuti

6.4.1 Motore a benzina

Il primo veicolo ad essere ufficialmente sottoposto a test per verificare il funzionamento e l'efficienza del sistema Hydromoving è stata la Nissan Z-Hydro.

Figura 56 Nissan in laboratorio per test su banco prova

Il veicolo è alimentato a benzina e l'iniezione di ossidrogeno si verifica nel condotto di aspirazione, a valle del filtro dell'aria e poco prima dell'imbocco in camera di combustione. Dato che l'automobile in questione non è munita di turbocompressore, ma ha un semplice motore aspirato, il sistema non necessita di compressore per la miscela di gas.

Di seguito sono riportati i risultati dei test effettuati presso l'azienda Control Sistem S.r.l. situata a Pianezza (TO), dove sono stati valutati alcuni parametri di rilevanza come i consumi, le emissioni e potenza secondo un protocollo tecnico concordato da Nissan Europe.

CONTROL SISTEM S.r.l.

via Cuneo n.7, 10044 Pianezza (TO) Italy

CYCLE DATA

Cycle number:	1161	Date:	05/02/2011
Performed cycle:	ECE_EUDC 2 fasi BENZINA	Job number:	CS 022/11
Operator:	Cassano	Customer:	Biosolar
Driver:	Vendemiati		

VEHICLE

Manufacturer:	Nissan	Inertia [Kg]:	1650
Model:	370Z	Road resistance 20km/h [N]:	0
Code:	CD462528	Road resistance 40km/h [N]:	0
Chassis number:		Road resistance 60km/h [N]:	0
Engine:	3700	Road resistance 80km/h [N]:	0
Transmission:	Manuale	Road resistance 100km/h [N]:	0
Traction:	Posteriore	Road resistance 120km/h [N]:	565
Fuel:	Gasoline	F0 [N]:	8
Tyres pressure [bar]:	2,4	F1 [N/kmh]:	0,000
Kilometers [km]:	51575	F2 [N/kmh^2]:	0,0536

GENERAL DATA

	Phase 1	Phase 2		
Ambient temperature [°C]:	24,9	24,9	Violations [sec]:	14,6
Barometric pressure [mbar]:	969	969	Fuel density [kg/l]:	0,7478
Relative humidity [%]:	45,0	45,0	THC density [g/l]:	0,619
Absolute humidity [g/kg]:	9,22	9,22	CO density [g/l]:	1,25
Pd dry [kPa]:	3,149	3,149	CO2 density [g/l]:	1,964
NOx correction factor:	0,953	0,953	NOx density [g/l]:	2,05
Distance [m]:	4090	6960	NO density [g/l]	1,338
Duration [sec]:	780	415	NO2 density [g/l]	2,054
CVS volume [m^3]:	68,23	35,25	Secondary dil. factor	6
CVS dilution factor:	13,35	8,02		
Particulate sample volume [nl]:	126,0	64,9		

POLLUTANTS MEASUREMENTS

	THC [ppm]	CO low [ppm]	NOx [ppm]	CO2 [%Vol]	CO high [%Vol]	Particulate [mg]	
Phase 1						Filter	
Sample	24,1	17,0	62,6	1,00	0,0	Initial weight	
Dilution air	3,2	0,0	0,9	0,05		Final weight	
						Difference	0,0000
Phase 2						Filter	
Sample	5,6	4,0	203,7	1,67	0,0	Initial weight	
Dilution air	2,9	0,0	2,8	0,07		Final weight	
						Difference	0,0000

RESULTS

	THC [g/km]	NOx [g/km]	THC + NOx [g/km]	CO [g/km]	CO2 [g/km]	PM [g/km]	Cons [l/100km]
				BAGS			
Phase 1	0,218	2,013	2,232	0,354	312,5	0,000	13,2
Phase 2	0,010	1,992	2,001	0,025	160,0	0,000	6,8
Total	0,087	2,000	2,087	0,147	216,5	0,000	9,1
				DILUTED			
Phase 1	0,208	2,045	2,253	0,301	318,3		13,5
Phase 2	0,006	2,036	2,042	0,023	161,0		6,8
Total	0,081	2,039	2,120	0,126	219,2		9,3
				RAW 1			
Phase 1							
Phase 2							
Total							
				RAW 2			
Phase 1							
Phase 2							
Total							

NOTES

Benzina

OPERATOR: CUSTOMER:

Figura 57 Risultati test con sistema Hydromoving disattivo

CONTROL SISTEM S.r.l.

via Cuneo n.7, 10044 Pianezza (TO) Italy

CYCLE DATA

Cycle number:	1162	Date:	05/02/11
Performed cycle:	ECE_EUDC 2 fasi BENZINA	Job number:	CS 022/11
Operator:	Cassano	Customer:	Biosolar
Driver:	Vendemiati		

VEHICLE

Manufacturer:	Nissan	Inertia [Kg]:	1650
Model:	370Z	Road resistance 20km/h [N]:	0
Code:	CD462528	Road resistance 40km/h [N]:	0
Chassis number:		Road resistance 60km/h [N]:	0
Engine:	3700	Road resistance 80km/h [N]:	0
Transmission:	Manuale	Road resistance 100km/h [N]:	0
Traction:	Posteriore	Road resistance 120km/h [N]:	565
Fuel:	Gasoline	F0 [N]:	8
Tyres pressure [bar]:	2,4	F1 [N/kmh]:	0,000
Kilometers [km]:	51575	F2 [N/kmh^2]:	0,0536

GENERAL DATA

	Phase 1	Phase 2		
Ambient temperature [°C]:	25,2	25,1	Violations [sec]:	2,0
Barometric pressure [mbar]:	968	968	Fuel density [kg/l]:	0,7478
Relative humidity [%]:	44,0	44,0	THC density [g/l]:	0,619
Absolute humidity [g/kg]:	9,18	9,13	CO density [g/l]:	1,25
Pd dry [kPa]:	3,205	3,186	CO2 density [g/l]:	1,964
NOx correction factor:	0,952	0,951	NOx density [g/l]:	2,05
Distance [m]:	4100	7000	NO density [g/l]	1,338
Duration [sec]:	780	415	NO2 density [g/l]	2,054
CVS volume [m^3]:	68,50	35,20	Secondary dil. factor	6
CVS dilution factor:	16,95	8,99		
Particulate sample volume [nl]:	126,0	64,9		

POLLUTANTS MEASUREMENTS

	THC [ppm]	CO low [ppm]	NOx [ppm]	CO2 [%Vol]	CO high [%Vol]	Particulate [mg]	
Phase 1						Filter	
Sample	5,2	1,0	47,7	0,79	0,0	Initial weight	
Dilution air	3,0	0,0	0,9	0,05		Final weight	
						Difference	0,0000
Phase 2						Filter	
Sample	4,8	2,0	200,1	1,49	0,0	Initial weight	
Dilution air	2,7	0,0	2,6	0,06		Final weight	
						Difference	0,0000

RESULTS

	THC [g/km]	NOx [g/km]	THC + NOx [g/km]	CO [g/km]	CO2 [g/km]	PM [g/km]	Cons [l/100km]
				BAGS			
Phase 1	0,025	1,528	1,553	0,021	243,8	0,000	10,3
Phase 2	0,007	1,938	1,946	0,013	141,9	0,000	6,0
Total	0,014	1,787	1,800	0,016	179,5	0,000	7,6
				DILUTED			
Phase 1	0,016	1,552	1,568	0,018	244,5		10,3
Phase 2	0,005	1,976	1,981	0,016	143,2		6,0
Total	0,009	1,819	1,829	0,017	180,6		7,6
				RAW 1			
Phase 1	2,155	2,455	4,609	9,413	243,5		11,2
Phase 2	1,292	1,612	2,904	3,430	142,6		6,4
Total	1,611	1,923	3,534	5,640	179,9		8,2
				RAW 2			
Phase 1							
Phase 2							
Total							

NOTES

benzina + idrogeno + Valori RAW 1 senza Catalizzatore

OPERATOR:		CUSTOMER:	

Figura 58 Risultati test con sistema Hydromoving attivo

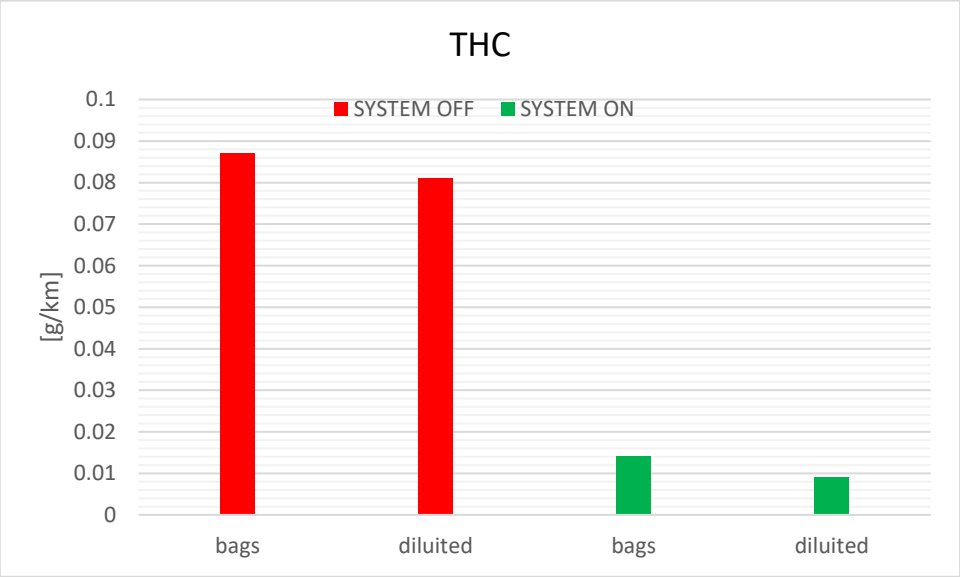
Nelle schede dove sono riportati i valori misurati durante i test, vi sono le diciture "Phase 1" e "Phase 2", che stanno a rappresentare rispettivamente il ciclo urbano e il ciclo extra-urbano, mentre "Total" è la media dei due cicli, ovvero il ciclo misto. Sotto la voce "Bags" vi sono le misurazioni di concentrazione degli inquinanti che vengono eseguite con il metodo CVS (Constant Volume Sample). La carica di gas da misurare viene diluita nei sacchi per poi risalire alla concentrazione originale. L'aria usata per diluire, successivamente raccolta, viene confrontata poi con l'aria fresca; questo confronto serve a stabilire se la misura sta avvenendo correttamente, ovvero quando i valori di "Bags" e "Diluited" sono simili. La misura "Raw" invece sta ad indicare i valori di emissione rilevati dal sensore relativo, senza essere normalizzati nei sacchi. Quest'ultima misura non è utile per quanti riguarda l'omologazione, ma è un'indicazione per i tecnici che svolgono il test per poter conoscere le aree di funzionamento del veicolo, ovvero dove questo emette più o meno inquinanti ed eventualmente intervenire per migliorare i risultati.

Si possono confrontare i dati ottenuti con i test quando il sistema è disattivato e quando invece viene messo in funzione per avere una panoramica dei miglioramenti per quanto riguarda i vari inquinanti e il consumo di combustibile; per far ciò vengono presi in esame i valori ottenuti nelle misure "Bags", essendo più precisi e affidabili:

$$\text{Riduzione}[\%] = \frac{\text{misura}_{\text{fuel conv.}} - \text{misura}_{\text{fuel conv.+oxhydr.}}}{\text{misura}_{\text{fuel conv.}}}$$

%	Riduzione HC	Riduzione Nox	Riduzione CO	Riduzione CO_2	Riduzione consumi
Ciclo urbano	88,5	24	94,1	21,9	21,9
Ciclo extraurbano	30	2,7	48	11,3	11,7
Ciclo misto	83,9	10,6	89,1	17,1	16,5

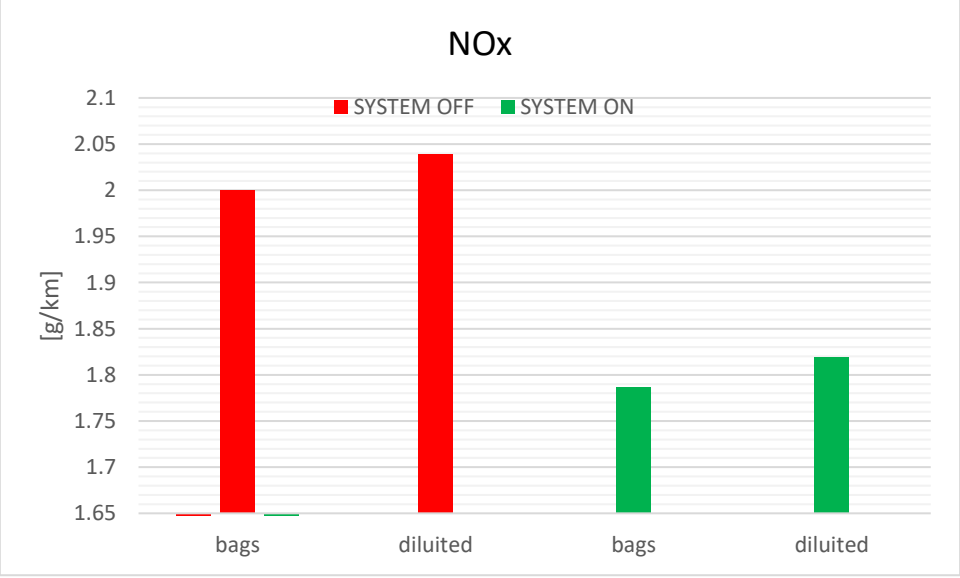
Idrocarburi incombusti



Come già affrontato nel paragrafo relativo, esistono diverse cause e fattori che determinano la non completa combustione degli idrocarburi.

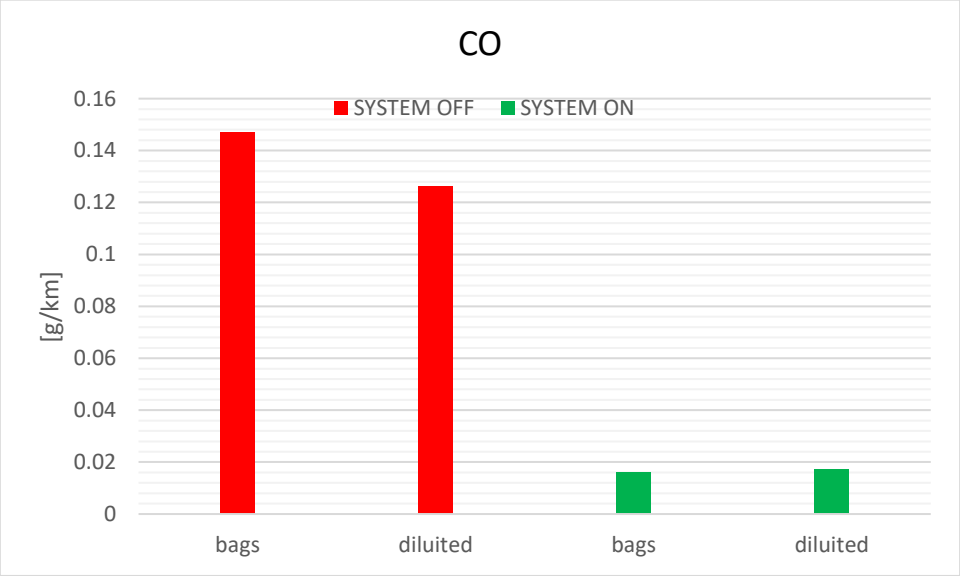
A velocità di fiamma fissa, la quantità di idrocarburi incombusti e le relative emissioni aumentano all'aumentare del carico, dato che è richiesto più combustibile per avere più coppia dal motore. L'immissione della miscela idrogeno-ossigeno, oltre che sostituire parte del combustibile, introduce un maggior quantitativo di ossigeno, che promuove l'ossidazione e la completa reazione degli idrocarburi; inoltre, l'impiego di idrogeno consente di lavorare con miscele più magre. Questo porta a una riduzione dell'84% delle emissioni di idrocarburi incombusti.

Ossidi di azoto



La formazione di ossidi di azoto è determinata principalmente dalle alte temperature e dalla quantità di aria introdotta; difatti, l'utilizzo di idrogeno come additivo favorisce l'aumento delle temperature di combustione, se non ne viene dosata la quantità da introdurre. Per ovviare a questo, si possono immettere nel collettore di aspirazione micro-nebulizzazioni di acqua insieme all'ossidrogeno, in modo da ridurre la temperatura della fiamma; in questo modo si arriva ad una riduzione delle emissioni degli ossidi di azoto fino ad un valore del 10%, giustificata anche dal fatto che l'utilizzo della miscela provoca una maggiore velocità delle reazioni, sfavorendone la formazione.

Monossido di carbonio

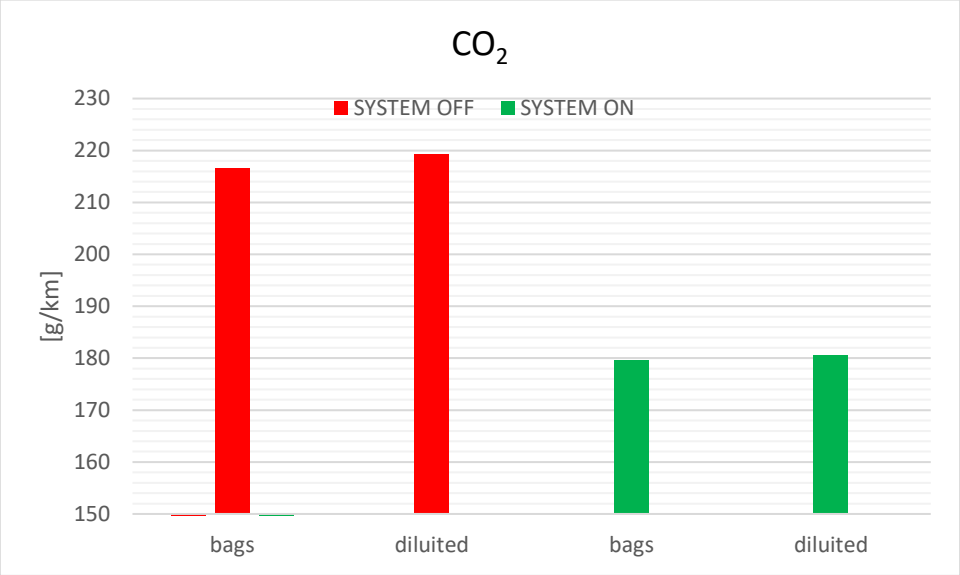


La riduzione delle emissioni di monossido di carbonio è fortemente favorita dalla presenza di ossigeno in grado di completare il processo di ossidazione; in questo caso è essenziale l'utilizzo della miscela idrogeno-ossigeno piuttosto che del solo idrogeno, in quanto viene apportato quel quantitativo di ossigeno in più che promuove la reazione di ossidazione del monossido di carbonio in anidride carbonica. Inoltre, come già detto più volte, l'ossidrogeno permette di utilizzare miscele più magre; queste condizioni favoriscono combustioni più complete, permettendo una riduzione delle emissioni fino all'89%.

Dato che le emissioni di monossido di carbonio dipendono in maniera marcata dal rapporto aria/combustibile, l'ossidrogeno provvede a migliorare il processo di combustione, rendendo disponibile più combustibile a bruciare: il fronte di fiamma della combustione della miscela di gas si propaga molto più velocemente che della sola benzina, il che significa che l'onda di calore e pressione generata schiaccia e frammenta le goccioline di combustibile, esponendole di più alla reazione di combustione. Ciò

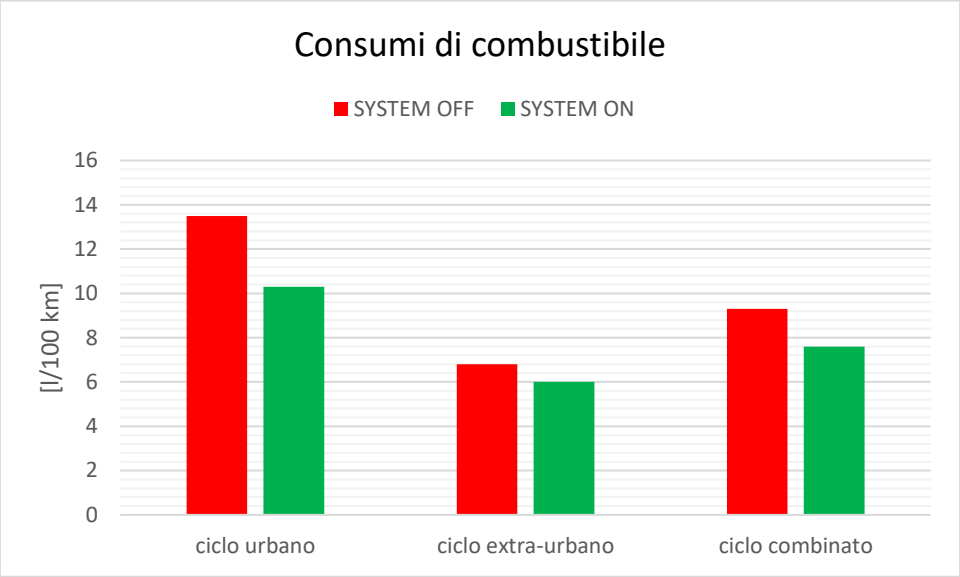
significa che, lavorando con rapporti aria/combustibile comunemente utilizzati, non solo l'ossidrogeno immesso sia più che sufficiente per ossidare la quantità presente nel cilindro, ma che si possa diminuire il rapporto (quindi introducendo più combustibile).

Anidride carbonica



Come si può osservare dai risultati, la riduzione di emissioni di anidride carbonica è del solo 17%, in quanto la produzione di questo inquinante allo scarico è determinato dall'ossidazione del monossido di carbonio; quindi dato che quest'ultimo viene ossidato in maniera marcata, la riduzione di CO_2 è contenuta, seppur si abbia sempre un valore positivo.

Consumi di combustibile



Dai test si può constatare che il sistema Hydromoving influisce anche sui consumi, in quanto oltre che ovviamente sostituire parte del combustibile che effettivamente viene iniettato in camera, viene ottimizzato il processo di combustione, avendo un risparmio complessivo del 16,5%. Va però sottolineato che effettivamente non si può iniettare una quantità eccessiva di ossidrogeno, in quanto i motori tradizionali dei veicoli sono progettati per avere una combustione che rispetti gli standard di emissione consentiti dalla normativa di legge in vigore; quindi bisogna iniettare la giusta quantità per ridurre sia emissioni che consumi, non modificando eccessivamente gli standard di combustione convenzionale.

6.4.2 Motore Diesel

Il secondo veicolo ad essere stato usato per i test di verifica delle capacità del sistema è stato un Nissan NV200 DCi, quindi alimentato da un motore Diesel, con una cilindrata di 1500 cc e una potenza di 64 kW.

Figura 59 Nissan NV200

L'iniezione della miscela idrogeno-ossigeno avviene nel collettore di aspirazione a monte della camera di combustione, subito dopo il turbocompressore, dove si ha un ambiente in cui la pressione arriva fino a 1,5 bar.

Nella figura seguente viene evidenziato qual è l'andamento della velocità del motore quando si verificano cambi di velocità, dove si può notare che in fase di un cambio di un'accelerazione da parte del veicolo, le rotazioni del motore aumentano per poi diminuire rapidamente e assestarsi quando la velocità del veicolo diventa stazionaria. Gli andamenti del motore sono rilevanti in quanto da questi dipendono la combustione e i livelli di emissioni del motore.

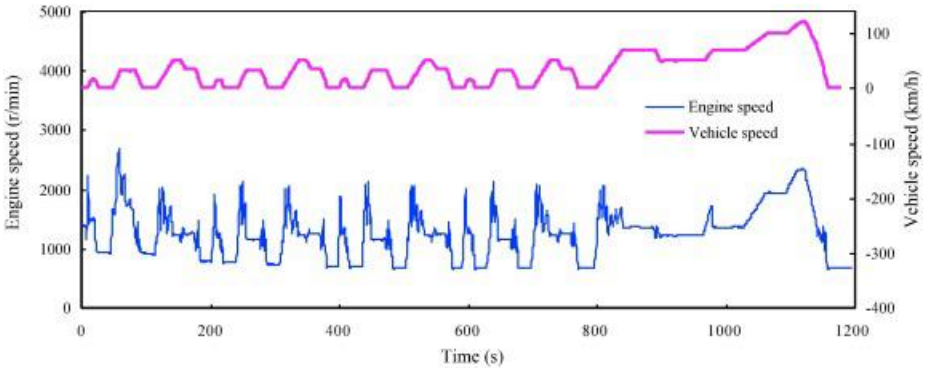


Figura 60 Andamento velocità del motore e del veicolo nel tempo

Qui di seguito vengono riportati i risultati delle concentrazioni allo scarico del motore diesel sia quando il sistema è disattivato e quando viene messo in funzione: i dati rappresentano valori sia positivi, ovvero quando c'è un aumento, sia negativi, quindi con una diminuzione, utilizzando il sistema rispetto al caso in cui non è attivato:

EMISSIONI	THC [g/km]	Nox[g/km]	CO [g/km]	CO_2 [g/km]	PM [counts/km]	THC + Nox [g/km]
Ciclo urbano	-31,24	-13,06	-7,48	5,62	-126,44	-15,58
Ciclo extraurbano	-26,17	0,57	63,09	0,47	-757,02	0,28
NEDC	-30,87	-3,62	-6,75	2,6	-127,72	-5,1

Tabella 1 Test a freddo, valori cumulativi

EMISSIONI	THC [g/km]	Nox[g/km]	CO [g/km]	CO_2 [g/km]	PM [counts/km]	THC + Nox [g/km]
Ciclo urbano	28,75	-13,27	-532,54	1,57	-266,46	-12,83
Ciclo extraurbano	35,74	-22,61	86,14	-2,92	-88,97	-22,4
NEDC	31,49	-19,17	-285,11	-1,16	-190,07	-5,1

Tabella 2 Test a caldo, valori cumulativi

Nelle seguenti descrizioni di ogni inquinante, vengono rappresentate le concentrazioni cumulative durante il ciclo NEDC sia a freddo che a caldo: nei grafici la linea blu rappresenta l'andamento della velocità del veicolo nel tempo, ovvero il ciclo NEDC (uguale in ogni grafico), la linea rossa è la quantità cumulativa dell'inquinante emesso dal veicolo con il sistema disattivato e la linea verde con il sistema attivo.

Ossidi di azoto

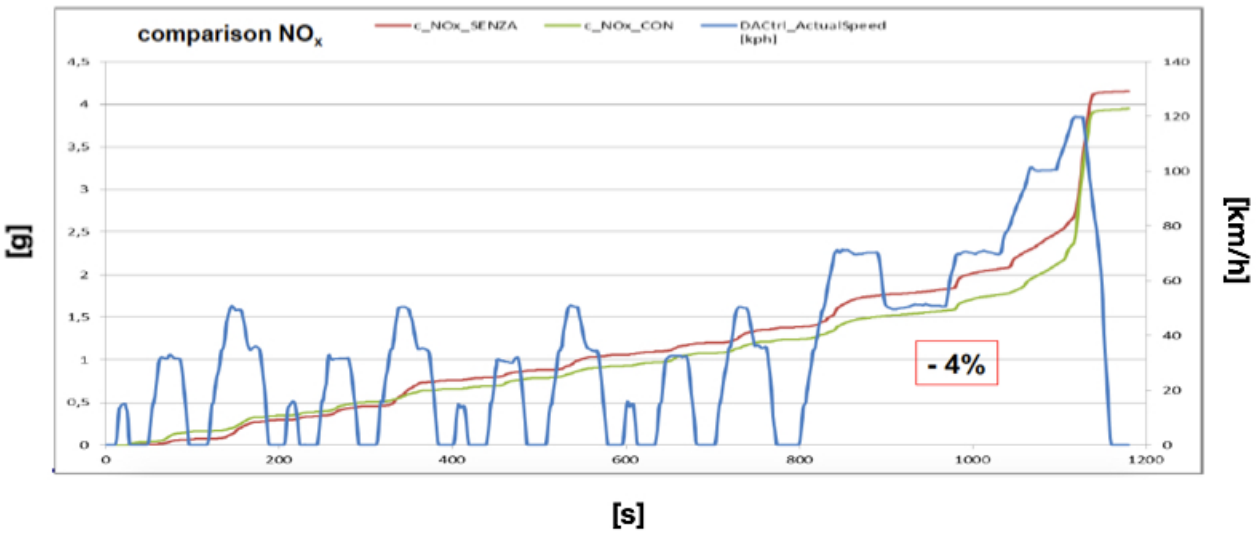


Figura 61 Emissioni cumulative di NOx, ciclo a freddo

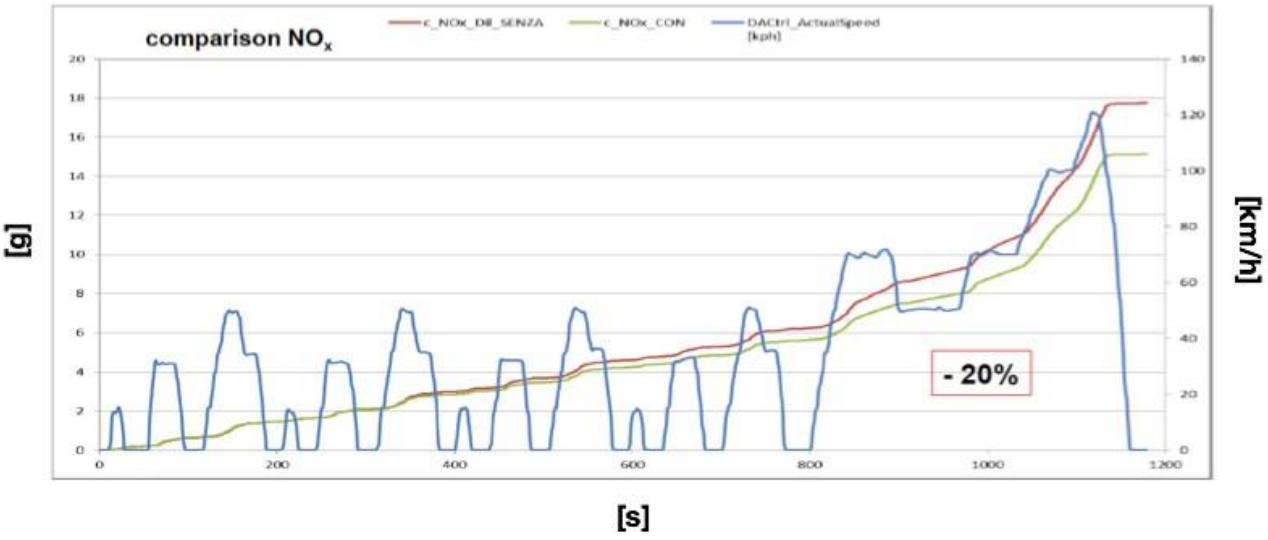


Figura 62 Emissioni cumulative di NOx, ciclo a caldo

I principali ossidi di azoto che vengono a formarsi durante la combustione nei motori diesel sono il monossido e il biossido di azoto (NO e NO_2). Come già spiegato ampiamente nei precedenti paragrafi, i parametri che influenzano maggiormente la formazione di questi inquinanti sono la quantità di aria immessa, le alte temperature raggiunte in camera e le condizioni del carico. Dal grafico si può notare come il sistema Hydromoving influisca positivamente alla diminuzione delle emissioni degli ossidi di azoto: ciò è dovuto alle temperature raggiunte che risultano più basse e al maggior apporto di ossigeno dovuto alla miscela di ossidrogeno, a scapito dell'aria, principale portatrice di azoto. Si può notare anche che la maggior parte di emissione di ossidi di azoto si ha durante la fase di circolazione extraurbana.

Durante il ciclo a freddo la riduzione delle emissioni allo scarico risulta del 4%, dovuto a una relativa bassa temperatura del collettore di aspirazione, con conseguente densità maggiore del gas; mentre nel ciclo a caldo si ha un'importante riduzione, ovvero del 20%, dovuto al raggiungimento delle condizioni favorevoli: le velocità di reazione risultano maggiori, quindi i tempi di permanenza in camera da parte dei reagenti sono minori. Come fattore determinante, vi è l'apporto di ossigeno puro in camera, piuttosto che dell'aria, oltre che lievi quantità di goccioline di acqua, che determinano un ulteriore abbassamento delle temperature locali.

Idrocarburi incombusti

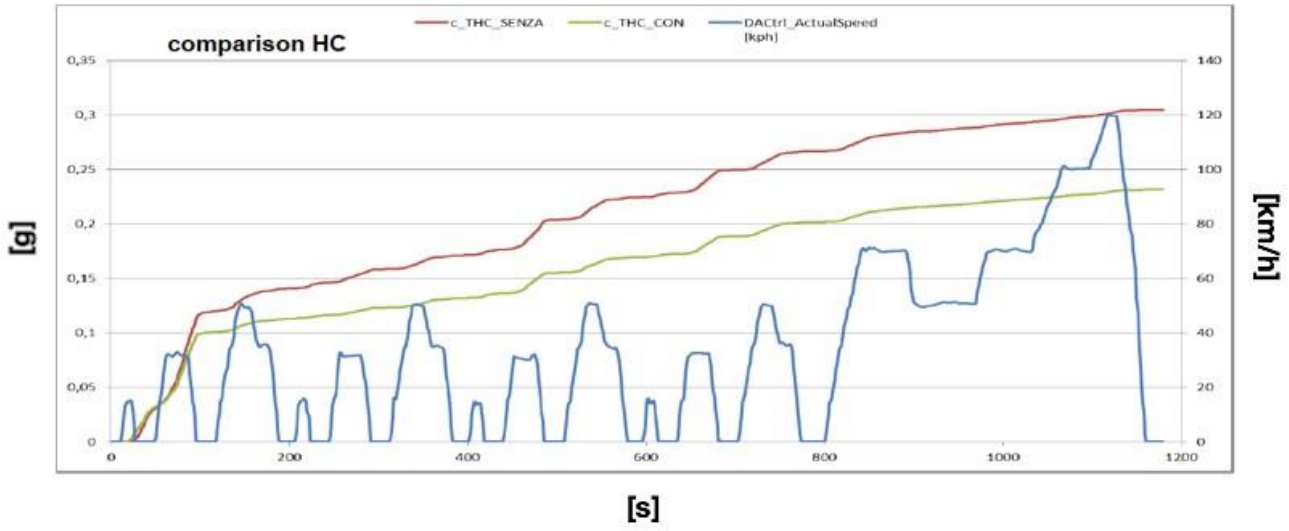


Figura 63 Emissioni cumulative di HC, ciclo a freddo

Dai diversi test effettuati, la riduzione degli idrocarburi incombusti risulta essere dovuta alla maggiore velocità di combustione dell'idrogeno, oltre che chiaramente un minor apporto di carbonio, contenuto nel diesel che viene sostituito in parte dalla miscela idrogeno-ossigeno. Questa riduzione ammonta a circa il 22,6% utilizzando il sistema Hydromoving rispetto al caso in cui non è presente, durante il ciclo NEDC svolto a freddo. Invece, durante la fase svolta a caldo, si ha un aumento di emissioni di questo inquinante (+31,5 g/km), che potrebbe essere giustificato dall'assenza di un compressore durante la fase di test del sistema: la miscela di gas non si è mescolata sufficientemente con il diesel oppure in camera non sono state raggiunte temperature favorevoli all'ossidazione del combustibile, osservazione che viene risaltata dalla riduzione notevole di NOx in questo tipo di test.

Monossido di carbonio

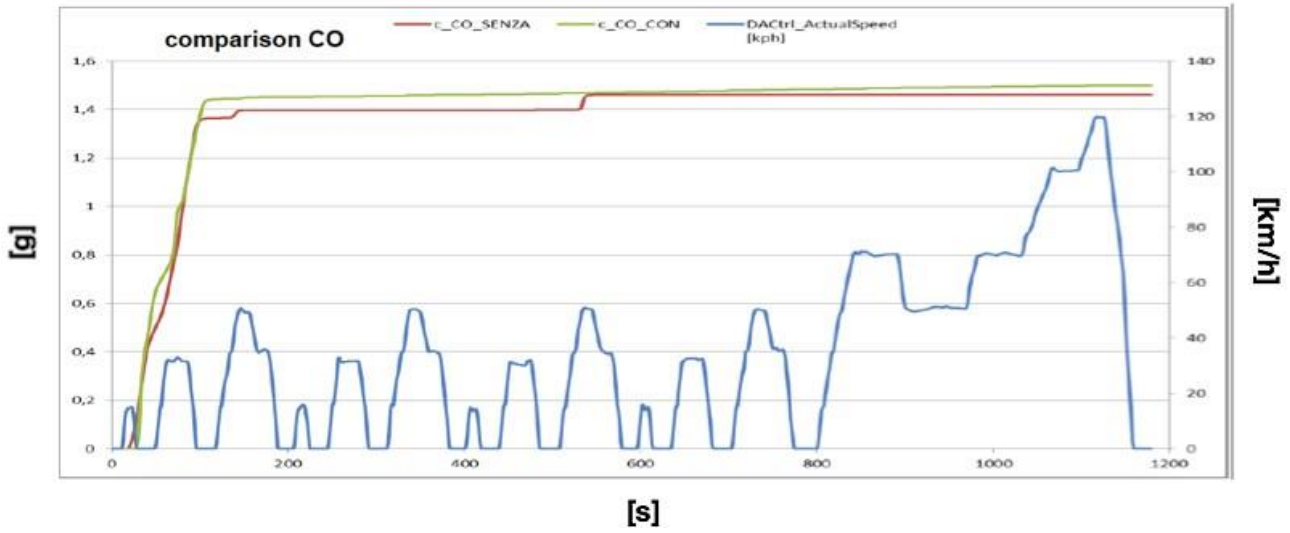


Figura 64 Emissioni cumulative di CO, ciclo a freddo

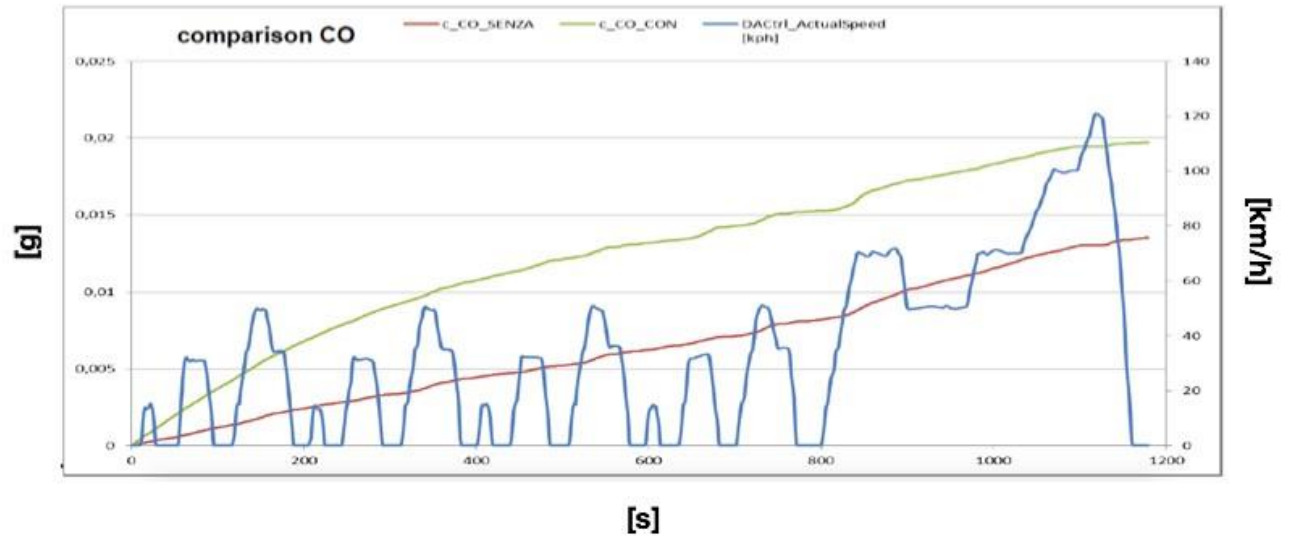


Figura 65 Emissioni cumulative di CO, ciclo a caldo

La formazione di monossido di carbonio è dovuta alla non completa ossidazione di composti contenenti carbonio, causata dalla non sufficiente quantità di ossigeno per reagire e formare anidride carbonica. In generale, con l'utilizzo dell'idrogeno come additivo e un funzionamento a pieno carico, la miscela è leggermente più ricca del normale, ergo vi è più combustibile, quindi più carbonio. Durante il funzionamento a freddo, quindi con temperature relativamente più basse, le emissioni risultano maggiori utilizzando il sistema Hydromoving, perché l'idrogeno sostituisce parte dell'aria in fase di aspirazione; questo è ancora più evidente durante la fase extraurbana del ciclo, dove i tempi di permanenza in camera sono ridotti.

Durante la fase a caldo del ciclo NEDC, invece, si ha una forte riduzione di emissioni, circa il 30%, sia per la minor presenza di carbonio, sia dovuta al raggiungimento di adeguate condizioni per la combustione, quindi di temperature più alte.

Anidride carbonica

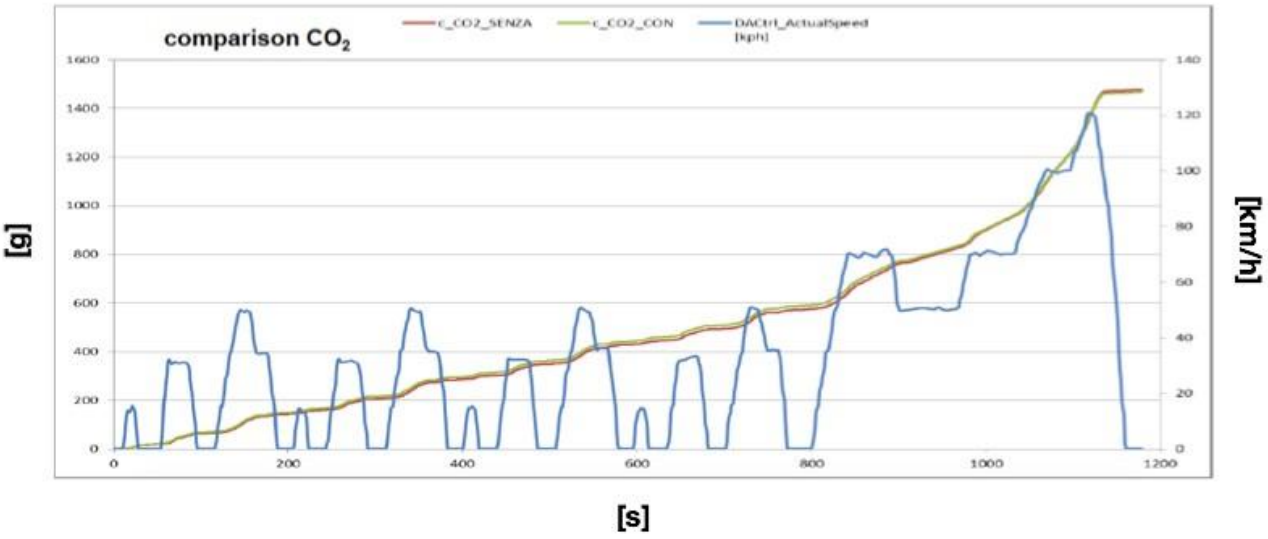


Figura 66 Emissioni cumulative di CO_2

Come per il monossido di carbonio, la riduzione di emissioni di questo inquinante è determinato dall'assenza di carbonio nel diesel, sostituito dall'ossidrogeno, e da una migliore combustione. Ma come si può notare dal grafico, il sistema non ha apportato grosse migliorie per quanto riguarda le emissioni di anidride carbonica: il motivo di questo risultato neutro potrebbe essere dettato dal fatto che la quantità di miscela residua sia poca o per l'assenza del compressore che non consente una migliore miscelazione.

Particolato

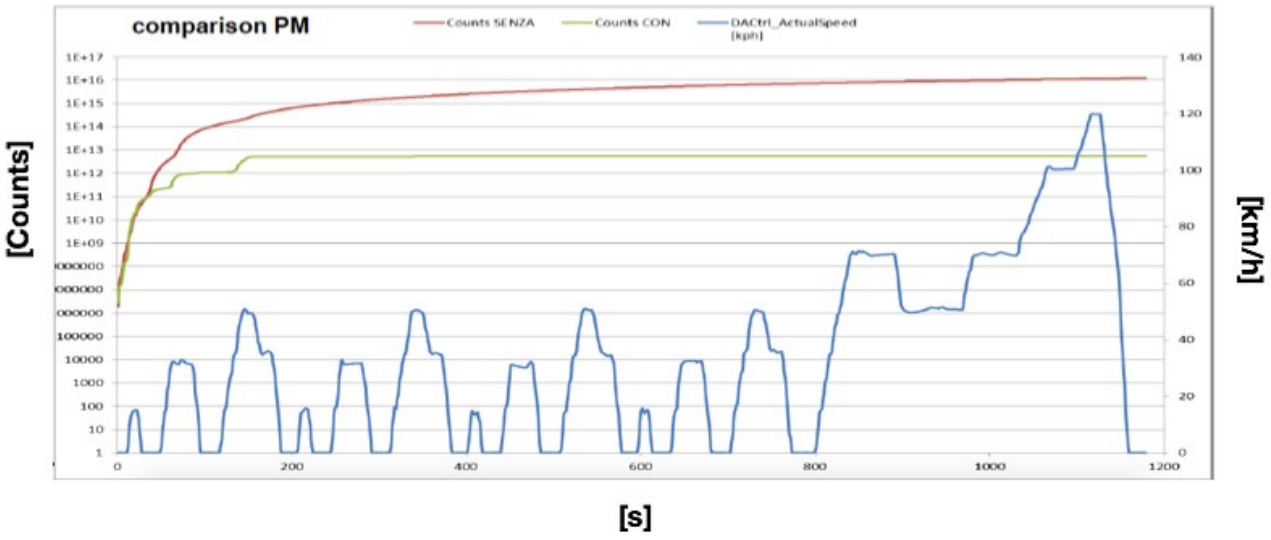


Figura 67 Emissioni cumulative di PM, ciclo a freddo

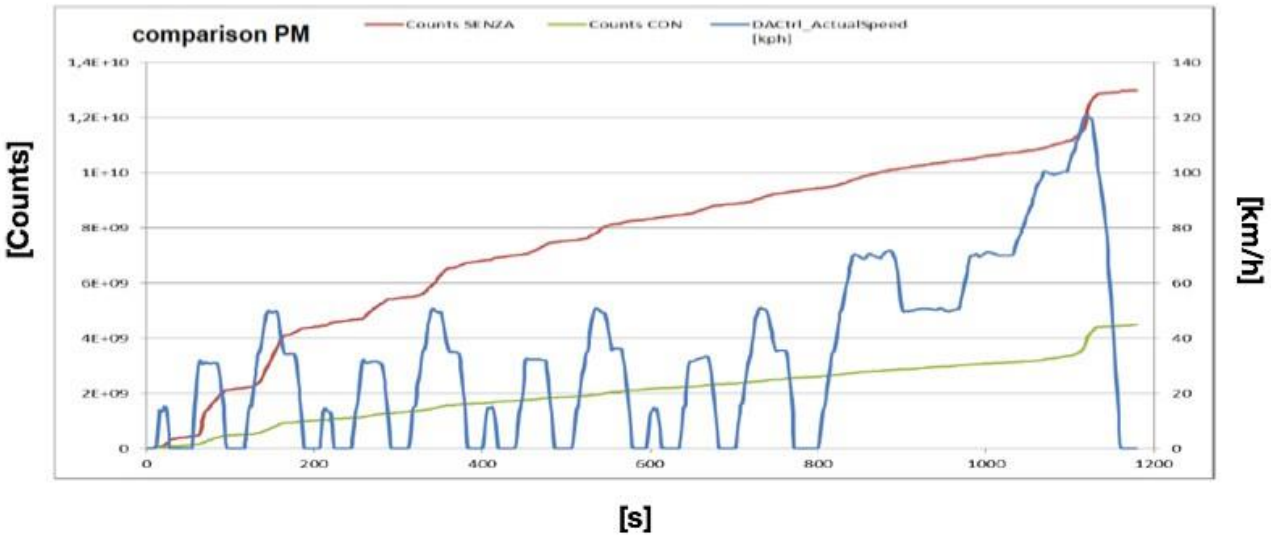
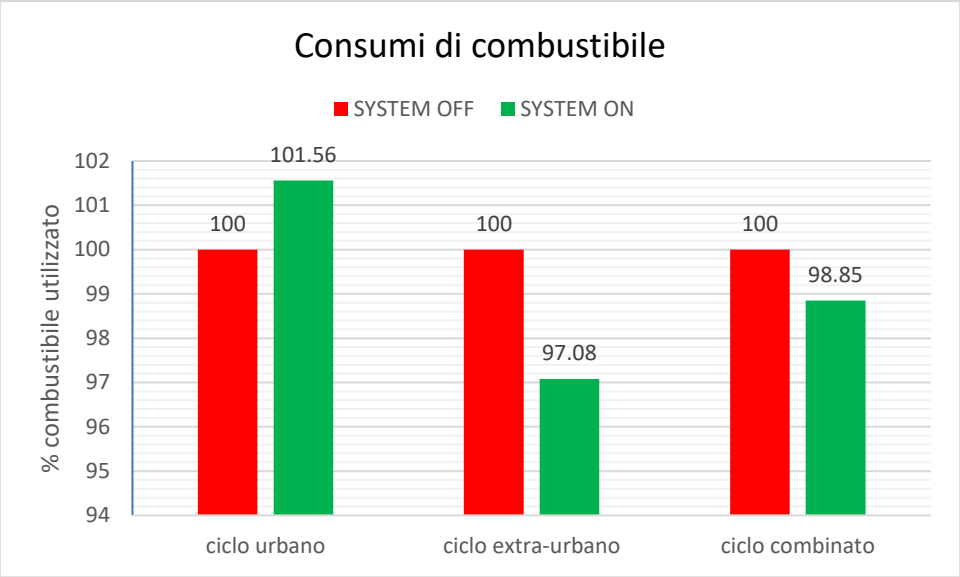


Figura 68 Emissioni cumulative di PM, ciclo a caldo

Il particolato è formato da materiali carboniosi prodotti durante la combustione in cui vengono assorbiti alcuni composti organici, dovuto all'incompleto processo di ossidazione. L'introduzione dell'idrogeno, come già sottolineato in precedenza, riduce il contenuto di carbonio in camera di combustione, diminuendo le possibilità di formazione di particolato, oltre che migliorare la combustione, agendo in termini di accelerare il processo di ossidazione, dato che la velocità di propagazione della fiamma è più alta del solo uso del combustibile. Utilizzando il sistema Hydromoving, si ha una riduzione circa del 19% durante il ciclo a caldo e del 9,7% quando svolto il ciclo a freddo rispetto alle condizioni in cui non è in funzione.

Consumi di combustibile



Si possono fare le stesse considerazioni come per il caso a benzina, ma nel caso del diesel le riduzioni di consumo di combustibile sono dell'1,15% durante il ciclo NEDC. Si può notare come il sistema sia più conveniente da utilizzare durante la guida extra-urbana piuttosto che nella fase di utilizzo urbano.

Capitolo 7
Conclusioni

I motori a combustione interna occupano una posizione importante e rilevante nella vita quotidiana, con maggior utilizzo nel settore dei trasporti, sia di persone che di merci. L'attuale situazione di riduzione di risorse derivanti da giacimenti petroliferi e, soprattutto, le condizioni ambientali odierne stanno portando a una lenta ma progressiva transizione verso l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile. A questo proposito, la miscela di idrogeno e ossigeno, altresì detta ossidrogeno, usata come additivo nei combustibili attuali, come benzina o diesel, può rappresentare un'ulteriore valida soluzione al problema. L'utilizzo del solo idrogeno come combustibile alternativo risulterebbe difficoltoso da realizzare, sia a livello economico, ovvero per la produzione di motori adeguati a poter essere alimentati con questo elemento, sia a livello tecnologico, ovvero riguardante l'approvvigionamento e stoccaggio dell'idrogeno.

A livello teorico, l'utilizzo dell'ossidrogeno apporta dei notevoli benefici sia per quanto riguarda i consumi e i rendimenti del motore, sia, molto più importante, a livello di emissioni. A livello pratico, svolgendo i test adibiti, si è riscontrato come il sistema del progetto Hydromoving sia molto efficace in termini di riduzione delle emissioni di inquinanti, come ossidi di azoto e carbonio, idrocarburi incombusti e particolato, avendo dei notevoli valori di abbattimento, anche se non si può dire lo stesso per i consumi, dove durante i test si è appurato che in determinate condizioni può portare ad un aumento dei consumi.

In sintesi, il sistema Hydromoving fornisce una serie di vantaggi, valorizzando la validità di tale innovazione:

- abbattimento delle emissioni inquinanti allo scarico e riduzione del combustibile;
- utilizza come carburante alternativo una miscela di idrogeno e ossigeno che può essere prodotta direttamente dall'acqua grazie ad un sistema a basso consumo energetico;
- produzione del gas tramite elettrolisi non convenzionale, con un consumo energetico inferiore rispetto ai sistemi tradizionali, poiché si utilizzano impulsi

elettrici al posto di un'alimentazione in corrente continua e una configurazione differente della cella e degli elettrodi;

- i costi di realizzazione dell'impianto sono decisamente inferiori rispetto alle tecnologie necessarie per costruire veicoli ibridi o funzionanti solo con idrogeno come carburante o vettore energetico;
- produzione diretta del gas a bordo del veicolo in funzione delle quantità richieste dal motore, evitando così i problemi di stoccaggio e aumento di peso del veicolo;
- iniezione controllata tramite appositi iniettori comandati da una centralina elettronica secondaria che lavora in maniera combinata con quella originale della vettura, seguendo la variazione di regime del motore e adattandosi al cambiamento del carico;
- sistema di espulsione del gas quando si spegne il veicolo, in maniera tale da evitare che le piccole quantità di idrogeno e ossigeno accumulate nei condotti e nei serbatoi possano costituire un pericolo per la sicurezza;
- aumento delle prestazioni del motore, che permettono di bilanciare le perdite incontrate nel momento in cui si utilizza energia elettrica per produrre il gas.

Concludendo, il sistema Hydromoving, con l'attuale tecnologia, offre una soluzione ai moderni sistemi di produzione di idrogeno on board e on demand, rappresentando un'alternativa alle attuali tecnologie di mobilità sostenibile.

Bibliografia

[1], [2] Parlamento europeo, Il divieto di vendita per le nuove auto a benzina e diesel nell'UE dal 2035, https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/economy/20221019STO44572/il-divieto-di-vendita-per-le-nuove-auto-a-benzina-e-diesel-nell-ue-dal-2035;
[3] Parlamento europeo, Cambiamento climatico: gas a effetto serra che causano il riscaldamento globale, https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20230316STO77629/cambiamento-climatico-gas-a-effetto-serra-che-causano-il-riscaldamento-globale#:~:text=Nel%202021%2C%20le%20emissioni%20di,di%20gas%20a%20effetto%20serra;
[4] European Environment Agency, Global and European temperatures, https://www.eea.europa.eu/ims/global-and-european-temperatures;
[5] European Environment Agency, CO_2 performance of new passenger cars in Europe, https://www.eea.europa.eu/ims/co2-performance-of-new-passenger;
[6] European Environment Agency, Le morti premature causate dall'inquinamento atmosferico sono in continuo calo nell'UE, ma è necessario un maggiore impegno per creare un ambiente privo di sostanze tossiche, https://www.eea.europa.eu/it/highlights/le-morti-premature-causate-dallinquinamento#:~:text=In%20base%20alle%20ultime%20stime,nelle%20linee%20guida%20dell'OMS.;
[7] H. Fayaz, R. Saidur, N. Razali, F.S. Anuar, A.R. Saleman, M.R. Islam, An overview of hydrogen as a vehicle fuel, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112003929;
[8] H. Shahad, Emad D. Abood, An experimental investigation on performance and emissions of a single cylinder D.I. diesel engine with manifold hydrogen induction, https://www.researchgate.net/publication/357186297_An_Experimental_Investigation_on_Performance_and_Emissions_of_a_Single_Cylinder_DI_Diesel_Engine_with_Manifold_Hydrogen_Induction;
[9] Y. Karagöz, T. Sandalcı, L. Yüksek, A. S. Dalkılıç, S. Wongwises, Effect of hydrogen–diesel dual-fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines, https://www.researchgate.net/publication/307875670_Effect_of_hydrogen-diesel_dual-fuel_usage_on_performance_emissions_and_diesel_combustion_in_diesel_engines;
[10] X. Liu, G. Seberry, S. Kook, Q. N. Chan, E. R. Hawkes, Direct injection of hydrogen main fuel and diesel pilot fuel in a retrofitted single-cylinder compression

ignition engine, https://www-sciencedirect-com.ezproxy.biblio.polito.it/science/article/pii/S0360319922036771;
[11] N. Marchettini, E. Del Giudice, V. Voeikov, E. Tiezzi, Water: A medium where dissipative structures are produced by a coherent dynamics, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022519310002560;
[12] L. Errico, Hydromoving Technology Report, http://www.hydromoving.com/h2o/images/tecnologia/how-it-works/Hydromoving_Technology_Report-U.pdf;