



Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

Prestazioni ed emissioni dei motori diesel alimentati con oli grezzi

Relatore: Ch.mo Prof. Alarico Macor

Laureando: Andrea Zaccaria

Anno Accademico 2010/2011

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	5
2. BIOMASSA COME SOSTITUTA DEL PETROLIO.....	7
3. CENNI STORICI.....	11
3.1 Il primo motore diesel e i suoi sviluppi	11
3.2 Il sistema di conversione Elsbett	12
4. L'OLIO VEGETALE.....	15
4.1 Produzione	16
4.2 Composizione	20
4.3 Lavorazione	21
4.4 Proprietà	22
5. ANALISI PRESTAZIONALE	27
5.1 Analisi dei testi.....	28
5.2 Grafici riassuntivi e considerazioni	34
6. ANALISI DELLE EMISSIONI.....	39
6.1 Emissioni regolamentate	39
6.1.1 Analisi dei testi	43
6.1.2 Grafici riassuntivi e considerazioni	49
6.2 Emissioni non regolamentate	54
7. WASTE OIL	57
7.1 Analisi prestazionale	58
7.1.1 Grafici riassuntivi e considerazioni	62
7.2 Analisi delle emissioni	64
7.2.1 Grafici riassuntivi e considerazioni	67
8. INCENTIVAZIONI STATALI	71
8.1 Certificati verdi	72
8.1.1 Calcolo dei certificati verdi	74
8.1.2 Periodo di rilascio dei certificati verdi	75
8.1.3 Cumulabilità degli incentivi	76
8.1.4 Ritiro dei certificati verdi	76
8.2 Tariffa omnicomprensiva	77
8.3 Biomasse da filiera	78
8.4 Disposizioni transitorie	78
8.5 RECS e garanzia d'origine da fonte rinnovabile	79
9. CONCLUSIONE	81
10. BIBLIOGRAFIA	83

1. INTRODUZIONE

L'andamento delle questioni energetica e climatica nel mondo sta ponendo attenzione su nuove fonti di energie "pulite", per cercare di rimpiazzare gradualmente i combustibili fossili che, innanzitutto, sono dannosi all'ambiente e, cosa non secondaria, non sono rinnovabili, con tempi di esaurimento relativamente brevi. Questo lavoro ha lo scopo di fornire una visione il più possibile completa degli oli grezzi e del loro utilizzo nei motori Diesel attraverso un'analisi dei testi presenti nella letteratura. Una prima parte è incentrata sulla presentazione degli oli, delle loro proprietà e delle differenze riscontrate nel confronto con il gasolio. La parte centrale focalizza l'attenzione sulle prestazioni e sulle emissioni di oli vegetali e di scarto che i vari testi in letteratura hanno preso in considerazione. Tutta questa analisi, oltre a valutare la convenienza o meno dell'utilizzo di olio nei motori, è stata accompagnata da una valutazione economica sugli incentivi che lo Stato fornisce a chi vuole adottare questo tipo di tecnologia.

2. BIOMASSA COME SOSTITUTA DEL PETROLIO

In questi ultimi anni l'obiettivo è divenuto sempre quello: slegarsi il più possibile dalla dipendenza dal petrolio, che ancora sostiene presuntuosamente la fornitura mondiale di energia. Il fatto che il petrolio sia sempre stato facilmente scoperto, estratto, trasportato e utilizzato ha permesso all'uomo di abusarne, senza considerare alcun tipo di conseguenza.

Il primo problema su cui si pone l'attenzione è la scarsità delle risorse petrolifere disponibili. Per ora le riserve di petrolio non si sono ancora prosciugate, ma il pericolo più immediato ci sarà quando la domanda supererà l'offerta, e cioè un continuo e folle aumento dei prezzi.

Al giorno d'oggi la domanda annuale di petrolio ammonta a quattro volte il volume delle nuove riserve, ed anche la scoperta di nuovi giacimenti non risolverebbe alcunché, se non dar un irrisorio periodo di respiro al mercato globale, che consuma più di 84 milioni di barili di petrolio al giorno.

Non meno importanza è riservata alla questione ambientale, resa sempre più complicata dall'inquinamento dovuto dalle emissioni di "gas serra", prodotti dalla combustione di carburanti di origine fossile. A questo riguardo, uno studio del Pentagono del febbraio 2004 rivelava le possibili conseguenze degli improvvisi cambiamenti climatici dovuti al riscaldamento globale, e sottolineava in particolare la minaccia di questi fatti alla stabilità politica mondiale.

Un passo importante è stato compiuto nel dicembre 1997, in cui più di 160 paesi hanno sottoscritto un trattato internazionale (conosciuto come trattato di Kyoto) per ridurre le emissioni di elementi inquinanti (biossido di carbonio, metano, ossido di diazoto, idrofluorocarburi, perfluorocarburi ed esafluoruro di zolfo) in una misura non inferiore al 5% rispetto alle emissioni registrate nel 1990 nel periodo 2008-2012. Il trattato è entrato in vigore solo nel 2005, dopo la ratifica della Russia.

Il risultato è un sempre maggior interesse per tutte quelle forme di energie rinnovabili, tra cui il solare, l'eolico, il geotermico e quant'altro. Per quel che riguarda il capitolo combustibili, gli studi si sono rivolti verso forme "green", che non dipendano (o che lo facciano in minima parte) dal petrolio e suoi derivati: si è pensato, come possibili alternative, ai Bio-combustibili, al gas naturale e all'idrogeno.

Il gas naturale però, nonostante fornisca una combustione più pulita, è comunque un combustibile fossile, e il suo prezzo si andrebbe rialzando man mano che le relative riserve si esauriscono. Inoltre la rete di distribuzione non è ancora adatta ad una fornitura su larga scala.

Per quel che riguarda l'idrogeno, esso viene prodotto dall'elettrolisi dell'acqua, e l'elettricità richiesta per soddisfare tutta la richiesta sarebbe enorme (per soddisfare tutto il traffico terrestre degli USA sarebbe richiesta elettricità per circa quattro volte la capacità della rete nazionale). Per di più, non esistono infrastrutture né per la produzione né per la vendita di tutto l'idrogeno che occorrerebbe.

È per questo che l'attenzione si sta spostando sui carburanti di origine naturale, e tutte quelle forme di energia derivati da matrici organiche, vegetali o animali: in sostanza, dalla biomassa. Tutte queste fonti sono rinnovabili, in quanto il tempo di sfruttamento della sostanza è paragonabile a quello di rigenerazione.

La biomassa, in particolare, è la forma più sofisticata di accumulo dell'energia solare. Quella utilizzabile ai fini energetici consiste in tutti quei materiali organici che possono essere utilizzati direttamente come carburanti, ovvero trasformati in combustibili solidi, liquidi o gassosi. Le tre più importanti filiere che rappresentano la biomassa, schematizzate sotto, derivano da:

- Legno
- Agricoltura
- Scarti e rifiuti

forestazione	essenze impiegate per scopi energetici	pellet e cippato
	residui industriali della lavorazione della cellulosa	
	i residui industriali della lavorazione del legno	
colture agricole	essenze coltivate proprio per scopi energetici	olio vegetale
	residui di piantagioni e di lavorazioni agricole	biodiesel
	scarti dei prodotti agro-alimentari	pellet
rifiuti	prodotti organici derivanti dall'attività biologica dell'uomo e degli animali	biogas e termovalorizzazione
	rifiuti urbani di origine vegetale	

Figura 1 - Filiere della biomassa, derivazione e usi

L'energia può essere imbrigliata da queste risorse con metodi fisici, chimici, termici e biologici (fermentazione, combustione diretta, gassificazione ...).

Le principali applicazioni della biomassa sono:

- Produzione di energia (bioenergia)
- Produzione di combustibili (biocombustibili)
- Sintesi di prodotti (bioprodotti)

Per quello che riguarda i biocombustibili, studio di questo lavoro, essi devono essere tecnicamente accettabili, economicamente competitivi, ambientalmente sostenibili e facilmente reperibili. Come si approfondirà più avanti, esistono un numero di piante che producono olio che può essere usato, puro o miscelato con il diesel, nei motori a combustione interna. Esse contengono una minima percentuale di zolfo, il quale causa l'inquinamento da acido solforico. Inoltre assorbono la stessa quantità di CO₂ durante la produzione di quella che emettono durante la combustione, e ciò riduce l'incremento di anidride carbonica nell'atmosfera.

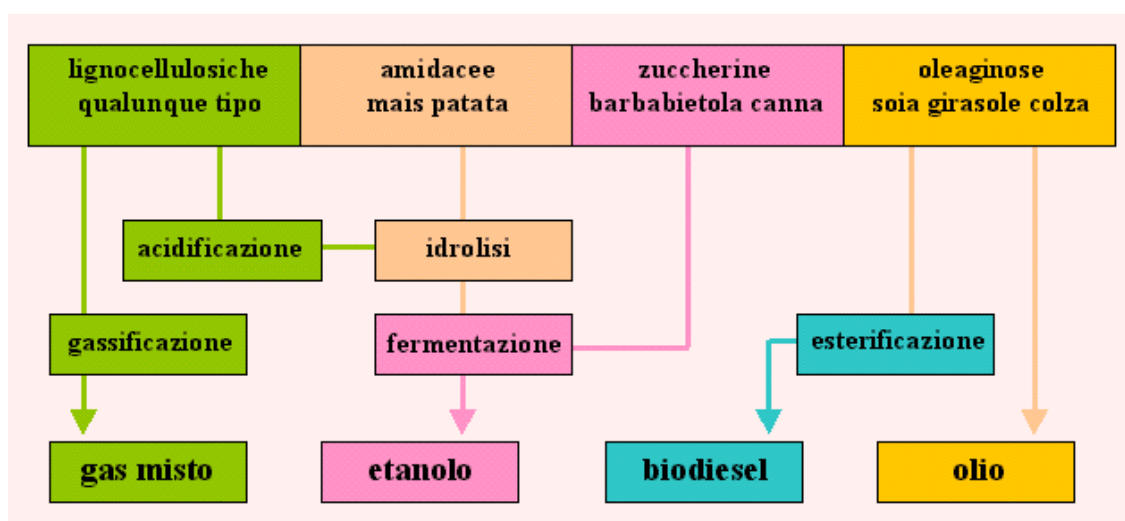


Figura 2 - Produzione di combustibili a partire da varie materie prime

Dalle riflessioni fatte fino ad ora, pare evidente che, in uno scenario globale in cui il petrolio regola gli equilibri del mercato e dell'ambiente, uno sguardo profondo a ciò che può essere rinnovabile e con un impatto minimale sulla natura ci fa sperare di poter uscire da una situazione che qualche anno fa era considerata solo marginalmente, ma che ora non ci si può più permettere di trascurare.

3. CENNI STORICI

L'idea di utilizzare gli oli vegetali nei motori a combustione interna non è nuova: nel 1900, all'Esposizione Universale di Parigi, fu mostrato il primo motore diesel funzionante con olio di arachidi, ma l'inventore morì prima di vedere che le sue intuizioni sull'utilizzo di oli vegetali nei motori divenissero realtà. Nonostante ciò, ora il nome di Diesel è associato solamente a motori funzionanti con i derivati dal petrolio.

Nel 1925 l'ingegnere francese Gautier fece dei test approfonditi su motori diesel marini da 250/550 kW a basso numero di giri (390/420) utilizzando olio di arachidi, di palma e di ricino e studiò il diverso comportamento del motore conseguente a varie modifiche. I risultati che ottenne non furono molto diversi da quelli attuali: prestazioni termodinamiche leggermente migliori di quelle del gasolio e un aumento dei consumi (5%).

Il risultato di questi studi ebbe alcune conseguenze durante la 2° guerra mondiale: 100 t/mese di olio di palma furono consumate nel porto di Abidjan (Costa d'Avorio) in motori da 40 a 700 kW, mentre olio di arachidi fu utilizzato come carburante per le colonne di camion adibite ai trasporti tra Dakar e Algeri.

Dalla guerra ad oggi lo sviluppo tecnologico ha portato ad un uso quasi esclusivo dei combustibili fossili, e per questo motivo i combustibili vegetali furono progressivamente messi da parte principalmente per due ragioni: l'alto costo produttivo e la non costanza qualitativa del prodotto. Il tutto fu fortemente influenzato dalla politica di sviluppo dei paesi industrializzati in quel periodo, basata su bassi costi del combustibile fossile e sulla massimizzazione della produzione agricola alimentare. Solo la crisi energetica degli anni settanta (legata alla guerra del Kippur) risvegliò l'interesse sull'argomento e fece partire nuove campagne di studi, iniziando in Australia e Nuova Zelanda.

3.1 IL PRIMO MOTORE DIESEL E I SUOI SVILUPPI

Il primo motore Diesel iniettava il carburante per mezzo di un compressore d'aria, che lo atomizzava all'interno della camera di combustione attraverso un ugello, la cui apertura era regolata da una valvola a spillo mossa dall'albero a camme. Questo meccanismo, chiamato "iniezione a colpo d'aria", funzionava relativamente bene con oli puri derivati dalle arachidi o con altri oli di semi.

I motori Diesel attuali invece alzano la pressione del carburante a valori altissimi, e lo inviano nella camera di combustione senza l'ausilio di aria compressa. Una pompa mette il combustibile in pressione e lo trasferisce al condotto comune ("common rail"), che funge da serbatoio di accumulo; la pressione stessa viene regolata grazie ad una valvola controllata elettronicamente in modo da mantenere nel condotto comune, comunemente chiamato "flauto", la pressione richiesta dalla centralina elettronica.

Questi sofisticati sistemi di iniezione permettono l'utilizzo di oli precedentemente processati e miscelati in minime percentuali con i carburanti derivati dal petrolio.

Negli anni seguenti molte compagnie investirono molti fondi in risorse e ricerche per sopperire a questo limite e per cercar di far funzionare i motori con una miscela sempre maggiore di biodiesel. Si ricorda in particolare la "New Holland", società produttrice di trattori che, nel 2007, alla Conferenza di Vienna sul Biodiesel e, poco dopo, all' "Agrotechnia Agriculture Exhibition" ad Hannover, intervenne per affrontare la questione delle energie rinnovabili per proteggere il clima.

In questi avvenimenti emerse una società, la Elsbett Technologie GmbH, con una tecnologia unica che le permise, sin dal 1977, di convertire i motori diesel affinché operassero con gli oli vegetali, divenendo così la compagnia leader mondiale per questa tecnologia.

Fu proprio da questo incontro che le sue società, New Holland e Elsbett Technologie iniziarono una collaborazione affinché si facessero funzionare i trattori, prodotti dalla prima compagnia, con i motori opportunamente modificati dalla seconda.

3.2 IL SISTEMA DI CONVERSIONE ELSBETT

Questo sistema prevede una serie di caratteristiche tecniche combinate in modo da far funzionare quasi tutti i motori diesel per automobili, camion e trattori. Per una buona conversione ai motori devono essere apportate alcune modifiche in modo da compensare alle speciali caratteristiche dell'olio vegetale. In particolare, il kit Elsbett prevede:

- Un preriscaldatore del combustibile
- Filtri addizionali
- Modifiche al sistema combustibile/pompa
- Aggiustamenti al sistema di controllo elettronico del motore
- Sistemi di controllo e di trasmissione
- Modifiche al sistema di iniezione (per il sistema ad un serbatoio)

Esistono due sistemi diversi per la conversione del motore: l'utilizzo del sistema ad un solo serbatoio è previsto per tutti i motori diesel dotati di una precamera di combustione; si ricorre, invece, al sistema con i due serbatoi quando sono utilizzate l'iniezione diretta o il common rail.

➤ *SISTEMA ELSBETT AD UN SERBATOIO*

Il combustibile è inserito nel serbatoio originale dell'automobile, non ce ne sono di aggiuntivi. Questa soluzione prevede l'adattamento del sistema di iniezione con le caratteristiche di iniezione dell'olio vegetale, ed in particolare delle candele ad incandescenza, degli iniettori e dei loro supporti.

In questo modo il motore diesel può funzionare unicamente con olio vegetale, eccezion fatta per i mesi invernali, quando una certa quantità di diesel puro deve essere inserita nel serbatoio per compensare la più alta viscosità dell'olio e permettere quindi che il combustibile continui a scorrere liberamente.

Il kit per questo sistema prevede le seguenti parti:

- Iniettori
- Filtri addizionali per il combustibile
- Scambiatore di calore per l'acqua refrigerante per pre-riscaldare il combustibile
- Regolatore di temperatura
- Pompa manuale per il combustibile
- Candele ad incandescenza
- Valvola di blocco
- Tubi per acqua e combustibile
- Cavi vari
- Istruzioni

➤ *SISTEMA ELSBETT A DUE SERBATOI*

Questo sistema prevede due serbatoi separati di combustibile: quello principale per l'olio vegetale, l'altro, più piccolo, per il diesel. Si utilizza il serbatoio del diesel per far partire il motore e per riscaldarlo. Una volta che si è scaldato, si commuta l'interruttore, manualmente o elettricamente, sul serbatoio dell'olio vegetale. Prima di lunghe soste, quando inevitabilmente in motore si raffredda, è necessario commutare nuovamente l'interruttore sul serbatoio del diesel per l'ultimo periodo di marcia del veicolo, in modo da scaricare l'olio vegetale dagli iniettori e preparare il motore alla nuova partenza a freddo.

Il kit per questo sistema prevede:

- Un piccolo serbatoio aggiuntivo
- Filtri aggiuntivi per il combustibile
- Scambiatore di calore per l'acqua refrigerante per pre-riscaldare il combustibile
- Interruttore per passare da un serbatoio ad un altro
- Tubi per acqua e combustibile
- In qualche caso candele ad incandescenza
- Pompa elettrica per il combustibile
- Regolatore di temperatura
- Cavi vari
- Istruzioni

4. L'OLIO VEGETALE

Gli oli vegetali sono combustibili liquidi, prodotti mediante l'estrazione dalle colture dedicate oleaginose (oli grezzi, senza necessità di raffinazione) o recuperati attraverso la raccolta differenziata degli oli alimentari esausti.

Essi trovano nell'alimentazione degli impianti per la produzione di energia elettrica e termica la loro più ampia applicazione. Nel settore dei trasporti, invece, il loro utilizzo è attualmente limitato a causa delle loro caratteristiche.

Per quel che riguarda l'autotrazione, l'applicazione di questi oli su larga scala non è attualmente proponibile, poiché necessita di importanti modifiche nella progettazione dei motori e, cosa non secondaria, nell'organizzazione della rete di distribuzione, soprattutto in considerazione della loro maggiore viscosità rispetto al gasolio.

Per quel che concerne invece la produzione di energia termica, sono già disponibili sul mercato alcuni impianti, con potenza massima non superiore ai 10 MW, ma si rendono necessarie delle modifiche per il corretto utilizzo, quali la geometria degli ugelli di polverizzazione a causa della maggiore viscosità, o le differenti temperature di preriscaldamento del combustibile (ca. 65° C) e pressioni di atomizzazione (2,2 MPa). Il rendimento della conversione si aggira intorno allo 0,4-0,5.

Gli oli vegetali possono essere utilizzati inoltre per l'alimentazione di gruppi elettrogeni, con rendimenti pari allo 0,42 per gli impianti che producono una potenza inferiore a 1 MW, e allo 0,45 per potenze superiori a 1 MW.

4.1 PRODUZIONE

Esistono centinaia di coltivazioni diverse che possono essere usate per la produzione di combustibili alternativi. Di seguito ne sono riportate alcune, in ordine decrescente a seconda di quanto olio (in litri) producono per ettaro all'anno.

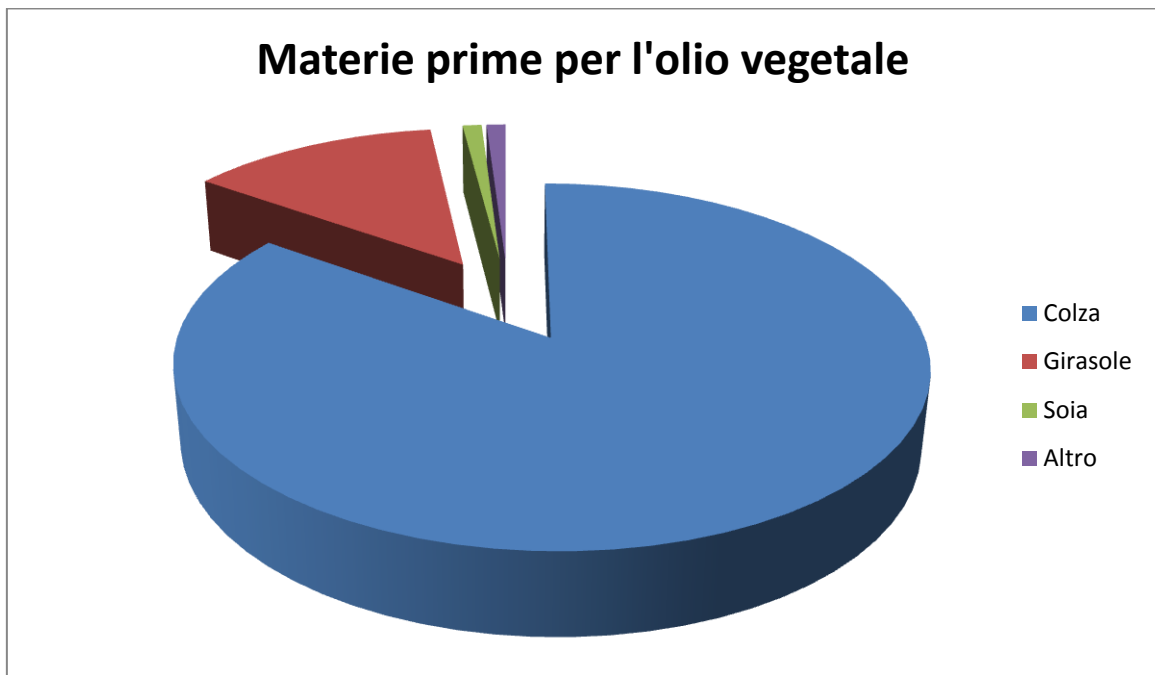


Figura 1 – Distribuzione delle materie prime per gli oli vegetali

→ OLIO DI PALMA

L'olio di palma dell'Africa è in cima alle classifiche delle piante da olio, con 5.950 litri per ettaro.

La palma fornisce due tipi di olio: l'olio di palma e l'olio di noce di palma. Il primo è estratto dalle parti carnose del frutto, che contiene il 40-50% di olio, e viene utilizzato soprattutto nella manifattura di saponi, candele, margarine e oli da cucina. Il secondo viene estratto dal nocciolo del frutto, che contiene il 50% di olio.

Quel che rimane dopo l'estrazione dell'olio è usato come mangime per gli animali.

→ *OLIO DI COCCO*

L'albero di cocco produce circa 2.700 litri l'anno per ettaro coltivato. È il terzo più prodotto al mondo, dopo quello di arachidi e di soia.

Si ricava estraendo la polpa, essiccandola e pressandola, e i residui vengono dati in pasto agli animali.

Tra tutti i prodotti che utilizzano le varie parti dell'albero di cocco si ricordano spaghi e corde, stuoie, zerbini saponi, lubrificanti, fluidi idraulici, gomma sintetica e margarina.

→ *JATROPHA GOSSYPIFOLIA*

È un arbusto assai tenace e versatile che ha molti usi. Si adatta molto bene a località semidesertiche e semiaride, può essere valido per combattere l'erosione del suolo o per circoscrivere gli appezzamenti, e perciò sta conquistando sempre maggior interesse nel settore.

Viene utilizzato per olio da lampada, sapone, candele, ma anche per veleni (per la sua tossicità).

La jatropha arriva a produrre circa 1.590 litri di olio per ettaro.

→ *COLZA (O CANOLA)*

A volte coltivata in piccole quantità come verdura da tavola, questa pianta è utilizzata come foraggio per il bestiame e per l'olio che se ne trae. Essa fornisce 1.190 litri di olio l'anno per ettaro, e, come visto in altri casi, ciò che rimane dopo la spremitura è usato come mangime altamente proteico per il bestiame.

→ *ARACHIDE*

L'olio di semi di arachide è un olio alimentare utilizzato sia per la cottura che per le frittiture a temperature elevate, per le margarine, per prodotti farmaceutici, saponi e lubrificanti.

I semi, le noccioline, si mangiano abbrustoliti e salati o vengono trasformati in burro d'arachidi, oppure, come avviene in molti paesi, sono trattati per ricavarne olio, per un quantitativo di circa 1.060 litri l'anno.

L'olio di arachidi è stato il primo biocombustibile ad essere utilizzato, nel 1900, all'Esposizione universale di Parigi, in una versione più piccola del motore di Rudolf Diesel, costruita dalla Otto Company francese.

→ *GIRASOLE*

I semi di questa pianta sono al secondo posto della produzione mondiale di olio commestibile, e producono circa 950 litri l'olio per ettaro. Esso, oltre all'uso alimentare, viene impiegato anche nei lubrificanti, nei saponi, come olio per lampade, e per una varietà di colori e tinture.

I semi si consumano sia crudi che abbrustoliti e salati, e possono anche essere trasformati in farina. Quel che ne resta è usato come mangime animale.

→ *CARTAMO*

È una pianta annuale, e si coltiva soprattutto per i suoi semi commestibili e ricchi d'olio, che fruttano circa 80 litri per ettaro. Ricco di acidi grassi insaturi, l'olio di cartamo è appena colorato e viene chiarificato facilmente. È usato come olio da cucina, nelle margarine, nelle cere e come olio secco nelle pitture e nelle vernici.

Il cartamo, che cresce bene sugli stessi terreni che favoriscono la crescita di grano e orzo, può essere piantato, coltivato e raccolto con le macchine usate per le graminacee.

→ *SENAPE*

Sono coltivate diverse varietà di senape apprezzate soprattutto per i semi, che riescono a fornire circa 570 litri l'olio per ettaro. I semi vengono processati per essere utilizzati in tanti modi, compresi diversi tipi di mostarde, lubrificanti e oli per capelli. Ancora una volta quel che ne rimane è utilizzato come mangime per le bestie, oppure come fertilizzante o ancora come pesticida biologico.

La maggior parte delle diverse tipologie di senape, come il cartamo, può essere piantata, coltivata e raccolta tramite i comuni macchinari agricoli.

→ *FAGIOLI DI SOIA*

Sono una delle fonti più importanti al mondo di olio e proteine. Essi rendono circa 445 litri d'olio per ettaro, che viene usato come olio da tavola e per la produzione di margarine varie; ha inoltre un impiego nella produzione di pitture, linoleum, saponi, insetticidi e disinfettanti.

→ *OLI DI CUCINA USATI*

La maggior parte dei ristoranti e degli altri esercizi in cui si frigge pagano appositamente per l'esportazione di tutti i grassi accumulati. Alcuni di questi oli vengono usati come materia prima per gli animali, o ancora fertilizzanti o quant'altro, ma la maggior parte viene gettata nelle discariche o peggio riversata nelle fognature, provocando molti problemi agli impianti di depurazione.

L'olio di frittura usato (WVO) è una grandissima risorsa a basso costo adatta per l'utilizzo nei motori a combustione interna, e a questo scopo comincia ad essere sempre più usato negli Stati Uniti (un po' meno in Europa), anche se, a causa delle contaminazioni con particelle di cibo, richiede un trattamento aggiuntivo prima di essere utilizzato.

→ *ALGHE*

Un'ulteriore risorsa per produrre olio per biocombustibili sono proprio le alghe. Esse possono fornire una quantità d'olio al cui confronto le altre risorse spariscono.

È necessario ricordare che la base della materia organica che nel corso del tempo si è trasformata in petrolio sono proprio le alghe. Questi depositi vennero successivamente coperti dai sedimenti e trasformati lentamente in petrolio nel corso di milioni di anni a causa della pressione e del calore.

Lo stesso processo oggi lo si può riprodurre in pochi giorni, facendo crescere le alghe in bacini colmi di una soluzione salina, e raccogliendone l'olio direttamente.

4.2 COMPOSIZIONE

L'olio vegetale è una miscela di:

- Acidi grassi liberi
- Glicerolo
- Monogliceridi, Digliceridi, Trigliceridi
- Fosfatidi
- Lipoproteine
- Glicolipidi
- Cere
- Terpeni e altri composti

Ogni olio vegetale è composto da tre catene di acidi grassi attaccati ad una molecola di glicerina, ed è per questo che esso viene definito come trigliceride. La glicerina è una sostanza densa e appiccicosa, la quale rende l'olio vegetale molto più viscoso (fino a 20 volte) rispetto al diesel derivato dal petrolio.

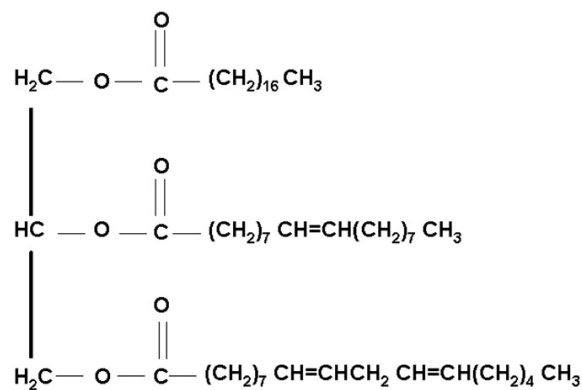


Figura 2 - Struttura di una tipica molecola di trigliceride

Parametri	Diesel	Biodiesel	Olio di girasole	Olio di colza
Potere calorifico (MJ/kg)	42.7	37.2	37.7	37.6
Densità a 15 °C (kg/L)	0.83	0.86-0.90	0.92	0.91
Viscosità a 40°C (mm ² /sec)	2-4.5	3.5-5	31.4	36
Punto di infiammabilità (°C)	>55	>120	253	>220

Tabella 1 - Parametri a confronto per diversi tipi di combustibile

4.3 LAVORAZIONE

Come già accennato, l'olio grezzo deve essere raffinato, prima di poter essere utilizzato, e ciò lo si fa attraverso quattro fasi di lavorazione: degommazione, neutralizzazione, decolorazione e deodorazione. L'olio risultante può essere utilizzato come sostituto nei motori diesel, sebbene debba essere prima riscaldato per ridurre la viscosità.

La lavorazione può essere soggetta a delle varianti, e alcuni processi possono combinare o addirittura eliminare delle fasi.

➤ *DEGOMMAZIONE*

Serve per eliminare dal composto le fibre gommose, i carboidrati complessi, i fosfolipidi. È la fase di lavorazione che rimuove la più grande quantità di impurità, e prevalentemente i fosfati idratati.

In primo luogo si riscalda a 50-70 °C l'olio grezzo, a cui si aggiunge, in percentuale dello 0,1-1%, l'acido fosforico o citrico. L'acido reagisce con i fosfatidi (gomme) nell'olio, rendendoli idratabili.

A questo punto si può procedere direttamente alla neutralizzazione o alla decolorazione senza la rimozione delle gomme. Altrimenti, ed è preferibile, passare alla degommazione ad acqua, per idratare i fosfatidi prima di passare alla loro rimozione nel separatore, da cui usciranno separatamente olio degommato e gomme.

Alcuni raffinatori preferiscono aggiungere degli agenti chelanti dopo la degommazione, per eliminare alcuni composti metallici presenti nell'olio vegetale, come per esempio calcio, potassio, magnesio, alluminio, ferro e rame.

➤ *NEUTRALIZZAZIONE*

La seconda fase consiste nel riscaldare, ad una temperatura di circa 95 °C l'olio degommato, per poi miscelarlo con una soluzione di idrossido di sodio (soda caustica). Questo permette di neutralizzare l'acido in eccesso e di saponificare gli acidi grassi nell'olio. L'olio attraversa quindi due separatori: dal primo ne esce uno stock di sapone; nel secondo, in cui però è aggiunta anche acqua, avviene un processo di lavaggio per eliminare eventuale sapone residuo. Da quest'ultimo passo escono olio neutralizzato e acqua esausta.

➤ *DECOLORAZIONE*

Questa fase migliora il colore e il gusto dell'olio degommato e neutralizzato. Dapprima si elimina l'acqua residua, successivamente si forma una soluzione olio/terra mediante l'aggiunta di terra decolorante. Le impurità residue vengono assorbite dalla terra, quindi attraverso un filtro si eliminano terra e le impurità da essa assorbite, fornendo l'olio vegetale utilizzabile.

➤ *DEODORAZIONE*

Quest'ultima fase consiste nell'eliminare quelle sostanze ancora presenti nell'olio che apportano odori sgradevoli allo stesso.

Nell'oggetto del nostro studio questa fase può non essere presa in considerazione, in quanto inutile e dispendiosa.

4.4 PROPRIETÀ

A seconda della natura da cui provengono e delle condizioni di estrazione e di essiccazione dei semi, gli oli vegetali mostrano diverse caratteristiche psico-fisiche e proprietà di combustione.

Tra le proprietà chimiche, in primo luogo bisogna citare la natura stessa degli acidi grassi, la quale dipende essenzialmente dal tipo di raccolto, e determina in modo considerevole la combustione degli acidi grassi stessi all'interno del motore.

Il valore di iodio (IV, Iodine Value) indica il grado di insaturazione dell'olio (numero di legami doppi o tripli). Esso corrisponde alla quantità di iodio, in grammi, assorbiti da 100 g di olio. Più l'olio è insaturo, maggiore è il valore di IV. Perciò un basso valore di iodio, che corrisponde quindi ad un olio saturo, conduce ad una combustione migliore. Se la maggior saturazione porta da un lato ad una combustione più efficiente, dall'altro rende gli oli stessi più viscosi alle alte temperature. I legami doppi che caratterizzano gli oli insaturi li rendono più fluidi e abbassano la loro temperatura di fusione.

I fosfolipidi sono degli elementi indesiderati i quali derivano dalle cellule delle membrane dei semi e dei chicchi, e la loro concentrazione negli oli dipende dai processi di spremitura e di filtraggio. Essi sono responsabili dell'ostruzione delle valvole, della camera di combustione e dei cilindri.

Le cere sono lunghe catene di acidi grassi e alcool, e derivano dal guscio o dalla pelle di alcuni semi. Il loro contenuto all'interno dell'olio dipende dall'origine del seme, dalla sua maturità e dalla temperatura di estrazione. Le cere sono solubili quando calde, ma possono essere filtrate a freddo. Non aumentano in alcun modo i problemi di combustione, ma possono creare guai quando fredde per il sistema di alimentazione, pompe, filtri e quant'altro.

Per quanto riguarda le caratteristiche fisiche invece, ne possiamo trattare alcune:

- *VISCOSITÀ*

Questa caratteristica indica la fluidità necessaria per una corretta polverizzazione da parte degli iniettori e una corretta scorrevolezza all'interno della pompa ad iniezione. Alte viscosità comportano combustioni più povere. Rispetto ai combustibili fossili, gli oli vegetali hanno un'elevata viscosità e una bassa volatilità, e ciò è dovuto alla maggior dimensione delle molecole dei trigliceridi che costituiscono circa il 98% delle piante da olio.

Come si può notare dalla Fig. 3, la viscosità è influenzata moltissimo dalla temperatura: alla temperatura ambientale gli oli vegetali hanno un valore medio di circa 10-15 volte maggiore rispetto a quello del diesel, mentre man mano che la temperatura aumenta, la viscosità decresce in modo esponenziale.

L'alta viscosità degli oli è attribuita alla loro elevata massa molare (600-900 g/mol).

Per risolvere questo problema si possono adottare varie soluzioni:

- miscelare l'olio in varie proporzioni con il diesel;
- pre-riscaldarlo prima di alimentare il motore;
- accendere il motore per un primo periodo utilizzando il diesel e poi switchare l'alimentazione verso l'olio vegetale (dual fuel).

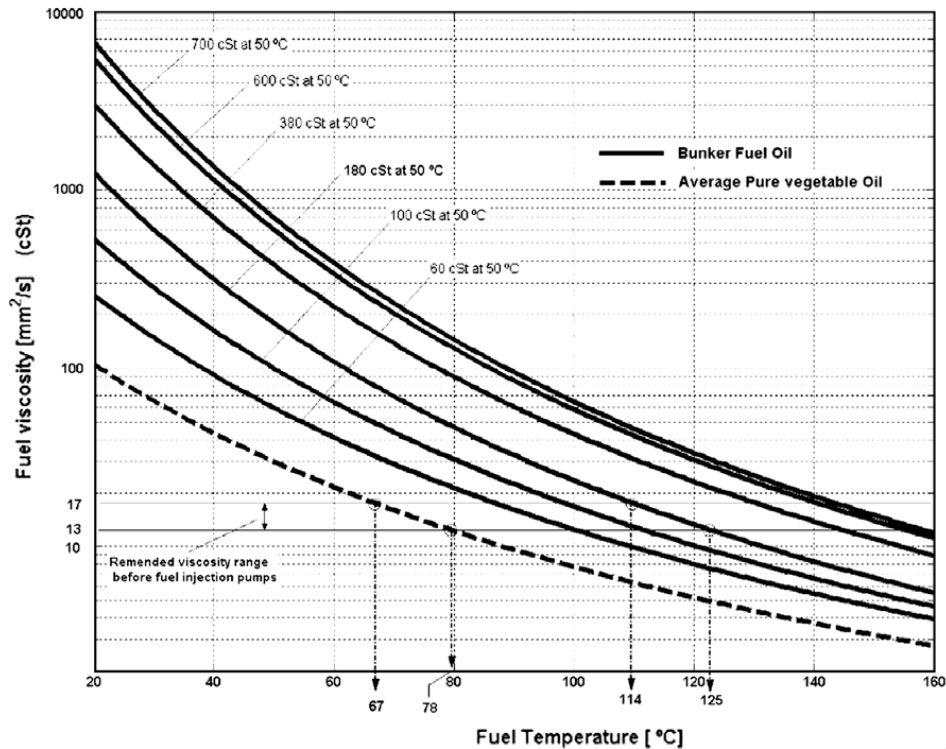


Figura 3 – Andamento della viscosità al variare della temperatura

- **DENSITÀ**

La densità degli oli vegetali è in media il 10% maggiore paragonato con il gasolio. Questo non è un problema, ma deve essere tenuto in considerazione, ad esempio, per regolare il flusso di carburante.

- **NUMERO DI CETANO**

Il numero di cetano indica la percentuale in valore di cetano (C₁₆H₃₄) al quale è assegnata accendibilità 100, contenuta in una miscela di cetano e alfa metilnaftalina, che ha accendibilità 0, avente uguale ritardo all'accensione del combustibile in esame. Esso indica quindi la qualità di iniezione, cioè la prontezza con cui il combustibile si accende nella camera di combustione. Un numero di cetano elevato implica un minor ritardo all'accensione, e questo comporta solitamente rendimenti maggiori; viceversa invece, un basso numero di cetano è causa del cosiddetto battito in testa del motore, con conseguenza una minor resistenza a fatica dei materiali.

Il numero di cetano rilevato per gli oli vegetali si trova tra 29 e 43, contro il 45-55 del diesel.

- *POTERE CALORIFICO (NCV)*

Il potere calorifico (Net Calorific Value) è l'energia liberata dalla combustione completa di 1 kg di combustibile, qualunque esso sia. Questo parametro influenza di molto le prestazioni dell'olio grezzo, poiché esso risulta minore di circa il 10% rispetto a quello del gasolio usato come confronto.

- *PUNTO DI INFIAMMABILITÀ*

È la minima temperatura alla quale i vapori sono emessi da un prodotto infiammato quando esposto ad una fiamma. Questo valore è superiore per gli oli vegetali rispetto a quello riscontrato per il diesel, ma ciò non influenza molto l'efficienza della combustione o le performance del motore.

- *PUNTO DI RUGIADA*

Alle basse temperature, il diesel puro gelifica. Questo fenomeno determina la minima temperatura alla quale un combustibile può essere usato. Quando si usano gli oli vegetali, allo stato grezzo o miscelati con il combustibile fossile, generalmente i trigliceridi gelificano ad una temperatura maggiore rispetto a quella del diesel puro, e ciò sarà causa di grosse restrizioni nell'uso degli oli vegetali.

- *RESIDUI CARBONIOSI*

Questo valore è correlato ai depositi carboniosi nella camera di combustione e nel sistema di iniezione, e si è notato essere considerevolmente maggiore per gli oli vegetali rispetto a quello rilevato nell'utilizzo del diesel nel motore. I residui derivano da una combustione incompleta dell'olio, e si depositano, nella camera di combustione, nei cilindri, nei pistoni e nelle valvole. Studi recenti dimostrano come le emissioni di NO_x incrementano all'aumentare dello sporco nel motore, e questo dovuto alla bassa conducibilità termica dei depositi, che producono alte temperature all'interno dei cilindri, le quali aumentano le emissioni degli ossidi di azoto. È stato inoltre dimostrato come eccessivi valori di questi depositi possano portare alla diminuzione delle performance e addirittura alla rottura del motore.

Olio	Densità a 20°C	Punto di infiammabilità	Numero di cetano	Viscosità cinematica	Punto di rugiada
Gasolio	836	93	50	3-7,5	< -5
Cotone	921	243	35-40	73	-1
Palma	915	280	38-40	95-106	31
Copra	915	-	40-42	30-37	20-28
Colza	915	320	32-36	77	-11
Girasole	925	316	35-37	55-61	-5
Soia	920	330	36-38	58-63	-4
Jatropha	920	240	45	55	3
Mais	915	277	98	60-64	-1,1

Tabella 2 – Proprietà di alcuni oli e confronto con il gasolio

5. ANALISI PRESTAZIONALE

Scopo di questo capitolo è quello di sintetizzare in modo critico i lavori scientifici presenti nella letteratura, analizzando i parametri che descrivono le prestazioni dei motori quando questi sono alimentati con diversi tipi di oli vegetali, e quindi confrontarli con quelli provenienti dall'utilizzo nel motore di gasolio puro.

I diversi parametri prestazionali su cui gli autori hanno posto l'attenzione nei loro esperimenti non sono solo coppia, potenza e consumo specifico di carburante, ma anche rendimento termico, consumo specifico di energia e temperature dei gas allo scarico.

In particolare:

- il consumo specifico di carburante (BSFC, Brake Specific Fuel Consumption) è la misura dell'efficienza del combustibile. Esso non è altro che il rapporto tra il grado di consumo di carburante (solitamente espresso in g/s) e la potenza prodotta (in W).

Dal grafico rappresentato in Fig. 1 si nota come questo parametro, per gli oli vegetali puri, per alcuni oli non si discosta molto rispetto ai valori del diesel, per altri risulta essere molto maggiore: un picco di circa il 35% si ha con l'olio di cocco, mentre l'unico valore negativo si aggira intorno al -10% (olio di arancia).

- Il consumo specifico di energia (BSEC, Brake Specific Energy Consumption) è invece la quantità di energia spesa per unità di potenza.

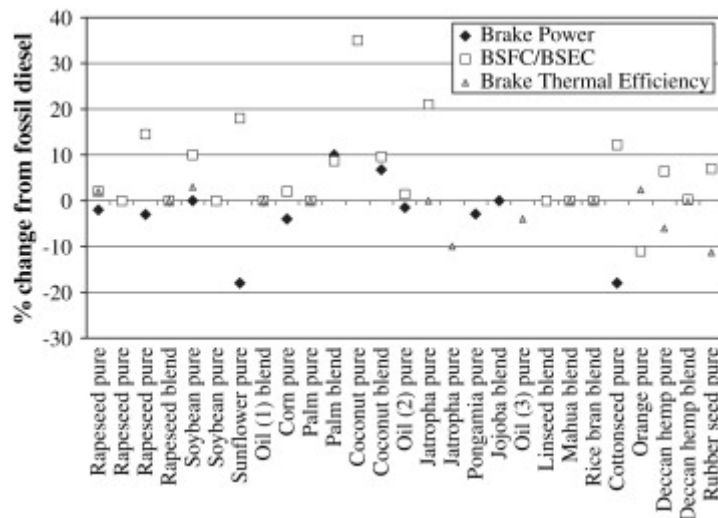


Figura 1 - Parametri a confronto per diversi tipi di olio per Hossain et al.

- Il rendimento termico invece è definito come il rapporto tra la potenza erogata dal motore e l'energia derivata dalla combustione dell'olio. Gli studi mostrano come questo valore vari tra -10% e +3% (rispettivamente per l'olio di jatropha e l'olio di soia), sempre in riferimento all'utilizzo del combustibile fossile.

In questo contesto si è ritenuto utile suddividere i lavori analizzati in base al tipo di motore utilizzato per la prova sperimentale: molti studi hanno infatti posto l'attenzione sull'importanza che il tipo di motore e la sua configurazione hanno nella combustione degli oli vegetali, soprattutto per quel che riguarda i valori di velocità e carico. In aggiunta a ciò, alcuni autori hanno dimostrato come anche la progettazione di specifici componenti possa essere influente: è il caso dei pistoni e degli iniettori, anche se più spesso ci si interessa del tipo di iniezione, diretta o indiretta che sia. I moderni motori diesel tendono ad avere l'iniezione diretta (DI), in modo da migliorare sia l'efficienza che le emissioni. I vecchi progetti dei motori invece prevedevano l'utilizzo dell'iniezione indiretta, a causa della loro abilità nel bruciare più efficacemente oli di bassa qualità.

5.1 ANALISI DEI TESTI

- Agarwal e Agarwal hanno alimentato un motore monocilindrico ad iniezione diretta da 0,948 l e 7,4 kW di potenza a 1500 giri al minuto e fatto funzionare a velocità costante, con olio di jatropha preriscaldato e non.

Si nota come il rendimento termico aumenti di circa il 3% (a massimo carico) quando l'olio viene riscaldato prima di essere iniettato, rimanendo però sempre minore dei valori riscontrati con il diesel.

Le temperature dei gas allo scarico per l'olio preriscaldato sono maggiori rispetto a quelle degli altri due combustibili. Per l'olio a temperatura ambiente esse risultano minori rispetto a quello preriscaldato, ma maggiori nei confronti del diesel.

Il consumo specifico di carburante invece è nettamente minore quando si utilizza il combustibile fossile. Non si è riscontrata invece una sensibile variazione derivata dal preriscaldamento dell'olio.

- Chauan et al. hanno anch'essi testato l'utilizzo di olio di jatropha pre-riscaldato a diverse temperature e a temperatura ambiente in un motore monocilindrico da 0,78 l, funzionante ad una velocità costante di 1500 giri al minuto.

È stato valutato come il consumo specifico di energia abbia un andamento simile per tutti i tipi di combustibile e diminuisca all'aumentare della temperatura di iniezione, risultando massimo per olio di jatropha non riscaldato e minimo per il diesel.

Per quel che riguarda l'efficienza termica (Brake Thermal Efficiency, BTE), i test effettuati hanno confermato quanto sperimentato da Agarwal e Agarwal.

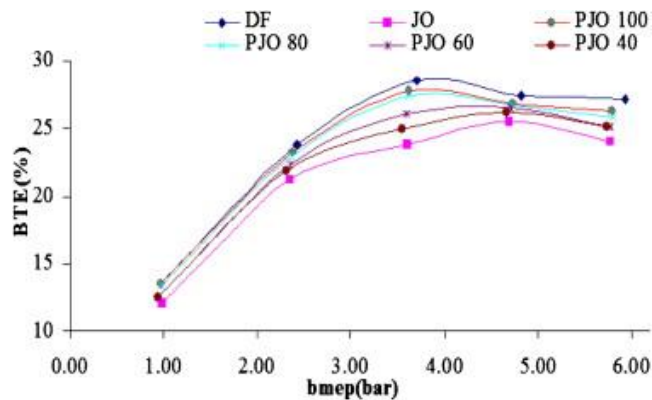


Figura 2 - Efficienza termica in funzione della frequenza

Le temperature dei gas di scarico per l'olio non riscaldato sono minime, anche nei confronti del gasolio, in leggera discordanza rispetto quello valutato nel test precedente.

- Canakci et al. hanno confrontato i risultati ottenuti alimentando con olio di girasole preriscaldato (preheated crude sunflower oil, PCSO) un motore normalmente aspirato a iniezione indiretta da 1,8 l e 38,8 kW di potenza con i risultati ottenuti alimentando lo stesso motore con il gasolio (petroleum based diesel fuel, PBDF).

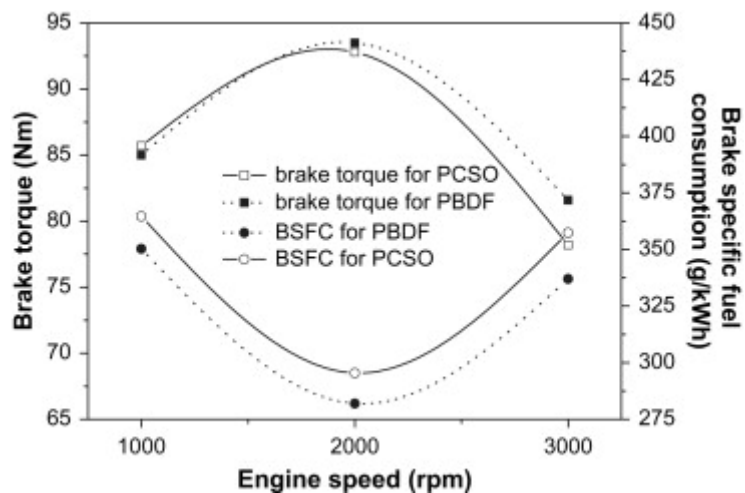


Figura 3 - Coppia e BSFC: confronto olio di girasole - diesel

Per quel che riguarda la coppia motrice, alle tre velocità a cui è stato funzionare il motore si è misurato un decremento medio del 1,36%, registrando un valore massimo attorno ai 2000 rpm di 93,5 Nm per il gasolio contro il 92,8 Nm per l'olio di girasole. Il consumo specifico di carburante è invece aumentato in media del 5%, valore rimasto costante per tutte le velocità di esercizio.

Per quanto riguarda il rendimento, il valore massimo si è ottenuto alla velocità di 2000 giri al minuto per l'olio di girasole, maggiore dello 0,4% rispetto a quello del gasolio; l'incremento medio sui tre valori di velocità è pari alle 0,3%.

- Shehata et al. hanno condotto un test su un motore di 0,824 l e 5,775 kW di potenza a 1500 rpm, fatto funzionare a velocità costante alimentato con diesel puro, olio di jojoba in concentrazione del 20% e olio di girasole puro.

La coppia prodotta dall'olio di girasole è minore di quelle degli altri due combustibili, e trova il suo valore massimo intorno ai 1500 giri/minuto. Il decremento per l'olio di girasole è consistente rispetto a quando si alimenta il motore con il diesel: esso infatti risulta inferiore, in media, del 19%.

Anche la potenza, al variare della velocità del motore, risulta minore con l'olio di girasole: ciò è dovuto agli effetti combinati di densità e viscosità, che per l'olio sono maggiori che per il diesel.

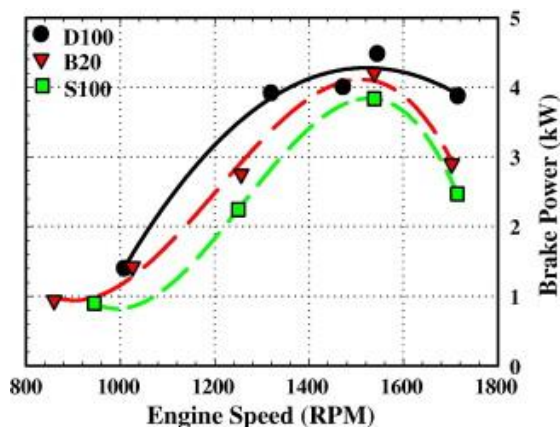


Figura 4 - Andamento della potenza al variare della velocità del motore

In linea con quanto asserito per coppia e potenza, anche il rendimento termico diminuisce quando si utilizza l'olio vegetale. Se per bassi valori di potenza i rendimenti sono simili per i tre combustibili, all'aumentare della potenza del motore anche la differenza di rendimento tra gasolio e olio di girasole incrementa. Il decremento medio valutato è pari al 18%.

Il consumo specifico di carburante ha valori massimi al minimo carico per i tre combustibili utilizzati. Man mano che il carico aumenta, il BSFC diminuisce: nei confronti del diesel, i valori riscontrati per l'olio di girasole restano sempre maggiori, registrando un aumento del 20÷30% al massimo carico.

- Devan et al. hanno alimentato con olio di poon puro un motore di 0,661 l e 4,4 kW di potenza funzionante alla velocità costante di 1500 rpm. L'olio di poon è stato altresì miscelato in varie proporzioni con il gasolio.

È stato sperimentato che il consumo specifico di energia per l'olio di poon puro (e sue miscele) è maggiore del 8÷15% rispetto all'utilizzo del gasolio nel motore, per tutti i regimi, ed aumenta man mano che incrementa la percentuale di olio nella miscela, fino a trovare valori massimi per l'olio puro.

Anche le temperature dei gas allo scarico si sono rilevate maggiori quando si utilizza l'olio puro; l'incremento è dell'ordine dei 30÷40 °C, mantenendosi più o meno costante per tutti i carichi.

L'efficienza termica invece decrementa, tanto più che la percentuale di olio aumenta nella miscela. I valori minimi si riscontrano quando si alimenta il motore con olio puro, e al massimo del carico il decremento è dell'ordine del 4÷5%.

- Agarwal et al. hanno testato un motore di 552,92 cm³ e 3,67 kW di potenza, monocilindrico ad iniezione diretta con olio di karanja preriscaldato e non, e in varie proporzioni di miscela con il diesel.

L'efficienza termica per l'olio puro non riscaldato (K100) è l'unica a risultare minore nei confronti del gasolio. Si nota invece come riscaldando il carburante l'efficienza tenda ad incrementare visibilmente rispetto al caso precedente.

Si è sperimentato inoltre che il consumo specifico di carburante è maggiore per l'olio a temperatura ambiente; preriscaldando l'olio invece si nota come i valori di BSFC per tutte le miscele risultino minori rispetto al diesel usato come riferimento.

- Purushothaman et al. hanno alimentato con olio di arancio un motore monocilindrico, raffreddato ad aria e ad iniezione diretta, di cilindrata pari a 661 cm³ e potenza 4,4 kW a 1500 giri/min.

I parametri prestazionali analizzati sono due: efficienza termica e consumo specifico di energia. In Tab. 1 si nota come l'efficienza del motore, quando si utilizza l'olio di arancio, è maggiore rispetto all'utilizzo del diesel di un valore medio del 2,4 % a tutti i regimi di funzionamento del motore.

Il consumo specifico di energia invece risulta minore a tutti i regimi, utilizzando l'olio di arancio, a causa della sua miglior combustione.

Potenza kW	Efficienza termica %		Consumo specifico di energia MJ/kWh	
	DIESEL	OLIO DI ARANCIO	DIESEL	OLIO DI ARANCIO
1,082	14,96	16,90	24,05	21,30
2,164	23,13	25,22	15,56	14,62
3,247	27,82	29,13	12,93	12,35
3,788	28,51	29,88	12,62	12,04
4,329	28,22	31,70	12,75	11,35

Tabella 1 – Rendimento e consumo specifico di energia a confronto a diversi regimi

- V.E. Geo et al. hanno sperimentato in un motore monocilindrico, di 661 cm³ di cilindrata, raffreddato ad aria e di potenza 4,4 kW a 1500 giri/minuto, l'utilizzo di olio derivato dai semi delle piante di gomma (RSO).

È stato rilevato che l'efficienza termica a tutti i regimi del motore, quando si utilizza l'olio come combustibile, è minore rispetto a quella prodotta dal diesel; il decremento medio è pari al 14,4%.

Il consumo specifico di energia per il motore con RSO è maggiore per tutti i regimi di utilizzo, e a pieno carico è pari a 13,5 MJ/kWh, mentre quello rilevato con il diesel è di 12 MJ/kWh.

Le temperature dei gas allo scarico, per entrambi i combustibili, aumentano man mano che la potenza cresce. Esse sono maggiori con l'olio derivante dalle piante di gomma,

rispetto a quando si utilizza il diesel, a tutti i valori di carico del motore, riscontrando un valore massimo di 410°C.

- Prem Anand et al. hanno invece utilizzato olio di turpentina in un motore ad iniezione diretta di 661 cm³ di cilindrata e di potenza 5,2 kW a 1500 giri/minuto. L'olio di turpentina deriva da un processo di pirolisi ottenuto dagli alberi di pino. Come è avvenuto per altri esperimenti, anche in questo caso l'olio è stato usato puro o miscelato in varie quantità con il gasolio, e poi confrontato con i valori ottenuti alimentando lo stesso motore con il gasolio stesso.

Si nota come il consumo specifico di energia decremента all'aumentare del carico, e aumenta man mano che diminuisce la quantità di gasolio nella miscela. Il BSFC per l'olio puro risulta essere il più elevato ad ogni valore del carico (con un valore medio del +5,59%).

Il consumo specifico di energia ha lo stesso comportamento del BSFC, e anche in questo caso risulta maggiore per l'olio puro (+10,54%).

Al contrario, l'efficienza termica aumenta all'aumentare del carico, e per l'olio di turpentina risulta essere minima (-17,31%, in media, nei confronti del gasolio), e aumenta man mano che la percentuale di olio decremента nella miscela, risultando perciò massima per il diesel.

Le temperature dei gas allo scarico aumentano con il carico, e risultano essere minime per l'olio di turpentina (-6,94% in media) e massime per il diesel.

- Un ulteriore caso di interesse è quello studiato da Macor e Pagnucco in cui si è confrontato il comportamento di un motore cogenerativo con potenza nominale di 300 kVA alimentato con olio di palma e gasolio. Nel passare da un combustibile all'altro, sia la potenza elettrica sia la potenza termica recuperata non subiscono sostanziali variazioni; il rendimento del motore migliora di circa due punti, mentre il consumo specifico di carburante aumenta mediamente del 9%.

5.2 GRAFICI RIASSUNTIVI E CONSIDERAZIONI

I grafici sottostanti sintetizzano le situazioni medie valutate negli esperimenti considerati, e rappresentano la variazione percentuale delle prestazioni degli oli nei confronti del gasolio, sempre usato come confronto.

In Fig. 5 si è presa in considerazione l'efficienza termica. I test condotti da Canakci et al. (seppur con percentuali irrilevanti), da Macor e Pagnucco e da Purushothman hanno rilevato un incremento del rendimento dell'olio rispetto ai test condotti utilizzando il diesel. Il decremento medio di tutti i test effettuati si aggira intorno al 6%. I risultati ottenuti trovano spiegazione soprattutto nelle maggior densità e viscosità dell'olio, le quali comportano una scarsa atomizzazione e una combustione più povera, con conseguenza sul rendimento totale. Nei test in cui si sono analizzati gli effetti del preriscaldamento dell'olio prima dell'iniezione del cilindro, si è notato che il rendimento migliora, poiché diminuiscono sia la densità che la viscosità del combustibile.

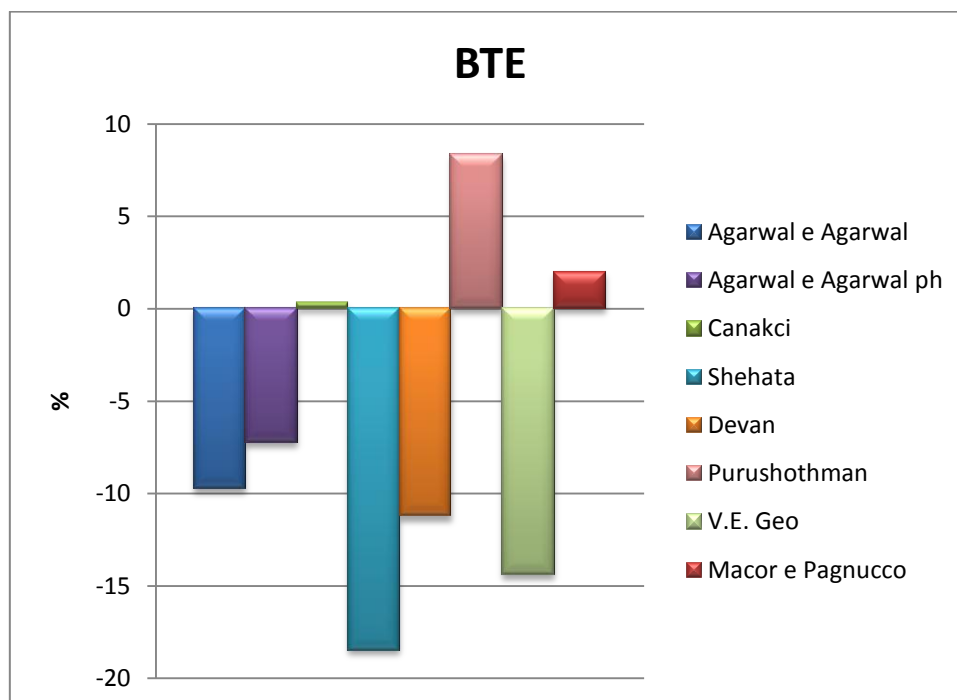


Figura 5 - Andamento medio percentuale del rendimento (BTE – Brake Thermal Efficiency) per i testi considerati nei confronti del diesel (0%)

La coppia è stata valutata solo da Canakci et al. e Shehata et al.; per il primo il decremento è basso, pari all'1,36%, mentre più consistente è quello sperimentato nel secondo caso (18,92%). La media dei due valori è pari a -10,14%.

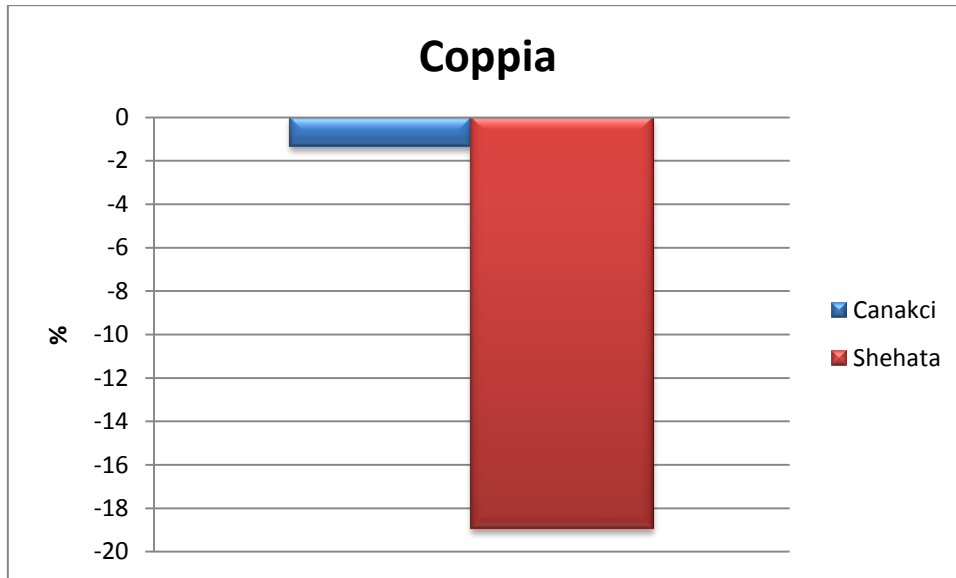


Figura 6 - Andamento medio percentuale della coppia per i testi considerati nei confronti del diesel (0%)

Tutti i test effettuati sono coerenti con il fatto che il consumo specifico di carburante per i vari tipi di olio sia sempre maggiore di quello del gasolio, eccezion fatta per l'utilizzo di olio di karanja preriscaldato (nel test di Agarwal et al.). L'incremento medio è pari al 12,66%, dovuto alla differenza di densità tra i combustibili utilizzati e al minor potere calorifico dell'olio rispetto al gasolio.

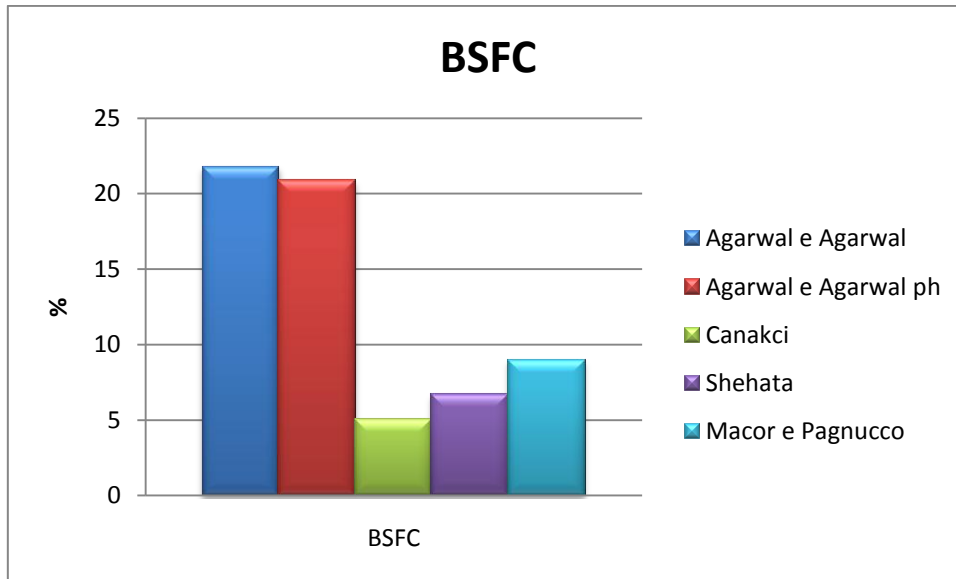


Figura 7 - Andamento medio percentuale del consumo specifico di carburante per i test considerati nei confronti del diesel (0%)

Il consumo specifico di energia è risultato essere maggiore, in media, del 9,85%. Solo il caso sviluppato da Purushothaman ne ha rilevato un decremento, dovuto alla miglior combustione dell'olio. I risultati degli altri test invece trovano nella peggior combustione, dovuta alla maggior viscosità dell'olio, la causa dell'incremento del BSEC.

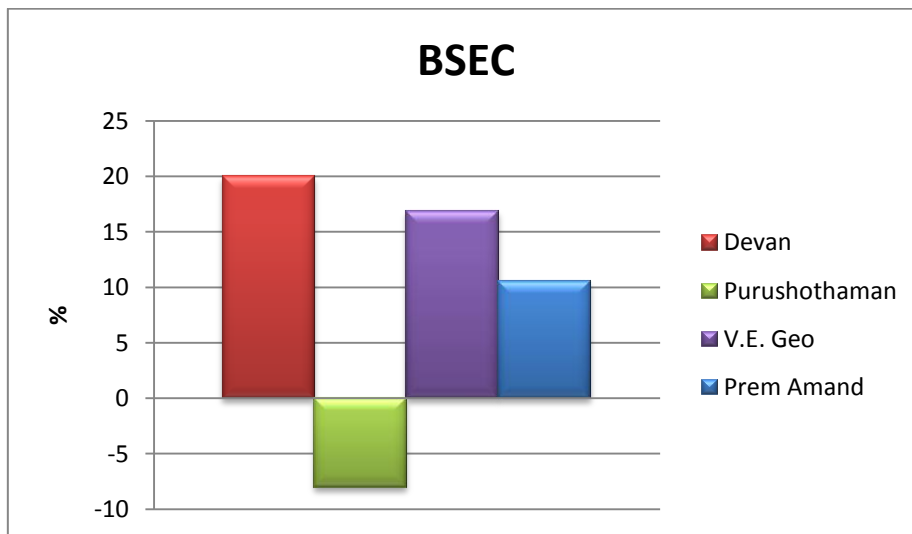


Figura 8 - Andamento medio percentuale del consumo specifico di energia per i test considerati nei confronti del diesel (0%)

In Fig. 9 sono mostrate le variazioni delle temperature dei gas allo scarico del motore. I test effettuati da Agarwal e Agarwal e da Chauan et al. mostrano come riscaldando l'olio anche le temperature dei gas aumentano. Lo scostamento medio rilevato per tutti i test è pari a +5,2%, e di ciò è ancora una volta responsabile la viscosità dell'olio che provoca una scarsa combustione dell'olio. Preriscaldando l'olio diminuisce la viscosità e con essa la resistenza del flusso; la combustione migliora e le temperature dei gas sono più elevate.

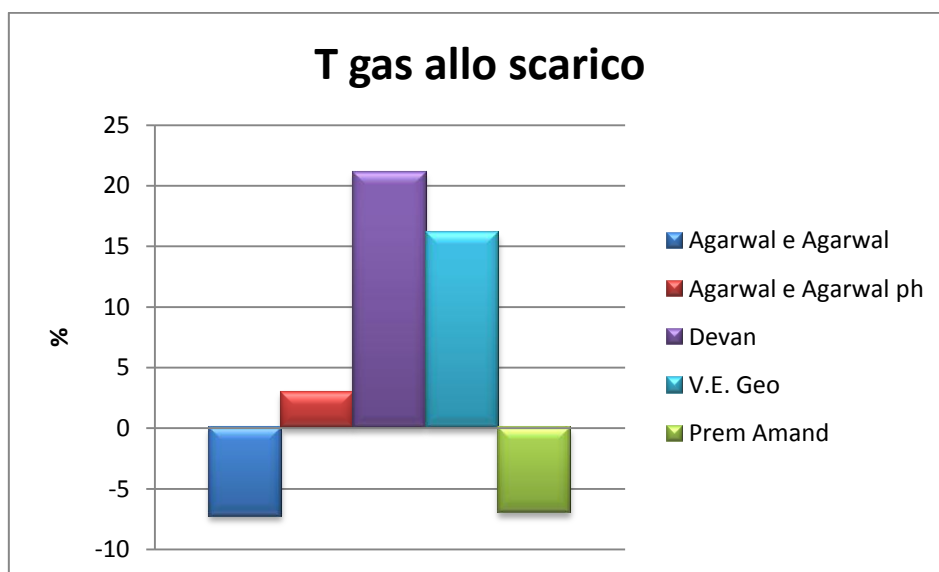


Figura 9 - Andamento medio percentuale delle temperature dei gas allo scarico per i test considerati nei confronti del diesel (0%)

TEST EFFETTUATO	Nome	OLIO UTILIZZATO	CARATTERISTICHE MOTORE
1	Agarwal et Agarwal	Olio di Jatropha preriscaldato e non	Monocil., i.d., 0,978 l, 7,4 kW a 1500 rpm
2	Chauan et al.	Olio di jatropha preriscaldato	Monocil., 0,78 l
3	Canakci et a.	Olio di girasole preriscaldato	Iniez. indir., 1,8 l, 38,8 kW
4	Shehata et al.	Olio di girasole	0,824 l, 5,775 kW a 1500 rpm
5	Devan et al.	Olio di poon	0,661 l, 4,4 kW a 1500 rpm
6	Agarwal et al.	Olio di karanja preriscaldato e non	Monocil., i.d., 0,552 l, 3,67 kW
7	Purushothaman et al.	Olio di arancio	Monocil., i.d., 0,661 l, 4,4 kW a 1500 rpm
8	V.E. Geo et al.	Olio derivato dai semi delle piante di gomma	Monocil., 0,661 l, 4,4 kW a 1500 rpm
9	Prem Amand et al.	Olio di turpentina	Monocil., i.i., 0,661 l, 5,2 kW a 1500 rpm

Tabella 2 – Elenco dei test considerati

6. ANALISI DELLE EMISSIONI

Dalle reazioni chimiche che avvengono all'interno della camera di combustione si generano delle emissioni che possono essere più o meno dannose per l'ambiente e per l'uomo. Come per la sezione precedente, verranno sintetizzati dei test svolti da alcuni autori per cercare di analizzare le emissioni prodotte da un motore Diesel alimentato da oli grezzi. I prodotti della combustione si possono distinguere in due grandi classi:

- Emissioni regolamentate;
- Emissioni non regolamentate.

6.1 EMISSIONI REGOLAMENTATE

Esse sono tutte quelle emissioni definite e limitate secondo vari criteri di carattere nazionale e internazionale. Di questa prima categoria fanno parte le emissioni di ossido e biossido di carbonio (rispettivamente CO e CO₂), le emissioni degli ossidi di azoto (NO_x: NO₁ e NO₂), le emissioni derivate da idrocarburi incombusti (HC) e le emissioni di particolato (PM, Particulate Matter).

- OSSIDO DI CARBONIO (CO)

L'ossido di carbonio (altresì detto monossido di carbonio) deriva dalla combustione incompleta dei combustibili utilizzati nel motore. Può provocare problemi anche gravi nell'uomo: legandosi saldamente agli atomi di ferro nell'emoglobina del sangue, non permette all'emoglobina stessa di rilasciare la stessa quantità di ossigeno nel sangue, provocando incoscienza ed asfissia, ed in casi estremi la morte. È per questi motivi che la quantità di CO emessa dai motori deve essere minima.

- BIOSSIDO DI CARBONIO (CO₂)

Il biossido di carbonio è il risultato della combustione di un composto organico in presenza di una quantità di ossigeno sufficiente a completarne l'ossidazione.

In natura le piante lo utilizzano per la fotosintesi che, combinandolo con l'acqua e per azione della luce solare e della clorofilla, lo trasforma in glucosio liberando ossigeno come sottoprodotto.

L'anidride carbonica di per sé non è un prodotto inquinante, ma se viene prodotta in grande quantità incrementa l'effetto serra e di conseguenza l'innalzamento della temperatura media del pianeta.

Per questi motivi, come già preventivamente accennato, il maggior vantaggio che si ha nella scelta dell'uso di oli vegetali nei motori è un notevole risparmio nelle emissioni in atmosfera di anidride carbonica. Questo perché essi sono ottenuti da organismi vegetali, che sottraggono anidride carbonica dall'atmosfera attraverso la fotosintesi clorofilliana per produrre biomassa. Il bilancio quindi si può ritenere nullo.

- OSSIDI DI AZOTO (NO_x)

Con la sigla NO_x si sta ad indicare la somma pesata del monossido di azoto (NO) e del biossido di azoto (NO₂). L'ossido di azoto è prodotto principalmente nei processi di combustione ad alta temperatura insieme al biossido di azoto (che costituisce meno del 5% degli NO_x totali emessi). Il ben noto colore giallognolo delle foschie che ricoprono le città ad elevato traffico è dovuto per l'appunto al biossido di azoto. Rappresenta un inquinante secondario dato che deriva, per lo più, dall'ossidazione in atmosfera del monossido di azoto. Si stima che gli ossidi di azoto contribuiscano per il 30% alla formazione delle piogge acide (il restante è imputabile al biossido di zolfo e ad altri inquinanti). Da notare che gli NO_x vengono per lo più emessi da sorgenti al suolo e sono solo parzialmente solubili in acqua; questo influenza notevolmente il trasporto e gli effetti a distanza.

- IDROCARBURI INCOMBUSTI

Gli idrocarburi incombusti sono composti chimici derivanti da una combustione incompleta di molecole contenenti carbonio e idrogeno. Quando si parla di emissioni allo scarico, vengono definiti HC, sigla che in realtà identifica più genericamente i vari tipi di idrocarburi. Per quel che riguarda i motori a combustione interna e ad accensione comandata, gli idrocarburi incombusti vengono emessi in particolare da combustioni a bassa temperatura o con ossigeno insufficiente. Nel primo caso il carburante tende a condensarsi lungo le pareti "fredde" del cilindro, il secondo caso invece era tipico delle vecchie auto a benzina con carburazione "grassa", cioè con rapporto di dosatura inferiore a quello teoricamente necessario per completare la combustione. In questo modo l'ossigeno risultava insufficiente per bruciare tutti gli

atomi di carbonio e idrogeno presenti nel carburante, favorendo la produzione di HC e ossido di carbonio (CO).

I motori diesel, prima dell'introduzione delle normative Euro, hanno sempre avuto emissioni di HC e CO contenute in quanto la combustione avveniva, salvo problemi di messa a punto dell'iniezione, con un forte eccesso di aria e quindi di ossigeno, che risultava così sovrabbondante per le esigenze della combustione. Per contenere le emissioni di ossidi di azoto (NO_x) sotto i limiti delle recenti norme antinquinamento, questo eccesso è stato molto ridotto nei diesel per autotrazione. Al tempo stesso, però, si è generalizzato l'uso dei catalizzatori ossidanti, che riducono a livelli decisamente contenuti le emissioni di HC e CO.

- POLVERI

Gli elementi che concorrono alla formazione di questi aggregati sospesi nell'aria sono numerosi e comprendono fattori sia naturali che antropici (ovvero causati dall'uomo), con diversa pericolosità a seconda dei casi. Tra i fattori antropici si include gran parte degli inquinanti atmosferici:

- emissioni della combustione dei motori a combustione interna (autocarri, automobili, aeroplani);
- emissioni del riscaldamento domestico (in particolare gasolio, carbone e legna);
- residui dell'usura del manto stradale, dei freni e delle gomme delle vetture;
- emissioni di lavorazioni meccaniche, dei cementifici, dei cantieri;
- lavorazioni agricole;
- inceneritori e centrali elettriche;
- fumo di tabacco.

Il rapporto fra fattori naturali ed antropici è molto differente a seconda dei luoghi. È stato stimato che in generale le sorgenti naturali contribuiscono per il 94% del totale lasciando al fattore umano meno del 10%. Tuttavia queste proporzioni cambiano notevolmente nelle aree urbane dove sono senza dubbio il traffico stradale e il riscaldamento (ma molto poco se a gas), nonché eventuali impianti industriali (raffinerie, cementifici, centrali termoelettriche, inceneritori ecc.) a costituire l'apporto preponderante.

La quantità totale di polveri sospese è in genere misurata in maniera quantitativa (peso/volume). In assenza di inquinanti atmosferici particolari, il pulviscolo contenuto

nell'aria raggiunge concentrazioni diverse (mg/m^3) nei diversi ambienti, generalmente è minimo in zone di alta montagna, e aumenta spostandosi dalla campagna alla città, alle aree industriali.

Si utilizza un identificativo formale delle dimensioni, il Particulate Matter, abbreviato in PM, seguito dal diametro aerodinamico massimo delle particelle. Ad esempio si parla di PM_{10} per tutte le particelle con diametro inferiore a $10\ \mu\text{m}$, pertanto il $\text{PM}_{2,5}$ è un sottoinsieme del PM_{10} , che a sua volta è un sottoinsieme del particolato grossolano ecc.

In particolare:

Particolato grossolano – particolato sedimentabile di dimensioni superiori ai $10\ \mu\text{m}$, non in grado di penetrare nel tratto respiratorio superando la laringe, se non in piccola parte.

PM_{10} – particolato formato da particelle inferiori a $10\ \mu\text{m}$ (cioè inferiori a un centesimo di millimetro), è una polvere inalabile, ovvero in grado di penetrare nel tratto respiratorio superiore (naso e laringe). Le particelle fra circa 5 e $2,5\ \mu\text{m}$ si depositano prima dei bronchioli.

$\text{PM}_{2,5}$ – particolato fine con diametro inferiore a $2,5\ \mu\text{m}$, è una polvere toracica, cioè in grado di penetrare profondamente nei polmoni, specie durante la respirazione dalla bocca.

6.1.1 ANALISI DEI TESTI

Nel riguardo di tutti questi parametri, sono stati analizzati diversi lavori contenuti nella letteratura, nello stesso modo in cui sono state valutate le prestazioni:

- Agarwal e Agarwal hanno riscontrato che a basso carico la curva di emissioni non si discosta molto per i tre combustibili utilizzati, ma per alti carichi la CO prodotta è maggiore per l'olio di jatropha preriscaldato e ancor più grande per quello non riscaldato; l'incremento medio è rispettivamente pari al 77% e al 132%.

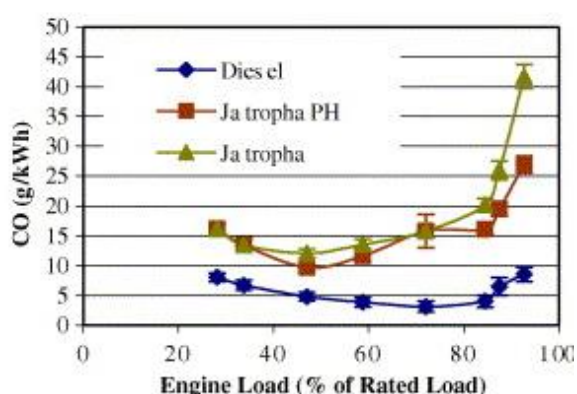


Figura 1 - Emissioni di monossido di carbonio al variare del carico

Per quanto riguarda le emissioni di CO₂, l'olio di Jatropha preriscaldato mostra un incremento del 22% rispetto al diesel puro, mentre l'olio a temperatura ambiente ha il più alto valore di biossido di carbonio, a tutti i livelli di carico (la media è attorno al 52%).

La quantità di idrocarburi incombusti emessi non discosta molto per i tre combustibili per carichi parziali, mentre la differenza tende ad aumentare man mano che il carico aumenta. Agarwal e Agarwal hanno ottenuto emissioni più elevate, rispetto al gasolio usato come confronto, utilizzando l'olio non riscaldato (in media del 44%) e olio preriscaldato (circa il 30%).

Le polveri incrementano all'aumentare del carico, e per l'olio (preriscaldato e non) esse risultano essere considerevolmente maggiori nei confronti di quelle prodotte dal diesel (attorno al 185% in entrambi i casi). La differenza tra i valori inoltre è tanto più marcata quanto più ci si avvicina al carico massimo.

- Chauan et al. hanno anch'essi testato l'utilizzo di olio di jatropha pre-riscaldato a diverse temperature e a temperatura ambiente, e non hanno riscontrato sostanziali variazioni rispetto a quello ottenuto da Agarwal e Agarwal. Le emissioni di CO per l'olio di Jatropha non preriscaldato sono maggiori rispetto a quelle di tutti gli altri combustibili utilizzati nelle prova. Più si incrementa la temperatura dell'olio prima dell'iniezione, tanto minori sono le emissioni di CO rilevate.

Anche in questo caso le emissioni di biossido di carbonio (CO₂) sono maggiori per l'olio di jatropha rispetto al diesel, e incrementano con un andamento abbastanza lineare man mano che la temperatura di preriscaldamento aumenta, a tutti i regimi di utilizzo del motore.

Gli ossidi di azoto invece sono minimi per l'olio di jatropha puro, mentre sono massimi per l'olio preriscaldato alla massima temperatura; questo è in linea col fatto che la temperatura della camera di combustione è la maggior responsabile di questo tipo di emissioni. I valori non discostano molto a bassi regimi, mentre la variazione è maggiore con l'aumentare del carico del motore.

Per quel che riguarda gli idrocarburi, il test mostra come essi abbiano valori minimi, minori rispetto anche a quelli prodotti dal diesel, per l'olio riscaldato a 100°C, mentre aumentano man mano che la temperatura di preriscaldamento diminuisce. Le emissioni di HC inoltre incrementano all'aumentare del carico.

- Canakci et al. hanno ottenuto che i due combustibili (preheated crude sunflower oil, PCSO e petroleum based diesel fuel, PBDF) hanno una curva rappresentativa simile: a 1000 e 2000 giri/min le emissioni di CO sono maggiori quando si utilizza l'olio combustibile, rispettivamente del 7% e del 4,3%, mentre a 3000 giri/min esse sono inferiori del 6% circa. Questo può essere spiegato dal raffreddamento del combustibile, che comporta un decremento di temperatura nella camera di combustione, soprattutto ai bassi regimi.

L'anidride carbonica emessa invece ha andamento quasi opposto: i valori sono sempre minori per l'olio di girasole a tutte le velocità di rotazione del motore rispetto a quelli valutati con l'utilizzo del diesel. La massima variazione (del 3,07%) riscontrata si verifica attorno ai 2000 giri/minuto.

Gli idrocarburi incombusti relativi all'olio di girasole nei confronti del diesel decrementano del 37%, 39% e 25% rispettivamente a 1000, 2000 e 3000 giri/minuto, registrando valori massimi per entrambi i combustibili a 2000 rpm (23 ppm per il diesel

e 14 ppm per l'olio di girasole), velocità alla quale si trova la coppia massima del motore.

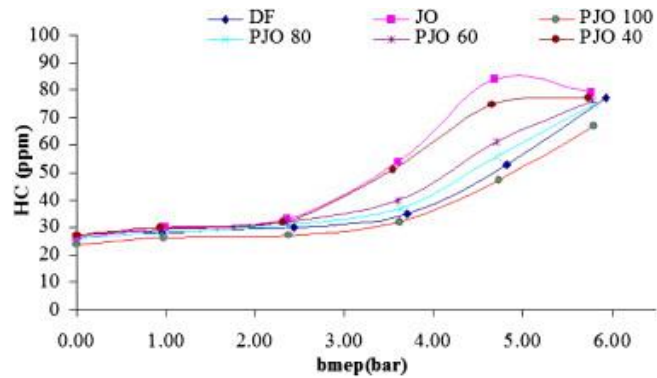


Figura 2 - Idrocarburi incombusti al variare del carico

- Uno studio condotto da Shehata et al. ha rivelato come la quantità di CO emessa da tre combustibili (diesel puro, olio di Jojoba in concentrazione del 20% e olio di girasole puro) si riduce man mano che la potenza aumenta, e questo perché aumentano le temperature del gas all'interno del cilindro, le quali incrementano l'ossidazione di CO verso CO₂. Valori più alti per l'olio di girasole rispetto agli altri combustibili utilizzati sono dovuti ad un maggior contenuto di carbonio, che si ripercuote sull'efficienza della combustione.

La concentrazione di CO₂ incrementa all'aumentare della potenza del motore, ed ha un massimo, per tutti e tre i combustibili presi in considerazione, quando anche la potenza è massima. L'olio di girasole produce la maggior quantità di anidride carbonica, sia nei confronti del diesel puro che nei confronti della miscela con l'olio di jojoba.

Le emissioni di ossidi di azoto (NO_x) si riducono alimentando il motore con gli oli vegetali (in miscela, e ancor più con l'olio puro) e ciò è dovuto ad un numero di cetano maggiore rispetto al diesel.

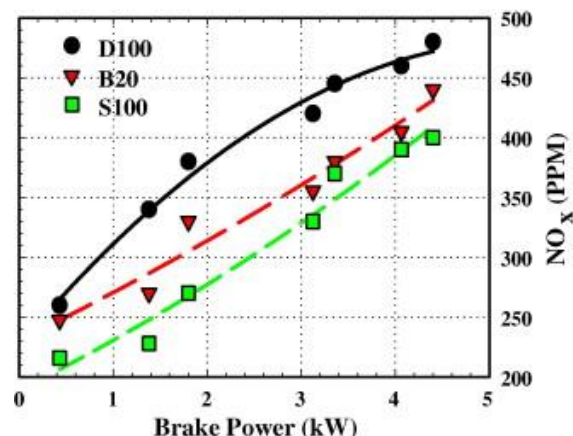


Figura 3 - Concentrazione di NOx al variare della potenza per i diversi combustibili considerati

- Devan et al. hanno ottenuto che, a pieno carico, le emissioni di CO per l'olio di poon puro sono circa del 33% più elevate nei confronti del gasolio. Gli effetti della viscosità degli oli vegetali nella qualità della nebulizzazione del carburante incrementano la quantità di CO prodotta.

La CO₂ emessa per l'olio grezzo è minima, mentre essa aumenta man mano che la percentuale di olio decrementa nella miscela.

Anche gli ossidi di azoto incrementano all'aumentare del carico, e sono minimi quando si utilizza l'olio di poon puro; nel confronto con il diesel il decremento è pari al 32%.

Il quantitativo di polveri emesse aumenta man mano che incrementa la potenza del motore. Per l'olio di poon esse sono maggiori nei confronti sia delle varie miscele, sia del diesel puro, per il quale le polveri sono minime.

- Agarwal et al. hanno ottenuto che le emissioni di ossido di carbonio, sia per olio preriscaldato che per quello non riscaldato, sono maggiori rispetto a quelle valutate con il gasolio. Una maggior concentrazione di olio nella miscela, e in particolar modo l'uso dell'olio puro, provocano una combustione incompleta nel motore ed un aumento di CO e, come si valuterà in seguito, anche di HC.

L'olio di karanja emette minori emissioni di idrocarburi quando il carico è basso, mentre esse sono maggiori per valori del carico più alti, rispetto a quelle prodotte dal gasolio, in entrambi i casi di olio preriscaldato e non.

Gli ossidi di azoto sono, ad ogni valore del carico, minori per l'olio (riscaldato o meno) rispetto a quelli prodotti dal diesel. La differenza è tanto più marcata tanto più il carico diminuisce, mentre al massimo carico i valori sono pressoché identici.

Le polveri incrementano all'aumentare della potenza; preriscaldando l'olio la quantità di polveri emesse è minore rispetto al caso dell'olio a temperatura ambiente, ma in entrambi i casi esse rimangono maggiori di quelle prodotte dal gasolio.

- In Tab. 1 sono riportati i risultati che Purushothaman et al. hanno ottenuto utilizzando nel loro esperimento l'olio di arancio, e confrontando i risultati con i valori ottenuti con il diesel. Anche se generalmente il gasolio produce meno CO a causa dell'eccesso d'aria presente nel cilindro, il monossido di carbonio prodotto con l'olio di arancio risulta minore nei confronti del diesel a causa della sua minor viscosità e della sua più completa combustione.

Gli ossidi di azoto (NO_x) prodotti dall'olio di arancio sono maggiori rispetto a quelli prodotti dal gasolio per tutti i regimi del motore.

Le emissioni di HC incrementano all'aumentare del carico per entrambi i combustibili utilizzati. A tutti i regimi del motore inoltre risultano essere minori quando si utilizza l'olio di arancio nei confronti del diesel.

Anche le polveri risultano essere minori quando si alimenta il motore con olio di arancio. Sempre dalla Tab. 1 si nota come la differenza tra i valori dei due combustibili diminuisca all'aumentare del carico.

Potenza (kW)	Monossido di carbonio (g/kW h)		Idrocarburi (g/kW h)		Polveri (BSU)		Ossidi d azoto (g/kW h)	
	Diesel	Olio di arancio	Diesel	Olio di arancio	Diesel	Olio di arancio	Diesel	Olio di arancio
1.082	2.7035	2.2949	0.2151	0.0922	0.26	0.05	12.6	20.810
2.164	1.7904	1.3514	0.1136	0.0469	0.328	0.2	11.6	17.585
3.247	0.9247	0.8557	0.0811	0.0317	0.457	0.4	12.7	17.311
3.788	0.8632	0.7520	0.0739	0.0275	0.65	0.6	13.7	17.921
4.329	0.8773	0.5920	0.0606	0.0243	0.85	0.8	14.9	16.738

Tabella 1 – Emissioni a confronto al variare della potenza

- V.E. Geo et al. hanno valutato le emissioni derivanti dall'utilizzo nel motore di olio proveniente dai semi delle piante di gomma. Con l'RSO le emissioni di monossido di carbonio sono maggiori a tutti gli output di potenza del motore rispetto all'utilizzo del diesel. Il massimo valore di CO per l'olio è di 6,7 g/kWh.

Le emissioni di NO_x sono pari a 10,7 g/kWh e 6,9 g/kWh, ottenuti rispettivamente alimentando il motore con diesel e olio e al massimo carico del motore. Gli ossidi di azoto rimangono sempre minori per l'RSO ad ogni valore di potenza.

Gli idrocarburi emessi sono risultati essere maggiori a tutti i valori del carico quando si alimenta il motore con l'olio di gomma.

Anche le polveri risultano essere maggiori quando si alimenta il motore con RSO a tutti i valori della potenza, e al massimo output le emissioni sono pari a 6,1 BSU (Bosch Smoke Unit) per RSO e 3,4 BSU per il diesel.

- Prem Amand et al. hanno sperimentato l'utilizzo di olio di turpentina in un motore diesel, e ne hanno confrontato le emissioni con quelle del gasolio.

Nel caso in questione gli autori non hanno analizzato le emissioni per quanto riguarda l'olio tal quale, ma solo in miscela (del 30, 40 e 50% con il diesel. Possiamo perciò delinearne un andamento qualitativo: solo la CO₂ risulta essere maggiore nei confronti del gasolio, mentre le altre emissioni considerate (CO, NO_x e HC) sono risultate minori

e con un andamento decrescente all'aumentare della percentuale dell'olio nella miscela.

- Un ulteriore caso di interesse è quello studiato da Macor e: si è notato come le concentrazioni di CO e HC sono diminuite rispettivamente del 50% e del 10%, mentre gli NOx sono aumentati del 10% circa, nei confronti dei valori rilevati utilizzando il gasolio nello stesso motore.

6.1.2 GRAFICI RIASSUNTIVI E CONSIDERAZIONI

Come è stato fatto per le prestazioni, anche per le emissioni si sono riassunti graficamente i vari scostamenti percentuali rispetto a quelle valutate per il diesel.

L'ossido di carbonio è risultato essere maggiore per tutti i test effettuati, eccezion fatta per quello emesso dall'olio di arancio nella prova condotta da Purushothaman e dall'olio di palma nella prova condotta da Macor e Pagnucco. L'incremento medio è comunque sostanziale e pari al 30%.

I risultati concordano pienamente con quanto si ipotizza nella teoria: valori maggiori di densità e viscosità dell'olio provocano una combustione incompleta nel cilindro, e ciò comporta un aumento della quantità di CO prodotta. Preriscaldando l'olio prima che questo venga iniettato nel motore si riduce la viscosità, con un beneficio nella quantità di emissioni prodotte.

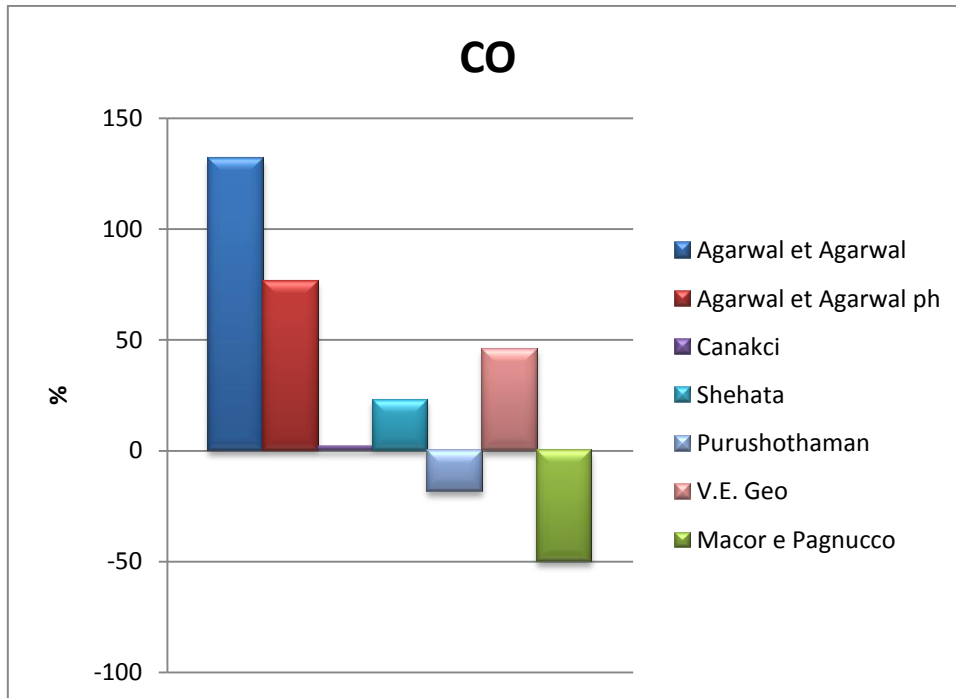


Figura 4 - Andamento medio percentuale delle emissioni di CO per i testi considerati nei confronti del diesel

Le emissioni di CO₂ sono in media maggiori, e pari all'11,62% rispetto al gasolio, questo perché non si ha una combustione completa dell'olio all'interno della camera di combustione. Si nota come nei test effettuati da Agarwal e Agarwal e da Chauan et al., ad un preriscaldamento dell'olio corrisponde un decremento di CO₂.

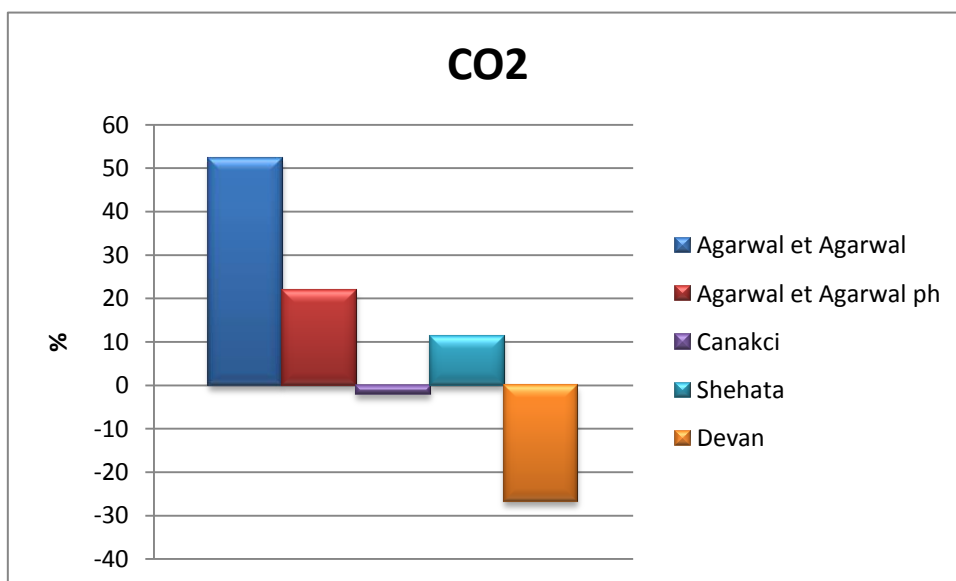


Figura 5 - Andamento medio percentuale delle emissioni di CO2 per i testi considerati nei confronti del diesel (0%)

I due casi le emissioni di ossidi di azoto sono risultate essere maggiori rispetto a quelle del gasolio (in particolare nel caso dell'olio di arancio). Il decremento medio è infatti pari al 7,33%. Gli ossidi di azoto sono formati dalle alte temperature nella camera di combustione. Incrementando la temperatura di iniezione dell'olio, anche la temperatura nel cilindro aumenta e di conseguenza anche gli NO_x.

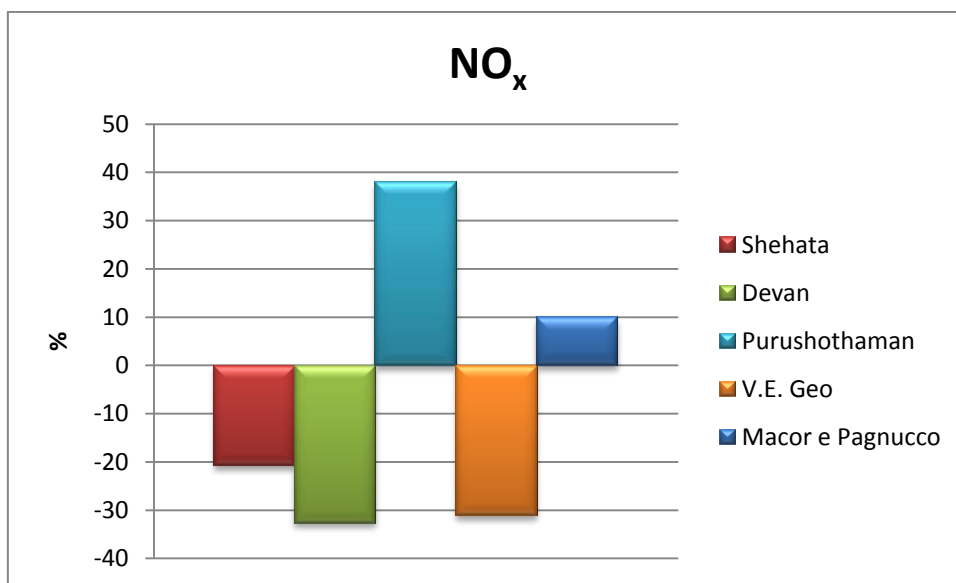


Figura 6 - Andamento medio percentuale delle emissioni di NO_x per i testi considerati nei confronti del diesel (0%)

Gli idrocarburi incombusti hanno andamenti sostanzialmente diversi: si passa infatti da picchi di incremento di +49,55% (per l'olio derivante dalla gomma) a decrementi di 59,1% (per l'olio di arancio). La media è superiore del 6,4% rispetto agli HC emessi dal gasolio. Anche gli HC si formano per combustione incompleta: è per questo motivo che gli oli, salvo alcuni casi, ne producono un maggior quantitativo rispetto al gasolio, a causa della loro maggior viscosità e densità.

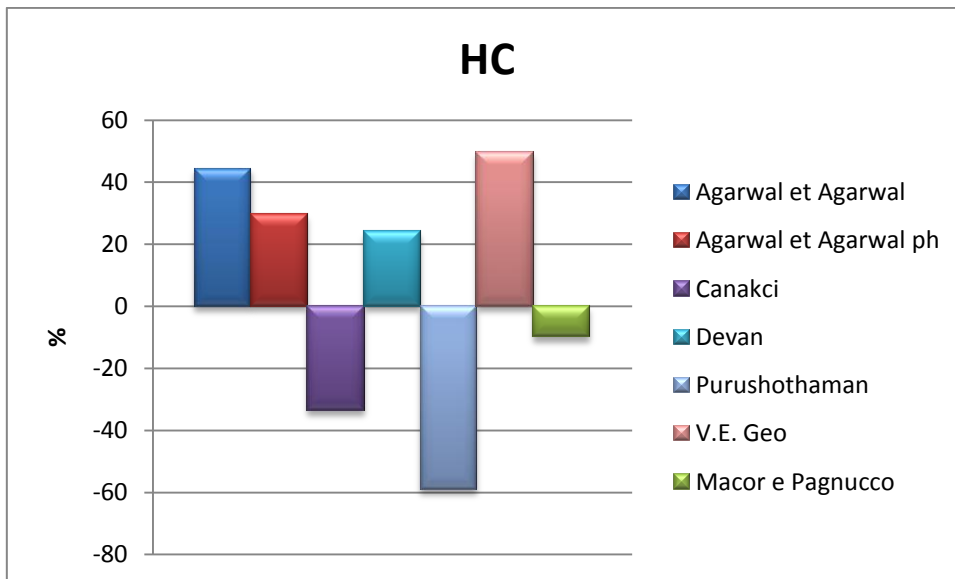


Figura 7 - Andamento medio percentuale delle emissioni di HC per i testi considerati nei confronti del diesel (0%)

Come ultimo parametro si sono valutate le polveri, che in media sono considerevolmente maggiori nei confronti di quelle prodotte dal diesel (+68%).

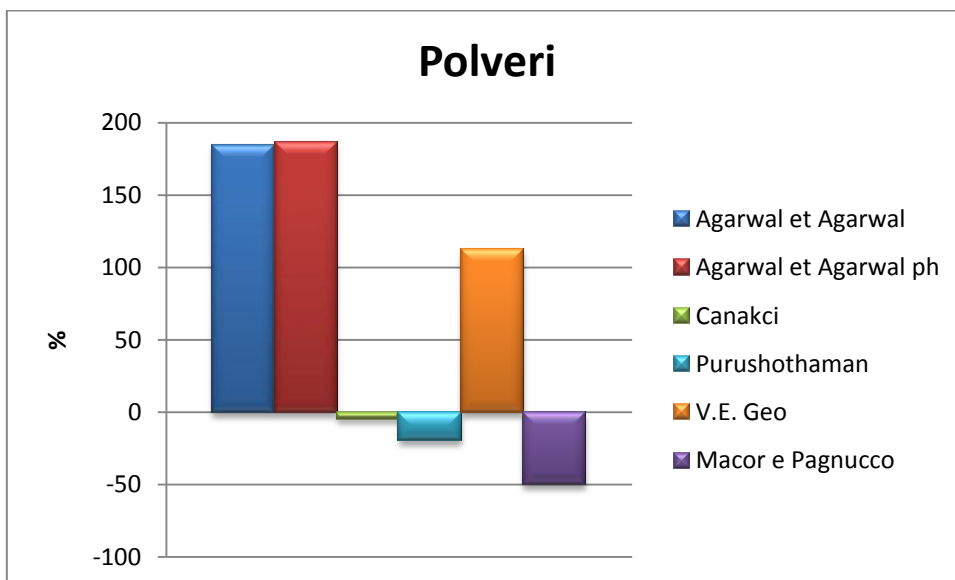


Figura 8 - Andamento medio percentuale delle polveri per i testi considerati nei confronti del diesel (0%)

TEST EFFETTUATO	NOME	OLIO UTILIZZATO	CARATTERISTICHE MOTORE
1	Agarwal et Agarwal	Olio di Jatropha preriscaldato e non	Monocil., i.d., 0,978 l, 7,4 kW a 1500 rpm
2	Chauan et al.	Olio di jatropha preriscaldato	Monocil., 0,78 l
3	Canakci et a.	Olio di girasole preriscaldato	Iniez. indir., 1,8 l, 38,8 kW
4	Shehata et al.	Olio di girasole	0,824 l, 5,775 kW a 1500 rpm
5	Devan et al.	Olio di poon	0,661 l, 4,4 kW a 1500 rpm
6	Agarwal et al.	Olio di karanja preriscaldato e non	Monocil., i.d., 0,552 l, 3,67 kW
7	Purushothaman et al.	Olio di arancio	Monocil., i.d., 0,661 l, 4,4 kW a 1500 rpm
8	V.E. Geo et al.	Olio derivato dai semi delle piante di gomma	Monocil., 0,661 l, 4,4 kW a 1500 rpm

Tabella 2 – Elenco dei test considerati

6.2 EMISSIONI NON REGOLAMENTATE

A differenza delle emissioni trattate nel paragrafo precedente, questo tipo di emissioni non è soggetto a controlli legislativi e non esistono nemmeno codifiche che dovrebbero regolarne la misurazione e il controllo. Le informazioni a tal riguardo perciò sono risultate essere talmente esigue da non poter delineare chiaramente il loro andamento.

Tra le emissioni non regolamentate di possono annoverare:

➤ **Benzene**

Il benzene è un **idrocarburo aromatico** strutturato ad anello esagonale ed è costituito da 6 atomi di carbonio e 6 atomi di idrogeno (formula C_6H_6). Anche conosciuto come benzolo, rappresenta la sostanza aromatica con la struttura molecolare più semplice e per questo lo si può definire il composto-base della classe degli idrocarburi aromatici.

Il benzene a temperatura ambiente si presenta come un liquido incolore che evapora all'aria molto velocemente. È caratterizzato da un odore pungente e dolciastro.

➤ **Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA)**

Gli idrocarburi policiclici aromatici, noti anche con l'acronimo IPA o PAH nell'acronimo inglese, sono idrocarburi costituiti da due o più anelli aromatici, quali quello del benzene uniti fra loro, in un'unica struttura generalmente piana.

Si ritrovano naturalmente nel carbon fossile e nel petrolio, da cui si estraggono, particolarmente dalle qualità ricche in aromatici.

La loro formazione per cause antropiche avviene invece nel corso di combustioni incomplete di combustibili fossili, legname, grassi, tabacco, incenso e prodotti organici in generale, quali i rifiuti urbani. Gli IPA ad alto peso molecolare, come il benzo(e)pirene e il benzo(a)pirene, sono presenti in elevate quantità in asfalti, bitumi e carbone. Gli IPA hanno noti effetti negativi sull'ambiente (tossicità evidente per alcuni organismi acquatici ed uccelli, alta tossicità cronica per la vita acquatica, contaminazione dei raccolti agricoli) e sulla salute umana. Pur essendo lo studio di queste miscele particolarmente complicato, è stato comunque dimostrato che l'esposizione alle miscele IPA comporta un aumento dell'insorgenza del cancro, soprattutto in presenza di benzo(a)pirene

➤ **Aldeidi**

Le aldeidi sono composti organici di formula bruta $C_nH_{2n}O$ che recano nella loro struttura il gruppo funzionale formile, indicato con -CHO. Il loro nome deriva da "alcol deidrogenato", che è una delle possibili modalità di preparazione. Il composto più semplice della serie è il metanale, o *formaldeide*, (HCHO) che viene usata come mezzo di conservazione e come battericida.

A causa della scarsità di informazioni disponibili, si è scelto come riferimento il lavoro sviluppato da Krahl et al., nel quale sono stati sintetizzati i risultati pubblicati da diversi autori di misure di emissioni di combustibili vegetali. Le procedure adottate più frequentemente per le misurazioni sono essenzialmente due: il FTP-75 (Federal Test Procedure) e l'ECE-15-Test (ECE = European Commission for Europe), le quali cercano di riprodurre degli impieghi tipici dei motori nel traffico cittadino e autostradali americano (il primo) e alle alte velocità per adeguarsi a quello europeo. In base al procedimento adottato, i valori rilevati saranno leggermente diversi tra loro, come si può notare dalla Tabella 3, nella quale sono elencate le emissioni percentuali di un veicolo alimentato con olio di colza rapportate alle emissioni quando si alimenta lo stesso veicolo con il gasolio (100%).

	FTP-75	ECE-15
Benzo(a)pirene (BaP)	141	169
Pirene	260	302
Fluorantene	212	308
IPA	189	271
Formaldeide	286	289
Acetaldeide	402	293
Propenale (Acroleina)	825	575
Aldeidi	382	336

Tabella 3 - Emissioni (%) di un veicolo alimentato ad olio di colza comparate con il gasolio, attraverso le due procedure elencate

Di seguito invece si riportano i valori medie risultanti da varie prove che rapportano le emissioni registrate da motori alimentati con olio di colza (Rapeseed Oil) e metilestere di olio di colza (RME) alle emissioni del gasolio (100%).

Componenti	Olio di colza		RME	
	IPA	10-75% 240%	FTP/13/5 ECE	75% 75% 15%
Aldeidi	280%		120% 400%	FTP
Composti aromatici	135%		60%	
Benzene	160%		70% 135%	
FTP: test FTP-75; ECE: test ECE-15; 13: Test dei 13 modi; 5: test dei 5 modi; inst.: test in regime transitorio				

Tabella 4 - Emissioni non regolamentate da motori alimentati con olio di colza e RME in rapporto con il gasolio

Dalla Tab. 4 si evince un forte aumento delle aldeidi, ma questo non dovrebbe suscitare scalpore in quanto le aldeidi sembrano essere tipiche componenti dei combustibili vegetali. Ciò che invece lascia qualche perplessità è l'alta quantità di idrocarburi aromatici, poiché la composizione dell'olio di colza usato come carburante ne è completamente privo.

Le elevate emissioni non regolamentate dipendono dalla composizione dell'olio di alimento del motore; la presenza di composti insaturi favorisce le reazioni nella fase di pre-combustione. Il fatto che poi l'olio vegetale richieda più tempo per evaporare allunga la fase di pre-combustione e le conseguenze che questo ritardo comporta. Le prove effettuate per misurare questo tipo di emissioni inoltre cercano di riprodurre un percorso ideale effettuato dal veicolo in questione, e sono caratterizzate da regimi transitori che non agevolano la già incompleta combustione degli oli vegetali, i quali rilasciano nell'atmosfera un maggior quantitativo di gas incombusti dallo scarico.

7. WASTE OIL

Una grande importanza nel campo delle energie rinnovabili, soprattutto per quel che riguarda i combustibili, è riservata agli oli di scarto.

Nei casi che si prenderanno in esame, si sono alimentati dei motori con olio di girasole usato per la frittura, olio derivante dalla plastica e un non specificato olio vegetale di scarto (in questo caso l'olio è stato utilizzato tal quale e modificato).

Per quel che riguarda l'olio non più utilizzabile a fine alimentare, alcuni studi hanno stimato che la quantità prodotta annualmente, solamente negli Stati Uniti, va dai 1,2 ai 3 miliardi di galloni (si ricorda che un gallone vale circa 3,78 l). Gli oli di frittura sono usati principalmente nel campo alimentare e nella produzione del sapone. In alcuni ristoranti, gli oli fritti passano una prima volta attraverso un riciclatore e sono successivamente riutilizzati, dopo di che vengono mandati ai laboratori per la produzione del sapone; in alcune città, l'uso di questi oli come fonte di nutrimento per gli animali è illegale, ed è anche questo il motivo del surplus di questa "fonte di energia".

Le plastiche invece sono polimeri non bio-degradabili, composti principalmente da carbonio, idrogeno e altri composti quali azoto. A causa della loro natura, esse contribuiscono in maniera sostanziale al problema dei rifiuti, se si pensa che al giorno d'oggi nel mondo sono prodotti circa 129 milioni di tonnellate di plastica ogni giorno, nonostante molte quantità vengano riciclate e poi riutilizzate. Per ricavare l'olio combustibile dalla plastica si utilizza il processo della pirolisi, il quale fornisce circa il 75% di idrocarburi liquidi, dal 5 al 10% di coke (un residuo carbonioso), mentre il resto è formato da LPG (Liquefied Petroleum Gas).

Per questi motivi alcuni ricercatori hanno pensato di utilizzare questi "scarti" come combustibile per i motori diesel.

7.1 ANALISI PRESTAZIONALE

- Nel primo caso, Pugazhvadivu et al. hanno utilizzato olio di girasole usato per la frittura di snack in un motore diesel ad iniezione diretta, monocilindrico, di 552 cm³ di cilindrata e 3,78 kW di potenza a 1500 rpm.

Le proprietà dell'olio, quali viscosità, densità e punto di infiammabilità sono sostanzialmente ed evidentemente diverse rispetto a quelle del combustibile fossile.

La viscosità di ogni combustibile può essere calcolata attraverso l'equazione di Mc Coulls:

$$\log \log(v + 0,8) = A \log T + B ,$$

dove v è la viscosità misurata in cSt, T la temperatura in gradi Kelvin, A e B costanti.

Sperimentalmente, le due costanti A e B sono state valutate rispettivamente -3,28 e 8,41.

Usando l'equazione di cui sopra, si è trovato che la temperatura a cui si devono pre-riscaldare gli oli di frittura per ridurre la viscosità ad un valore pari a quello del diesel ad una T di 30° C, è pari a 135 °C. Per questo motivo le prestazioni e le emissioni del motore sono valutate per una temperatura pari a 135° C ed inoltre, per ottenere altri valori, anche ad una temperatura di pre-riscaldamento di 75° C.

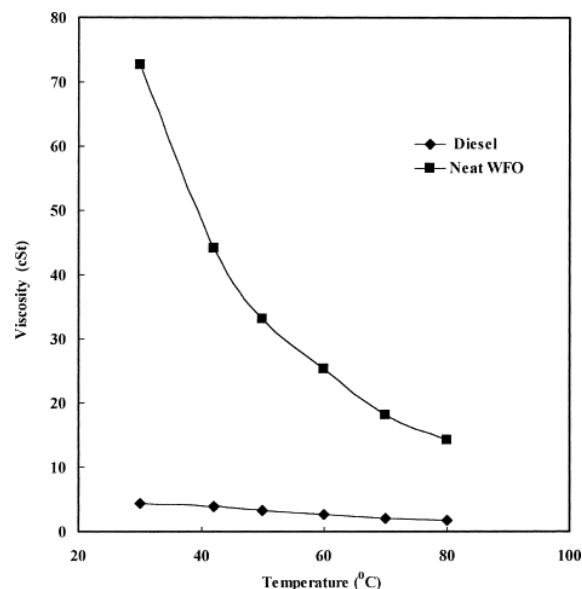


Figura 1 - Andamento della viscosità di WFO e gasolio al variare della temperatura

Per quel che riguarda le prestazioni valutate, la Fig. 2 mostra come il valore minimo del consumo specifico di energia (BSEC) per il diesel e per l'olio di frittura pre-riscaldato a 75° C e a 135° C si verifica quando la potenza è massima, mentre per l'olio a 35° C esso si trova in corrispondenza dell'85% del carico massimo. Utilizzando l'olio di frittura tal quale, senza riscaldarlo, si è trovato un valore minimo superiore del 28% rispetto a quello del diesel.

Queste differenze sono dovute all'alta densità e dal basso potere calorifico degli oli di frittura, sempre relazionati con il combustibile fossile.

Man mano che si riscalda l'olio il BSEC migliora, e questo è dovuto ad una minor viscosità e ad una miglior atomizzazione. Si nota come per l'olio riscaldato a 135° C, il minimo valore di BSEC sia prossimo a quello del diesel.

Tutte queste considerazioni provano come una temperatura maggiore porti il motore ad avere valori simili a quelli che si avrebbero alimentandolo con gasolio.

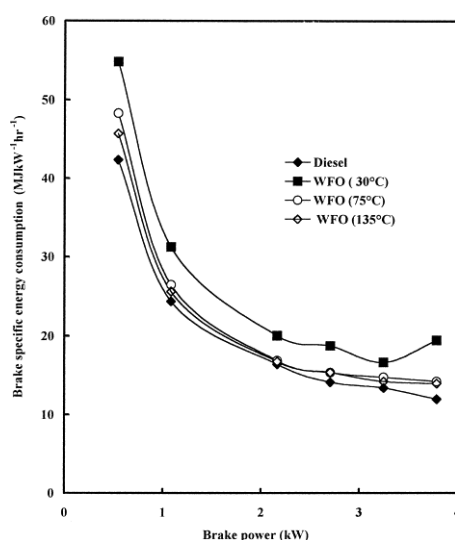


Figura 2 - Consumo specifico di energia in funzione della potenza

L'efficienza termica, quando si alimenta il motore con l'olio non preriscaldato, è minore nei confronti di tutti gli altri casi e ad ogni valore della potenza. Il valore massimo registrato è pari al 21,6% per l'olio di scarto tal quale, mentre sale al 30% quando si utilizza il gasolio; essa inoltre incrementa all'aumentare della temperatura di preriscaldamento dell'olio: si sono registrati infatti valori di massimo pari al 25,26% e 25,79% per l'olio preriscaldato rispettivamente alle temperature di 75°C e 135°C.

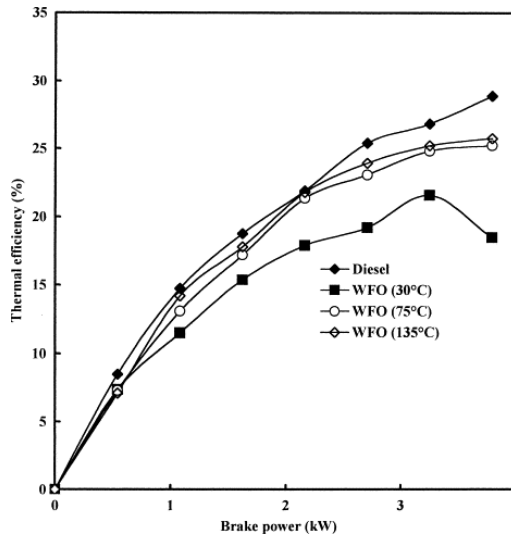


Figura 3 - Efficienza in funzione della potenza

Le temperature dei gas allo scarico sono maggiori per l'olio a temperatura ambiente rispetto a quelle riscontrate con il diesel. Man mano che si incrementano le temperature di immissione del combustibile, anche le temperature crescono.

- Mani et al. hanno analizzato l'utilizzo di olio derivato dalla plastica di scarto (Waste Plastic Oil) in un motore di 210 cm³ di cilindrata e 4,4 kW di potenza, monocilindrico, ad iniezione diretta e fatto lavorare ad una velocità costante di 1500 giri/minuto.

Le performance del motore sono state analizzate attraverso due parametri, quali l'efficienza termica e le temperature dei gas allo scarico.

Per quanto riguarda il primo, si è trovato che le due curve per il diesel e per il WPO, in dipendenza della potenza, hanno un andamento simile fino ad un 75% della potenza massima. Un leggero incremento dell'efficienza per il diesel si è ottenuto al massimo valore della potenza, e più precisamente un 28,2% contro un 27,4% valutato invece utilizzando l'olio nel motore.

Le temperature dei gas allo scarico crescono all'aumentare della potenza, e variano tra i 221 °C e i 417 °C per il diesel, e tra i 240 °C e i 450 °C per l'olio rispettivamente in assenza di carico e per la massima potenza.

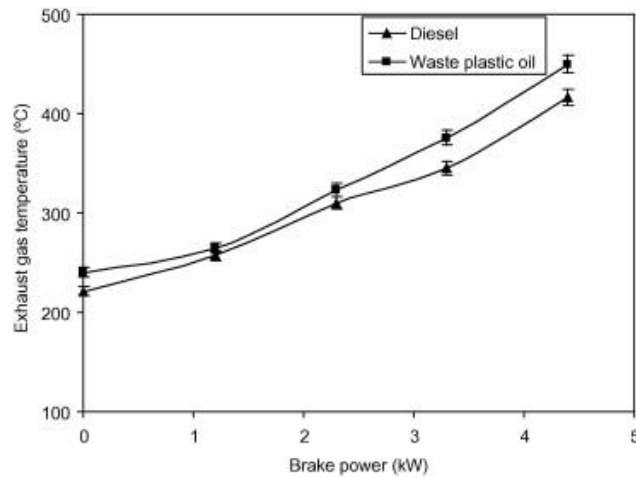


Figura 4 - Incremento delle temperature dei gas allo scarico in funzione della potenza

- Basinger et al. hanno utilizzato olio di scarto in un motore da 1,4 l, ad iniezione indiretta e raffreddato ad acqua. Come già anticipato, l'olio è stato utilizzato tal quale e modificato, cioè iniettato alla temperatura di 100 °C e alla pressione di 15 MPa, fattori che dovrebbero migliorare la combustione dell'olio.

Le temperature dei gas allo scarico per l'olio non modificato sono risultate essere le più alte; valori leggermente minori si sono riscontrati per l'olio modificato, e ancora minori sono quelli per il gasolio.

Il consumo specifico di carburante è minimo nel caso del combustibile fossile, ed è risultato essere minore, in media, del 15% rispetto all'olio tal quale e del 12% rispetto a quello modificato.

Sempre nei confronti del diesel, l'efficienza termica è cresciuta dello 0,67% per l'olio modificato, mentre per l'olio puro il decremento riscontrato è pari al 2,67%.

7.1.1 GRAFICI RIASSUNTIVI E CONSIDERAZIONI

I grafici sottostanti sono riassuntivi delle prestazioni valutate nei due test, e nei quali i risultati ottenuti sono confrontati con il gasolio.

Solo Mani et al. hanno rilevato un incremento maggiore rispetto a quello del gasolio, pari allo 0,11%, mentre l'altro test ha rilevato decrementi più sostanziali per tutte le temperature di preriscaldamento.

In Fig.5 si nota come l'efficienza termica diminuisca il media del 7,28%. Mani et al. e Basinger et al. (nel caso dell'olio modificato) hanno valutato un leggero incremento del rendimento, mentre in tutti gli altri casi il decremento è stato più rilevante.

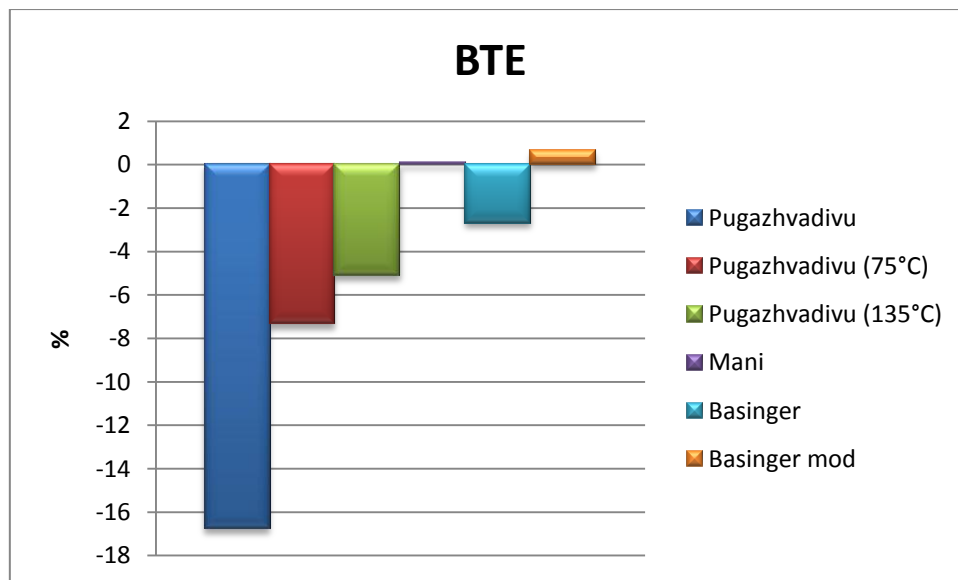


Figura 5 - Andamento medio percentuale del rendimento per i test considerati nei confronti del diesel (0%)

Il consumo specifico di energia (BSEC), è stato valutato solo da Pugazhvadivu, e in media l'incremento (per l'olio preriscaldato e non) è pari a 10,79%, dovuto ad una minore viscosità e ad una migliore atomizzazione, tanto più che incrementa la temperatura di preriscaldamento.

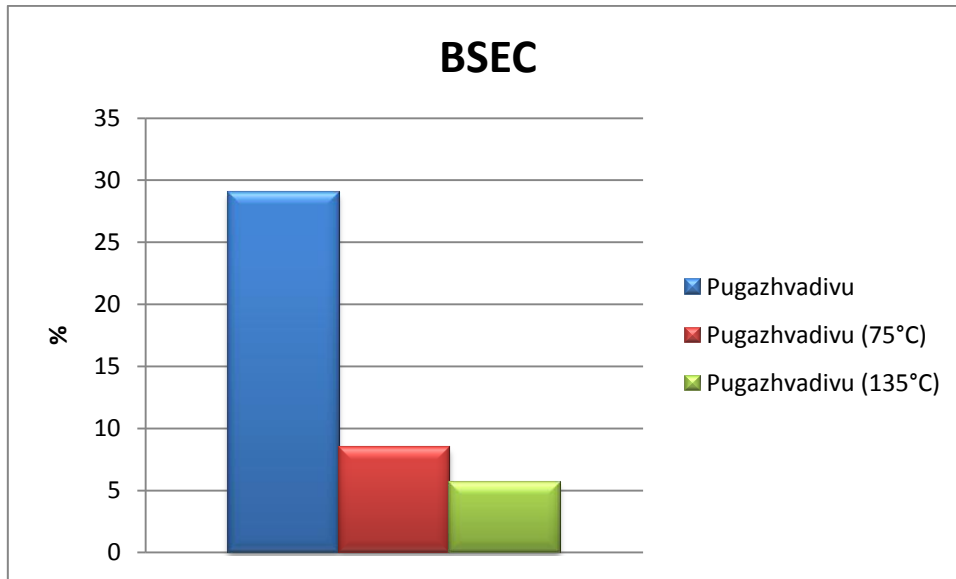


Figura 6 - Andamento medio percentuale del consumo specifico di energia per i test considerati nei confronti del diesel (0%)

Le temperature dei gas allo scarico sono risultate essere, in tutti i casi presi in esame, maggiori di quelle rilevate con il gasolio; l'incremento medio rilevato è pari al 11,56%.

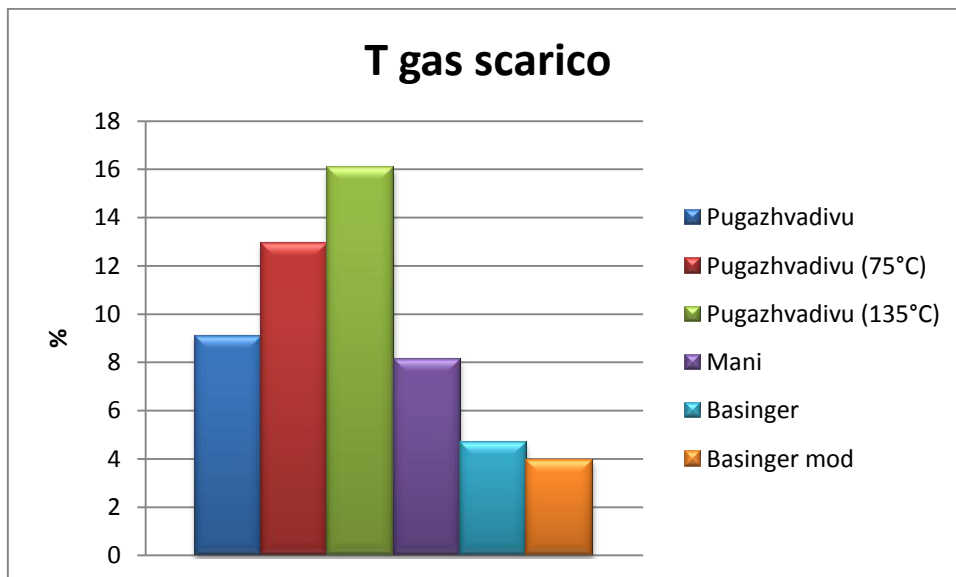


Figura 7 - Andamento medio percentuale delle temperature dei gas allo scarico per i test considerati nei confronti del diesel (0%)

7.2 ANALISI DELLE EMISSIONI

Si prende ora in esame il capitolo emissioni, confrontando i valori di CO, NO_x e polveri valutati negli esperimenti presi in considerazione.

Tutti i parametri sono espressi in funzione della potenza del motore, e ad esse si farà riferimento per le variazioni riscontrate di caso in caso.

- CO

L'ossido di carbonio aumenta all'aumentare del carico. Quando si alimenta il motore con olio di girasole usato, questo tipo di emissioni risulta massimo quando l'olio non è riscaldato prima di essere iniettato (alla massima potenza si ha un massimo pari a 0,7), mentre diminuisce man mano che la temperatura incrementa (0,58 per una temperatura di 75 °C e 0,48 per 135 °C). Il diesel invece ha i valori minori (0,21 al massimo carico).

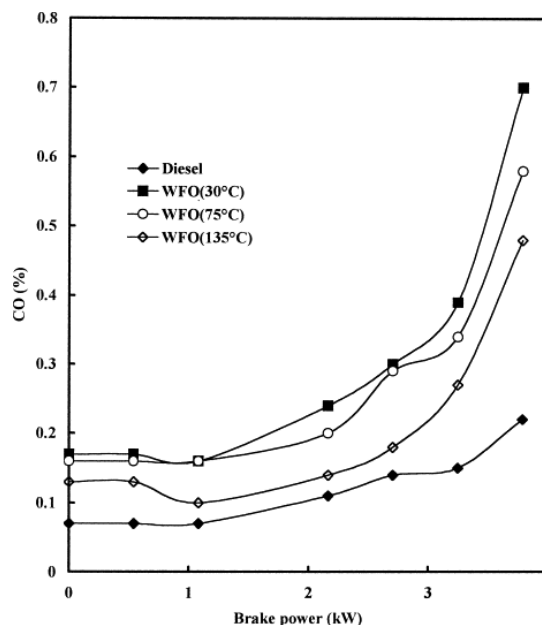


Figura 8 - Variazione di CO in funzione del carico

Per Mani et al., la concentrazione di CO per l'olio varia dai 18,51 g/kWh al 25% della potenza massima (per il gasolio sono 14,14 g/kWh) ai 6,19 g/kWh (contro i 5,75 g/kWh). Si nota quindi che, per tutti i valori del carico, le emissioni di ossidi di carbonio

per l'olio derivante dalla plastica siano maggiori rispetto al combustibile fossile usato come confronto.

In linea con i risultati appena ottenuti, anche per Basinger et al. le emissioni di CO per il diesel sono minime. Per l'olio non modificato esse invece sono massime (l'incremento medio è pari al 102,7%) e sono intermedie per l'olio preriscaldato (+ 47,32%).

- NO_x

Anche gli ossidi di azoto incrementano con l'aumentare del carico. In questo caso, per l'olio di girasole usato essi sono minori rispetto ai valori riscontrati per il diesel (si è rilevato un decremento del 44%); inoltre le emissioni diminuiscono man mano che la temperatura di iniezione decrementa del carburante (del 23% e 25% rispettivamente alle temperature di 75 °C e 135 °C, rispetto all'olio a temperatura ambiente).

In accordo con quello trovato da Pugazhvadivu et al., anche per l'olio derivante dalla plastica le emissioni di NO_x incrementano all'aumentare del carico. Esse variano dai 14,68 g/kWh per il 25% del carico (contro i 12,15 g/kWh del gasolio), agli 8,93 g/kWh alla massima potenza (per il diesel sono pari a 7,91 g/kWh).

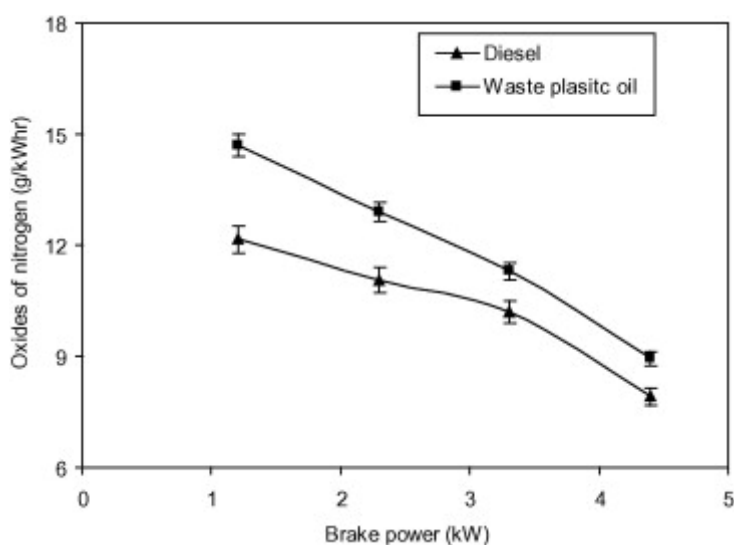


Figura 9 - Variazione delle emissioni di NOx al variare della potenza

Per Basinger et al. gli ossidi di azoto emessi quando si alimenta il motore con l'olio sono risultate essere minori a tutti i regimi di utilizzo rispetto al gasolio, e la differenza tra l'olio preriscaldato e non è ininfluente ($\approx 1\%$).

- HC

Gli idrocarburi incombusti sono stati presi in considerazione solamente da Mani et al. e da Basinger et al.

Nel primo caso, la differenza tra i valori valutati per l'olio e per il diesel è irrilevante. Le due curve presentano lo stesso andamento, e si è riscontrato un incremento della quantità di HC per l'olio in media del 3%.

L'incremento di idrocarburi incombusti, per Basinger et al., è più significativo, sia per l'olio utilizzato tal quale che per quello modificato (rispettivamente +21,7% e +28%).

- POLVERI

Si è valutato che per l'olio di girasole usato, senza preriscaldamento, le polveri emesse sono significativamente maggiori se confrontate con quelle prodotte dal diesel. Esse decrementano all'aumentare della temperatura di iniezione, rimanendo comunque sempre minori di quelle emesse dal gasolio.

Nel caso preso in esame da Mani et al. invece le polveri risultano essere minori quando si utilizza l'olio derivante dalla plastica: esse variano tra i 0,2 Bosch Smoke Units (BSU) e i 3,48 BSU (per l'olio) e tra i 0,66 BSU e i 3,5 BSU (per il diesel).

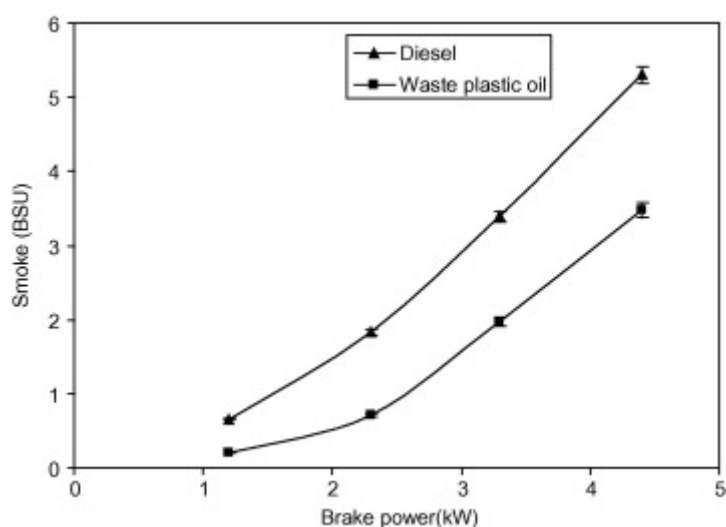


Figura 10 - Andamento delle polveri al variare del carico

7.2.2 GRAFICI RIASSUNTIVI E CONSIDERAZIONI

Si riassumono ora, tramite i soliti grafici, le varie tipologie di emissioni per i test considerati.

Tutti gli esperimenti hanno evidenziato come la quantità di ossido di carbonio sia maggiore rispetto alla media emessa dal gasolio usato come confronto. L'incremento medio è pari al 93,71%, dovuto all'incompleta combustione dell'olio a causa dell'elevata densità e della scarsa nebulizzazione: si nota infatti come preriscaldando l'olio le emissioni diminuiscano, proprio perché densità ed atomizzazione si avvicinano ai valori del gasolio.

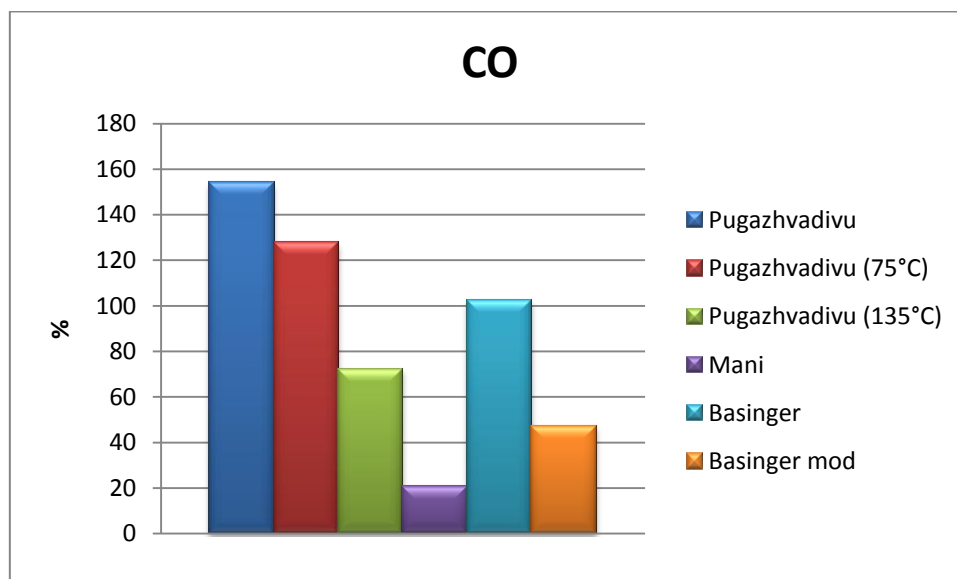


Figura 11 - Andamento medio percentuale delle emissioni di CO per i testi considerati nei confronti del diesel (0%)

Gli ossidi di azoto sono invece minori quando si sono alimentati i motori con i vari tipi di olio. Solo Mani et al. hanno evidenziato un incremento di queste emissioni (pari al 17,07%). Il decremento medio comunque è pari al 26,6%. Nei casi Pugazhvadivu et al. e Basinger et al. la miglior combustione del gasolio nella camera di combustione comporta delle temperature più alte all'interno del cilindro con conseguente formazione di un maggior quantitativo di NO_x. Mani et al. invece hanno riscontrato delle temperature maggiori alimentando il motore con il WPO, e di conseguenza anche un maggior quantitativo di emissioni.

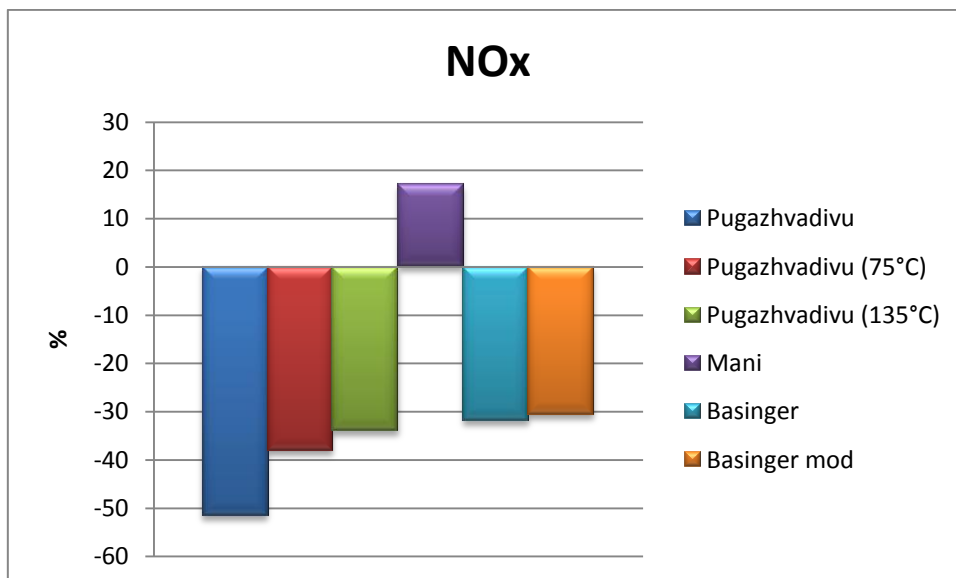


Figura 12 - Andamento medio percentuale delle emissioni di NOx per i testi considerati nei confronti del diesel (0%)

Come si nota dalla Fig. 13, la quantità di idrocarburi incombusti risulta essere in ogni caso sopra la media: se per Mani et al. l'incremento è quasi irrilevante, per Basinger et al. invece esso è più importante. Lo scostamento medio rispetto ai valori del gasolio è pari al +17,6%.

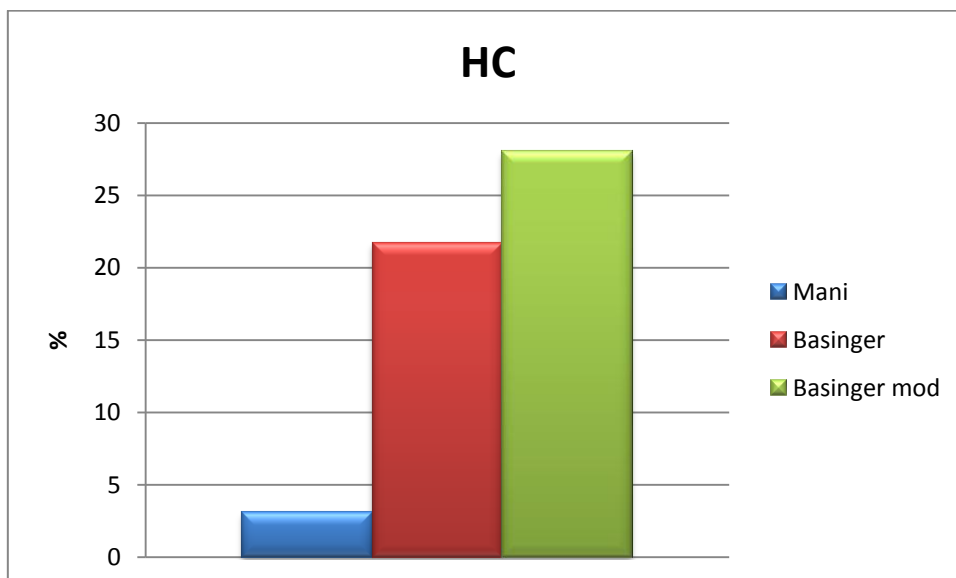


Figura 13 - Andamento medio percentuale delle emissioni di HC per i testi considerati nei confronti del diesel (0%)

I due test che hanno preso in considerazione le polveri hanno evidenziato andamenti opposti: nonostante questo la media dei valori risulta essere ben sopra la media del gasolio (+52,75%). Per Pugazhvadivu et al. l'incremento delle polveri emesse è dovuto alla maggior dimensione delle particelle: aumenta così il tempo di evaporazione e di conseguenza una minor velocità di mescolamento tra aria e combustibile. Per Mani et al. il decremento invece è conseguenza delle temperature più elevate all'interno della c.d.c..

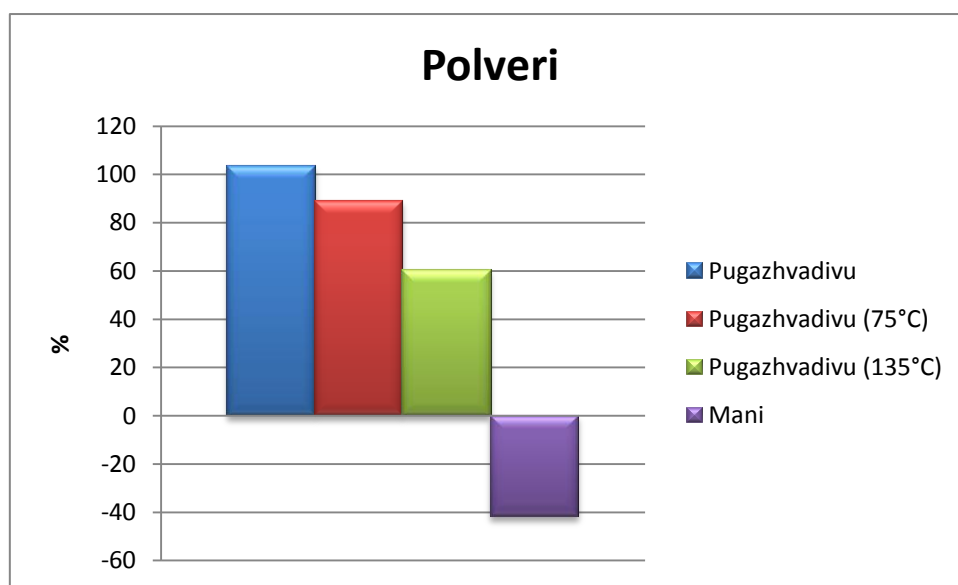


Figura 14 - Andamento medio percentuale delle polveri per i test considerati nei confronti del diesel (0%)

TEST EFFETTUATO	Nome	OLIO UTILIZZATO	CARATTERISTICHE MOTORE
1	Pugazhvadivu et al.	Olio di girasole usato per frittura	Monocil., i.d., 0,552 l, 3,78 kW a 1500 rpm
2	Mani et al.	Olio derivato dalla plastica di scarto	Monocil., i.d., 0,210 l, 4,4 kW a 1500 rpm
3	Basinger et al.	Olio di scarto	Iniez.indiretta, 1,4 l, raffreddato ad acqua

Tabella 1 – Elenco dei test considerati

8. INCENTIVAZIONI STATALI

In questo capitolo si cercherà di evidenziare gli incentivi che lo Stato mette a disposizione per l'utilizzo degli oli vegetali negli impianti.

Ai fini del raggiungimento degli obiettivi definiti nel protocollo di Kyoto, l'Italia ha recepito la Direttiva Europea 2001/77 in tema di incentivazione della produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile.

Vengono definite fonti energetiche rinnovabili (art. 2 del Dlgs 387/03):

“le fonti energetiche non fossili (eolica, solare, geotermica, del moto ondoso, maremotrice, idraulica, biomasse, gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione e biogas). In particolare, per biomasse si intende: la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali) e dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani.”

In Italia il Gestore dei Servizi Energetici (GSE) ha un ruolo centrale nella promozione, incentivazione e sviluppo delle fonti rinnovabili, essendo l'ente attuatore del sistema di incentivazione dell'energia prodotta da fonti rinnovabili che prevede, su richiesta dell'operatore:

- il rilascio di certificati verdi;
- la tariffa omnicomprensiva (solo per impianti di potenza inferiore ad 1 MW).

I certificati verdi sono titoli negoziabili che attestano la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile e rappresentano un beneficio per l'operatore in quanto sono utilizzabili per ottemperare all'obbligo di immissione nel sistema elettrico di una quota di energia elettrica da fonte rinnovabile.

La tariffa omnicomprensiva (comprensiva cioè dell'incentivo e del ricavo da vendita dell'energia) è applicabile agli impianti entrati in esercizio in data successiva al 31 dicembre 2007, di potenza nominale media annua non superiore ad 1 MW e di potenza elettrica non superiore a 0,2 MW per gli impianti eolici, per i quantitativi di energia elettrica netta prodotta e contestualmente immessa in rete.

In data 18 dicembre 2008 il Ministro dello Sviluppo Economico, di concerto col Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, ha adottato il Decreto “Incentivazione della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, ai sensi dell'articolo 2, comma 150, della legge 24 dicembre 2007, n. 244” (di seguito DM 18 dicembre 2008) che dà attuazione ai meccanismi di incentivazione già introdotti dalla

Legge 24 dicembre 2007 n. 244 (Legge Finanziaria 2008) e dalla Legge 29 novembre 2007, n. 222 (Collegato alla Finanziaria 2008).

Per poter accedere all'incentivo si deve richiedere al GSE la qualifica IAFR di Impianto Alimentato da Fonti Rinnovabili. In particolare, possono ottenere la qualificazione IAFR gli impianti alimentati da fonte rinnovabile entrati in esercizio successivamente al 1 aprile 1999 a seguito di nuova costruzione, potenziamento, rifacimento totale o parziale, riattivazione ed anche gli impianti che operano in co-combustione, entrati in esercizio prima del 1 aprile 1999, che successivamente a tale data operino come centrali ibride.

Il GSE rilascia inoltre altre forme di certificazione dell'energia prodotta da fonti rinnovabili, quali la Garanzia di Origine (GO) e i certificati RECS e gestisce il meccanismo di scambio sul posto per gli impianti di potenza nominale media annua fino a 200 kW.

8.1 I CERTIFICATI VERDI

I produttori di energia da fonti rinnovabili, titolari d'impianti qualificati IAFR, possono richiedere al GSE l'emissione di certificati verdi (CV).

I CV possono essere richiesti:

- a consuntivo, in base all'energia netta effettivamente prodotta dall'impianto nell'anno precedente rispetto a quello di emissione;
- a preventivo, in base alla producibilità netta attesa dell'impianto.

Il GSE a valle della verifica dell'attendibilità dei dati forniti dai produttori, i cui impianti siano stati qualificati, emette a consuntivo, entro trenta giorni dalla ricezione della richiesta, i certificati verdi spettanti, arrotondando la produzione netta di energia al MWh con criterio commerciale.

I produttori che hanno richiesto l'emissione di certificati verdi a preventivo sono tenuti successivamente a compensare l'emissione ed inviare copia della dichiarazione, presentata all'Ufficio Tecnico di Finanza (UTF), attestante l'effettiva produzione di energia elettrica realizzata nell'anno cui si riferiscono i certificati verdi.

A decorrere dal 30 giugno 2009, l'emissione dei certificati verdi a preventivo, anche se riferiti ad impianti già entrati in esercizio, è subordinata alla presentazione di una garanzia a favore del GSE, in termini di energia a valere sulla produzione di altri impianti qualificati già in esercizio, nella titolarità del medesimo soggetto, o in termini

economici sotto forma di fideiussione bancaria escutibile a prima richiesta a favore del GSE, commisurata al prezzo medio riconosciuto ai CV, registrato l'anno precedente dal GME e trasmesso al GSE entro il 31 gennaio di ogni anno, calcolato con le modalità di cui all'art. 14, comma 4, del DM del 18/12/2008, per un uguale ammontare dei certificati verdi da emettere.

Per gli impianti non ancora in esercizio deve essere presentato un coerente piano di realizzazione.

Nel caso in cui l'impianto, per qualsiasi motivo, non produca effettivamente energia in quantità pari o superiore ai certificati emessi e il produttore non sia in grado di restituire i certificati ottenuti in eccesso, il GSE compensa la differenza trattenendo certificati verdi relativi a eventuali altri impianti, nella titolarità del medesimo produttore, per il medesimo anno. In mancanza di certificati sufficienti per l'anno di riferimento, il GSE può effettuare la compensazione anche sulla produzione dell'anno successivo a quello nel quale si è generato il debito. In mancanza di tale ulteriore possibilità di compensazione, il GSE si avvale della fideiussione bancaria a suo favore.

Viceversa, nel caso in cui l'effettiva produzione dell'impianto sia superiore alla producibilità attesa, il GSE emette a favore del produttore, all'atto della compensazione, il maggior numero di certificati spettanti.

Contestualmente alla prima emissione di certificati verdi, il GSE attiva, a favore del produttore, un "conto proprietà" per il "deposito" dei certificati stessi.

Il GSE mantiene traccia delle emissioni dei CV e delle relative transazioni mediante un sistema informatico dedicato al quale i titolari del conto proprietà possono accedere, previa assegnazione di un codice identificativo da parte del GSE.

Il conto proprietà è attivato anche a favore dei produttori e/o importatori soggetti all'obbligo di cui all'art.11 del D.lgs.79/99, all'atto della ricezione, da parte del GSE, dell'autocertificazione attestante la produzione e/o importazione non rinnovabile, nonché a favore dei soggetti che intendano effettuare attività di trading di CV. E' possibile consultare via internet, tramite accesso riservato, lo stato del proprio conto proprietà, sia per inserire acquisizioni e/o cessioni di certificati verdi, sia per verificare, in maniera diretta e immediata, le transazioni avvenute.

8.1.1 CALCOLO DEI CERTIFICATI VERDI

Per gli impianti entrati in esercizio in data successiva al 31 dicembre 2007 di potenza nominale media annua superiore a 1 MW e a 0,2 MW per gli impianti eolici, il GSE rilascia i CV per 15 anni, moltiplicando l'energia netta EI riconosciuta all'intervento effettuato per le costanti, differenziate per fonte, della Tabella della Legge Finanziaria 2008.

N°	FONTE	COEFFICIENTE
1	Eolica per impianti di taglia superiore a 200 kW	1,00
1-bis	Eolica offshore	1,50
3	Geotermica	0,90
4	Moto ondoso e maremotrice	1,80
5	Idraulica diversa da quella del punto precedente	1,00
6	Rifiuti biodegradabili, biomasse diverse da quelle di cui al punto successivo	1,30
7	Biomasse e biogas prodotti da attività agricola, allevamento e forestale da filiera corta	1,80
8	Gas di discarica e gas residuati dai processi di depurazione e biogas diversi da quelli del punto precedente	0,80

Figura 1 - Coefficienti moltiplicativi per differenti tipi di fonte

A seguito dell'entrata in vigore del Decreto 18/12/2008 il GSE provvede, per gli impianti IAFR aventi diritto, a effettuare i conguagli, ovvero a emettere i certificati verdi aggiuntivi, in applicazione dei coefficienti moltiplicativi indicati nella tabella di cui sopra.

8.1.2 PERIODO DI RILASCIO DEI CERTIFICATI VERDI

Ai sensi dell'art. 10, comma 1, del DM 18/12/2008 viene definito il periodo di diritto al rilascio dei certificati verdi, per impianti qualificati, come segue:

- a. *15 anni*, limitatamente all'energia elettrica incentivata ascrivibile ad alimentazione da fonti rinnovabili negli impianti, incluse le centrali ibride, entrati in esercizio in data successiva al 31 dicembre 2007;
- b. *15 anni* per l'energia derivante da impianti termoelettrici entrati in esercizio prima del 1.4.99 che, successivamente al 31 dicembre 2007, iniziano ad operare come centrali ibride;
- c. *12 anni*, limitatamente all'energia elettrica incentivata ascrivibile ad alimentazione da fonti rinnovabili negli impianti entrati in esercizio fino al 31 dicembre 2007;
- d. *12 anni* per l'energia derivante da impianti termoelettrici entrati in esercizio prima del 1.4.99 che prima del 31 dicembre 2007 hanno iniziato ad operare come centrali ibride;
- e. *8 anni*, per l'energia elettrica incentivata non ascrivibile ad alimentazione da fonti rinnovabili negli impianti di cogenerazione abbinati al teleriscaldamento;
- f. *8 anni* per l'energia elettrica incentivata non ascrivibile ad alimentazione da fonti rinnovabili per gli impianti, anche ibridi, alimentati da rifiuti non biodegradabili, entrati in esercizio entro il 31 dicembre 2006 che hanno acquisito i diritti all'ottenimento dei CV in applicazione della normativa vigente fino alla stessa data.

L'energia prodotta dagli impianti di cui alle precedenti lettere c. e d. ha diritto ai certificati verdi per un periodo aggiuntivo di ulteriori 4 anni, in misura corrispondente al 60% dell'energia incentivabile, ascrivibile ad alimentazione da biomasse da filiera, in ciascuno dei predetti 4 anni.

L'energia prodotta dagli impianti di cui alla precedente lettera f., entrati in esercizio dopo il 14.2.04 e prima del 1.1.07, ha diritto ai certificati verdi per un periodo aggiuntivo di ulteriori 4 anni, in misura corrispondente al 60% dell'energia incentivabile, in ciascuno dei predetti 4 anni, ascrivibile all'alimentazione da rifiuti non biodegradabili.

8.1.3 CUMULABILITÀ DEGLI INCENTIVI

La domanda del produttore volta a ottenere gli incentivi per impianti alimentati da fonti rinnovabili per il primo anno è accompagnata da dichiarazione giurata con cui il produttore attesta di non incorrere nel divieto di cumulo degli incentivi di cui all'art. 18 del D.lgs. 387/2003.

La domanda del produttore volta a ottenere gli incentivi per impianti alimentati da fonti rinnovabili, entrati in esercizio in data successiva al 30/06/2009, per il primo anno è altresì accompagnata da dichiarazione giurata con cui il produttore attesta di non incorrere nel divieto di cumulo d'incentivi di cui all'art. 2, comma 152 della Legge Finanziaria 2008, vale a dire incentivi pubblici di natura nazionale, regionale, locale o comunitaria, in conto energia, in conto capitale o in conto interessi con capitalizzazione anticipata, assegnati dopo il 31/12/2007.

Per gli impianti, di proprietà di aziende agricole o gestiti in connessione con aziende agricole, agroalimentari, di allevamento e forestali, alimentati dalle fonti di cui al numero 6 della tabella 2 sotto riportata, l'accesso, a decorrere dall'entrata in esercizio commerciale, alla tariffa fissa omnicomprensiva è cumulabile con altri incentivi pubblici di natura nazionale, regionale, locale o comunitaria in conto capitale o in conto interessi con capitalizzazione anticipata, non eccedenti il 40 per cento del costo dell'investimento.

8.1.4 RITIRO DEI CERTIFICATI VERDI

A partire dal 2008, entro giugno di ciascun anno, il GSE, su richiesta del produttore, ritira i CV in scadenza nell'anno (i CV hanno una validità triennale) ulteriori rispetto a quelli necessari per assolvere l'obbligo. A tal fine il prezzo medio annuale è quello relativo alle contrattazioni di tutti i CV indipendentemente dall'anno di riferimento scambiati l'anno precedente (sulla borsa del GME o con contratti bilaterali). Al fine di garantire graduale transizione dal vecchio ai nuovi meccanismi incentivanti e non penalizzare gli investimenti già avviati, nel triennio 2009-2011, entro il mese di giugno, il GSE ritira, su richiesta dei detentori, i certificati verdi rilasciati per le produzioni, riferite agli anni 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, con esclusione degli impianti di cogenerazione abbinati a teleriscaldamento di cui all'art. 9, comma 2, lettera b) del DM 18/12/2008. La richiesta di ritiro è inoltrata dal detentore al GSE entro il 31 marzo di ogni anno del triennio 2009-2011.

8.2 TARIFFA ONNICOMPRENSIVA

Su richiesta del produttore, per gli impianti entrati in esercizio in data successiva al 31 dicembre 2007, di potenza nominale media annua non superiore ad 1 MW (0,2 MW per gli impianti eolici), l'energia netta EI riconosciuta all'intervento effettuato immessa nel sistema elettrico può essere incentivata, in alternativa ai certificati verdi, con una tariffa fissa onnicomprensiva (di cui alla Tabella 3 della Legge Finanziaria 2008) di entità variabile a seconda della fonte, per un periodo di 15 anni. La Tabella della Legge Finanziaria è stata aggiornata dalla Legge 23/07/2009 n.99, come sotto riportata.

Al termine dei 15 anni l'energia elettrica è remunerata, con le medesime modalità, alle condizioni economiche previste dall'articolo 13 del D.lgs. 387/03.

N°	FONTE	TARIFFA (€cent/kWh)
1	Eolica per impianti di taglia inferiore a 200 kW	30
3	Geotermica	20
4	Moto ondoso e maremotrice	34
5	Idraulica diversa da quella del punto precedente	22
6	Biogas e biomasse, esclusi i biocombustibili liquidi ad eccezione degli oli vegetali puri tracciabili attraverso il sistema integrato di gestione e di controllo previsto dal regolamento (CE) n. 73/2009 del Consiglio, del 19 gennaio 2009	28
8	Gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione e biocombustibili liquidi ad eccezione degli oli vegetali puri tracciabili attraverso il sistema integrato di gestione e di controllo previsto dal regolamento (CE) n. 73/2009 del Consiglio, del 19 gennaio 2009	18

Figura 2 - Tariffa (€cent/kWh) per diversi tipi di fonte di provenienza

La tariffa onnicomprensiva può essere variata ogni tre anni, con decreto del Ministro dello sviluppo economico, assicurando la congruità della remunerazione ai fini dell'incentivazione delle fonti energetiche rinnovabili.

Il diritto di opzione tra i certificati verdi e la tariffa fissa è esercitato all'atto della richiesta di qualifica IAFR presentata al GSE. E' consentito, prima della fine del periodo d'incentivazione, un solo passaggio da un sistema incentivante all'altro; in tal caso la durata del periodo di diritto al nuovo sistema di incentivante è ridotta del periodo già fruito con il precedente sistema.

8.3 BIOMASSE DA FILIERA

Nei casi di produzione di energia elettrica da impianti alimentati da biomasse da filiera, il GSE riconoscerà il coefficiente moltiplicativo pari a 1,8, per l'energia netta incentivabile mediante CV, solo dopo l'emanazione del Decreto del Ministro delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali di concerto con il Ministro dello Sviluppo Economico, di cui all'articolo 1, comma 382-septies, della legge finanziaria 2007. Nelle more dell'emanazione del suddetto Decreto, il GSE applica all'energia netta incentivabile il coefficiente moltiplicativo pari a 1,3 in caso di CV. Successivamente all'entrata in vigore del Decreto, il GSE emette certificati verdi aggiuntivi, in applicazione del coefficiente moltiplicativo pari a 1,8, esclusivamente per gli impianti per i quali il produttore sia in grado di comprovare la rispondenza delle biomasse utilizzate nel periodo intercorrente tra la data di entrata in esercizio commerciale dell'impianto e la data di entrata in vigore del decreto, alle disposizioni dello stesso Decreto.

8.4 DISPOSIZIONI TRANSITORIE

I soggetti aventi diritto alla tariffa onnicomprensiva che nelle more dell'entrata in vigore del Decreto del Ministro dello Sviluppo Economico del 18/12/2008 hanno fatto richiesta dei certificati verdi, entro 3 mesi dalla data di entrata in vigore dello stesso possono optare per la tariffa fissa onnicomprensiva. In tal caso, la durata del periodo di validità della tariffa fissa onnicomprensiva è ridotta del periodo cui è riferita la produzione incentivata che percepisce i certificati verdi.

I soggetti aventi diritto alla tariffa onnicomprensiva che non hanno fatto richiesta dei certificati verdi e che nelle more dell'entrata in vigore del Decreto del Ministro dello Sviluppo Economico del 18/12/2008, hanno chiesto il ritiro dell'energia ai sensi dell'art. 13, comma 3 del D.Lgs. 387/2003, hanno diritto alla tariffa fissa onnicomprensiva a partire dalla data di entrata in esercizio commerciale dell'impianto. A tal fine il GSE opera i conguagli sulla tariffa applicata.

8.5 RECS E GARANZIA D'ORIGINE DA FONTE RINNOVABILE

I certificati RECS (Renewable Energy Certificate System) sono titoli richiesti su base volontaria che attestano l'impiego delle fonti rinnovabili per la produzione di energia elettrica e rappresentano un beneficio per il produttore in quanto sono scambiabili, in ambito nazionale ed internazionale, separatamente dall'energia sottostante certificata. La Garanzia d'Origine (GO) è una certificazione, a carattere volontario, della produzione rinnovabile rilasciata su richiesta del produttore. La GO è stata introdotta in Italia dal Dlgs 387/03 "Attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità".

9. CONCLUSIONE

Questo capitolo conclusivo metterà in luce i dati ricavati durante questo lavoro, in termini di prestazioni ed emissioni ottenute tramite il confronto olio grezzo – gasolio; verrà inoltre posta l'attenzione su aspetti positivi e negativi che la scelta di utilizzare l'uno o l'altro combustibile produce.

I dati ricavati sono stati riassunti in Fig.1, in modo da rendere visibili immediatamente le differenze.

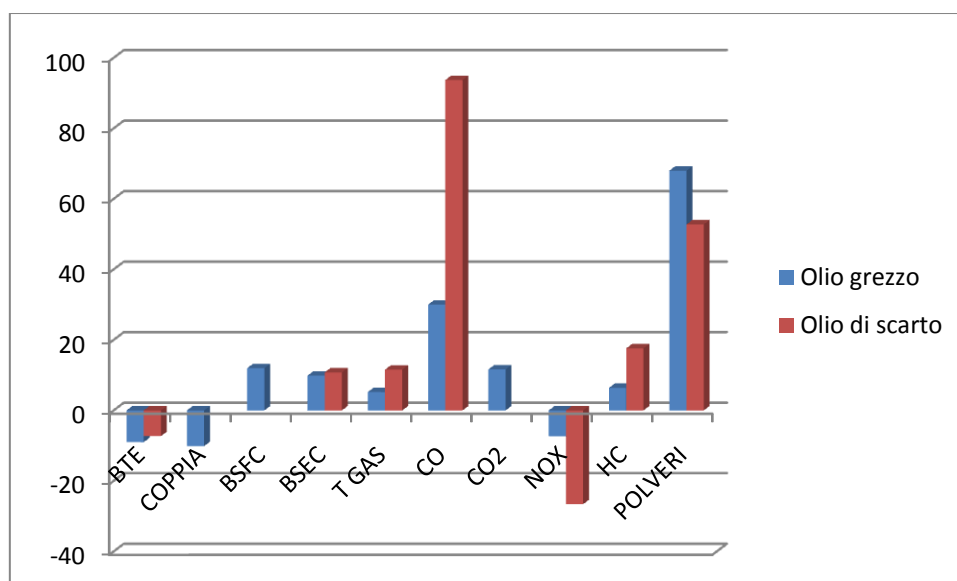


Fig.1 – Rappresentazione delle differenze rilevate per gli oli grezzi in ogni caratteristica considerata

Dal punto di vista prestazionale gli oli grezzi sono praticamente assimilabili al gasolio, in quanto le differenze non sono così marcate. Come si nota però essi pagano in termini di emissioni, che risultano sostanzialmente maggiori per alcuni parametri. A questo riguardo si ricorda ancora una volta come la mancanza di dati renda impossibile delineare un andamento per le emissioni non regolamentate, che invece sarebbe interessante approfondire vista la nocività di alcune di esse.

Nonostante ciò però gli oli grezzi sono comunque da preferire all'utilizzo del Gasolio per i motivi già elencati nel corso di questo lavoro:

- essendo una fonte di energia rinnovabile, possono costituire una valida alternativa per eliminare la dipendenza dal petrolio: essi possono essere prodotti nuovamente alla fine di ogni ciclo di raccolto;

- assorbono la stessa quantità di CO₂ che emettono durante la combustione: non incidono infatti sull'incremento dell'effetto serra;
- hanno un basso costo di produzione;
- sono soggetti ad incentivazione da parte dello Stato attraverso i certificati verdi (con coefficiente moltiplicativo di 1,8) o la tariffa omnicomprensiva (28 €cent/kWh).

Il problema maggiore che si è riscontrato nell'utilizzo degli oli grezzi nei motori è la loro elevata viscosità. Per far fronte a ciò in molti casi si è deciso di preriscaldare l'olio stesso prima di iniettarlo nella camera di combustione; in alcuni casi inoltre si instaura un sistema a due serbatoi, uno con il diesel e l'altro con l'olio, in modo che le fasi di accensione e spegnimento del motore avvenga tramite il combustibile fossile sostanzialmente per pulire gli iniettori dai depositi carboniosi rilasciati dal funzionamento tramite olio.

Alla fine di questo lavoro l'auspicio è che gli enti coinvolti (Stati, Università ed industrie) coltivino sempre un maggior interesse verso fonti di energia pulite, sottoforma di finanziamenti a ricerche ed applicazioni, per migliorarne ulteriormente le prestazioni e diminuirne le emissioni. Perché il nostro ambiente va salvaguardato, e non ci si può più premettere di aspettare oltre.

BIBLIOGRAFIA

1. G. Pahl, "Biodiesel: Coltivare una nuova energia".
2. K. S. Tyson, J. Bozell, R. Wallace, E. Peterson, and L. Moens, "Biomass oil analysis: research needs and recommendations", National Renewable Energy Laboratory, 2004.
3. www.elsbett.com/
4. www.rinnovabili.it/biomassa
5. M. Basinger, T. Reding, C. Williams, K.S. Lackner, V. Modi, "Compression ignition engine modifications for straight plant oil fueling in remote contexts: Modification design and short-run testing", 2010.
6. A. Abolle´, K. Loukou, P. Henri, "The density and cloud point of diesel oil mixtures with the straight vegetable oils (SVO): Palm, cabbage palm, cotton, groundnut, copra and sunflower", 2009.
7. M.S. Shehata, S.M. Abdel Razek, "Experimental investigation of diesel engine performance and emission characteristics using jojoba/diesel blend and sunflower oil", 2010.
8. K. Purushothaman, G. Nagarajan, "Experimental investigation on a C.I. engine using orange oil and orange oil with DEE", 2009.
9. A. K. Agarwal, K. Rajamanoharan, "Experimental investigations of performance and emissions of Karanja oil and its blends in a single cylinder agricultural diesel engine", 2009.
10. B. Prem Anand, C.G. Saravanan, C. Ananda Srinivasan, "Performance and exhaust emission of turpentine oil powered direct injection diesel engine", 2010.
11. B.S. Chauhan, N. Kumar, Y. D. Jun, K. B. Lee, "Performance and emission study of preheated Jatropha oil on medium capacity diesel engine, 2010.
12. D. Agarwal, A. K. Agarwal, "Performance and emissions characteristics of Jatropha oil (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine", 2007.
13. M. Canakci, A. N. Ozsezen, A. Turkcan, "Combustion analysis of preheated crude sunflower oil in an IDI diesel engine", 2009.
14. M. Mani, C. Subash, G. Nagarajan, "Performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine using waste plastic oil", 2009.

15. V. Edwin Geo, G. Nagarajan, B. Nagalingam, "Studies on improving the performance of rubber seed oil fuel for diesel engine with DEE port injection", 2010.
16. P.K. Devan, N.V. Mahalakshmi, "Performance, emission and combustion characteristics of poon oil and its diesel blends in a DI diesel engine", 2009.
17. A.K. Hossain, P.A. Davies, "Plant oils as fuels for compression ignition engines: A technical review and life-cycle analysis", 2010.
18. F. Jiménez Espadafor, M. Torres García, J. Becerra Villanueva, J. Moreno Gutiérrez, "The viability of pure vegetable oil as an alternative fuel for large ships", 2009.
19. Abollé, L. Kouakou, H. Planche, "The viscosity of diesel oil and mixtures with straight vegetable oils: Palm, cabbage palm, cotton, groundnut, copra and sunflower", 2009.
20. S.S. Sidibé, J. Blin, G. Vaitilingom, Y. Azoumah, "Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines state of the art: Literature review", 2010.
21. M. Pugazhivadivu, K. Jeyachandran, "Investigations on the performance and exhaust emissions of a diesel engine using preheated waste frying oil as fuel", 2005.
22. www.cti2000.it
23. <http://www.carlobertocchi.it/oliogenerale.htm>
24. <http://www.nonsoloaria.com/iqposaca.htm>
25. www.rinnovabili.it/biomassa
26. http://www.crami.it/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=9&Itemid=193
27. <http://www.tractorum.it/forum/249-post1.html>
28. <http://www.enerlive.it/sz/inf/oli.php>
29. "Gli incentivi alle energie rinnovabili e all'efficienza energetica"
30. <http://www.gse.it/attivita/Incentivazioni%20Fonti%20Rinnovabili/Pagine/default.aspx>
31. <http://www.gse.it/attivita/RECSego/Pagine/default.aspx>
32. <http://www.consulente-energia.com/incentivi-rinnovabili-come-tariffe-omnicomprensive-tariffa-omnicomprensiva-gse-2010-2011-2012.html>
33. <http://www.consulente-energia.com/incentivi-rinnovabili-come-richiedere-certificati-verdi-gse-cosa-sono-2010-2011-2012.html>

34. Prot. Ex SACO 5520 del 31/03/2010, Dipartimento delle politiche competitive del mondo rurale e delle qualità, Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali.
35. A. Fugaro, Terra e vita, n. 36/2009: "Biomasse e oli vegetali puri tracciati. È legge la tariffa di 0,28 cent/kWh".
36. A. Fugaro, Terra e vita, n. 14/2010: "Oli vegetali puri: tracciabilità ok".