

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI "FEDERICO II"**

FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
Dipartimento di Ingegneria Meccanica per l'Energetica

DOTTORATO DI RICERCA  
IN  
INGEGNERIA DEI SISTEMI MECCANICI  
(XIX CICLO)

**L'applicazione di Biocombustibili su moderni motori  
Diesel veloci Common Rail**

COORDINATORE DEL DOTTORATO:  
Ch.mo Prof. Ing. RAFFAELE TUCCILLO

CANDIDATO  
Ing. DARIO BUONO

TUTOR:  
Ch.mo Prof. Ing. SENATORE ADOLFO

## Tesi di Dottorato

### *L'applicazione di Biocombustibili su moderni motori Diesel veloci Common Rail*

## Indice

	<b>Pag.</b>	<b>I</b>
<b>Introduzione</b>		
<b>Cap. I - Il Biodiesel</b>	“	<b>1</b>
Introduzione	“	2
1.1 - Il Biodiesel	“	4
1.2 - La produzione	“	6
1.3 - Impianti per la produzione di Biodiesel		9
1.4 - I sottoprodotti della lavorazione dell'olio	“	12
1.5 - I produttori di Biodiesel	“	14
1.6 - Defiscalizzazione in Italia	“	19
<b>Cap. 2 - Le normative</b>	“	<b>27</b>
Introduzione	“	28
2.1 - Protocollo di Kyoto	“	32
2.1.1 - Obiettivi	“	34
2.2 - Principali riferimenti normativi e comunitari...	“	39
<b>Cap. 3 - Stato dell'arte</b>	“	<b>46</b>
Introduzione	“	47
3.1 - EPA	“	49
3.1.1 - Heavy Duty	“	49
3.1.2 - Analisi di diversi tipi di Biodiesel	“	51
3.1.3 - Confronto	“	52
3.1.4 - Light duty	“	53
3.2 - Emulsione	“	54
3.3 - Olio transesterificato di Palma e Colza	“	56
3.4 - Olio di Palma	“	59
3.5 - Olio di Girasole e LPG	“	61
3.6 - Rigenerazione filtro particolato	“	62
3.7 - Catalizzatore ossidante	“	65
3.8 - Considerazioni finali	“	69
<b>Cap. 4 - Background</b>	“	<b>71</b>
Introduzione	“	72
4.1 - Le prove: Motore iniezione meccanica	“	73
4.1.1 - Analisi delle prestazioni		73
4.1.2 - Analisi cicli indicati	“	76
4.1.3 - Le emissioni	“	79
4.1.4 - Il rilascio di calore	“	83
4.1.5 - Velocità di rilascio del calore netto	“	89

4.2 - Le prove: Motore iniezione elettronica	“	92
4.2.1 - Emissioni		92
4.2.2 - Prestazioni		93
4.2.3 - Cicli indicati e alzata spillo		94
4.2.4 - Rilascio		96
<b>Cap. 5 - Allestimento sala prova</b>	<b>“</b>	<b>98</b>
Introduzione	“	99
5.1 - Il motore in prova	“	100
5.1.1 - Descrizione del motore	“	100
5.1.2 - Il sistema di sovralimentazione	“	101
5.1.3 - Il sistema di iniezione MultiJet	“	103
5.1.4 - Il sistema di ricircolo dei gas di scarico EGR	“	107
5.1.5 - Il circuito di Blow-By	“	109
5.1.6 - Dispositivo allo scarico del motore	“	109
5.1.7 - Il pre-catalizzatore	“	109
5.1.8 - Curve di prestazione del motore	“	111
5.2 - La sala prova motori	“	114
5.2.1 - Descrizione della sensoristica...	“	117
5.2.2 - Descrizione della sala comando	“	137
5.2.3 - Altre apparecchiature fondamentali...	“	140
<b>Cap. 6 - Le prove sperimentali</b>	<b>“</b>	<b>142</b>
Introduzione	“	143
6.1 - Caratteristiche del Biodiesel	“	144
6.2 - Ottimizzazione della calibrazione	“	145
6.2.1 - Le prestazioni	“	145
6.2.2 - Le emissioni inquinanti	“	147
6.2.3 - Le emissioni inquinanti : Biodiesel puro	“	148
6.2.4 - Le emissioni inquinanti : Miscela Biodiesel - gasolio	“	152
6.2.5 - Analisi dei risultati	“	156
6.3 - Analisi della legge di rilascio del calore	“	157
6.3.1 - Le prove sperimentali	“	157
6.3.2 - Analisi dei parametri motoristici	“	183
6.3.3 - Analisi dell'EGR	“	184
6.3.4 - Analisi del timing dell'iniezione	“	186
<b>Conclusioni</b>	<b>“</b>	
<b>Bibliografia</b>	<b>“</b>	

## **Introduzione**

*Nell'ultimo decennio l'interesse nei confronti delle Biomasse, e nello specifico del Biodiesel, è molto cresciuto grazie anche agli obiettivi preposti dalla Commissione Europea sulle tematiche dell'approvvigionamento energetico che, come specificato nel Green Paper [1], indica una riduzione entro il 2020 del 20% dei combustibili ricavati a partire da fonti fossili.*

*I biocombustibili, il gas naturale e l'idrogeno sono stati considerati come possibili alternative.*

*Mentre l'uso su vasta scala del gas naturale [2] è strettamente legato ai punti di distribuzione sul territorio, i Biocombustibili e in particolare il Biodiesel rappresentano una soluzione immediatamente applicabile, come ad esempio in Brasile, dove da diversi anni, il metanolo derivato dalla Biomasse è largamente utilizzato come combustibile per autotrazione.*

*Il Biodiesel [4] [5] è un combustibile ossigenato prodotto a partire da olio vegetale, olio esausto o grasso animale mediante una reazione dell'estere con metanolo (transesterificazione) per formare un metil-estere.*

*L'uso del Biodiesel come sostituto ai combustibili di origine fossile, riduce il riscaldamento globale del Pianeta grazie alla riduzione delle emissioni di anidride carbonica, che viene utilizzata dalle piante (Girasole, Colza, Soia, etc.) per il processo di fotosintesi. Dopo che l'olio viene estratto dai semi delle piante, esso è trasformato in Biodiesel e quando viene bruciato produce anidride carbonica che viene rilasciata nell'atmosfera. Il ciclo di vita del Biodiesel indica che esso è rinnovabile e il suo uso, quindi, può comportare una sensibile riduzione del consumo di petrolio e delle emissioni di anidride carbonica.*

*Quando i combustibili fossili vengono bruciati, infatti, il 100% dell'anidride carbonica prodotta aumenta la sua concentrazione nell'atmosfera. L'energia fossile richiesta per produrre Biodiesel da olio di soia o girasole è solo una parte (circa il 32%) dell'energia contenuta in un litro di combustibile. Quindi, il riciclo dell'anidride carbonica riduce la sua immissione in atmosfera dal 100% al 78% quando il Biodiesel è utilizzato al posto del gasolio di origine petrolifera. Inoltre, il Biodiesel può essere usato in qualsiasi concentrazione con il gasolio nei moderni motori Diesel attualmente in circolazione, con qualche piccola modifica, e in alcuni casi, senza necessità di alcuna modifica al motore.*

*Il Biodiesel riduce anche le emissioni di particolato (PM), idrocarburi incombusti (HC) e monossido di carbonio (CO) e annulla completamente le emissioni di composti di zolfo. Essendo un combustibile ossigenato, la miscela aria/combustibile*

*brucia in maniera più completa rispetto al gasolio, permettendo minori emissioni di incombusti.*

*Molte prove sperimentali hanno dimostrato che, indipendentemente dal tipo di olio di origine, alimentando un motore Diesel con Biodiesel, le emissioni di HC, CO e PM si riducono.*

*Da diversi anni presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica per l'Energetica è in corso un'attività di studio [6] [7] [8] sul Biodiesel e sulla sua applicazione nei motori Diesel utilizzati per la trazione terrestre. Gli studi hanno confermato i dati noti in letteratura, infatti alimentando un motore Diesel con Biodiesel puro o in miscela con gasolio commerciale, le emissioni allo scarico di particolato, idrocarburi incombusti e ossido di carbonio diminuiscono rispetto al gasolio, mentre si verifica un modesto aumento degli ossidi di azoto e del consumo di combustibile e una leggera perdita di potenza.*

# Capitolo I

*Il biodiesel*

## **Introduzione**

*L'inquinamento ambientale[10] [11] è uno dei temi più delicati, ed a cui si pone e si porrà notevole attenzione. La causa dell'aumento continuo dell'inquinamento è principalmente il notevole progresso tecnologico che ha caratterizzato buona parte del secolo scorso e caratterizzerà i giorni futuri. La presente tesi si giustifica con le problematiche inerenti all'inquinamento atmosferico dovuto alle emissioni dei "gas serra" [12] [13], così chiamati poiché responsabili dell'effetto serra che è causa degli stravolgimenti climatici che stanno caratterizzando i nostri giorni.*

*A partire dal 1979 si è posto il problema della riduzione di tali gas fino ad allora non considerati inquinanti perché effettivamente non danneggiano direttamente la salute. È da notare, inoltre, che tali gas, per le applicazioni motoristiche, si identificano con l'anidride carbonica ed il vapore acqueo che sono, in pratica, indici dell'energia prelevata dal combustibile utilizzato, di conseguenza una riduzione di essi corrisponde ad un ridotto prelievo di energia. Tale effetto è solo in minima parte conseguito con l'aumento di efficienza dei motori, per cui per ridurre l'inquinamento risulta più efficace l'impiego di fonti di energia rinnovabili.*

*Il combustibile di origine vegetale comunemente indicato come “biodiesel”[14] risponde a tali esigenze: in pratica si prelevano dall’atmosfera i gas serra CO<sub>2</sub> ed H<sub>2</sub>O che alla stessa atmosfera saranno restituiti con la combustione secondo il meccanismo che è alla base dell’utilizzo di ogni biomassa. Le cronache riportano che il primo a concepire l’idea di adoperare oli vegetali come combustibili per motori ad accensione per compressione fu Rudolf Diesel il quale all’Esposizione Internazionale di Parigi del 1900, faceva funzionare un suo motore con olio di arachide.*

*Gli oli vegetali sono stati usati nei motori diesel durante tutta la prima parte del novecento.*

*Le ricerche sui combustibili di origine vegetale ebbero un notevole impulso durante la seconda guerra mondiale a causa delle carenze di combustibili; la seguente pace e disponibilità di combustibili fossili a bassissimo prezzo fermarono ogni ricerca in campo di fonti alternative. Solo dopo la crisi energetica del 1973 e dopo un aumento dei prezzi del petrolio si è avuto un nuovo interesse per gli oli vegetali come pure per tutte le altre fonti di energia alternative.*

*Al giorno d’oggi molto si sta facendo per aumentare la diffusione del Biodiesel e per incentivarne l’uso.*

## 1.1 IL BIODIESEL

I biocombustibili sono sostanze che derivano dalla lavorazione di alcune piante o semi particolari [15] e si dividono principalmente in due tipi:

1- Oleosi da cui si ricava in prima battuta olio vegetale che può essere sottoposto alla tecnica della transesterificazione per diventare ancora più fluido e creare il Biodiesel, utilizzato nei motori a ciclo Diesel.

2- Alcoli che derivano dalla fermentazione di prodotti agricoli ricchi di zuccheri per la creazione del bioetanolo e che possono essere utilizzati nei motori a ciclo Otto.

Il bioetanolo è un alcool (etanolo o alcool etilico) ottenuto mediante un processo di fermentazione di diversi prodotti agricoli ricchi di carboidrati e zuccheri quali i cereali (mais, sorgo, frumento, orzo), le colture zuccherine (bietola e canna da zucchero), frutta, patata e vinacce.

Il Biodiesel è un prodotto naturale utilizzabile come carburante in autotrazione e come combustibile nel riscaldamento, con le caratteristiche indicate rispettivamente nelle norme UNI 10946 ed UNI 10947.

- è rinnovabile, in quanto ottenuto dalla coltivazione di piante oleaginose di ampia diffusione;
- è biodegradabile, cioè se disperso si dissolve nell'arco di pochi giorni, mentre gli scarti dei consueti carburanti permangono molto a lungo;
- garantisce un rendimento energetico pari a quello dei carburanti e dei combustibili minerali ed un'ottima affidabilità nelle prestazioni dei veicoli e degli impianti di riscaldamento.

Si ottiene dalla spremitura di semi oleaginosi di colza, soia, girasole e dalla reazione di transesterificazione che determina la sostituzione dei componenti alcolici d'origine ( glicerolo ) con alcool metilico ( metanolo )

Può essere anche ottenuto da olii vegetali usati, il cui recupero è stato disciplinato dal DLgs 5 febbraio 1997, n° 22. Questo consente di sottrarre definitivamente gli olii vegetali usati dal circuito dell'alimentazione zootecnica o da utilizzi ancora più pericolosi per la salute umana.

La sua produzione è del tutto ecologica, poiché non presuppone la generazione di residui, o scarti di lavorazione.

La reazione di transesterificazione prevede la generazione di glicerina quale "sottoprodotto" nobile dall'elevato valore aggiunto, della quale sono noti oltre 800 diversi

utilizzi.

In confronto con il gasolio, il Biodiesel determina numerosi effetti positivi per l'ambiente:

- non contribuisce all'« effetto serra» poiché restituisce all'aria solo la quantità di anidride carbonica utilizzata da colza, soia e girasole durante la loro crescita;
- riduce le emissioni di monossido di carbonio (- 35%) e di idrocarburi incombusti (- 20%) emessi nell'atmosfera;
- non contenendo zolfo, il Biodiesel non produce una sostanza altamente inquinante come il biossido di zolfo e consente maggiore efficienza alle marmitte catalitiche;
- diminuisce, rispetto al gasolio, la fumosità dei gas di scarico emessi dai motori diesel e dagli impianti di riscaldamento (- 70%);
- non contiene sostanze pericolosissime per la salute quali gli idrocarburi aromatici (benzene, toluene ed omologhi) o policiclici aromatici;
- giova al motore grazie ad un superiore potere detergente che previene le incrostazioni;
- non presenta pericoli, come l'autocombustione, durante la fase di trasporto e di stoccaggio;
- la sua diffusione determina l'attivazione di un circuito che promuove lo sviluppo di produzioni agricole non destinate alla alimentazione (non food), quindi non generatrici di eccedenze.

In uno dei più completi studi sulle fonti energetiche, realizzato da Sheehan e colleghi (1998) sono emersi molti aspetti vantaggiosi nella valutazione del Biodiesel come valida fonte di energia rinnovabile:

- Il bilancio energetico nel life- cycle è di soli 0.31 unità di energia fossile per produrre 1 unità di Biodiesel.
- Le emissioni di CO<sub>2</sub> nel suo ciclo di vita sono particolarmente basse ( una riduzione del 78% rispetto al gasolio fossile), suggerendone un utilizzo urbano.
- Le emissioni di particolato risultano essere complessivamente il 32% di quelle del gasolio (il particolato sotto ai 10 µm -altamente nocivo- inferiore del 68%).
- Il monossido di carbonio CO è il 35% rispetto al gasolio.
- Gli ossidi di zolfo SO<sub>x</sub> non superano mai l'8% rispetto al gasolio.
- La quasi totale assenza di zolfo e le sue proprietà chimico- fisiche suggeriscono l'impiego del Biodiesel come additivo al gasolio fino a specifiche ULS (Ultra Low Sulfur).

## 1.2 LA PRODUZIONE

L'intero ciclo produttivo si svolge in quattro fasi [16].

1. Coltivazione delle piante oleaginose
2. Estrazione dell'olio grezzo dai semi di tali piante
3. Raffinazione dell'olio grezzo
4. Transesterificazione dell'olio raffinato.

La prima fase riguarda tutte le operazioni di coltura in campo, dalle lavorazioni preliminari alla raccolta dei semi, che sono poi trasportati agli stabilimenti di lavorazione, dove, in contemporanea allo stoccaggio, si favorisce un'operazione di essiccazione in ambienti con aria deumidificata e riciclata mediante appositi impianti di condizionamento. Quest'ultima operazione è necessaria il più delle volte, ma non sempre; il contenuto di umidità dei semi, infatti, risulta variabile a seconda delle condizioni climatiche relative al momento della raccolta. Tale valore risulta generalmente ben superiore al 10% (può arrivare fino al 20%), e l'essiccazione ha proprio l'obiettivo di riportare detta percentuale al di sotto di questa soglia, in modo da raggiungere le condizioni ottimali per le fasi di lavorazione successive. A questo punto, prima della fase di estrazione dell'olio, i semi essiccati sono sottoposti ad una serie di lavorazioni. Esse sono:

- pulizia e depurazione: eliminazione di impurità di vario genere (principalmente sostanze organiche ma anche inorganiche), per migliorare la qualità del prodotto finale
- decorticazione o sgusciatura: estrazione del seme dal suo involucro, per ottenere un aumento dell'efficienza di estrazione dell'olio grezzo
- macinazione o laminazione: schiacciatura del seme, senza però arrivare alla sua polverizzazione, per aumentarne la superficie d'estrazione
- condizionamento: i semi vengono trattati in ambiente climaticamente controllato (90°C e 8% di umidità), per impedire grosse trasformazioni chimico fisiche e diminuire la viscosità dell'olio contenuto nei semi stessi

Così trattati i semi sono finalmente pronti per il procedimento di estrazione da cui si otterrà l'olio grezzo ed un sottoprodotto detto pannello proteico; una farina destinata ad uso mangimistico. La fase di estrazione può avvenire secondo una delle seguenti modalità:

- pressatura meccanica: operazione più idonea per i semi di girasole ai quali si riducono le percentuali d'olio dal 50% all'8%. I valori di pressione raggiungono i 1000-1500 bar
- trattamento chimico con solvente: è una soluzione più indicata per produzioni su larga scala e per semi con basso tenore d'olio (come la soia). Sfrutta la solubilità dei grassi in alcune sostanze a struttura non polare, di buona selettività nei confronti dei trigliceridi e prive di residui tossici
- pressatura e trattamento con solvente: è una soluzione che prevede una parziale estrazione dell'olio tramite pressatura meccanica, con cui si ottiene un pannello proteico al 15% di olio, che viene in seguito sottoposto ad una fase di estrazione mediante un solvente. Questa tecnica di estrazione, che è oggi la più utilizzata, mostra tuttavia alcuni inconvenienti: l'olio così ricavato non può essere subito utilizzato in quanto contiene una certa quantità di acidi grassi liberi (fino al 3%) e di trigliceridi (fino al 96%) e altre sostanze che potrebbero danneggiare i macchinari. In virtù di ciò, si rende indispensabile un'ulteriore fase dedicata alla separazione di tali sostanze non gradite.

Quindi, l'olio fino ad ora ottenuto sarà oggetto di un processo di raffinazione che consiste nei seguenti passi:

- chiarificazione o defangatura: consiste nell'allontanamento di sostanze estranee mediante l'impiego di un estrattore centrifugo
- degommaggio: si basa sull'idratazione con acqua o soluzioni di elettroliti, e consiste nell'eliminazione di tutte le sostanze organiche estranee ai trigliceridi e agli acidi grassi
- neutralizzazione: si tratta di un'eliminazione degli acidi grassi allo stato libero, che si formano dalla scissione dei trigliceridi per particolari fenomeni di fermentazione enzimatica.

Dopo la raffinazione, per ottenere un olio combustibile di qualità ancora superiore, si continua con la transesterificazione dell'olio raffinato, cioè una vera e propria conversione dei trigliceridi o esteri di acidi grassi, in esteri etilici o, più frequentemente, esteri metilici.

Il procedimento di transesterificazione consiste nel far confluire l'olio vegetale e metanolo ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) in un apposito reattore di acciaio inossidabile. La cinetica della

reazione, che di seguito si riporta, viene accelerata mediante l'utilizzo di un catalizzatore, il metilato sodico, ed un sufficiente apporto di energia termica. La reazione globale avviene attraverso una sequenza di tre stadi successivi, che sono i seguenti:

- TG(Trigliceride) + CHOH + catalizz. => DG(Digliceride) + ME(Metilestere)
- DG(Digliceride) + CH<sub>3</sub>OH + catalizz. => MG(Monogliceride) + ME(Metilest)
- MG(Monogliceride) + CH<sub>3</sub>OH + catalizz. => GLICERINA + ME(Metilestere)

La reazione globale, riportando la formula chimica dei reagenti, è:

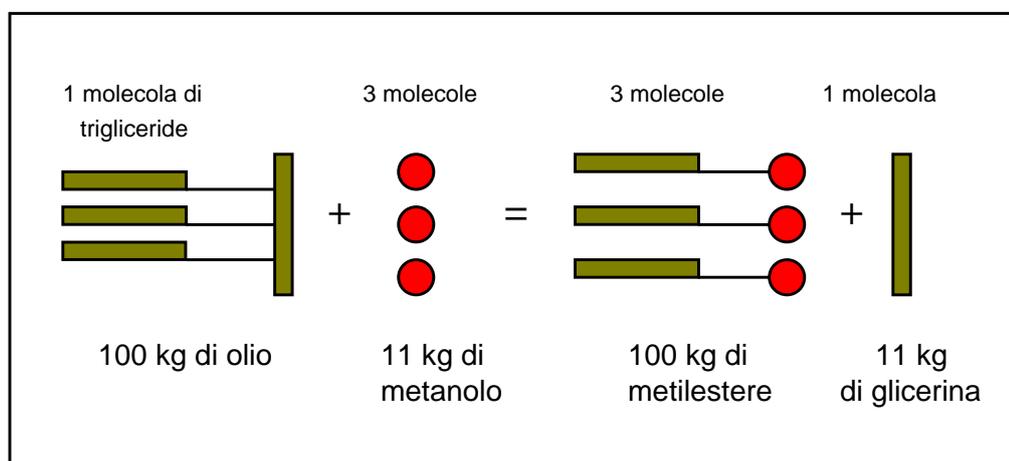
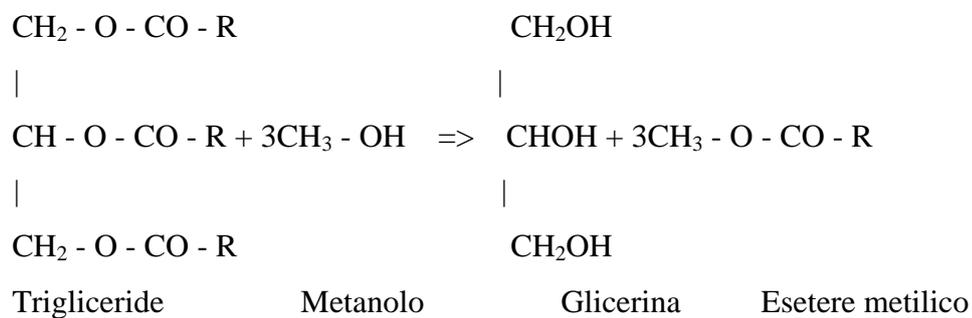


Figura 1.1 Transesterificazione

In questa prima fase il processo è discontinuo, perché, dopo circa quattro ore, la reazione viene fatta arrestare e vengono riversati i prodotti della reazione fin a quel punto ottenuti dal reattore in cui si trovano, in un altro reattore, in cui però non vi è il catalizzatore. I prodotti della reazione (estere metilico, glicerina e metanolo in eccesso) vengono immessi in un distillatore mantenuto sottovuoto. Qui si realizza la separazione di una fase liquida, costituita da una miscela di estere metilico e glicerina, da una aeriforme

costituita da metanolo. Per la successiva separazione delle sostanze componenti la fase liquida, si utilizza un separatore centrifugo, che opera sfruttando il loro differente posizionamento, a causa di una diversa densità. Il metanolo allo stato aeriforme non viene buttato, ma, per poter essere riutilizzato, dovrà condensare, e ciò avviene mediante un passaggio attraverso una serie di condensatori raffreddati da fluidi a temperature gradualmente più basse in modo che un'aliquota sempre maggiore condensi e venga recuperata. Il residuo di metanolo allo stato aeriforme che fuoriesce è poi inviato in una torre a pressione atmosferica, dove viene investito da una pioggia di olio vegetale a sua volta raccolto e rimesso in circolo, in maniera da ridurre al minimo le perdite di metanolo nell'atmosfera. Il biodiesel così ottenuto è pronto per l'utilizzo.

Non va dimenticato che, con il processo appena descritto, si ottengono anche degli interessanti sottoprodotti, che rendono economicamente meno gravoso l'intero ciclo di lavorazione. Nella fase di estrazione dell'olio si ottiene una farina (panello proteico) che viene utilizzata per la produzione di mangimi in quantità pari al 125% in peso rispetto al biodiesel prodotto.

Altro sottoprodotto di un certo interesse è la glicerina pari invece al 10% in peso della produzione di metilestere, che può essere utilizzata, grezza, per svariati scopi: come anticongelante, come plastificante (mastice, stucchi), come lubrificante nelle macchine frigorifere, nei freni idraulici di macchine o apparecchi simili, come materia prima per la produzione di intermedi chimici ad alto valore aggiunto. Distillando inoltre la glicerina grezza, si ottiene quella raffinata, che può essere utilizzata nell'industria farmaceutica o cosmetica.

### 1.3 IMPIANTI PER LA PRODUZIONE DI BIODIESEL

A seconda della tipologia dell'impianto e in particolare a seconda della grandezza, è possibile distinguere diverse tipologie di processo [17] [18], che sono:

**A - Processo a medio-alta temperatura:** utilizzato per grandi impianti. Prevede:

1. un pre-trattamento di raffinazione dell'olio: per migliorare le rese e aumentare l'efficienza del processo seguente è opportuno eliminare le lecitine ed eventuali acidi grassi liberi ed ottenere una materia prima con caratteristiche costanti;
2. la miscelazione dell'alcool con il catalizzatore (quasi sempre KOH) in ambiente controllato e sicuro in quanto la reazione libera una notevole quantità di energia;

3. la miscelazione dell'olio con il mix alcool/catalizzatore. Normalmente si opera con il doppio (1:6) del rapporto stechiometrico che vuole, per ogni mole di olio, tre moli di alcol (1:3). L'utilizzazione di metanolo richiede di adottare, come previsto dalla legislazione, opportuni accorgimenti di sicurezza che incidono sensibilmente sui costi. Tale operazione può avvenire in continuo (richiede alti costi, grossi impianti - >20-25.000 t/anno, tecnologie di punta) oppure in batch (discontinuo) utilizzando agitatori. La miscela viene fatta reagire a 70 °C per un'ora. L'ambiente di reazione è corrosivo, per cui tutta l'impiantistica deve essere realizzata in acciaio inossidabile e in materiale plastico;
4. la purificazione del metilestere per eliminare le tracce della fase idrofila (glicerolo, eccesso di metanolo, catalizzatore). Normalmente si eseguono semplici lavaggi con acqua del prodotto che successivamente viene fatto decantare o viene centrifugato.
5. il recupero dell'alcool in eccesso per mezzo di un procedimento di evaporazione sottovuoto (stripping) e la sua reimmissione nel ciclo. Tale operazione si esegue sia sul prodotto (metilestere) che sulla fase acquosa contenente glicerolo.
6. la raffinazione della glicerina ottenuta in funzione dei differenti utilizzi.

**B - Processo a temperatura ambiente:** utilizzato per piccoli impianti (1000-3000 t/anno). Richiede poca energia e, quindi, è relativamente economico; può essere utilizzato per esterificare oli grezzi o oli esausti di frittura, ma in tal caso si devono dosare i reagenti (soprattutto il catalizzatore) in funzione della composizione, molto variabile, della materia prima e si deve usare l'accortezza di non miscelare stock differenti. Il processo prevede:

1. l'analisi dello stock da trattare per poter individuare le giuste quantità di reagenti;
2. la miscelazione dell'alcool con il catalizzatore (normalmente idrossido di potassio) in ambiente controllato. Poiché il catalizzatore alcalino reagisce con gli acidi della miscela e crea dei saponi si osserva un certo consumo di tale reagente.
3. la miscelazione dell'olio con il mix alcool/catalizzatore in un primo tank (Batch 1). Normalmente si opera con il doppio (1:6) del rapporto stechiometrico che vuole, per ogni mole di olio, tre moli di alcol (1:3). Tale miscela viene reagire e fatta decantare e successivamente la frazione idrofila viene allontanata dal fondo del tank. L'intero processo dura 8 ore circa a 20 °C;
4. il travaso della fase idrofobica contenente il metilestere in un altro tank (Batch 2) nel quale si ripete il processo di miscelazione con l'alcool e il catalizzatore al fine di raggiungere un buon livello qualitativo del prodotto finale. I processi più semplici

riducono al minimo, sino a quasi annullarlo, l'impiego di acqua (che implica sempre problemi di smaltimento) per il lavaggio del prodotto.

5. la neutralizzazione del catalizzatore con acido fosforico con conseguente produzione di fosfato di potassio (utilizzabile come fertilizzante)
6. il recupero dell'alcool in eccesso per mezzo di un procedimento di evaporazione sottovuoto (stripping) e la sua reimmissione nel ciclo.

**C - Processo continuo ad alta temperatura e pressione.** Come accennato il processo di esterificazione è normalmente discontinuo, ma per impianti con elevata capacità si può utilizzare un processo in continuo caratterizzato da elevate pressioni e temperature di reazione, dall'uso di catalizzatore acido e quindi dalla possibilità di utilizzare oli con acidità fino al 4%; altro vantaggio è la produzione di glicerina che non richiede successiva raffinazione. Il processo continuo prevede:

1. la riduzione del contenuto di fosforo fino a 25-50 ppm;
2. la miscelazione dell'olio con metanolo (purezza del 99,5 %) in quantità pari al 13,5 % dell'olio trattato e con il catalizzatore in quantità pari allo 0,15%;
3. il riscaldamento a 200 °C e la pressurizzazione a 5 MPa della miscela in un reattore;
4. il recupero del metanolo in eccesso per evaporazione e stripping;
5. la decantazione della miscela per separare l'estere dalla fase acquosa;
6. il lavaggio della miscela con acqua;
7. l'asciugatura dell'estere;
8. la distillazione del composto per ottenere una purezza del 99 % in metilestere. I mono-, di- e tri-gliceridi residui vengono reimmessi nel processo
9. la distillazione di tutte le frazioni per recuperare il metanolo che viene reimpresso nel processo (purezza di 98,5%)
10. la concentrazione della glicerina per usi industriali (82-88%) o per usi farmaceutici (99%)

Comune a tutti i processi è il controllo della qualità ed l'eventuale aggiunta di additivi (gli stessi utilizzati per il gasolio). In genere, vengono verificati: contenuto in esteri e glicerina; flash-point (affetto dal metanolo residuo); contenuto di catalizzatore o di acido utilizzato per l'arresto della reazione. Se la qualità non è soddisfacente, il prodotto viene rinviato a monte dell'impianto.

Per avere un'idea sugli attuali orientamenti qualitativi, si possono consultare le tabelle con le caratteristiche commerciali degli esteri di olio vegetale.

La soluzione acquosa, sottoprodotto principale del processo, può essere trattata per ottenere glicerina a diversi gradi di purezza. A tale fine, deve essere neutralizzata, centrifugata e separata nei suoi componenti.

#### 1.4 SOTTOPRODOTTI DELLA LAVORAZIONE DELL'OLIO

I co-prodotti della lavorazione dei semi oleosi sono [19]:

-**Gusci e tegumenti** costituiscono il primo sottoprodotto della lavorazione dei semi oleosi. E' noto che soia e colza hanno un tegumento che rappresenta il 10-15% del seme, mentre il guscio del seme di girasole varia dal 20 al 50%.

Dato che i gusci e i tegumenti sono costituiti soprattutto da materiali cellulosici e ligninici essi si prestano a parecchie utilizzazioni: preparazione di pellettati da incorporare nei mangimi per ruminanti e conigli, preparazione di pannelli e pressati per imballaggi, ottenimento di biomasse microbiche previa idrolisi acida o enzimatica della cellulosa, produzione di furfurolo per distillazione in ambiente acido, produzione di energia a mezzo di processi fisico-chimici e microbiologici.

-**Panella**, formato dai residui del seme dopo la spremitura meccanica. Ha un contenuto di sostanza grassa superiore all'8%, arriva anche al 10-15%; esso contiene inoltre acidi grassi, alcune vitamine liposolubili ed elevato valore energetico.

Presenta lo svantaggio della difficile conservazione dovuta alla potenziale formazione di perossidi (irrancidimento);

-**Farina di estrazione**, residuo dei trattamenti chimici di estrazione. Ha un contenuto in materia grassa molto basso (1-2%), dovuto al processo di estrazione, molto più efficiente di quello meccanico. Non è un alimento completo ma ha il vantaggio di conservarsi bene.

Per quanto riguarda la farina di colza è necessario coltivare varietà 00 (senza glucosinolati). La CEE e l'Italia in particolare, importa gran parte delle farine di estrazione di colza e girasole impiegate per i mangimi.

Entrambi vengono impiegati come alimenti zootecnici: se interessa solamente il contenuto proteico, la scelta va alla farina di estrazione; si preferisce il panella, invece, se ai protidi si desidera associare un elevato valore energetico.

Il contenuto di sostanza grassa influenza ovviamente il valore calorico del sottoprodotto che di conseguenza deve essere impiegato in quantità differenti. Il panella

infatti ha un valore calorico superiore del 7-15% rispetto alle farine che sono caratterizzate dal basso apporto di acidi grassi nella dieta dell'animale.

L'utilizzo per l'alimentazione bovina di sottoprodotti provenienti da differenti lavorazioni o da diverse specie vegetali può influenzare le caratteristiche del latte e dei derivati in quanto cambiano le caratteristiche del grasso; ad esempio il burro si presenta molto molle se si utilizzano derivati del girasole, normale invece con i derivati del cotone, secco e duro utilizzando derivati del cocco.

Si parla, poi, di panelli e/o farine **decorticati** (o non), a seconda che si sia ricorso o meno alla decorticatura (processo meccanico che elimina il pericarpo del seme, componente ricco di cellulosa e scarso di materia grassa).

Sulla classificazione del pannello influisce anche il metodo meccanico di spremitura: con le presse a vite si producono "expellers" (scaglie di colore bruno con contenuto di olio del 5-12%); con le presse a cilindri, invece, "schilfers".

#### **Expeller e farina di colza**

Presentano differenze qualitative legate a vari fattori di natura colturale e stagionale, nonché al sistema di estrazione dell'olio. Un buon prodotto deve essere caratterizzato da odore non sgradevole e colore giallo verdognolo.

Expeller e farina di colza si inseriscono fra i prodotti di medio tenore proteico: ciò ne favorisce un largo impiego nella preparazione di mangimi concentrati. Le variazioni nel tenore proteico (dal 30 al 40%) e quelle ancor più rilevanti nel contenuto di fibra (dal 7 a oltre 20%), tuttavia, non ne facilitano un normale inserimento nelle miscele di concentrati. Il prodotto non è talvolta gradito al bestiame se viene somministrato con acqua: odore agliaceo e sapore amarognolo lo rendono talvolta male accetto, a meno che non venga somministrato con alimenti molto appetibili, come melasso, fettucce integrali di bietola e simili. Questi problemi, tuttavia, sono superati con le varietà più recenti e, comunque, si presentano solo quando il mangime viene somministrato in percentuali rilevanti nella razione. A titolo indicativo, incidenze normali sono le seguenti: bovini, 10-12%; suini, 10-15%; broilers, 15%; ovaiole, 5%.

#### **Expeller e farina di girasole**

A differenza del colza, il seme del girasole è contenuto all'interno di un frutto (achenio) che è formato esternamente dal pericarpo. Quest'ultimo è composto prevalentemente da sostanze ligno-cellulosiche e rappresenta dal 20 al 50% circa del peso del frutto intero. Di conseguenza, la ricchezza in principi nutritivi del pannello (expeller o farina) di girasole, dipende strettamente dall'intensità del processo di decorticazione a cui

può essere sottoposto il seme. Un tenore di cellulosa grezza molto elevato rende il prodotto non adatto per la preparazione di mangimi concentrati, in quanto deprime il valore nutritivo e la digeribilità della miscela. Il gradimento da parte del bestiame è buono sia per l'expeller che per la farina. I co-prodotti del girasole, quindi, entrano correntemente nella composizione dei mangimi concentrati per bovini, suini e pollame.

	Semi di cotone	Semi di soia	Farina di girasole	Farina di soia	Pannello di cotone	Pannello di lino	Pannello di soia
S.S.	90,00	90,00	90,00	89,00	90,00	90,50	90,00
L.G.	18,20	21,30	2,68	1,60	6,00	8,80	5,50
C.	5,80	5,90	7,00	5,50	6,50	7,50	6,50
A.p.	0,90	4,14	2,30	1,80	0,50	3,00	8,00
P.G.	22,10	41,10	36,00	49,9,	41,20	35,00	48,00
F.G.	27,70	7,40	25,00	5,50	16,50	11,40	7,00
E.I.	26,20	24,30	29,32	37,50	29,80	37,30	33,00

(Fonte Ass. Mantovana Allevatori)

S.S.- Sostanza secca  
 L.G.- Lipidi grezzi  
 A.p. - Amido polarimetrico  
 C. - Ceneri  
 P.G. - Proteina grezza  
 E.I. - Estrattivi inazotati  
 F.G. - Fibra grezza

Tabella.1.1 Analisi chimica di alcuni semi e sottoprodotti dell'estrazione dell'olio

## 1.5 I PRODUTTORI DI BIODIESEL

La produzione italiana di biodiesel, ottenuto interamente da oli vegetali di colza (80%) e girasole (20%), è iniziata nei primi anni novanta. Il Biodiesel è venduto in regime di defiscalizzazione [20] [21] [22] in contingenti che vengono fissati di anno in anno dalla Agenzie delle Dogane, la quale fissa anche le ditte che, a seguito di una gara, possono produrre in regime di defiscalizzazione.

La ditta o azienda per essere ammessa alla gara deve avere un suo stabilimento produttivo e deve essere dotata della licenza fiscale per la produzione di Biodiesel, che

viene rilasciata da parte degli uffici dell'Agenzia delle Dogane, territorialmente competenti.

Per il 2006 le aziende a cui è stato assegnato un contingente defiscalizzato sono 15, che si dividono un totale di 180.000 tonnellate.

Il quadro italiano delle aziende di Biodiesel in Italia non è molto chiaro, in quanto molte aziende, riconosciute come produttrici, in realtà hanno impianti non funzionanti o non ne sono dotate affatto. In molti casi alcune aziende non sono rintracciabili e non hanno siti internet attivi o consultabili. Non è scopo del presente lavoro analizzare questo fenomeno, ma verrà comunque descritto un quadro sulla produzione di biodiesel in Italia, descrivendo gli impianti di cui è stato possibile ricavare informazioni.

Si precisa che al 2006, le aziende italiane riconosciute come produttori dalla ASSOBIODIESEL sono:

- Comlube
- DP Lubrificanti
- Fox Petroli
- GDR Biocarburanti
- Ital bi-oil
- Mythen
- Novaol
- Oil.b
- Redoil

Di seguito vengono riportate tutti dati che è stato possibile trovare sugli impianti produttivi italiani:

La **Comlube S.r.l.** nel '92 ha realizzato un impianto chimico nell'ambito della politica energetica della Comunità Europea, avviando la produzione di biodiesel con la denominazione commerciale di SolarDiesel<sup>®</sup>, quale combustibile ecologico da biomassa a basso impatto ambientale, da impiegarsi nei motori ed in caldaia in alternativa al gasolio minerale.

SolarDiesel<sup>®</sup> è il Biodiesel già utilizzato nei motori di autovetture, autobus, trattori, autocarri ed impianti di riscaldamento, finora alimentati a combustibile minerale, senza che questi accusino perdite di potenza nelle prestazioni, e senza laboriose modifiche tecniche per il loro impiego.



Figura. 1.2 WOLKSWAGEN Golf III tdi-R. Autovettura alimentata a SOLARDIESEL, il biodiesel, classificatasi al terzo posto assoluto in classifica generale al Campionato European Superdiesel Challenge.

La **Fox Petroli**, la cui origine risale al 1924, ha sempre adeguato risorse e strutture agli eventi e alle sfide che in tempi diversi sono apparsi nel suo cammino, affrontandoli con il massimo impegno e serietà.

In questa azione di progresso e innovazione, Fox Petroli si è sempre distinta per la pluralità delle proprie attività di trasporto, stoccaggio, lavorazione e commercializzazione di prodotti petroliferi, combustibili ecologici e relativi sottoprodotti.

Ha due stabilimenti, uno a Pesaro ed uno a Vasto,  
In collaborazione con la ditta Mariani Petroli produce Biodiesel denominato **BIOFOX**



Figura 1.3 Logo del Biofox

La **Ital Bi-Oil** s.r.l. opera nel settore degli olii vegetali non alimentari. La società con sede amministrativa e stabilimento in Monopoli (BA) con capacità produttiva di 120.000 t/anno. La Ital Bi-Oil srl ha in funzione l'unico impianto di produzione esistente al sud dell'Italia, ponendosi sul mercato come unico fornitore per i consumatori di Puglia, Basilicata, Campania, Calabria e Sicilia.

Produce un combustibile di nome ITALBIODIESEL



Figura 1.3 Logo dell' Ital Bio Diesel

Il Biodiesel , messo a punto grazie alle competenze specifiche della chimica e dell'agroindustria, è un carburante/combustibile derivato da olio di colza, girasole e soia utilizzabile senza necessità di apportare modifiche sostanziali agli impianti termici ed ai motori Diesel abitualmente funzionanti a gasolio.

La **Mythen** , nata nel 2002, è stata creata per realizzare un progetto di industria chimica "pulita" non solo rispettosa dell'ambiente ma anche in grado di contribuire a ridurre le problematiche ambientali di altre industrie.

Gli impianti produttivi si trovano a Ferrandina (MT), nella Valle del Basento.

Il biodiesel è un biocombustibile, denominato "**mitoil**" è un carburante biodegradabile prodotto da oli vegetali attraverso una reazione di transesterificazione, nella quale gli oli vegetali reagiscono con alcool metilico.

L'impianto di Mythen ha una capacità produttiva di 200.000 tonnellate / anno.

La **Novaol**, leader nel trattamento di semi oleosi e nella produzione e vendita di olii alimentari ed altri ingredienti per alimenti, è una realtà di riferimento nella produzione di biodiesel.



Figura 1.5 Logo della Novaol

La **Oil.bi.** è una società industriale che ha iniziato la sua attività nell'ottobre 2004. Ha come obiettivo la produzione di Biodiesel.

La capacità produttiva del proprio impianto è di 200.000 tonnellate/anno.

Nel 2005 le vendite sono state di 83.500 tonnellate con un fatturato di 52.700.000 €



Figura 1.6 Logo del Oli.bi

La **Redoil Bio** fa parte del gruppo **REDOIL** e si occupa della produzione di Biodiesel.



Figura 1.7 Logo del RedoilBio

Le attività dello stabilimento REDOIL BIO possono essere schematizzate in:

- produzione di biodiesel (prodotto primario) con grado di purezza del 99.98 % per una capacità massima pari a 70000 t/anno;
- produzione di glicerina grezza o glicerolo (by-product) per una capacità massima pari a 15000 t/anno.

Il Bio-Re®, nome commerciale del biodiesel, prodotto dalla REDOIL BIO, ha praticamente le stesse caratteristiche chimico fisiche del gasolio di cui è un sostituto ottimale e somma, ai vantaggi prestazionali, quelli ambientali.

Oltre al biodiesel, lo stabilimento produce anche glicerina grezza, che ricopre una nicchia di mercato legato al settore farmaceutico e a quello dei detergenti.

La **Bakelite** con impianto di produzione a Solbiate Olona (Va) della Bakelite Italia produce biodiesel e ad esso è stata assegnata una quota produttiva di 15.500 tonnellate fino a giugno 2001.

La **Estereco** di Umbertide, di cui Vincenti è fondatore e animatore, per dimostrare che quello del biodiesel non è solo un bel progetto sperimentale, ha deciso di fornire carburante alla Volkswagen Motor Sport Italia per la Golf TDI e la Bora TDI, le due vetture della casa tedesca che corrono nell'European Superdiesel Challenge.

## 1.6 DEFISCALIZZAZIONE IN ITALIA

Da quanto si apprende dal Documento emanato dalla Agenzia delle Dogane il 13 Febbraio 2006, il contingente di Biodiesel agevolato per l'anno 2006, è fissato a 180.000 tonnellate.

Le aziende a cui è stata accettata l'istanza sono indicate nella tabella seguente, in viene riportato anche la percentuale di contingente assegnato

Si sottolinea che le istanze presentate dalle ditte GDR BIOCARBURANTI e RED OIL ITALIA non sono state accolte, in quanto al momento della stesura del citato documento, non sono produttrici di Biodiesel e non sono in possesso della licenza fiscale per produzione di Biodiesel rilasciata da parte degli Uffici dell'Agenzia delle Dogane, territorialmente componenti.

<b>Ditta richiedente</b> Sito impianto	Cancelli di ingresso Soggetti autorizzati	<b>Quantitativi</b> <b>assegnati per</b> <b>l'annualità</b> <b>2006</b> tonnellate
<b>BioDiesel Bokel</b> -Bokel - Germania	Deposito Oil B di Salbiate Olona (VA)	66
<b>Biodiesel Karnten GmbH</b> Arnoldsteinustria	San Marco Petroli – Porto Marghera (VE)	3.897
<b>Bionor Transformacion S.A.</b> - Berantevilla - Spagna	Deposito Comlube di Castenedolo (BS)	283
<b>Campa Biodiesel Ochsenfurt-</b> Germania	Deposito Oil B di Salbiate Olona (VA)	683
<b>Comlube S.r.l.</b> -Castenedolo- Brescia	Stabilimento di Castenedolo (BS)	5.432
<b>Diester Industrie S.a.s.</b> Grand COURONNE (Rouen) –Francia	Deposito Lombarda Petroli di Villasanta (MI)	2.684
<b>DP Lubrificanti S.r.l.</b> Aprilia (LT)	Stabilimento di Aprilia (LT)	7.954
<b>Fox Petroli S.p.A.</b> -Vasto (CH)	Stabilimento di Vasto (CH)	55.212
<b>Ital Bi Oil</b> - Monopoli (BA)	Stabilimento di Monopoli (BA)	17.027
<b>Mythen S.p.a.</b> - Ferrandina (MT)	Stabilimento di Ferrandina (MT)	6.330
<b>New - Marl/Neuss</b> – Germania	Deposito Lombarda Petroli di	8.443

	Villasanta (MI) Deposito Decal – Porto Marghera (VE)	
<b>Novaol S.r.l.</b> – Livorno	Stabilimento di Livorno	48.354
<b>Novaol Austria Gmbh</b> - Bruck/Leitha – Austria	Deposito Lombarda Petroli di Villasanta (MI) Deposito Decal – Porto Marghera (VE)	2.310
<b>Oil. B. S.r.l.</b> - Solbiate Olona (VA)	Deposito fiscale di Solbiate Olona (VA)	20.316
<b>Rheinische Bio Ester</b> - Neuss – Germania	Deposito Comlube di Castenedolo (BS)	1.009

Tabella 1.3 Aziende che producono in regime di defiscalizzazione nel 2006

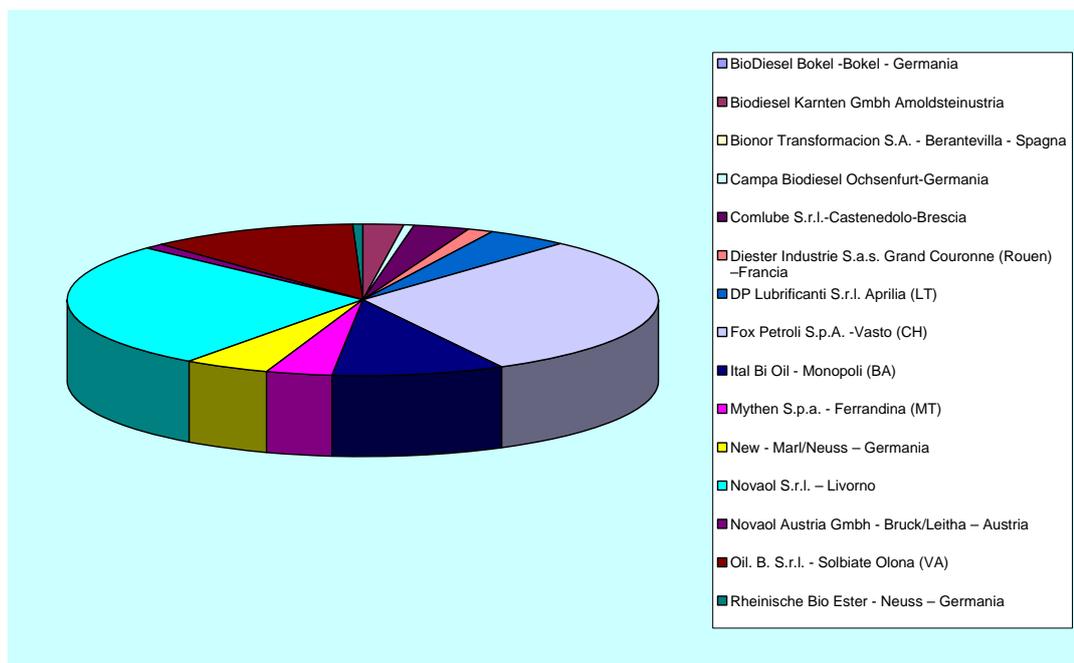


Figura 1.8 Ripartizione percentuale del contingente defiscalizzato

Le 15 aziende risultano così suddivise:

- 14 Società che hanno già ricevuto un'assegnazione a partire dal 1 Gennaio 2004 o a

partire dal 1 Gennaio 2005 (di seguito indicate come Ditte A) di cui:

- 11 hanno ricevuto un'assegnazione già a partire dal 1 Gennaio 2004;
  - 3 hanno ricevuto un'assegnazione già a partire dal 1 Gennaio 2005;
- 1 Società che è di nuovo inserimento nell'elenco delle assegnazioni (di seguito indicata come Ditta B).

Tenuto conto che i quantitativi richiesti sono pari a **465.000** tonnellate a fronte di un contingente di **180.000** tonnellate e che l'anno 2006 è il secondo anno nel quale si verifica l'eccedenza, si è proceduto applicando la seguente procedura:

- 1) **Prima fase** – Raccolta dati
- 2) **Seconda fase** – Verifica presenza quote residue dalla suddivisione tra le Ditte A.
- 3) **Terza fase** - Calcolo della frazione di contingente spettante alla Ditta B.
- 4) **Quarta fase** - Suddivisione del contingente residuo tra le Ditte A.

Si riporta una breve descrizione delle 4 fasi

### **PRIMA FASE – RACCOLTA DATI**

**1.** Per le 11 Società che hanno ricevuto quote di contingente a partire dal 1 Gennaio 2004, sono stati acquisiti i dati riguardanti le assegnazioni e le immissioni in consumo di biodiesel nell'annualità 2004 e in quella in corso fino al 30 Novembre 2005. Pertanto, il periodo di riferimento per le relative certificazioni UTF è quello compreso tra il **1 Gennaio 2004** e il **30 Novembre 2005**, per un totale di **23** mesi.

**2.** Per le 3 Società che hanno ricevuto quote di contingente a partire dal 1 Gennaio 2005, sono stati acquisiti i dati riguardanti le assegnazioni e le immissioni in consumo di Biodiesel dal 1 Gennaio 2005 al 30 Novembre 2005, per un totale di 11 mesi. Questo è il periodo di riferimento per le relative certificazioni UTF.

Per il calcolo dei contingenti assegnati sono state utilizzate le seguenti note:

- per l'annualità 2004, nonché ai sensi dell'art.5 del Decreto 256/03, determinazioni

prot.n.468 del 13 Febbraio 2004 e prot.n.524 del 18 Febbraio 2004;

- determinazione prot.n.2960 del 8 Ottobre 2004, in redistribuzione dei quantitativi di cui all'articolo 5 del Decreto 256/03 non immessi in consumo entro il 20 Luglio 2004;
- determinazioni prot.n.5378 del 8 Settembre 2005 e prot.n.5433 del 9 Settembre 2005, a titolo di assegnazione definitiva per l'anno 2005.

Ciascuna Società ha fornito i dati relativi ai quantitativi richiesti, alla capacità produttiva e all'immesso in consumo. L'Ufficio doganale territorialmente competente ha verificato l'immesso in consumo e l'operatività dell'impianto di ciascuna Società alla data di scadenza della presentazione della domanda di richiesta.

Le quantità immesse in consumo sono state determinate considerando esclusivamente la massa di biodiesel facente parte del contingente in esenzione di accisa.

In tal modo sono stati determinati, per ciascuna ditta, i seguenti elementi:

**a. assegnazioni**

**b. immissioni in consumo**

**c. capacità produttiva**

3. Verifica delle richieste di ciascuna ditta: se la richiesta eccede la capacità produttiva annua essa viene corretta assumendo come richiesta il valore della capacità produttiva annua. In tal modo viene determinata per ciascuna ditta:

**d. richiesta**

4. Si è verificato che:

- le richieste complessive per l'anno 2006 ammontano a **465.000** tonnellate. Tale valore è superiore al contingente per l'anno 2006, pari a **180.000** tonnellate;
- l'anno 2006 è il secondo anno in cui si verifica l' eccedenza.

Pertanto, è necessario procedere in base all'art.4, comma 2, lettera b) del Decreto n.256/03.

**SECONDA FASE – VERIFICA PRESENZA QUOTE RESIDUE DALLA SUDDIVISIONE TRA LE DITTE A**

1. Per le Ditte A operanti per 23 mesi, si è calcolata la media mensile delle immissioni in

consumo come:

$$[\text{media mensile}] = [\text{immissioni in consumo}] / 23$$

2. Per le Ditte A operanti per 11 mesi, si è calcolata la media mensile delle immissioni in consumo come:

$$[\text{media mensile}] = [\text{immissioni in consumo}] / 11$$

3. Per tutte le Ditte A, si è calcolata l'immissione annua:

$$[\text{immissione annua}] = [\text{media mensile}] \times 12$$

4. In base alla lettera b) del comma 2 dell'articolo 4 del Decreto 256/03, a ciascuna delle Ditte A viene assegnata una quota pari all'immissione annua.

$$[\text{quota}] = [\text{immissione annua}]$$

5. La quota residua è determinata detraendo dal contingente di 180.000 tonnellate la somma delle quote assegnate alle Ditte A.

$$[\text{residuo}] = (180.000 - [\text{somma delle quote delle Ditte A}])$$

6. Essendo la somma delle quote delle Ditte A pari a **263.341** tonnellate, si verifica che non sono presenti quote residue da assegnare alla Ditta B.

### **TERZA FASE – CALCOLO DELLA FRAZIONE DI CONTINGENTE DA ASSEGNARE ALLA DITTA B**

Essendo presente un'istanza di partecipazione da parte di una ditta che non ha avuto l'assegnazione nell'anno 2005, non essendo presenti residui da assegnare, per valutare la frazione di contingente da assegnare alla suddetta Società si è proceduto in base alla lettera a) del comma 2 dell'art.4 del Decreto 256/03. Le operazioni effettuate sono le seguenti.

1. Per le Ditte A vengono determinati i parametri p e q, il grado di utilizzo e il peso, tramite le seguenti operazioni.

$$p = 0,40 \times [\text{capacità produttiva}] / [\text{somma delle capacità produttive}]$$

$$q = 0,60 \times [\text{immissioni in consumo}] / [\text{somma delle immissioni in consumo}] \text{ [grado di}$$

**utilizzo] = [immissioni in consumo] / [assegnazioni]**

**peso = [p+q] x [grado di utilizzo]**

Il grado di utilizzo può essere al massimo unitario.

2. Per la Ditta B vengono determinati i parametri p e q, il grado di utilizzo e il peso, tramite le seguenti operazioni.

**p = 0,10 x [capacità produttiva] / [somma delle capacità produttive]**

**q = 0,00 x [immissioni in consumo] / [somma delle immissioni in consumo]**

Per la Ditta B si assume un grado di utilizzo pari a 1 e, pertanto,

**peso = [p+q]**

3. Il peso calcolato per le Ditte A e per la Ditta B viene normalizzato in modo che la somma dei pesi sia pari a 100%. Si ottiene cos' la grandezza:

#### **d. peso normalizzato**

4. Per la Ditta B si determina l'assegnazione per l'anno 2006 tramite la formula:

**[assegnazione Ditta B] = [peso normalizzato] \* 180.000**

5. L'assegnazione alla Ditta B è convalidata dopo aver verificato che:

**[assegnazione Ditta B] < [richiesta ditta B]**

I risultati della partizione sono esposti nella tabella 1. I coefficienti sono stati arrotondati alla seconda cifra decimale.

### **QUARTA FASE – SUDDIVISIONE DEL CONTINGENTE RESIDUO TRA LE DITTE A**

Determinata l'assegnazione alla Ditta B, si calcola il contingente residuo da dividere tra le Ditte A con la formula:

**[contingente residuo] = 180.000 – [assegnazione Ditta B]**

La ripartizione di tale contingente residuo è stata effettuata tramite la procedura prevista dall'art.4, comma 2, lettera b) del Decreto 256/03. Le operazioni effettuate sono state le seguenti.

BIODIESEL: PROGRAMMA ESENNALE 2005-2010															
ASSEGNAZIONE 2006 - Tabella 1 - Dati in tonnellate															
Ditte richiedenti	CAPACITA' PRODUTTIVE E RICHIESTE			capacità produttiva % sul totale	assegnazioni 2004 e residui anni prec. + 2005	immisioni in cons. 1/1/2004 - 30/11/2005	% immisioni = (l(totale)) / (l(1/1/04))	coefficiente di capacità produttiva	parametro di capacità produttiva	coefficiente di immisione in consumo	parametro di immisione in consumo	grado di utilizzo	FESO	quote assegnate Ditta B annualità 2006	
	CAPACITA' PRODUTTIVE C	RICHIESTE R	RICHIESTE CORRETTE (-C se R<C)												
<b>180.000</b>															
<b>DITTE A</b>	C	R	Rc	e%	A	I	I%	c40	p=c% x c40	e60	q = I% x 160	s = p-q	t = I/A	v = s x t	Q
BIODIESEL KARNTEN	25.000	4.000	4.000	1,19	14.324	11.084	2,21	0,4	0,48	0,6	1,33	1,51	0,77	1,39	-
BIONOR	23.000	50.000	23.000	1,10	2.303	807	0,16	0,4	0,44	0,6	0,10	0,54	0,35	0,19	-
COMLUBE	120.000	50.000	50.000	5,73	20.367	15.462	3,08	0,4	2,29	0,6	1,85	4,14	0,76	3,15	-
DP LUBRIFICANTI	155.520	18.000	18.000	7,42	23.455	22.641	4,51	0,4	2,97	0,6	2,71	5,66	0,96	5,45	-
FOX PETROLI	131.370	60.000	60.000	6,27	183.430	157.162	31,30	0,4	2,51	0,6	18,78	21,29	0,86	18,31	-
ITAL BI OIL	120.000	30.000	30.000	5,73	44.171	48.468	9,55	0,4	2,29	0,6	5,79	8,08	1,00	8,08	-
MYTHEN	200.000	35.000	35.000	9,55	19.357	18.019	3,59	0,4	3,82	0,6	2,15	5,97	0,93	5,55	-
NEW	280.000	25.000	25.000	13,37	29.174	24.033	4,79	0,4	5,35	0,6	2,87	8,22	0,82	6,74	-
NOVAOL AUSTRIA	30.000	8.000	8.000	1,43	12.274	6.577	1,31	0,4	0,57	0,6	0,79	1,36	0,54	0,73	-
NOVAOL	250.000	80.000	80.000	11,93	189.474	137.641	27,41	0,4	4,77	0,6	16,45	21,22	0,73	15,49	-
OIL B.	200.000	50.000	50.000	9,55	75.097	57.830	11,52	0,4	3,82	0,6	6,91	10,73	0,77	8,26	-
BIODIESEL BOKEL	10.000	2.000	2.000	0,48	118	89	0,02	0,4	0,19	0,6	0,01	0,20	0,76	0,15	-
CAMPA BIODIESEL	150.000	20.000	20.000	7,16	940	890	0,19	0,4	2,88	0,6	0,11	2,97	0,99	2,94	-
RHEINISCHE BIO ESTER	150.000	50.000	50.000	7,16	1.879	1.374	0,27	0,4	2,88	0,6	0,16	3,02	0,73	2,20	-
<b>1.844.890 482.000 455.000 88,07 616.403 502.126 100,00</b>															
<b>DITTE B</b>	C	R	Rc	e%	A	I	I%	c40	p=c% x c10	e60	q = I% x 100	s = p-q	t = I/A	v = s x t	Q
BIESTER INDUSTRIE	250.000	10.000	10.000	11,93	-	-	0,00	0,1	1,19	0,6	0,00	1,19	1,00	1,19	2.684
	250.000	10.000	10.000	11,93	0	0	-	-	-	-	-	-	-	1,19	2.684
<b>totale c: 2.084.890    totale R: 492.000    totale c: 465.000    totale c%: 100,00    totale A: 616.403    totale I: 502.126    totale v: 79,62    totale Q: 2.684</b>															

Tabella 1.4 Contingente defiscalizzato 2005-2010

BIODIESEL: PROGRAMMA ESENNALE 2005-2010													
ASSEGNAZIONE 2006 - Tabella 2 - Dati in tonnellate													
Ditte richiedenti	CAPACITA' PRODUTTIVE E RICHIESTE			capacità produttiva % sul totale	ASSEGNAZIONI CONI ANTE 2006	ASSEGNAZIONI CONI 2006	ASSEGNAZIONI ANNUALITA' PRECEDENTI	IMMISSIONI IN CONSUMO				QUOTE ASSEGNATE ANNO 2006	
	CAPACITA' PRODUTTIVE a	RICHIESTE b	RICHIESTE CORRETTE (-a se b>a) c					immisioni 1/1/2004-30/11/2005 h	media mensile k = h/mesi	immisione annua = k x 12 m = k x 12	coefficiente proporzionale = n/(m totale) n		
<b>23</b>													
<b>DITTE A</b>	a	b	c	d	e	f	g=e+f	h	k = h/mesi	m = k x 12	n		
BIODIESEL KARNTEN	25.000	4.000	4.000	1,19	10.539	3.785	14.324	11.084	482	6.788	2,20		3.887
BIONOR	23.000	50.000	23.000	1,10	2.092	211	2.303	807	35	421	0,16		289
COMLUBE	120.000	50.000	50.000	5,73	11.106	9.261	20.367	15.462	672	8.087	3,06		5.492
DP LUBRIFICANTI	155.520	18.000	18.000	7,42	15.090	8.415	23.495	22.641	984	11.813	4,49		7.864
FOX PETROLI	131.370	60.000	60.000	6,27	134.211	49.219	183.430	157.162	6.833	81.998	31,14		55.212
ITAL BI OIL	120.000	30.000	30.000	5,73	24.168	20.003	44.171	48.468	2.107	25.288	9,60		17.027
MYTHEN	200.000	35.000	35.000	9,55	8.874	10.483	19.357	18.019	783	9.401	3,57		8.330
NEW	280.000	25.000	25.000	13,37	15.000	14.174	29.174	24.033	1.045	12.638	4,76		8.443
NOVAOL AUSTRIA	30.000	8.000	8.000	1,43	10.253	2.021	12.274	6.577	286	3.431	1,30		2.310
NOVAOL	250.000	80.000	80.000	11,93	140.325	49.149	189.474	137.641	5.984	71.813	27,27		48.364
OIL B.	200.000	50.000	50.000	9,55	55.097	20.000	75.097	57.830	2.514	30.172	11,46		20.318
BIODIESEL BOKEL	10.000	2.000	2.000	0,48	-	118	118	89	8	97	0,04		68
CAMPA BIODIESEL	150.000	20.000	20.000	7,16	-	940	940	890	85	1.014	0,39		883
RHEINISCHE BIO ESTER	150.000	50.000	50.000	7,16	-	1.879	1.879	1.374	125	1.488	0,57		1.008
<b>1.844.890 482.000 455.000 88,07 616.403 502.126 263.341 100,00 177.318</b>													
<b>DITTE B</b>	a	b	c	d	e	f	g=e+f	h	k = h/mesi	m = k x 12	n		
BIESTER INDUSTRIE	250.000	10.000	10.000	11,93	-	-	0,00	-	-	-	0,00		2.684
	250.000	10.000	10.000	11,93	-	-	0,00	0	-	-	0		
<b>totale a: 2.084.890    totale b: 492.000    totale c: 465.000    totale d: 100,00    totale e: 616.403    totale f: 502.126    totale g: 180.000</b>													

Tabella 1.5 Contingente defiscalizzato 2006

1. Per ciascuna Ditta A è stata calcolata l'immissione annua percentuale con la seguente formula.

$$\text{(\% immissione annua)} = (\text{immissione annua} / [\text{totale immissioni annue}])$$

2. La quota di ciascuna Ditta A è stata calcolata moltiplicando il contingente residuo per l'immissione annua percentuale.

$$[\text{quota Ditta A}] = (\% \text{ immissione annua}) \times [\text{contingente residuo}]$$

3. L'assegnazione alla Ditta A è convalidata dopo aver verificato che:

$$[\text{assegnazione Ditta A}] < [\text{richiesta ditta A}]$$

I risultati della partizione sono esposti nella tabelle 1.4 e 1.5. I coefficienti sono stati arrotondati alla seconda cifra decimale.

# Capitolo II

*Le normative*

## **Introduzione**

*Se da un lato ogni paese è responsabile con proporzioni variabili all'immissione in atmosfera di gas climalteranti, è anche vero che ogni singolo paese si trova oggi ad affrontare il difficile problema degli effetti dei cambiamenti climatici, indipendentemente dalle proprie responsabilità.*



Figura 2.1 Inquinamento

*Questo carattere "planetario" del problema lascia intendere come sia importante che vi siano misure internazionali globalmente condivise per la riduzione progressiva delle emissioni in atmosfera (mitigazione) e per un sostegno comune in previsione delle enormi spese necessarie ad assicurare la sopravvivenza di intere popolazioni agli effetti dei mutamenti climatici (adattamento).*

*Si evidenzia dunque la necessità di investire in energie alternative come i biocarburanti ottenuti da coltivazioni quali girasole, soia e colza che*

*l'Italia può produrre in abbondanza e che l'aumento dei prezzi del greggio rende più competitivi soprattutto alla luce del contributo che possono offrire al raggiungimento degli obiettivi fissati dal protocollo di Kyoto [23][24] per la riduzione delle emissioni di gas serra.*

*Il contributo che l'agricoltura può dare consente di raggiungere gli obiettivi fissati con il protocollo di Kyoto e di ridurre l'inquinamento. Con il biodiesel infatti si dimezzano le emissioni: produrre un milione di tonnellate di biocarburanti dalle coltivazioni agricole nazionali consente di ridurre dell'80 per cento le emissioni idrocarburi e policiclici aromatici e del 50 per cento di particolato e polveri sottili.*

*Dalla prima pubblicazione riconosciuta a livello internazionale del 1988, ad opera dell'UNEP ( United Nations Environment Programme ), che illustrava le evidenze scientifiche di un innalzamento della temperatura globale ed ne identificava le responsabilità nel pulviscolo introdotto in atmosfera da numerose eruzioni esplosive avvenute negli anni precedenti, ne è passata di acqua sotto i ponti. L'IPCC [ International Panel for Climate Change ], fondato dall'UNEP nel 1988, ebbe l'incarico di valutare in maniera indipendente ed obiettiva la situazione e l'evolversi del clima mondiale. Per far ciò, sono stati chiamati oltre 2000 luminari da oltre 160 Paesi, che hanno elaborato finora tre rapporti dettagliati sullo stato del pianeta, considerati come il miglior riferimento scientifico internazionale.*

*Già a partire dal suo primo rapporto, nel 1990, l'IPCC identificò la CO<sub>2</sub> tra i gas responsabili dell'effetto serra ed indicò l'attività umana come una delle cause responsabili di tale anomalia. Tale posizione si è evoluta negli anni con l'aumentare sia dei dati a disposizione, sia dell'accuratezza dei modelli matematici utilizzati, al punto da assicurare che l'attività umana è alla base dell'accelerazione del processo di riscaldamento e che solo attraverso una drastica riduzione delle emissioni di gas climalteranti in atmosfera si potrà evitare il superamento delle soglie critiche, pericolose persino per il mantenimento della vita sulla Terra.*

*Il primo rapporto dell'IPCC, che ha evidenziato la correlazione tra le emissioni dei gas-serra antropici e un probabile cambiamento climatico, ha costituito la base scientifica per i negoziati della Convenzione quadro sui cambiamenti climatici (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC). Nel 1992, i delegati di 150 paesi hanno infatti approvato la Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici adottata a New York il 9 maggio e presentata ai governi per la firma nel corso del Vertice della Terra svoltosi a Rio de Janeiro nel mese di giugno la quale costituisce il primo trattato internazionale riferito specificamente ai cambiamenti climatici.*

*La Convenzione, sottoscritta a Rio da 154 Paesi, più l'Unione europea, è entrata in vigore il 21 marzo 1994, 90 giorni dopo la cinquantesima ratifica. Essa definisce un obiettivo di stabilizzazione delle concentrazioni di*

*gas-serra per la protezione del sistema climatico e promuove interventi a livello nazionale e internazionale per il raggiungimento di questo obiettivo, ma non prevede impegni vincolanti per la riduzione delle emissioni di gas-serra, ma solo un impegno di massima per i Paesi industrializzati a riportare entro il 2000 le proprie emissioni di gas-serra ai livelli del 1990. Le riunioni della Conferenza delle Parti, che si svolgono con cadenza annuale, valutano le azioni intraprese e gli impegni da assumere anche alla luce delle conclusioni dei rapporti dell'IPCC. Secondo la prassi delle Nazioni Unite, tutte le decisioni della Conferenza delle Parti richiedono, per essere adottate, il consenso di tutti i Paesi firmatari.*

## 2.1 PROTOCOLLO DI KYOTO

Nella Convenzione UN-FCCC (United Nation Framework Convention on Climate Change) viene istituito un organo definito la “*Conferenza delle Parti*”, al quale viene demandato il compito fondamentale di dare attuazione dei principi e degli impegni generali contenuti nella convenzione stessa. Questo organo, che è l’organo supremo e decisionale, ha anche il compito di controllare l’effettivo svolgimento delle azioni per il raggiungimento degli obiettivi della UN-FCCC.



Figura 2.2 Emissioni di gas serra

Il Protocollo di Kyoto, sottoscritto a Kyoto il 7 dicembre 1997, il giorno seguente alla chiusura ufficiale della terza Conferenza delle Parti della UN-FCC nella sua terza sessione plenaria tenuta a Kyoto dal 1 al 10 dicembre 1997, è dunque un atto esecutivo contenente le prime decisioni sulla attuazione operativa di alcuni degli impegni della Convenzione UN-FCC e stabilisce per i Paesi industrializzati e per i Paesi con economie in transizione obiettivi di riduzione delle emissioni di sei gas-serra responsabili del surriscaldamento del pianeta.

L’adozione del protocollo di Kyoto [25] [26] ha rappresentato la tappa più rilevante del processo di negoziazione per il controllo del cambiamento climatico, avviato dalla Conferenza di Rio de Janeiro del 1992. Gli impegni del Protocollo, a differenza di quelli della Convenzione, sono vincolanti per i Paesi firmatari: per questo, probabilmente, si è arrivati a ratificarlo solo nel 2005.

Circa 122 Paesi hanno ratificato il Protocollo: l'ultima ratifica è stata appunto quella russa che ha consentito finalmente al Protocollo di entrare in vigore ed avere valore vincolante. Condizione necessaria era, infatti, il raggiungimento della soglia di 55 paesi firmatari per un totale di almeno il 55% delle emissioni climalteranti in atmosfera.

Il Protocollo di Kyoto è entrato in vigore il 16 Febbraio, 90 giorni dopo la ratifica dalla Russia grazie alla quale è stata soddisfatta la condizione che richiedeva il coinvolgimento di 55 Parti aderenti alla Convenzione (UNFCCC), le cui emissioni rappresentino almeno il 55% del totale di CO<sub>2</sub> al 1990 dei paesi appartenenti all'Annex (1), ossia dei paesi OCSE e delle Economie in Transizione (paesi dell'Europa Centrale e dell'Est).

Gli USA dichiararono ufficialmente la loro uscita dal Protocollo nel marzo 2001, poche settimane dopo l'elezione di George W. Bush. Un rapporto di Greenpeace illustra come compagnie petrolifere, gruppi lobbistici (spesso finanziati dalle stesse compagnie) e altri stakeholders del settore, ExxonMobil in testa (nota in Europa come Esso), finanziarono la campagna elettorale di Bush facendo pressione sull'Amministrazione affinché non ratificasse il Protocollo di Kyoto, ritenuto un pericolo per lo sviluppo industriale ed economico della confederazione.

Se si uscisse dalla mentalità di un'economia dipendente dai combustibili fossili in favore delle energie rinnovabili e si ragionasse sulle enormi potenzialità di una politica di efficienza energetica che riduca al massimo gli sprechi energetici, si potrebbe pronosticare una crescita ben oltre le previsioni, con costi sociali ed ambientali sempre minori.

Oggi il Protocollo ha più di 8 anni di vita e può essere considerato definitivo al 99%. Non tutte le decisioni prese al suo interno rispecchiano le volontà del mondo ambientalista, tuttavia la sua forza sta nella sostanziale riduzione delle emissioni di gas serra a livello planetario e nell'inquadramento dello sviluppo dei paesi più poveri all'interno di un modello di sostenibilità che assicuri la loro crescita, mantenendo al minimo la loro impronta ecologica.

In altre parole il Protocollo di Kyoto individua e definisce operativamente solo una parte molto limitata degli impegni da attuare. Anche se molto lavoro resta ancora da fare ai fini attuativi, tuttavia le azioni e le misure decise a Kyoto dalla "Conferenza delle Parti" rappresentano un punto di partenza fondamentale non solo nella direzione delle problematiche dei cambiamenti climatici, ma anche nel quadro più generale dello sviluppo sostenibile.

Infatti, nonostante l'alto rischio di fallimento che da più parti si paventava alla vigilia di questo importante appuntamento per le apparenti intransigenze di molti Paesi in via di sviluppo e di alcuni Paesi sviluppati quali gli Stati Uniti, e nonostante i continui colpi di scena che si sono avuti durante la fase di discussione delle misure da attuare, è stato avviato un processo di collaborazione mondiale su base consensuale, un processo che al di là delle inevitabili mediazioni e delle inevitabili critiche su chi ci ha perso e chi ci ha guadagnato o tra chi ne è uscito sconfitto e chi vincitore, ha posto comunque, ed in qualche modo ha anche sancito, la centralità dei problemi del clima globale nello sviluppo socio-economico mondiale e la centralità dello sviluppo sostenibile per il futuro del nostro pianeta e per la sopravvivenza stessa dell'umanità.

Kyoto, quindi, non rappresenta affatto un punto di arrivo o una grande conquista diplomatica mondiale (le misure decise sono scarse, parziali e limitate solo ad alcuni aspetti), ma è solo un timido punto di partenza per i problemi del clima e dello sviluppo sostenibile, ma soprattutto per la cooperazione mondiale anche in altri settori delle tematiche globali quali la biodiversità, la desertificazione e l'Agenda 21.

### **2.1.1 OBIETTIVI**

Il protocollo di Kyoto ha come obiettivo [27] [28] [29] [30] la riduzione delle emissioni di un "basket" di sei gas: anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), ossido di azoto (N<sub>2</sub>O), esafluoruro di zolfo (SF<sub>6</sub>), idrofluorocarburi (HFCs) e perfluorocarburi (PFCs). I Paesi soggetti a vincolo di emissione sono 39, indicati nell'Annex I. Il tasso di riduzione delle emissioni (misurate in CO<sub>2</sub> equivalenti, in relazione al "Global Warming Potential" indicato dall'IPCC per ciascun gas) è differenziato per ogni Paese. Il valore medio di riduzione è pari al 5,2%.. Il Protocollo prevede che i Paesi industrializzati e quelli con economia in via di transizione (es: Paesi dell'Est Europeo) debbano impegnarsi, entro il 2012, a ridurre complessivamente del 5,2% rispetto ai valori del 1990, le emissioni di "gas serra" ovvero dei gas atmosferici che causano l' "effetto serra" mantenendo intrappolata la radiazione infrarossa proveniente dal Sole (la mancata adesione degli USA e le concessioni richieste dalla Russia hanno finito col ridurre questa percentuale allo 0,4% rispetto ai valori del 1990)

L'obiettivo di riduzione è da realizzare nell'intervallo 2008-2012, utilizzando come anno base il 1990 per i primi tre gas o, per i restanti tre a discrezione della Parte, il 1995.

La riduzione complessiva del 5% delle emissioni antropogeniche viene ripartita in maniera diversa: per i Paesi dell'Unione europea nel loro insieme la riduzione deve essere dell'8%, per gli Stati Uniti la riduzione deve essere del 7% e per Canada, Ungheria, Polonia e il Giappone del 6%. Nessuna riduzione, ma solo stabilizzazione è prevista per la Federazione Russa, la Nuova Zelanda e l'Ucraina. Possono, invece, aumentare le loro emissioni fino all'1% la Norvegia, fino all'8% l'Australia e fino al 10% l'Islanda. Nessun tipo di limitazione alle emissioni di gas-serra viene previsto per i Paesi in via di sviluppo (es. Sud America, Cina, India) le cui eventuali misure di riduzioni si basano solo su termini volontari.

Il 1 gennaio 2005 è stato avviato l'Emission Trading: oltre tale data nessun impianto che ricade nell'ambito di applicazione della direttiva 2003/87/CE potrà emettere, ovvero potrà continuare ad operare, in assenza di apposita autorizzazione. Il coinvolgimento è totale per i Paesi della Comunità Europea, soprattutto quelli che hanno aumentato le loro emissioni di CO<sub>2</sub>, che devono impegnarsi, nel periodo 2008 - 2012, ad una riduzione del 8% . In particolare l'Italia, con un incremento superiore al 9% in più rispetto al 1990, deve ridurre le proprie emissioni del 6,5%, sempre rispetto ai livelli del 1990.

Il ruolo ed il contributo dei gas serra in termini quantitativi sono ormai ampiamente definiti da studi ed approfondimenti scientifici: l'effetto serra" è un fenomeno naturale, se non ci fosse la temperatura media sulla Terra sarebbe di 18 °C, ma il suo incremento ad opera dell'uomo rischia di provocare il surriscaldamento del pianeta, con un aumento della temperatura di almeno 3 °C entro la fine del secolo; le conseguenze ovviamente sarebbero disastrose: scioglimento dei ghiacci polari, innalzamento del livello del mare (25-30 cm), desertificazione, eventi climatici estremi, ecc.

Analizzando i gas responsabili del fenomeno, l'effetto serra incrementale - conseguenza di attività umane - è dovuto:

1. per il 65% all'**anidride carbonica (CO<sub>2</sub>)** prodotta dall'impiego dei combustibili fossili in tutte le attività energetiche ed industriali, oltre che nei trasporti (nel 1995 l'80% delle emissioni in Italia erano rappresentate da CO<sub>2</sub>)
2. per il 20% al **metano (CH<sub>4</sub>)** immesso in atmosfera sia durante le operazioni di sfruttamento del gas naturale ai fini energetici, sia come biogas dalle discariche dei rifiuti solidi urbani, sia dagli allevamenti zootecnici e dalle coltivazioni di riso; (nel 1995 il 10% delle emissioni in Italia erano rappresentate da CH<sub>4</sub>); 1 tonnellata di CH<sub>4</sub> incrementa l'effetto serra come 21 tonnellate di CO<sub>2</sub>

3. per il 10% all'insieme degli **idrofluorocarburi (HFCs)**, ai **perfluorocarburi (PFCs)** e all'**esafluoruro di zolfo (SF<sub>6</sub>)**, oggi sempre più in diminuzione

4. per il 5% al **protossido di azoto (N<sub>2</sub>O)** proveniente sia dai processi di combustione che dalla degradazione all'aria dei fertilizzanti azotati impiegati in agricoltura; (nel 1995 il 10% delle emissioni in Italia erano rappresentate da N<sub>2</sub>O; 1 tonnellata di N<sub>2</sub>O incrementa l'effetto serra come 31 tonnellate di CO<sub>2</sub>)

Sino ad ora si è fatto ben poco per limitare le emissioni di CO<sub>2</sub>, i programmi di sviluppo delle "energie alternative" incidono ancora per una percentuale modesta sul totale dell'energia termica di cui ha bisogno l'Unione Europea.

Per conseguire i propri specifici obiettivi di riduzione, il Protocollo permette ai Paesi industrializzati di fare uso degli assorbimenti di CO<sub>2</sub> (anidride carbonica) da foreste e terreni agricoli (i cosiddetti carbon sink) e dei meccanismi di cooperazione internazionale per ridurre le emissioni. I dettagli operativi relativi all'uso di questi strumenti sono stati però definiti solo dalla COP 7, svoltasi a Marrakech nel novembre 2001. La COP 9, che si è riunita a Milano nel dicembre 2003, ha ultimato le attività preparatorie all'attuazione del Protocollo, approvando le modalità per la realizzazione di interventi di cooperazione internazionale nel settore agricolo e forestale.

Per limitare e/o ridurre le emissioni ogni Paese si è impegnato ad adottare politiche e misure adeguate, trovando soluzioni che garantiscano la crescita dei Paesi in via di sviluppo assicurando nello stesso tempo che gli obiettivi stabiliti nel Protocollo siano effettivamente raggiunti a livello mondiale.

Ciò si può raggiungere non solo riducendo le emissioni attraverso meccanismi di abbattimento diretto, ma soprattutto implementando strumenti diretti e flessibili come per esempio:

1. la riforestazione, al fine di aumentare l'assorbimento di carbonio
2. l'ammodernamento del sistema energetico ed industriale
3. lo sviluppo delle tecnologie innovative a basse emissioni, dando particolare peso alle fonti rinnovabili
4. il commercio delle emissioni con i Paesi in via di sviluppo
5. il trasferimento di tecnologie pulite verso questi stessi Paesi

Tutto ciò è realizzabile solo grazie alla capacità di innovazione delle imprese italiane e non, con adeguate incentivazioni del loro coinvolgimento e collegamento con i settori della ricerca soprattutto a carattere pubblico, sono proprio le imprese che operano

nel settore energetico che possono offrire un importante contributo positivo (in Italia circa un quarto delle emissioni sono legate alla produzione di energia elettrica).

L'impegno dell'Italia (Delibera CIPE del 2002) è di ridurre di 93 milioni di tonnellate le emissioni di CO<sub>2</sub> entro il 2012 (per rispettare gli obiettivi italiani di riduzione dei gas serra del 6,5% rispetto ai livelli del 1990); ciò può comportare investimenti per circa 50.000 milioni di Euro, una riduzione dei consumi energetici, un risparmio per oltre 40.000 milioni di Euro oltre naturalmente ai benefici ambientali.

In particolare le imprese che operano nel settore dell'energia prodotta da fonti rinnovabili (eolico, biomasse e biogas, fotovoltaico, idroelettrico, geotermia), sono in prima fila nel contribuire al raggiungimento di tali ambiziosi obiettivi con una quota pari a 18 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub> (come indicato dalla Delibera CIPE 137/98).

Per il conseguimento dei propri obiettivi, i Paesi industrializzati e ad economia in transizione possono "contabilizzare" come riduzione delle emissioni, secondo le decisioni negoziali assunte dalla Settima Conferenza sul Clima di Marrakesh, il carbonio assorbito dalle nuove piantagioni forestali e dalle attività agroforestali (**carbon sink**) e utilizzare in maniera sostanziale i meccanismi flessibili (Clean Development Mechanism, Joint Implementation ed Emissions Trading), previsti dal Protocollo di Kyoto.

In particolare:

- **Clean Development Mechanism** (CDM) consente ai Paesi industrializzati e ad economia in transizione di realizzare progetti nei Paesi in via di sviluppo, che producano benefici ambientali in termini di riduzione delle emissioni di gas-serra e di sviluppo economico e sociale dei Paesi ospiti e nello stesso tempo generino crediti di emissione per i Paesi che promuovono gli interventi;
- **Joint Implementation** (JI) consente ai Paesi industrializzati e ad economia di transizione di realizzare progetti per la riduzione delle emissioni di gas-serra in un altro Paese dello stesso gruppo e di utilizzare i crediti derivanti, congiuntamente con il Paese ospite;
- **Emissions Trading** (ET) consente lo scambio di crediti di emissione tra Paesi industrializzati e ad economia in transizione: un Paese che abbia conseguito una diminuzione delle proprie emissioni di gas serra superiore al proprio obiettivo può così cedere (ricorrendo all'ET) tali "crediti" a un Paese che, al contrario, non sia

stato in grado di rispettare i propri impegni di riduzione delle emissioni di gas-serra.

Gli ultimi due meccanismi, JI e CDM, la cui realizzazione dei progetti è affidata quasi esclusivamente alle imprese che devono valutare la convenienza di acquisire crediti di emissione attraverso interventi impiantistici ed industriali, rappresentano per le imprese stesse una straordinaria forza trainante per trasferire tecnologie nei mercati emergenti dei nuovi protagonisti dell'economia mondiale.

Nell'adempiere agli impegni di riduzione delle emissioni, ogni Paese elaborerà politiche e misure, come ad esempio:

- il miglioramento dell'efficienza energetica in settori rilevanti dell'economia nazionale;
- la protezione e il miglioramento dei meccanismi di rimozione e di raccolta dei gas ad effetto serra,
- la promozione di metodi sostenibili di gestione forestale, di imboscamento e di rimboscamento;
- la promozione di forme sostenibili di agricoltura;
- la ricerca, promozione, sviluppo e maggiore utilizzazione di energia rinnovabile, di tecnologie per la cattura e l'isolamento del biossido di carbonio e di tecnologie avanzate ed innovative compatibili con l'ambiente;
- la riduzione progressiva, o eliminazione graduale, delle imperfezioni del mercato, degli incentivi fiscali, delle esenzioni tributarie e di sussidi in tutti i settori responsabili di emissioni di gas ad effetto serra, ed applicazione di strumenti di mercato;
- l'adozione di misure volte a limitare e/o ridurre le emissioni di gas ad effetto serra nel settore dei trasporti;
- la limitazione e/o riduzione delle emissioni di metano attraverso il recupero e utilizzazione del gas nel settore della gestione dei rifiuti, nonché nella produzione, il trasporto e la distribuzione di energia.

L'effetto più importante dell'entrata in vigore (che rappresenta un grosso successo politico per l'Unione Europea, che si è impegnata strenuamente per il rafforzamento di questo processo) è invece quello di rilanciare la cooperazione internazionale per la tutela del clima globale del pianeta, di cui il Protocollo rappresenta solo il primo passo. La Conferenza delle Parti del Protocollo dovrà poi cominciare a prendere in considerazione gli obiettivi di riduzione per la fase successiva al quinquennio 2008-2012, obiettivi che dovranno prevedere impegni di riduzione più stringenti da parte dei paesi industrializzati e la partecipazione di tutte le maggiori economie alla salvaguardia del clima terrestre.

## **2.2 PRINCIPALI RIFERIMENTI NORMATIVI E COMUNITARI NEL SETTORE DELLE FONTI RINNOVABILI, CON PARTICOLARE RIFERIMENTO ALL'IMPIEGO DELLE BIOMASSE AI FINI ENERGETICI**

La definizione di biomasse per usi energetici è regolata dal DPCM dell'8 marzo 2002 e dal Decreto Legislativo 387/03 art.2, comma 1, lettera a) che si riporta di seguito: *“fonti energetiche rinnovabili o fonti rinnovabili: le fonti energetiche rinnovabili 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”*.

Attualmente la materia è disciplinata da vari testi legislativi che si riportano sinteticamente di seguito:

**Direttiva 2003/30/CE** del parlamento Europeo e del consiglio 8 Maggio 2003, sulla promozione dell'impiego dei biocarburanti o di altri carburanti rinnovabili nei trasporti;

**Direttiva 2003/96/CE** del consiglio Europeo che ristruttura il quadro comunitario per la tassazione dei prodotti energetici e dell'elettricità

**Decisione del Consiglio del 25 marzo 2002** che autorizza l' Italia ad applicare aliquote di accise differenziate ad alcuni carburanti contenenti biodiesel a norma dell' articolo 8, paragrafo 4 della direttiva 92/81/CEE(2002/265/CE)

**Testo unico delle disposizioni legislative concernenti le imposte sulla produzione e sui consumi e relative sanzioni penali e amministrative Decreto**

**Legislativo 26.10.1995n.504** Pubblicato nel supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale n°279 del 29 novembre 1995

**Decreto del ministro dell'economia e delle finanze 25 Luglio 2003, n°256**  
“Regolamento concernente le modalità di applicazione dell'accisa agevolata sul prodotto denominato biodiesel”(GU 12/9/2003, n.212). Tale decreto, integrato e modificato dalle successive leggi finanziarie, stabilisce che il biodiesel, nell'ambito di un programma triennale di durata dal 1° Luglio 2001 al 30 Giugno 2004 e nel limite di un contingente annuo di 300.000 tonnellate, è esentato dall'accisa, con l'osservanza di alcune disposizioni definite dal decreto

**Legge 30 dicembre 2004, n.311**, Art 1, commi 521 e 522 che istituisce un programma esentale, a decorrere dal 1° gennaio 2005 fino al 31 dicembre 2010, nel quale il biodiesel puro e miscelato con oli minerali è esentato dalle accise nei limiti di un contingente annuo di 200.000 tonnellate, sulla base delle precedenti, l'Agenzia delle dogane ha emanato alcune determinazioni che disciplinano ulteriormente la materia:

**Determinazione n°7512 del 16/11/2005.** Biodiesel. Assegnazione del contingente agevolato per l'annualità 2006 nell'ambito del programma esentale 2005-2010 previsto dalla legge n°311 del 30/12/2004. Invito alla presentazione delle domande di assegnazione.

**Determinazione n°9041 del 2/1/2006.** Biodiesel. Assegnazione del contingente agevolato per l'annualità 2006, nell'ambito del programma esentale 2005-2010 previsto dalla legge n°311 del 30.12.2004. Assegnazione delle quote.

Altre determinazioni precedenti dell'agenzia delle dogane in merito al settore:

**Determinazione n°2412 del 17/12/2003.** Disposizioni tecniche di attuazione del regolamento 256/2003, che stabilisce le modalità di applicazione dell'accisa agevolata sul “biodiesel” e fissa il termine di 60 giorni per la presentazione delle domande di partecipazione al programma di ripartizione del contingente agevolato dalla data di pubblicazione sulla GUCE del regolamento, anche per estratto.

Oltre a definire il termine per la presentazione delle domande di assegnazione delle quote, chiarisce quali sono le principali novità introdotte dal DM n° 256/2003:

-la tabella con le caratteristiche fiscali riporta nell'allegato al decreto stesso che è stata aggiornata con le caratteristiche riportate dalle due norme nazionali UNI 10946 (per autotrazione) e UNI 10947(per riscaldamento)- ora sostituite dalle UNI EN 14213 e UNI EN 14214- e che quindi abroga la precedente tabella del DM 219/98;

-la possibilità di utilizzare gasolio miscelato al 23% con biodiesel da utenti in reti;

**Determinazione n°468 del 13/02/2004. Biodiesel.:** assegnazione del contingente per l' annualità 2003-2004 e dei quantitativi non assegnati per le annualità 2001-2002-2003 nell' ambito del programma triennale 2001-2004 di cui all' art.21 della legge n°388/2000. In applicazione all' art.5 del DM n.256/2003 assegna i quantitativi di prodotto per il programma triennale 2001-2004.

**Determinazione n°524 del 18/02/2004.**Biodiesel. Parziale rettifica delle quote a saldo per l' annualità 2003-2004. Seguito a determinazione n°468 del 13/02/2004.

Rettifica parzialmente quanto stabilito della determinazione n°468/2004.

**Legge 23 dicembre 2005, n.266** "Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello stato (legge finanziaria 2006)", Art.1, commi 421, 422 e 423

**D.M. n 210 del 25 Marzo 1996,** Art.21, che prevede per le ditte comunitarie assegnatarie di quote l' immissione in consumo di biodiesel nel territorio nazionale attraverso soggetti preventivamente autorizzati;

**Legge 11 Marzo 2006, n° 81** "Conversione in legge, con modificazioni, del decreto legge 10 Gennaio 2006, n°2 recante interventi urgenti per i settori dell' agricoltura, dell' agroindustria, della pesca, nonché in materia di fiscalità d' impresa", Pubblicata nella Gazzetta Ufficiale n°59 del 11 Marzo 2006-suppl.ord. n°58, Art.2-quarter, comma 2, recante disposizioni circa l' obbligo per i produttori di carburanti di immettere al consumo biocarburanti di origina agricola e relative percentuali di incremento annue.

La Legge 23 dicembre 2005, n.266 "Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello Stato (legge finanziaria 2006)" all' art. 1, commi 421, 422 e 423 cita testualmente:

**421.** All' articolo 21, comma 6, del testo unico di cui al decreto legislativo 26 ottobre 1995, n. 504, e successive modificazioni, sono apportate le seguenti modificazioni: a) al terzo periodo, le parole: "un contingente annuo di 200.000 tonnellate" sono sostituite dalle seguenti: "un contingente di 200.000 tonnellate di cui 20.000 tonnellate da utilizzare su autorizzazioni del Ministero dell' economia e delle finanze di concerto con il Ministero delle politiche agricole e forestali, a seguito della sottoscrizione di appositi contratti di coltivazione, realizzati nell' ambito di contratti quadro, o intese di filiera"; b) dopo il quarto periodo, e' inserito il seguente: "Con il medesimo decreto e' altresì determinata la quota annua di biocarburanti di origine agricola da immettere al consumo sul mercato nazionale".

**422.** L'importo previsto dall'articolo 21, comma 6-ter, del testo unico di cui al decreto legislativo 26 ottobre 1995, n. 504, come modificato dal comma 520 dell'articolo 1 della legge 30 dicembre 2004, n. 311, non utilizzato nell'anno 2005 e' destinato per l'anno 2006 nella misura massima di 10 milioni di euro per l'aumento fino a 20.000 tonnellate del contingente di cui al comma 421, da utilizzare con le modalita' previste dal decreto di cui al medesimo comma 421, nonche' fino a 5 milioni di euro per programmi di ricerca e sperimentazione del Ministero delle politiche agricole e forestali nel campo bioenergetico. Il restante importo e' destinato alla costituzione di un apposito fondo per la promozione e lo sviluppo delle filiere agroenergetiche, anche attraverso l'istituzione di certificati per l'incentivazione, la produzione e l'utilizzo di biocombustibili da trazione, da utilizzare tenuto conto delle linee di indirizzo definite dalla Commissione biocombustibili, di cui all'articolo 5 del decreto legislativo 29 dicembre 2003, n. 387.

**423.** La produzione e la cessione di energia elettrica da fonti rinnovabili agroforestali effettuate dagli imprenditori agricoli costituiscono attivita' connesse ai sensi dell'articolo 2135, terzo comma, del codice civile e si considerano produttive di reddito agrario.

Più recentemente, la legge n. 81/2006 di conversione del Decreto-legge 10 gennaio 2006, n. 2, pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 8 dell' 11 gennaio 2006 "Interventi urgenti per i settori dell'agricoltura, dell'agroindustria, della pesca, nonché in materia di fiscalità d'impresa" introduce alcuni interessanti disposizioni a favore dei biocarburanti:

Dopo l'art. 2 del Dl convertito viene aggiunto l'art.2-quater.

Art. 2-quater. - (Interventi nel settore agroenergetico).

1. Per il conseguimento degli obiettivi di cui all'articolo 3 del decreto legislativo 30 maggio 2005, n. 128, e per favorire lo sviluppo della filiera agroenergetica, è incentivata la produzione e la commercializzazione di bioetanolo, per un periodo di sei anni a partire dal 1° gennaio 2008.

2. Dal 1° luglio 2006 i produttori di carburanti diesel e di benzina sono obbligati ad immettere al consumo biocarburanti di origine agricola oggetto di un'intesa di filiera, o di un contratto quadro, o di un contratto di programma agroenergetico, stipulati ai sensi del presente articolo, in misura pari all'1 per cento dei carburanti diesel e della benzina immessi al consumo nell'anno precedente. Tale percentuale, espressa in potere calorifico inferiore, è incrementata di un punto per ogni anno, fino al 2010.

3. Con decreto del Ministro dell'economia e delle finanze, di concerto con il Ministro delle politiche agricole e forestali e con il Ministro delle attività produttive, da emanare entro sessanta giorni dalla data di entrata in vigore della legge di conversione del presente decreto, sono stabilite le modalità per l'invio da parte dei produttori di carburanti diesel e di benzina, con autocertificazione, dei dati relativi all'immissione in consumo di biocarburanti di origine agricola, riferiti all'anno in corso e dei dati relativi all'immissione in consumo di carburanti diesel e di benzina, riferiti all'anno precedente. Con detto decreto sono altresì stabilite le misure per il mancato rispetto dell'obbligo previsto dal comma 2.

4. L'intesa di filiera o il contratto quadro di cui agli articoli 9 e 10 del decreto legislativo 27 maggio 2005, n. 102, hanno per scopo, altresì, l'integrazione della filiera agroenergetica, la valorizzazione, la produzione, la trasformazione, la commercializzazione, la distribuzione di biomasse agricole e di biocarburanti di origine agricola. Gli imprenditori agricoli e le imprese di produzione e di distribuzione di biocarburanti e i soggetti interessati, pubblici o privati, stipulano contratti di coltivazione e fornitura in attuazione degli articoli 11, 12 e 13 del predetto decreto legislativo n. 102 del 2005.

5. Il CIPE, sentita la Conferenza permanente per i rapporti tra lo Stato, le regioni e le province autonome di Trento e di Bolzano, su proposta del Ministro delle attività produttive e del Ministro delle politiche agricole e forestali, entro trenta giorni dalla data di entrata in vigore della legge di conversione del presente decreto, delibera la disciplina dei contratti di programma agroenergetici, individuando l'amministrazione competente per la loro stipula. I contratti di programma agroenergetici hanno rilevanza territoriale nazionale e sono finalizzati alla creazione di occupazione aggiuntiva, anche mediante l'attivazione di nuovi impianti. È assicurata priorità nella stipula dei predetti contratti ai soggetti che riconoscono agli imprenditori agricoli una quota dell'utile conseguito in proporzione ai conferimenti della materia prima agricola.

6. La sottoscrizione di un contratto di coltivazione e di fornitura, o contratti ad essi equiparati, o di un contratto di programma agroenergetico costituisce titolo preferenziale:

a) nei bandi pubblici per i finanziamenti delle iniziative e dei progetti nel settore della promozione delle energie rinnovabili e dell'impiego dei biocarburanti;

b) nei contratti di fornitura dei biocarburanti per il trasporto ed il riscaldamento pubblici.

7. Le pubbliche amministrazioni stipulano contratti o accordi di programma con i soggetti interessati al fine di promuovere la produzione e l'impiego di biomasse e di biocarburanti

di origine agricola, la ricerca e lo sviluppo di specie e varietà vegetali da destinare ad utilizzazioni energetiche.

8. Ai fini dell'articolo 21, comma 5, del testo unico di cui al decreto legislativo 26 ottobre 1995, n. 504, il biogas è equiparato al gas naturale.

9. Ai fini dell'articolo 11 del decreto legislativo 16 marzo 1999, n. 79, e successive modificazioni, il gestore della rete di trasmissione nazionale assicura la precedenza, per una quota annuale fino al 30 per cento, all'energia elettrica prodotta da biomasse o da biogas oggetto di un'intesa di filiera, o di un contratto quadro, o di un contratto di programma agroenergetico, stipulati ai sensi del presente articolo.

10. Gli operatori della filiera di produzione e distribuzione dei biocarburanti di origine agricola devono garantire la tracciabilità e la rintracciabilità della filiera. A tal fine realizzano un sistema di identificazioni e registrazioni di tutte le informazioni necessarie a ricostruire il percorso del biocarburante attraverso tutte le fasi della produzione, trasformazione e distribuzione, con particolare riferimento alle informazioni relative alla biomassa ed alla materia prima agricola, specificando i fornitori e l'ubicazione dei siti di produzione.

11. All'articolo 1, comma 423, della legge 23 dicembre 2005, n. 266, sono apportate le seguenti modificazioni:

a) dopo le parole: "energia elettrica", sono inserite le seguenti: "e calorica";

b) dopo le parole: "da fonti rinnovabili agroforestali", sono inserite le seguenti: "e fotovoltaiche".

E' quindi evidente come sia stato attivato un sistema di incentivazione a favore dei biocarburanti seppure in fase embrionale rispetto a quanto fatto da altri paesi dell'Unione europea.

Molto interessanti, inoltre, sono le considerazioni sui biocarburanti contenute nel documento comunitario COM(2005) 628 definitivo "Piano d'azione per la biomassa" del 7/12/2005.

Questo documento afferma che affinché il biodiesel risulti competitivo, il prezzo del petrolio dovrebbe aggirarsi sui 75 EUR al barile, mentre nel caso del bioetanolo il prezzo dovrebbe salire a 95 EUR al barile. Se il prezzo dei combustibili fossili includesse i costi esterni, aumenterebbero le fonti di biomassa competitive.

Il Piano d'azione comunitario auspica inoltre che si modifichi la norma EN 14214 per favorire l'impiego di una gamma più ampia di oli vegetali per la produzione di biodiesel, nella misura possibile senza che si abbiano effetti negativi di rilievo sul rendimento del carburante e indica la possibile strada di introduzione dell'etanolo al posto del metanolo per la produzione di biodiesel in quanto l'Europa ha una elevata capacità di produrre etanolo.

# Capitolo III

*Stato dell'arte*

## **Introduzione**

*La recente crisi petrolifera e il crescente interesse da parte dell'opinione pubblica sulle tematiche ambientali, hanno incrementato studi su tutte le energie "pulite". Sempre di più le fonti rinnovabili, e tra queste le biomasse, stanno riscuotendo sempre più interesse da parte della comunità.*

*Gli studi sul Biodiesel sono numerosissimi, e, dato anche il crescente interesse da parte dell'opinione pubblica, tali studi vengono sempre più pubblicizzati anche dai mass-media.*

*Le notizie divulgate, anche da parte di organi non specializzati, non sono sempre corrette da un punto di vista scientifico, e spesso sono circolate notizie in parte o del tutto errate sull'utilizzo del Biodiesel come carburante ecologico per la trazione terrestre.*

*C'è da dire comunque, che anche nel mondo scientifico, le notizie sono spesso contrastanti, anche perché, considerando tutte le tipologie di Biodiesel ad oggi conosciute e la diversità dei motori ad accensione per compressione in circolazione, non è facile presentare dati in maniera oggettiva.*

*Nel presente capitolo si riporta un quadro generale della letteratura mondiale sul Biodiesel, tale analisi sarà incentrata sull'effetto del Biodiesel*

*sulle emissioni nocive dei motori a ciclo Diesel. Vengono riportati studi da parte di enti e associazioni autorevoli come l'EPA, e studi eseguiti da parte di singoli gruppi di ricerca. Lo scopo è quello di riportare lo "stato dell'arte" sul Biodiesel e cercare di fare un po' di chiarezza sulla notevole mole di dati disponibili.*

### 3.1 EPA

L'ultimo documento ufficiale presentato dall'EPA [31] ha lo scopo di fornire informazioni alle parti interessate che vogliono valutare la possibilità dell'uso del Biodiesel come sostituto del gasolio commerciale per autotrazione. Tale documento non affronta temi quali qualità dell'aria, costi di produzione o distribuzione del Biodiesel, esso è incentrato principalmente sull'impatto ambientale del Biodiesel come combustibile per la trazione terrestre.

Sono stati prima raccolti tutti i dati pubblici disponibili sul Biodiesel, e dopo un'analisi approfondita per correlare tutti i dati, sono stati presentati i risultati dell'influenza del Biodiesel sulle emissioni regolamentate.

Lo studio in questione è stato poi diviso in due parti, una dedicata ai veicoli pesanti e l'altra dedicata ai propulsori destinati al mercato automobilistico e a quello per impianti fissi.

#### 3.1.1 HEAVY DUTY

L'analisi dei dati disponibili dall'EPA sull'emissioni regolamentate di motori Heavy Duty si può riassumere con il grafico riportato in figura 3.1, in cui è riportata, al variare della percentuale di Biodiesel in miscela con gasolio, la variazione di emissioni di NO<sub>x</sub>, PM, CO e HC rispetto al gasolio commerciale.

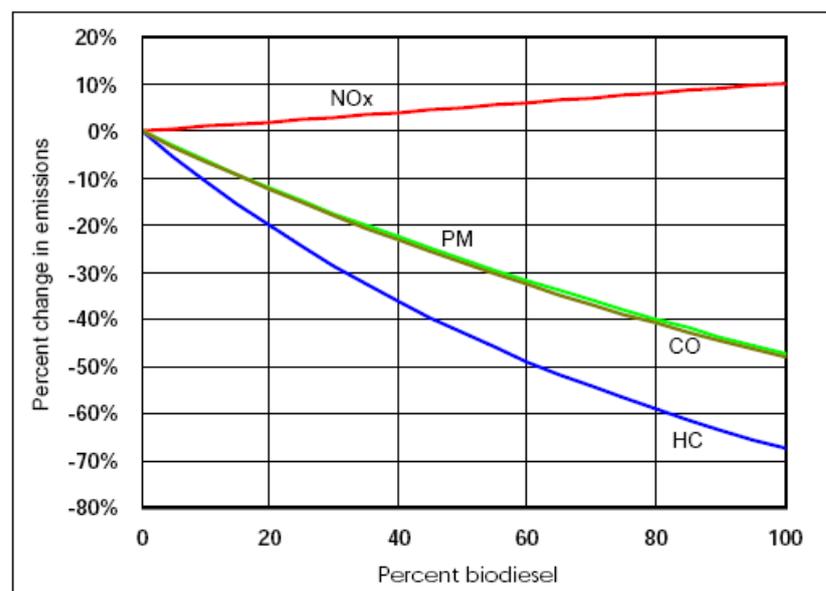


Figura 3.1

I risultati riportati sono nella forma più generale possibile, e sintetizzano un dato noto in letteratura: all'aumentare della percentuale di Biodiesel in una sua miscela con il gasolio, le emissioni di HC CO e PM diminuiscono, mentre gli ossidi di azoto aumentano al massimo del 10% nel caso il motore sia alimentato con Biodiesel puro.

Entrando nel dettaglio dei singoli inquinanti, si riportano in figura 3.2 i dati sperimentali utilizzati per i singoli inquinanti, ed è possibile osservare che in alcuni casi il trend mostrato in figura 1 non è rispettato, ci sono infatti esperienze in cui le emissioni di NOx risultano inferiori rispetto al gasolio, ad altre in cui PM e HC aumentano.

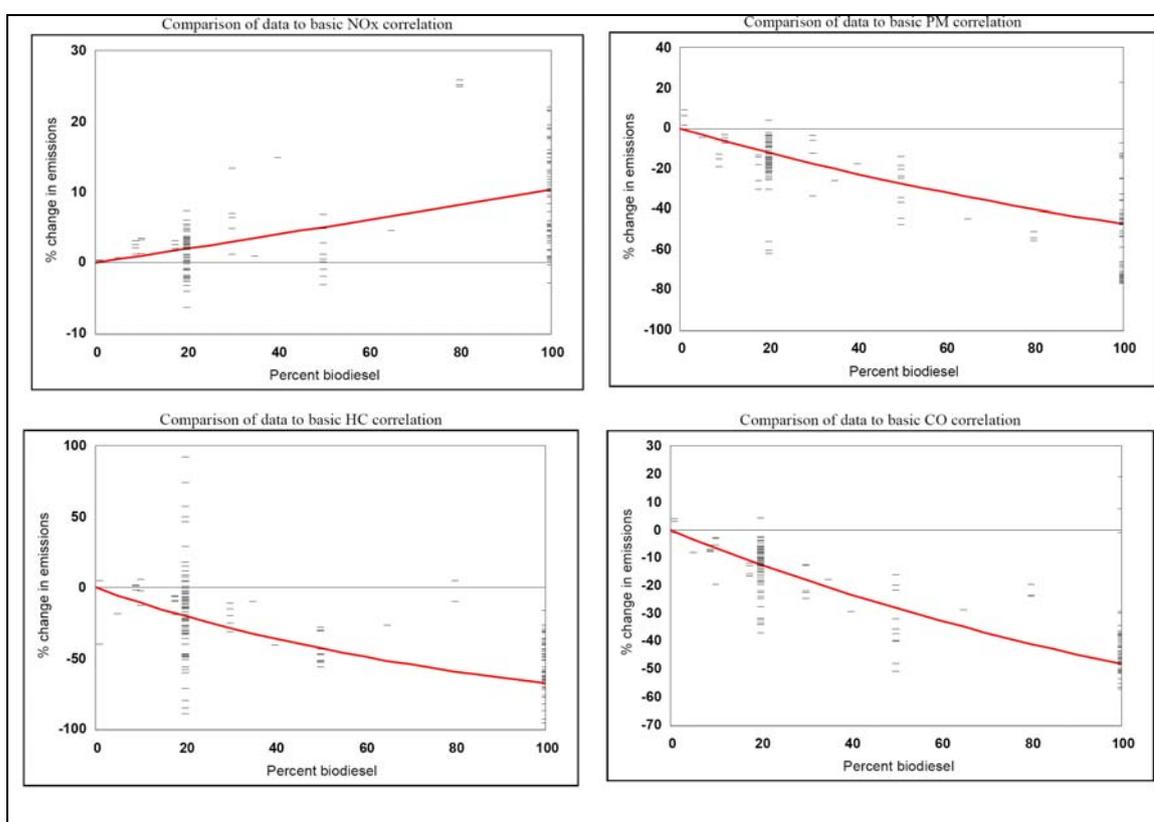


Figura 3.2

L'aumento delle emissioni di NOx con l'aumentare della concentrazione di Biodiesel potrebbe essere un deterrente per l'uso del Biodiesel, per questo, è sembrato appropriato considerare le condizioni sotto le quali gli NOx appaiono decrescere con l'aumento della concentrazione di Biodiesel. Bisogna comunque tener conto che alcuni risultati possono essere dovuti semplicemente alla variabilità delle prove sperimentali. L'analisi delle medie dei risultati delle prove sperimentali disponibili ha portato l'EPA ad affermare che misure su miscele al 20% di Biodiesel mostrano una diminuzione di

*Tesi di Dottorato - Ing. Dario Buono – L' applicazione di Biocombustibili...*

emissioni di NOx nel 10% dei casi, anche se la media di tutti i campioni mostra un aumento del 10%. Ulteriori analisi dell'EPA volte alla comprensione del fenomeno, in cui si è tenuto conto di molteplici aspetti quali l'olio di origine del Biodiesel, il tipo di propulsore, condizione di test, non hanno portato a nessuna conclusione di carattere generale.

A causa del minor potere calorifero netto, il consumo di combustibile con il Biodiesel aumenta, e anche in questo caso non è possibile quantificare questo fenomeno, a causa della notevole varietà di propulsori esaminati.

Per quanto riguarda le emissioni di anidride carbonica, l'EPA non ha tenuto conto dei benefici derivanti dalle colture delle piante da semi, ma sono state considerate solo le emissioni dovute dall'uso finale del Biodiesel. L'analisi di questo inquinante è stata condotta anche in funzione del tipo di Biodiesel utilizzato. I risultati sono riportati nella figura 3.3.

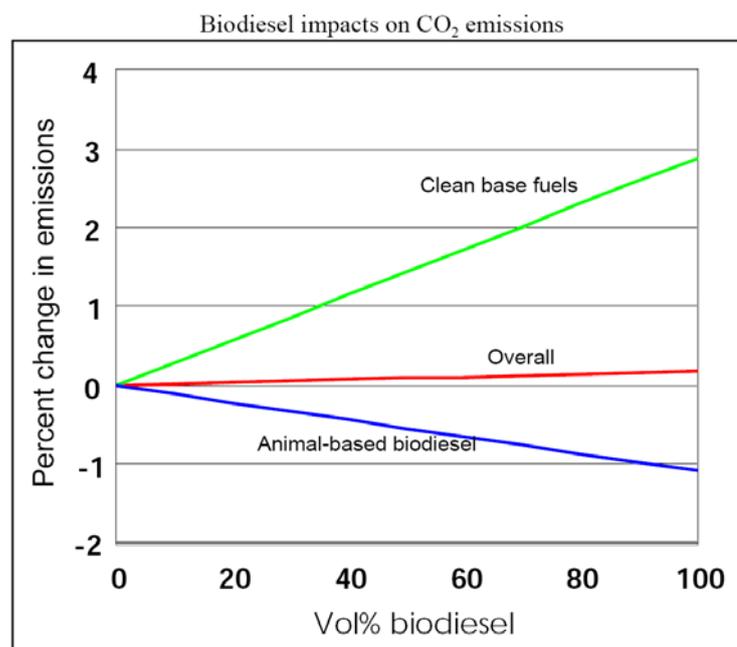


Figura 3.3

### 3.1.2 ANALISI DI DIVERSI TIPI DI BIODIESEL

I risultati dell'EPA sull'influenza del tipo di Biodiesel sulle emissioni inquinanti è riportato nella figura 3.4.

L'EPA ha considerato il Biodiesel prodotto a partire da olio di soia, colza e da resti animali. Il Biodiesel che comporta maggiore emissioni di NOx all'aumentare della sua concentrazione nella miscela è il Biodiesel di olio di soia, mentre quello che da maggiori

benefici per le emissioni di CO è il Biodiesel prodotto da resti animali.

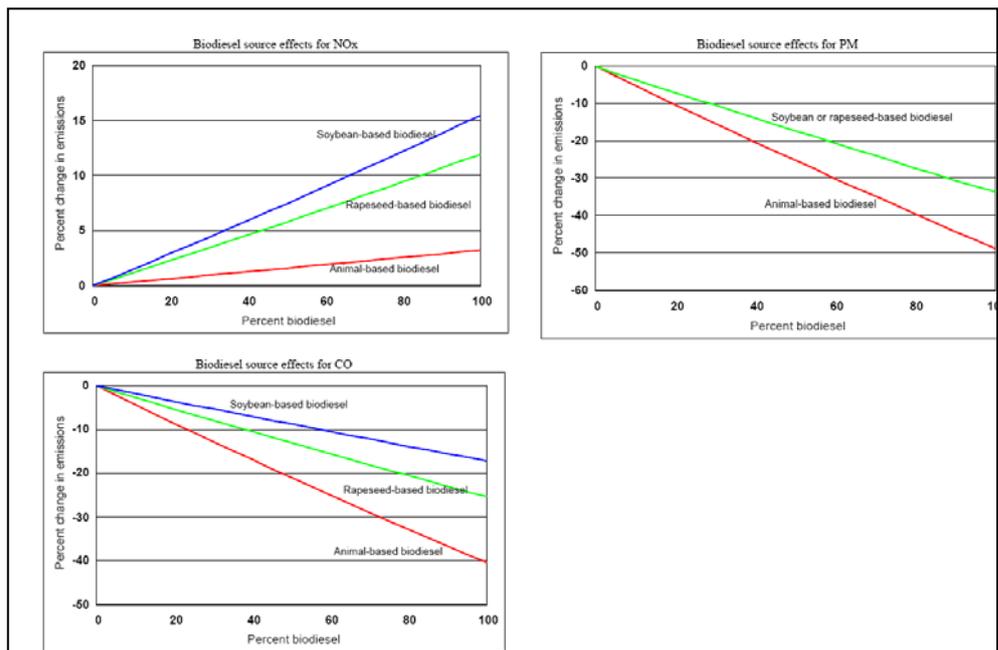


Figura 3.4

### 3.1.3 CONFRONTO

Per concludere l'analisi sui motori Heavy Duty, l'EPA ha confrontato i suoi risultati con precedenti studi sulle emissioni inquinanti di motori Heavy duty, altrettanto autorevoli., sotto riportati:

1. Howell, S., "Emissions Summary for Biodiesel," MARC-IV Consulting, Inc., memorandum to Sam McCahon, December 8, 2000
2. Lindhjem et al, "Impact of Biodiesel Fuels on Air Quality," ENVIRON International Corporation Task 1 Report, June 13, 2000
3. Sheehan et al, "Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus," National Renewable Energy Laboratory Final Report, May 1998

I confronti sono riassunti nei grafici seguenti.

E' possibile notare come il trend riportato dall'EPA nella figura 3.1 è coerente con gli altri tre studi ora proposti, segno della buona affidabilità degli studi condotti dall'EPA.

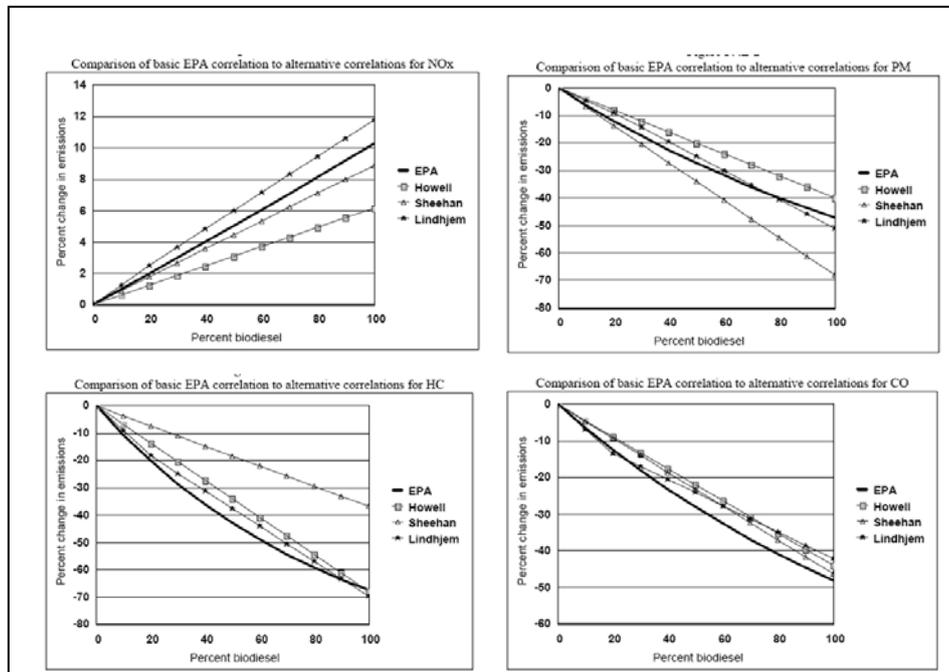


Figura 3.5

### 3.1.4 LIGHT DUTY

I dati a disposizione dell'EPA sui propulsori dei veicoli leggeri e per quelli non destinati alla trazione terrestre sono sensibilmente ridotti rispetto a quelli valutati sui veicoli Heavy duty.

Lo studio è iniziato convertendo i dati nelle stesse unità di misura e poi analizzati e mediati in considerazione sulle miscele utilizzate. Il passo successivo è stato quello di correlare i risultati relativi ai propulsori in questione con i risultati delle analisi riportate nel paragrafo precedente. In pratica si è cercato di calcolare dei valori attesi o predicted, in modo da poter estendere i risultati sui propulsori dei veicoli heavy duty a quelli dei veicoli leggeri e ai motori per impianti fissi.

Dopo numerosi studi l'EPA ha concluso che non è possibile trovare una correlazione sulle prove effettuate, con diverse miscele di Biodiesel, con motori heavy duty e automobilistici, tale affermazione è nata sia dalla notevole diversità di dati disponibili per i due motori in esame, ma anche dalla diversa tipologie di motori, miscele e condizioni di prova realizzate per i rispettivi motori. In pratica l'EPA ha cercato di estendere i risultati ottenuti sui motori Heavy duty su quelli leggeri, ma a causa soprattutto della notevole diversità sulla mole dei dati disponibili, quindi non è stato possibile estendere tali risultati e soprattutto non è stato possibile dare delle indicazioni di carattere generale valide per le categorie di motori in questione.

Si riporta nella figura 3.6 come esempio alcuni confronti tra i risultati attesi e quelli

osservati, ricavati da prove sperimentali.

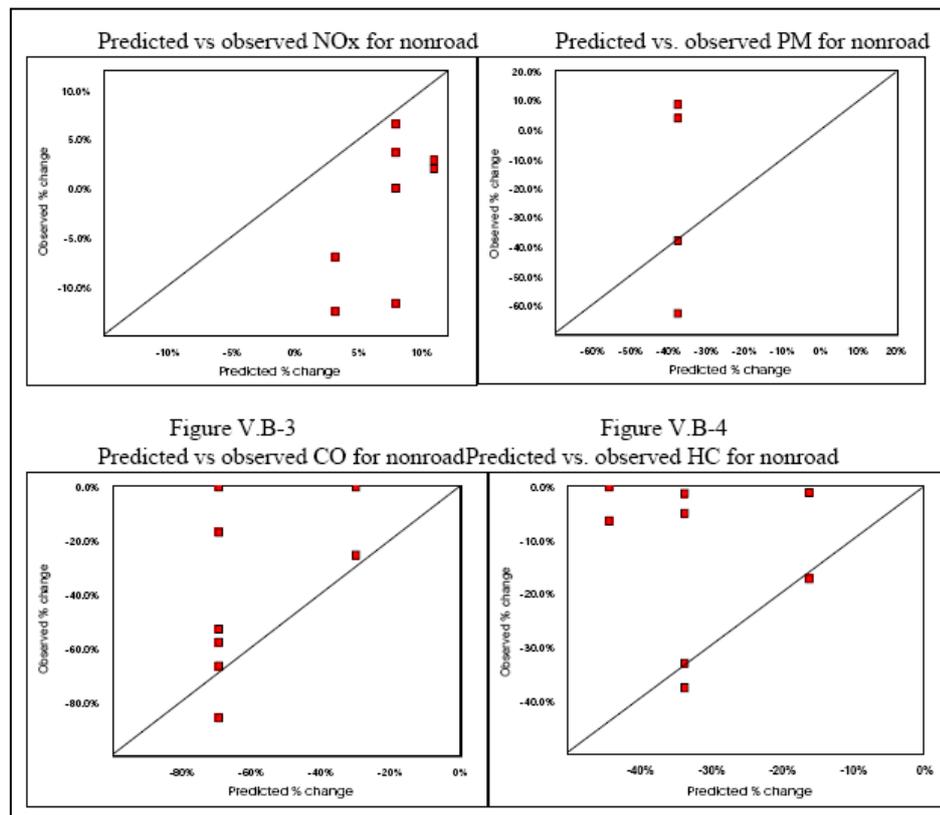


Figura 3.6

Come si evince dai grafici la variazione percentuale dei risultati attesi rispetto a quelli osservati è notevole, confermando che non è possibile estendere i risultati dei motori della trazione pesante a quelli della trazione leggera.

Analoghe considerazioni sono riportate su motori non destinati alla trazione terrestre, per i quali i dati a disposizione sono ancora più scarsi. Per questa tipologia di motori l'EPA non dà alcuna indicazione di carattere generale.

### 3.2 EMULSIONE

Tra i vari studi effettuati sulle emulsioni acqua/combustibile, si riporta ora una campagna di prove [32] effettuate con Biodiesel emulsionato. Le prove sono state effettuate su un motore monocilindrico 4 tempi a ciclo diesel, di 5,4 kW di potenza massima a 3000 RPM.

Questa esperienza ha visto la realizzazione di tre tipologie di prove, -la prima in cui diverse miscele di Biodiesel e gasolio commerciale sono state testate con un tradizionale sistema ad iniezione diretta di combustibile.

-la seconda in cui la stessa tipologia di combustibile è stata sperimentata con un sistema di iniezione ad alta pressione con un iniettore Bosch utilizzato nei sistemi Common Rail.

-La terza in cui una emulsione di 10% di acqua e 90% di Biodiesel e diverse miscele Biodiesel/gasolio sono state utilizzate per alimentare il motore in esame con il sistema di alimentazione tradizionale.

Tutte le prove che verranno ora illustrate sono state eseguite a carico parziale costante, a numero di giri fissato a 1500 RPM e iniettando una massa costante di combustibile pari a 10 mg.

Le prove sperimentali hanno evidenziato che le iniezioni effettuate con il Biodiesel puro, paragonate con quelle effettuate con gasolio commerciale per autotrazione, comportano pressioni in camera maggiori, ritardi all'iniezione ridotti e temperature dei gas più alte a carichi parziali del motore. Inoltre misure effettuate sullo spray hanno messo in luce che, all'aumentare della pressione di iniezione, il diametro della goccia di gasolio aumenta mentre quello del Biodiesel rimane all'incirca costante.

I risultati sulle emissioni gassose allo scarico del motore in prova sono illustrate nelle figure seguenti.

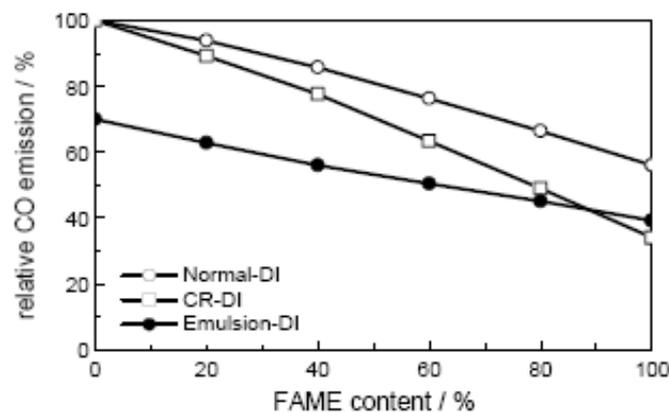


Figura 3.7

Nella figura 3.7 si riporta l'andamento delle emissioni di monossido di carbonio in funzione della percentuale di Biodiesel (FAME:fatty acid methyl ester) in miscela con il gasolio; è evidente come il sistema di iniezione ad alta pressione di combustibile sia più efficiente del sistema tradizionale e come l'emulsione permetta di limitare le emissioni di CO anche utilizzando il sistema di iniezione a bassa pressione.

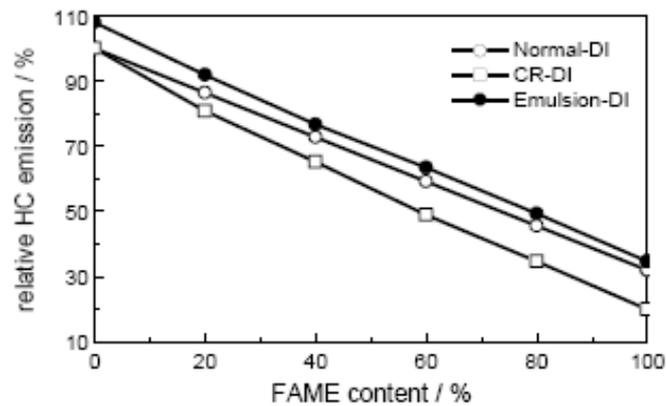


Figura 3.8

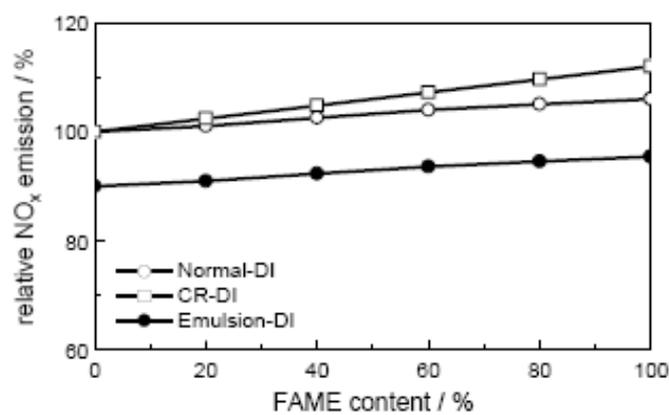


Figura 3.9

Le stesse considerazioni possono essere ripetute anche per gli idrocarburi incombusti e ossidi di azoto, i cui rispettivi andamenti sono riportati nelle figure 3.8 e 3.9. In conclusione l'uso di un'emulsione può comportare una diminuzione delle emissioni di CO e NO<sub>x</sub> a fronte di un modesto aumento delle emissioni di idrocarburi incombusti.

### 3.3 OLIO TRANSESTERIFICATO DI PALMA E COLZA

Il Biodiesel ricavato dall'olio di palma transesterificato ha sempre mostrato ottimi risultati in confronto con il gasolio tradizionale

Verranno ora riportata i risultati di prove sperimentali [33] condotte su un motore monocilindrico, aspirato, 4 tempi a ciclo diesel, con una potenza massima di 11kW a 2200 RPM, che è stato alimentato con due Biodiesel ottenuti da olio di palma e olio di colza e i risultati sono stati confrontati con prove effettuate con gasolio tradizionale.

Le caratteristiche chimico-fisiche dei carburanti in prova sono riassunte nella tabella sottostante:

Table 1 Properties of test fuels

Test fuels		PME	RME	Gas Oil
Cetane number		53	51	56
Net calorific value	MJ/kg	36.85	36.55	43.12
Density @ 288K	kg/m <sup>3</sup>	879	886	832
Viscosity @ 293K	mm <sup>2</sup> /s	7.1	7.7	4.7
Pour point	°C	12.5	-7.5	-12.5
C	wt%	75.6	77.6	87.3
H	wt%	12.9	11.9	12.5
O	wt%	11.5	10.5	0
Sulfur	wt%	0.00018	0.0006	0.05
Water	wt%	0.04	0.03	—
Stoichiometric air-fuel ratio		12.60	12.53	14.2

Tabella 3.1

Il sistema di iniezione del motore oggetto delle prove sperimentali è del tipo “fisso” e nelle condizioni di prova esaminate prevede un’iniezione a 18° CA BTDC.

Le diverse caratteristiche dei 3 combustibili comportano tempi di iniezione, ritardi all’accensione diverse. Un confronto del comportamento dei 3 combustibile è riportato nel grafico seguente:

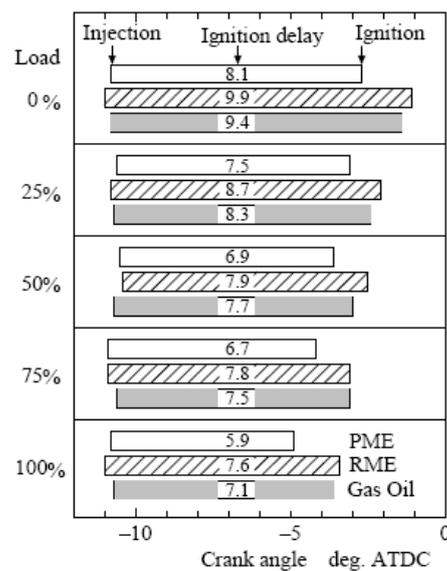


Figura 3.10

Nella figura 3.10 si riporta l’andamento dell’iniezione e del ritardo all’accensione per i tre combustibili in prova in diverse condizioni di carico motore, si nota come il ritardo all’accensione dell’olio di palma è il più basso tra i combustibili esaminati, mentre quello del Biodiesel da olio di colza è maggiore del gasolio tradizionale.

L’aspetto più interessante delle prove è sicuramente la diminuzione delle emissioni di NOx quando il motore è alimentato con Biodiesel di olio di palma, rispetto a quando è alimentato con gasolio commerciale. I risultati sulle emissioni

allo scarico al variare del carico motore sono riportati nei diagrammi sottostanti:

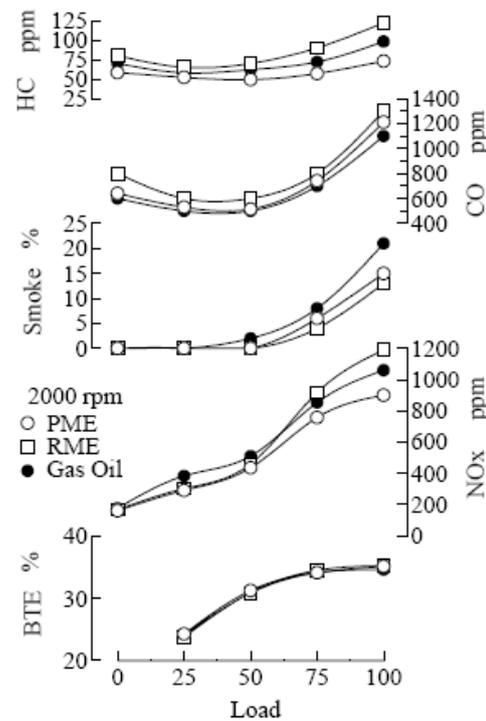


Figura 3.11

Anche gli idrocarburi incombusti del Biodiesel da palma risultano inferiori probabilmente dovuto al minore ritardo all'accensione di questo combustibile, bisogna sottolineare che alcuni risultati sono in contrasto con i dati riportati nei precedenti paragrafi, ad esempio si evidenzia che i livelli di monossido di carbonio del Biodiesel di olio di colza (RME) risultano superiori a quelli rilevati con il gasolio.

Studi effettuati sulla pressione in camera di combustione e sulla legge di rilascio del calore, a partire da dati sperimentali del motore in prova hanno evidenziato comportamenti abbastanza simili per i tre combustibile, si evidenzia una curva del rilascio leggermente più bassa per il Biodiesel da palma, che spiega i minori livelli di NOx emessi quando il motore è alimentato con questo tipo di combustibile. In figura 3.12 si riportano le grandezze esaminate a carico massimo a 2000 RPM.

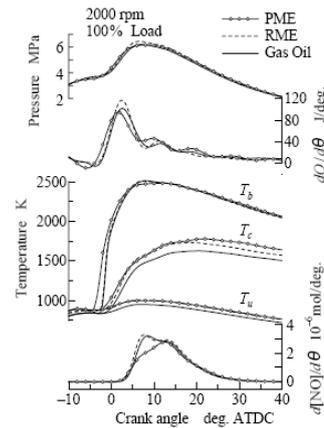


Figura3.12

La stessa tipologia di prove è stata effettuata anche con miscele di acido grasso oleico e palmitico. Sono prove che hanno voluto verificare l'influenza della composizione dell'acido grasso. In alcuni casi, infatti, è stato necessario preriscaldare la miscela di combustibile per avviare il motore, a riprova del fatto che olii non transesterificati non possono essere considerati come validi combustibili per motori Diesel.

### 3.4 OLIO DI PALMA

Per meglio analizzare il comportamento del Biodiesel da olio di palma si riporta un'altra esperienza [34] dove sono state misurate le prestazioni e le emissioni di un motore diesel monocilindrico, aspirato, di 1000 cm<sup>3</sup> ad iniezione diretta, alimentato sia con olio di palma grezzo che con Biodiesel derivato dall'olio di palma. I risultati sono stati quindi confrontati con quelli del gasolio commerciale.

Le prove hanno evidenziato che il motore alimentato a Biodiesel ha un consumo specifico maggiore e emissioni di CO, CO<sub>2</sub> e HC minori rispetto al gasolio commerciale.

Le caratteristiche del combustibile sono riportate nella tabella seguente:

Nelle figure 3.13 – 3.18 si riportano il consumo specifico, l'efficienza termica, le emissioni di CO, CO<sub>2</sub> e la fumosità al variare del numero di giri del motore in prova alimentato con gasolio (Diesel Oli), olio di palma grezzo (CPO) e con Biodiesel (RBDPO).

	Biodiesel 100%	
	CPO	RBDO
Spec Grav (25°C)	0.870	0.869
v (CSt, 40°C)	6.72	6.04
Cetane Index	62.1	61.51
LHV (MJ/kg)	37.114	36.764
I.V. (mg/g)	47.2	48.5
A.V. (mg KOH/g)	0.5	0.5
Free glycerol (%m)	0.02	0.02
Bounded glycerol (%m)	1.125	1.125

Note: I.V.= iodine value, A.V. = acid value

Tabella 3.2

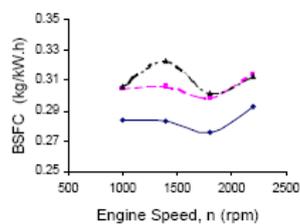


Figura 3.13

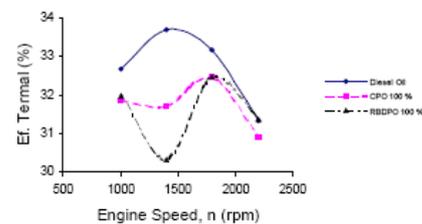


Figura 3.14

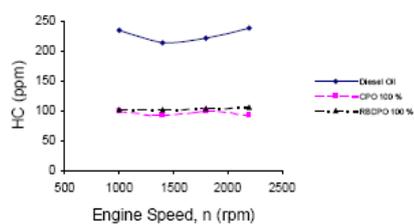


Figura 3.15

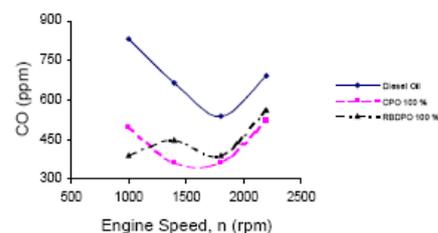


Figura 3.16

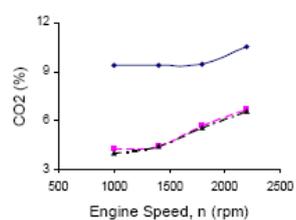


Figura 3.17

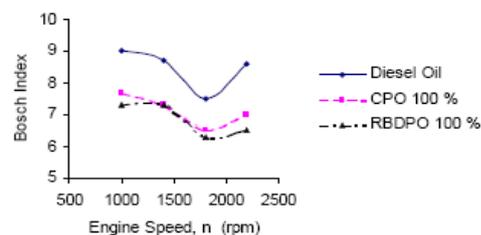


Figura 3.18

I risultati delle prove sperimentali mostrano un comportamento abbastanza simile per l'olio grezzo e per il Biodiesel, da sottolineare comunque che le emissioni di HC e CO sono inferiori rispetto al gasolio, mentre risulta maggiore il consumo specifico misurato al freno.

### 3.5 OLIO DI GIRASOLE E LPG

Il metil-estere di olio di girasole può essere utilizzato come fluido pilota per innescare la combustione in un motore alimentato con GPL (LPG?).

Si riportano delle prove sperimentali [35] effettuate su un motore monocilindrico, che gira a punto fisso, che è stato alimentato con iniezione costanti di 0,65 kg/hr.

Nel lavoro non vengono eseguiti confronti di prestazione con il gasolio o altro combustibile commerciale.

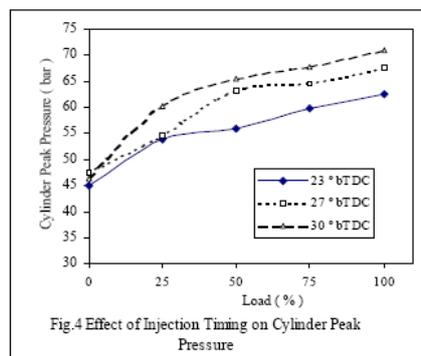


Figura 3.17

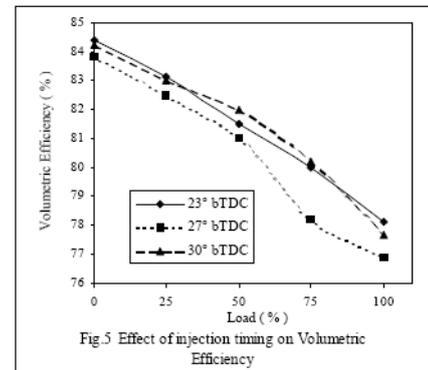


Figura 3.18

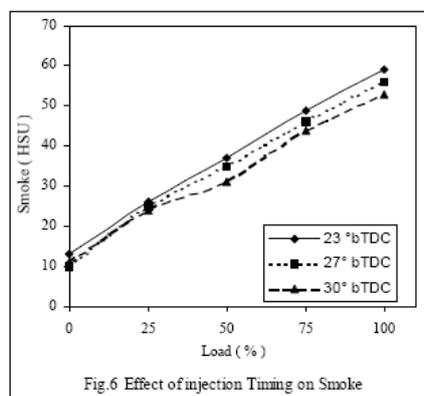


Figura 3.20

Nelle figure 3.17 – 3.20 si riporta la pressione in camera di combustione, l'efficienza volumetrica e la fumosità al variare del carico del motore, in funzione dell'angolo di iniezione del combustibile.

Lo scopo della ricerca è stato quello di verificare la possibilità di utilizzare il Biodiesel come combustibile pilota in un motore Diesel alimentato con GPL. Il motore ha funzionato con livelli di emissioni nella norma, ma non è possibile trarre

alcun risultato di carattere generale non essendo state riportate prove in cui il motore è stato alimentato con gasolio commerciale.

### 3.6 RIGENERAZIONE FILTRO PARTICOLATO

Nel presente paragrafo si riportano alcune prove sperimentali [36] eseguite su un motore monocilindrico, 4 tempi a ciclo diesel, con una camera di combustione toroidale e un a cilindrata di 0,857 litri, non sovralimentato. Il motore è stato alimentato con un Biodiesel contenente un catalizzatore  $\text{CH}_3\text{OK}$ , usato nel processo di produzione del Biodiesel stesso. Sulla linea di scarico del motore è stato installato un DPF commerciale.

Il Biodiesel è stato prodotto a partire da olio esausto da cucina, e durante il processo di raffinazione  $\text{CH}_3\text{OK}$  funge da catalizzatore durante il processo di transterificazione dell'olio esausto.

Le prove sono state eseguite alternando condizioni di basso e alto carico, e sono state effettuate alimentando il motore con gasolio per autotrazione e con Biodiesel additivato con  $\text{CH}_3\text{OK}$ . Nelle figure 3.21 – 3.24 sono riportati i risultati delle prove sperimentali

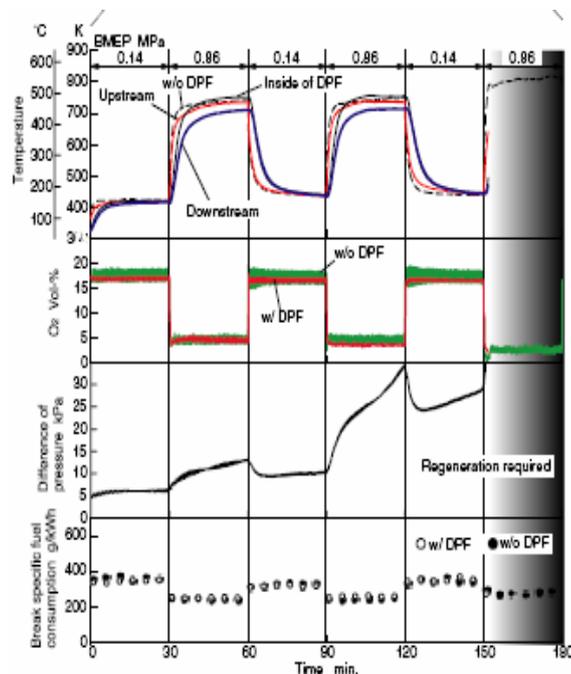


Figura:3.21 Andamento del consumo specifico e di P e T in prossimità del DPF

COMBUSTIBILE: GASOLIO

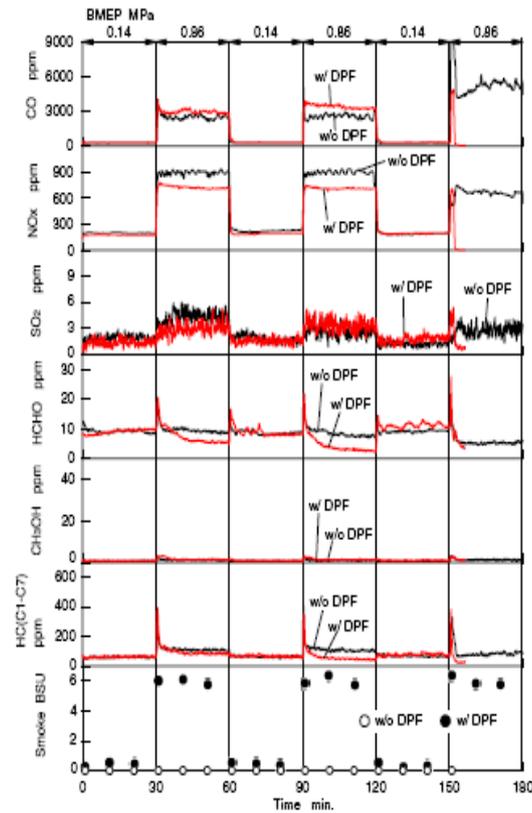


Figura 3.22 :Andamento delle emissioni allo scarico  
COMBUSTIBILE GASOLIO

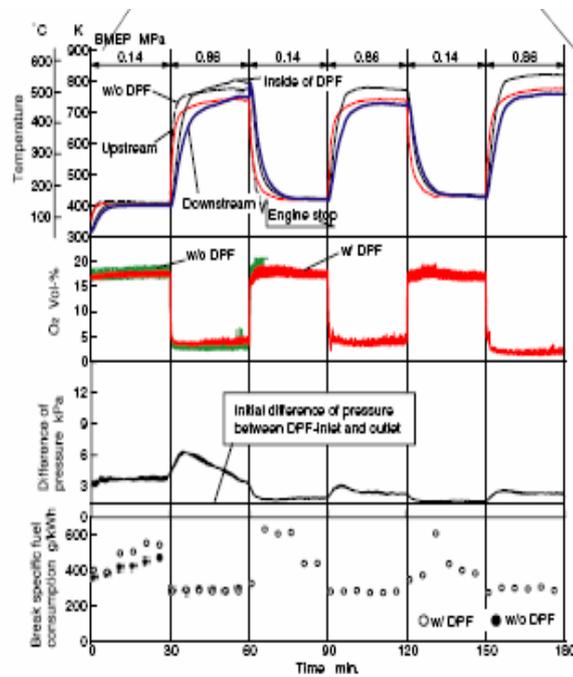


Figura: 3.23 Andamento del consumo specifico e di P e T in prossimità del DPF  
COMBUSTIBILE BIODIESEL additivato con CH<sub>3</sub>OK

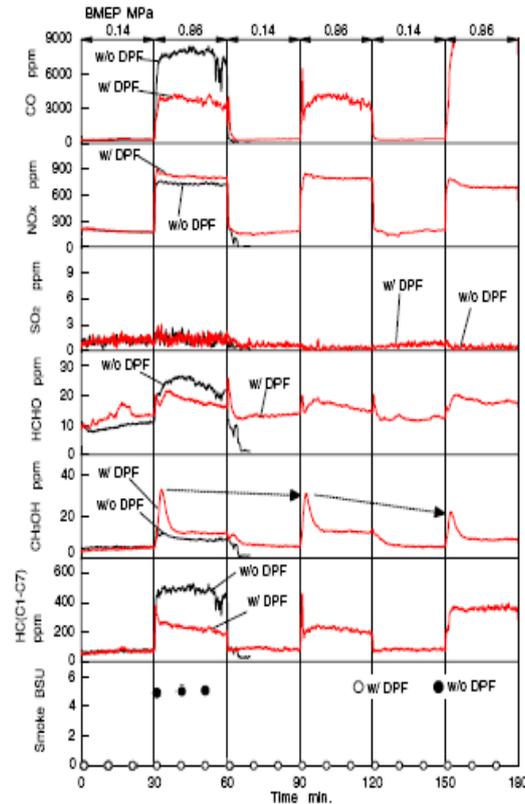


Figura 3.24 :Andamento delle emissioni allo scarico  
COMBUSTIBILE BIODIESEL additivato con CH<sub>3</sub>OK

Nelle figure 3.21 e 3.22 sono mostrati l'andamento nel tempo delle temperature e delle pressioni misurate in prossimità del DPF e i livelli di emissioni inquinanti emessi dal motore alimentato con gasolio commerciale. Invece nelle figure 3.23 e 3.24 le stesse grandezze acquisite quando il motore è stato alimentato con Biodiesel additivato con CH<sub>3</sub>OK.

L'aspetto più interessante è la differenza dell'andamento nel tempo della pressione differenziale, misurata tra monte e valle DPF, nel caso Biodiesel e nel caso del gasolio. Quando il motore è alimentato con gasolio (figura 3.21) la pressione differenziale del DPF aumenta, segno che la trappola accumula particolato in ogni condizione di carico motore, inoltre dopo circa 120 minuti di prova è necessario procedere alla rigenerazione della trappola. Alimentando il motore con Biodiesel additivato, l'accumulo di particolato e quindi la pressione differenziale monte valle DPF cambia sensibilmente al variare del carico e soprattutto tale pressione si mantiene sempre al di sotto della soglia per cui è necessario rigenerare il filtro antiparticolato. Analizzando le temperature nei due casi, si vede come nel caso del Biodiesel esse sono sensibilmente più alte, e nelle condizioni di carico alto, raggiungono valori superiori ai 500 °C. L'abbassamento della pressione differenziale

*Tesi di Dottorato - Ing. Dario Buono – L' applicazione di Biocombustibili...*

è indice che ad alti carichi si verifica una autorigenerazione della trappola.

In conclusione, nelle particolari condizioni esaminate nel presente paragrafo, è possibile affermare che un motore alimentato a biocombustibili additivato con  $\text{CH}_3\text{OK}$ , durante il funzionamento a basso carico si ha accumulo di particolato nel DPF, che si rigenera automaticamente quando il motore funziona in condizioni di carichi elevati.

### 3.7 CATALIZZATORE OSSIDANTE

Due diversi tipi di Biodiesel, denominati BDF-A e BDF-B sono stati testati [37] su un veicolo Mercedes al fine di verificarne l'applicabilità su un filtro antiparticolato (DPF).

Il Biodiesel denominato BDF-A è stato raffinato mediante un processo di centrifuga, mentre il BDF-B, che risulta più puro, è stato trattato mediante un processo di sedimentazione e successivi di lavaggi con acqua ed essiccazione a caldo. Il processo di rigenerazione del DPF è previsto mediante un riscaldatore esterno.

Le prove hanno avuto lo scopo di valutare i chilometri che è possibile percorrere alimentando il motore con i due tipi di Biodiesel in prova, prima che fosse necessaria la rigenerazione della trappola. Allo scopo è stata misurata la pressione dei gas di scarico a monte del DPF, che al superare del valore di soglia indicava la necessità della rigenerazione. Le prove sono state poi ripetute con il gasolio per confrontare le prestazioni dei biocombustibili in esame.

La figura seguente mostra la distanza media che il veicolo in prova, equipaggiato con un DPF, ha percorso prima che si rendesse necessaria la rigenerazione.

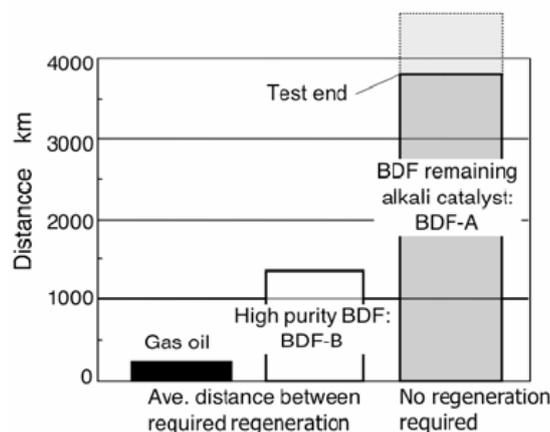


Figura 3.25

Con il gasolio la rigenerazione si è resa necessaria solo dopo circa 300 km, con il combustibile BDF-A dopo circa 1500 km, invece con il BDF-B la rigenerazione non si è resa mai necessaria, anche al termine dei 3000 km percorsi previsti dalla procedura di test. Entrambi i Biodiesel hanno evidenziato inoltre, bassa fumosità durante l'esecuzione del test. Al fine di comprendere meglio le differenze tra i due tipi di Biodiesel (essenzialmente presenza di  $\text{CH}_3\text{OK}$  e  $\text{KOH}$ , dovute al processo di produzione) sono state effettuati dei test a un banco prova motori, in cui è stato installato un motore monocilindrico, 0,857 Litri di cilindrata, dotato di un sistema di iniezione statico, con timing all'iniezione fissato a 17 gradi BTDC. Sulla linea di scarico del motore è stato installato un DPF con caratteristiche analoghe a quello utilizzato per le prove sul veicolo appena descritte. Il Biodiesel utilizzato è ricavato a partire da oli esausti per uso alimentare e il  $\text{CH}_3\text{OK}$  è usato come catalizzatore durante il processo di transesterificazione. I risultati sono stati confrontati con prove effettuate alimentando il motore con Biodiesel raffinato senza l'aggiunta di  $\text{CH}_3\text{OK}$  e con gasolio per autotrazione.

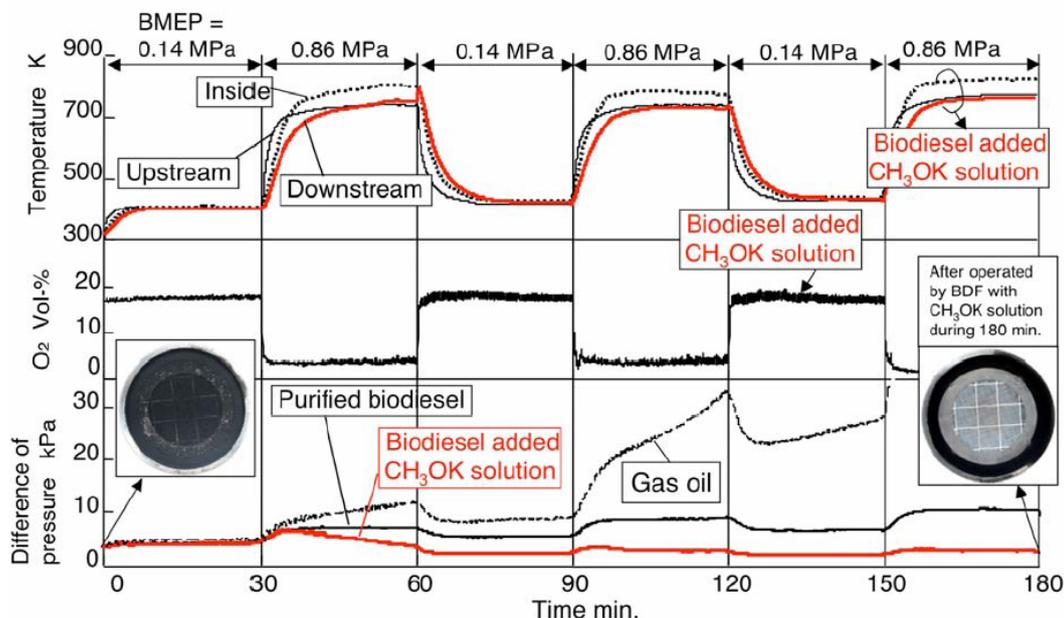


Figura 3.26

Nella figura 3.26 è riportato l'andamento, per i tre combustibili analizzati, della pressione differenziale al DPF, la percentuale di ossigeno misurato in uscita al DPF e la temperatura in prossimità del DPF, durante una prova di 180 minuti in cui il carico motore è stato alternativamente variato tra alto (1,4 bar) e basso (8,6 bar). In questa tipologia di prova è stato possibile far innescare il fenomeno di autorigenerazione della trappola ad alti carichi motore durante il funzionamento con

Biodiesel. In particolare il Biodiesel con  $\text{CH}_3\text{OK}$  presenta un'autorigenerazione molto efficiente, cosa ben evidenziata negli ultimi minuti di prova in cui la pressione differenziale si mantiene sensibilmente più bassa rispetto agli altri due combustibili.

Un'altra interessante analisi effettuata in questa attività è stata l'applicazione di un catalizzatore ossidante (DOC) sulla linea di scarico a monte e poi a valle della trappola del particolato. Sono state investigate diverse configurazioni così come mostrato nella figura seguente:

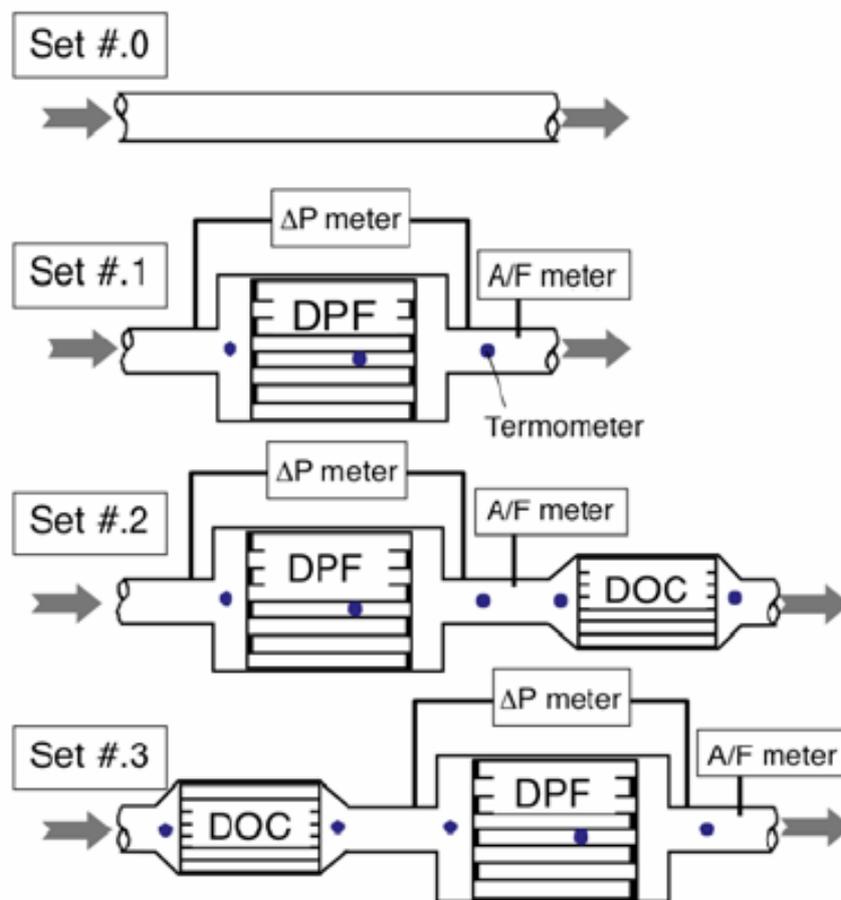


Figura 3.27

Nelle 4 configurazioni mostrate sono state effettuate sia prove sull'efficienza della auto-rigenerazione che un'analisi delle emissioni inquinanti al variare del carico motore.

I risultati sono mostrati nelle figure successive:

L'analisi della figura 3.28 porta a concludere che nella configurazione Set#3, in cui il catalizzatore ossidante è montato a monte del DPF, l'autorigenerazione non interviene.

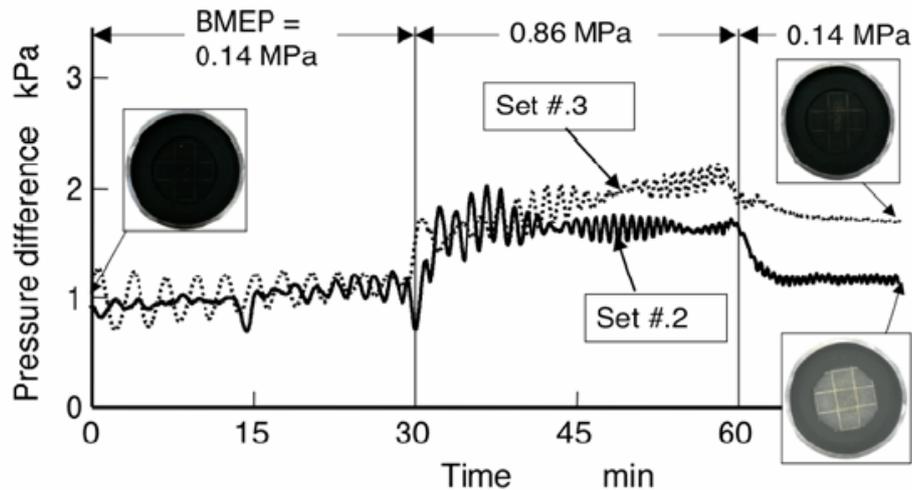


Figura 3.28

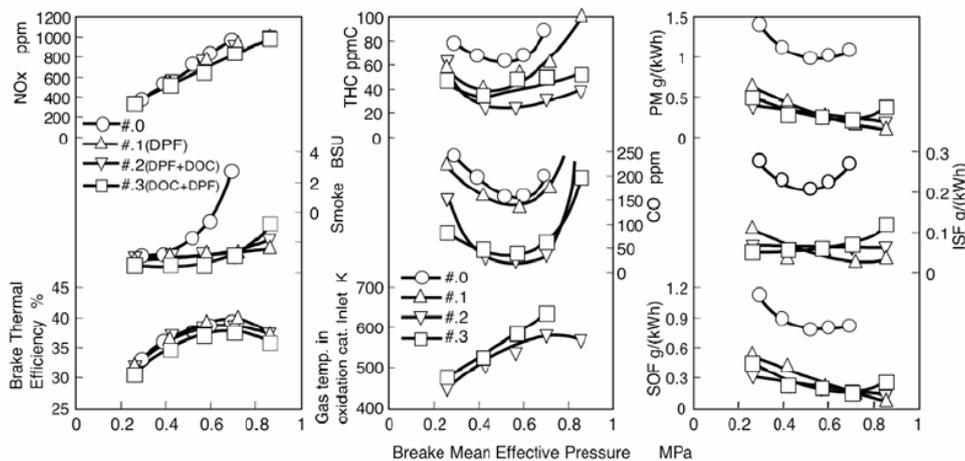


Figura 3.29

La figura 3.29 riporta i risultati della efficienza al freno, fumosità e emissioni di NO<sub>x</sub>, HC, CO, PM e SOF, la temperatura dei gas di scarico a monte del catalizzatore, per le diverse configurazioni testate. Come evidente, non ci sono sensibili differenze tra le configurazioni sul rendimento, mentre per quanto riguarda le emissioni se da un lato è evidente il vantaggio dell'utilizzo del catalizzatore e del filtro antiparticolato, non ci sono apprezzabili differenze delle varie configurazioni esaminate.

Altri studi sono stati effettuati sempre su un motore monocilindrico dotato di un sistema elettronico per la gestione dell'iniezione di combustibile alimentato con Biodiesel prodotto sempre a partire da oli esausti per usi alimentari. Inoltre è stata testata l'influenza del 2-ethylhexyl nitrate (EHN) miscelato al 15%. Il sistema di alimentazione utilizzato in questa parte dell'attività permette la variazione del timing

dell'iniezione.

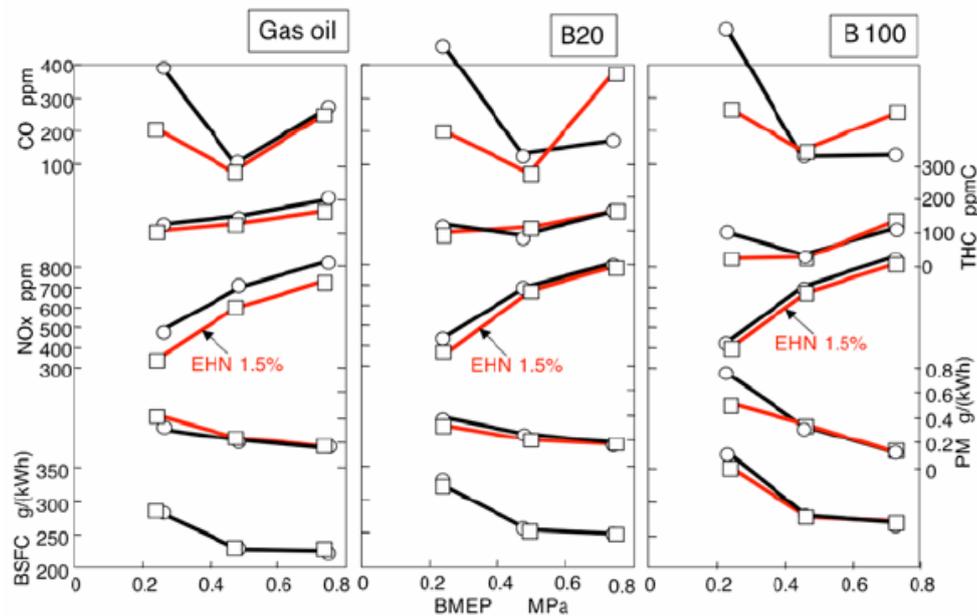


Figura 3.30

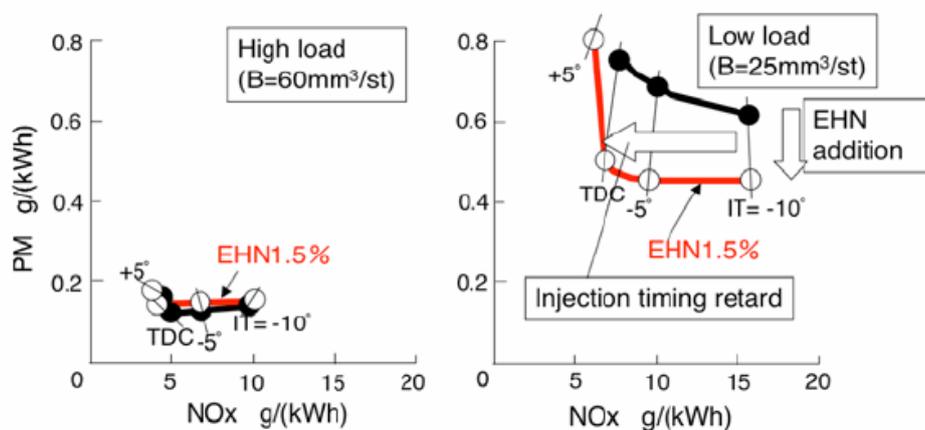


Figura 3.31

### 3.8 CONSIDERAZIONI FINALI

Gli studi riportati in questo paragrafo riportano lo stato attuale della bibliografia disponibile riguardo l'applicazione del Biodiesel come combustibile per motori Diesel. Come è facile notare, i dati sono spesso in contrasto tra di loro, specialmente quelli riguardanti le emissioni inquinanti. L'aspetto che in questa sede si vuole evidenziare è che i risultati si riferiscono a prove non perfettamente confrontabili, data la diversità dei motori in questione e i diversi tipi di Biodiesel oggi in circolazione.

Si può concludere, in definitiva, che, da quanto emerge dagli studi e le esperienze mostrate, il Biodiesel può rappresentare una valida alternativa al gasolio di origine petrolifera, grazie alla sua biodegradabilità e al suo impatto nullo sulla produzione di anidride carbonica.

# Capitolo IV

*Background*

## **Introduzione**

*Ormai da diversi anni, presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Meccanica per l'Energetica di Napoli è in corso un'attività sull'applicazione del Biodiesel su motori Diesel leggeri. Tale attività ha visto lo svolgimento di numerose prove sperimentali su diversi motori, sia con iniezione indiretta che iniezione diretta in camera del combustibile.*

*Nel presente capitolo si riporta una sintesi degli ultimi risultati con lo scopo di introdurre l'attività sperimentale che rappresenta il cuore della presente Tesi.*

*Durante la trattazione emergeranno le principali differenze tra il Biodiesel e il gasolio commerciale, in particolare si porrà attenzione a come alcune caratteristiche, quali rapporto di miscela stechiometrico, densità, potere calorifico inferiore influenzino il comportamento, in termini di emissioni e prestazioni del motore in prova.*

*Tali risultati costituiranno la base di partenza per l'attività che verrà esposta nel prossimo capitolo, in cui si evidenzierà come è possibile ottimizzare la calibrazione della centralina motore in funzione del combustibile utilizzato.*

#### 4.1 LE PROVE: MOTORE INIEZIONE MECCANICA

Si riportano ora i risultati dell'attività svolta nella sala prova del DIME [6], [7], dove un motore Diesel di 1930 cm<sup>3</sup>, con iniezione diretta in camera di combustione e sistema di iniezione meccanica è stato alimentato con Biodiesel puro e con diverse sue miscele con il gasolio (30% – 50% – e 70%). I risultati delle prove, in termini di emissioni e prestazioni sono stati poi confrontati con prove precedenti in cui lo stesso motore è stato alimentato con gasolio commerciale.

Le condizioni operative utilizzate in questa attività sono riportate nella tabella 4.1 e corrispondono, per ciascuno dei combustibili adoperati, a 7 valori di  $\lambda$  fissati tra il minimo ed il massimo carico ad un regime di rotazione pari a 3000 rpm.

$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_{\min}$
3.75	3.12	2.73	2.21	1.95	1.68	Carico Massimo

Tab. 4.1 - Valori dell'indice d'aria adoperati nella prima sessione di prove

##### 4.1.1 ANALISI DELLE PRESTAZIONI: POTENZA, COPPIA E CONSUMO SPECIFICO

Nelle figure 4.1-4.7 sono riportati i risultati sperimentali relativi alle prestazioni del motore alimentato con gasolio e con Biodiesel puro e relative miscele. In proposito, si deve considerare che, pur essendo le reali prestazioni del motore direttamente dipendenti dall'effettivo rapporto aria/combustibile, tenendo conto del differente rapporto stechiometrico del biodiesel (12,6) rispetto a quello del gasolio (14,6), il confronto tra le diverse condizioni operative deve essere effettuato in funzione del rapporto di dosatura relativo  $\lambda = \alpha/\alpha_{st}$ . Per tale motivo, e per la differente densità dei combustibili, il rapporto stechiometrico di ciascuna miscela deve essere determinato con una valutazione per media pesata in base alla composizione della miscela stessa.

Stante quest'ultima osservazione e per i differenti valori del potere calorifico inferiore, anche il confronto tra i due combustibili e le loro miscele va operato in termini di potere calorifico relativo definito come:

$$Q_{rel} = \frac{Q_i}{\alpha_{st}}$$

In base a tale relazione, si può constatare come, compensandosi rispettivamente i valori del rapporto stechiometrico e del potere calorifico, il gasolio ed il metilestere sono caratterizzati da un valore sostanzialmente equivalente del potere calorifico relativo pari a circa 2.900 kJ/kg. Per tener conto degli effetti combinati dei suddetti parametri, un confronto tra risultati sperimentali a parità delle effettive condizioni operative del motore, deve essere quindi effettuato in termini di rapporto di dosatura relativo in modo da assicurare che il processo di combustione della miscela abbia luogo con gli stessi valori di eccesso d'aria rispetto alla massa di combustibile iniettato ad ogni ciclo.

A chiarimento di quanto esposto, nelle figure seguenti sono messi a confronto i risultati sperimentali riportati in funzione sia del rapporto di dosatura  $\lambda$  che del rapporto di dosatura relativo  $\lambda$  riferiti alle condizioni di prova illustrate in tab. 4.1.

In tali figure sono presentati gli andamenti rispettivamente della potenza, della coppia e del consumo specifico rilevati nelle suddette condizioni di prova. Per le differenti proprietà dei combustibili, qualora il confronto venga operato per uno stesso valore del rapporto di dosatura, si osserva un marcato scostamento delle curve rilevate (fig. 4.1, 4.3 e 4.5), che evidenziano, appunto, come il Biodiesel, a parità di quantità di aria e di combustibile introdotto nel cilindro, fornisca prestazioni nettamente inferiori (circa il 20-25 % in meno se puro) a quelle ottenibili con il gasolio. Tale scostamento, come era da aspettarsi, tende ad annullarsi se ci si riferisce, invece, (fig. 4.2, 4.4 e 4.6) al rapporto di dosatura relativo.

Una non trascurabile differenza permane, ovviamente, e soprattutto ai carichi più elevati ( $\lambda = 1.5, 2$ ), tra le curve del consumo specifico (fig. 4.6), essendo tale parametro, per definizione, dipendente in modo inversamente proporzionale dal valore del potere calorifico inferiore. Per operare una comparazione che tenga conto delle diverse proprietà del Biodiesel è necessario, quindi, fare riferimento al consumo specifico di calore, ottenendo, anche in questo caso, come risultato, andamenti delle curve relative ai due combustibili del tutto coincidenti, come mostrato in figura 4.7

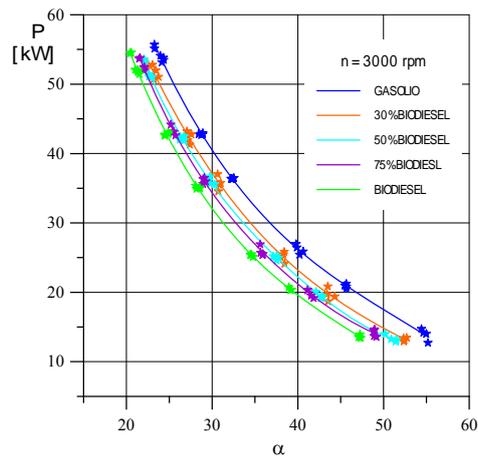


Fig. 4.1

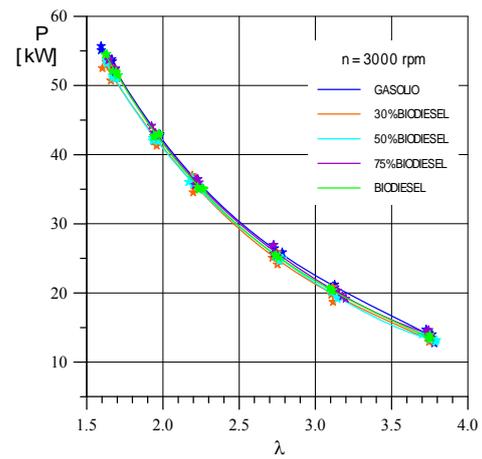


Fig. 4.2

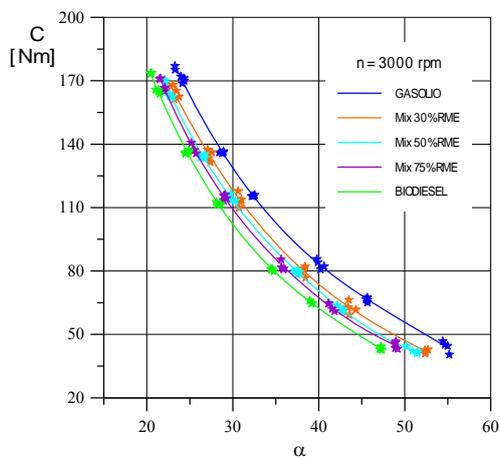


Fig. 4.3

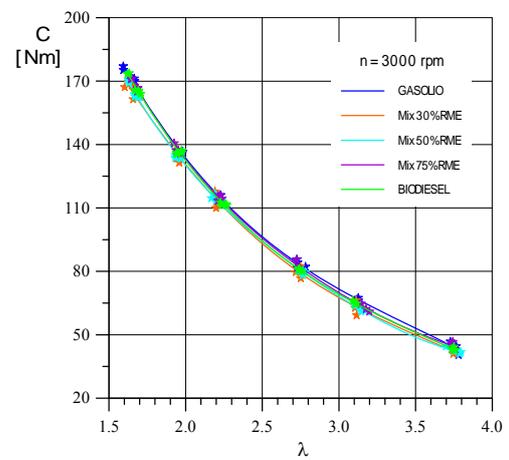


Fig. 4.4

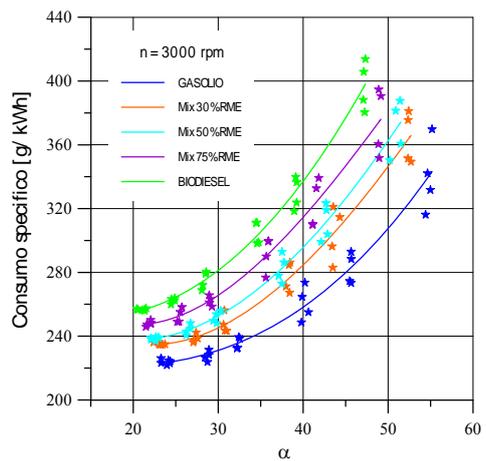


Fig. 4.5

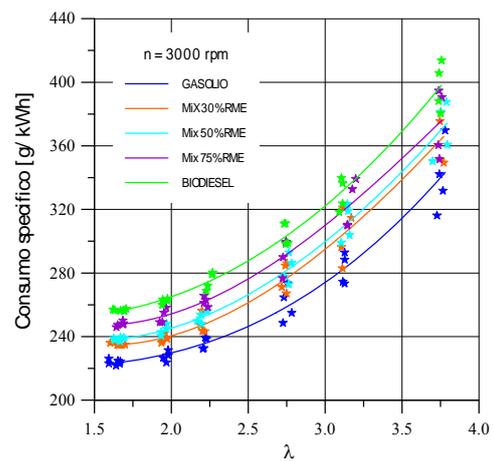


Fig. 4.6

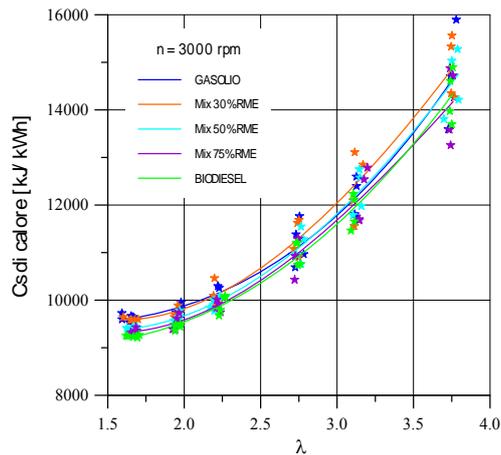


Fig. 4.7

#### 4.1.2 ANALISI DEI CICLI INDICATI

L'esame dei cicli indicati ha evidenziato in generale un valore maggiore sia del picco di pressione, sia del gradiente di questa nella fase di combustione per i dati relativi al biodiesel.

I diagrammi riportati nelle figg. da 4.8 a 4.14 presentano un confronto tra i cicli indicati in ciascuna delle 7 condizioni di funzionamento prescelte. In essi sono riportati, oltre al ciclo indicato relativo alle fasi di compressione, combustione ed espansione, un particolare del ciclo indicato che evidenzia il differente andamento della pressione, per le diverse miscele, nell'intervallo angolare a cavallo del punto morto superiore.

L'esame di tali figure conferma che, perlomeno al regime di rotazione investigato, in ogni condizione di carico, il Biodiesel comporta valori sia del picco di pressione, sia del gradiente, superiori a quelli relativi al gasolio.

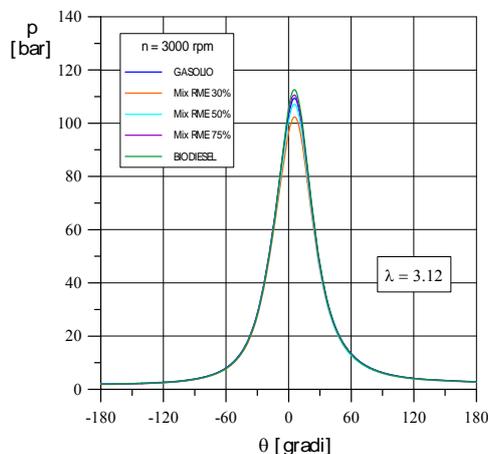


Fig. 4.8

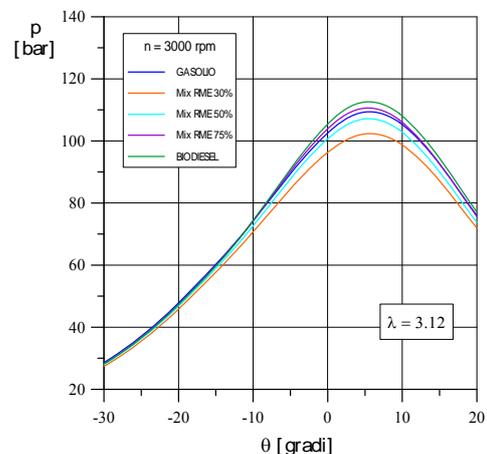


Fig. 4.9

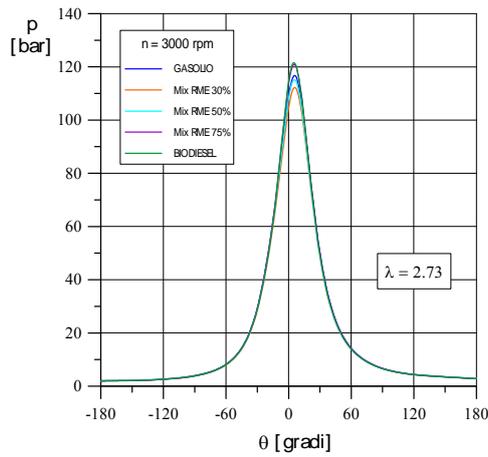


Fig. 4.10

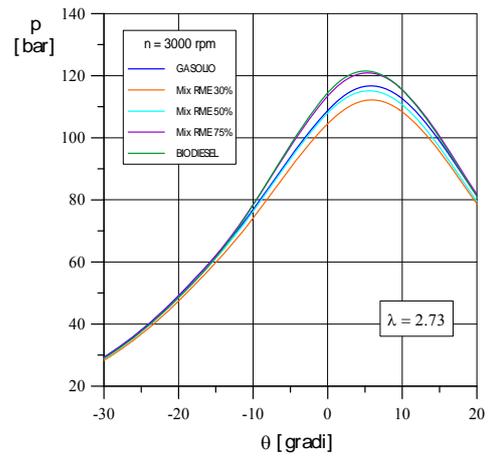


Fig. 4.11

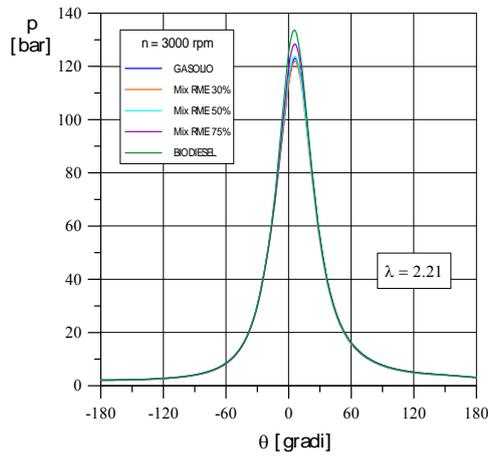


Fig. 4.12

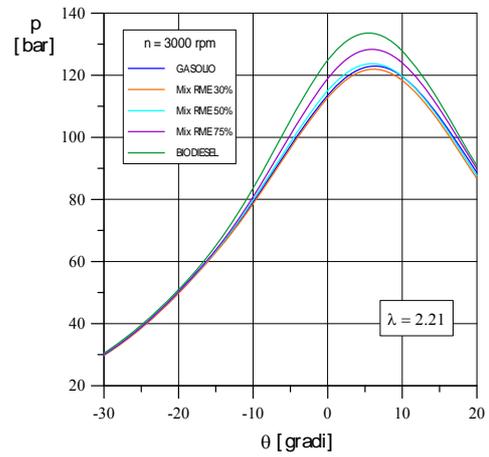


Fig. 4.13

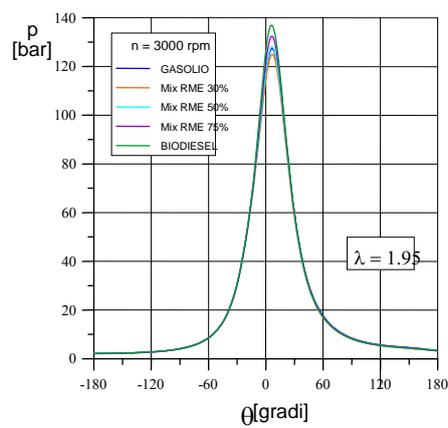


Fig. 4.14

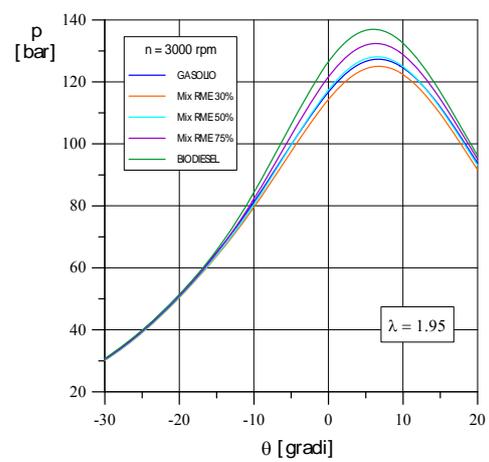


Fig. 4.15

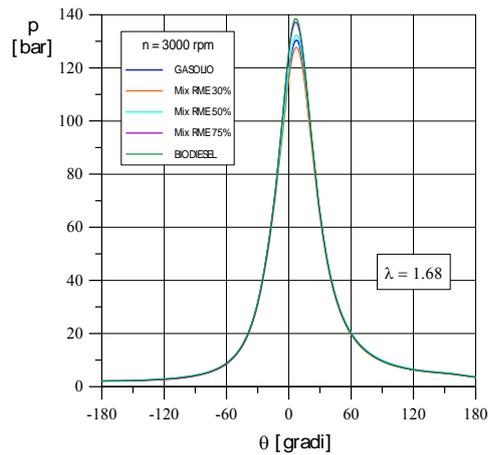


Fig. 4.16

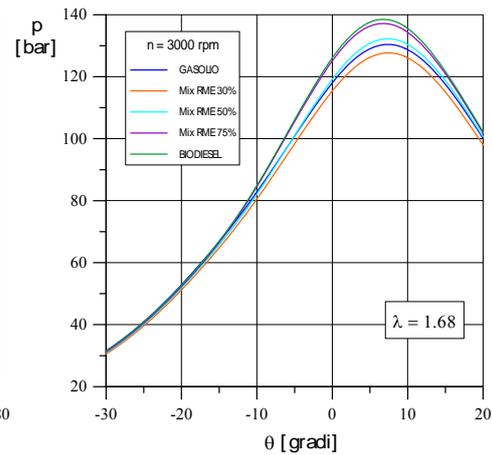


Fig. 4.17

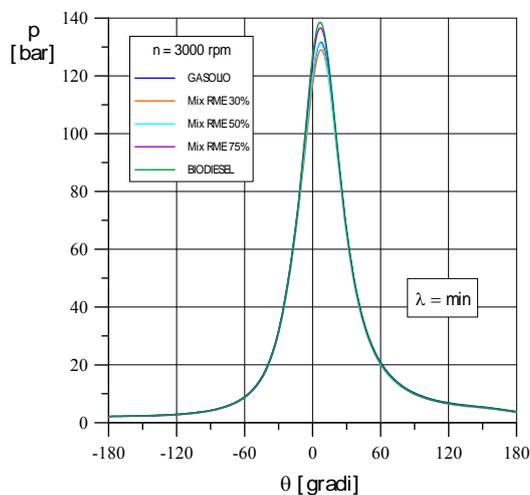


Fig. 4.18

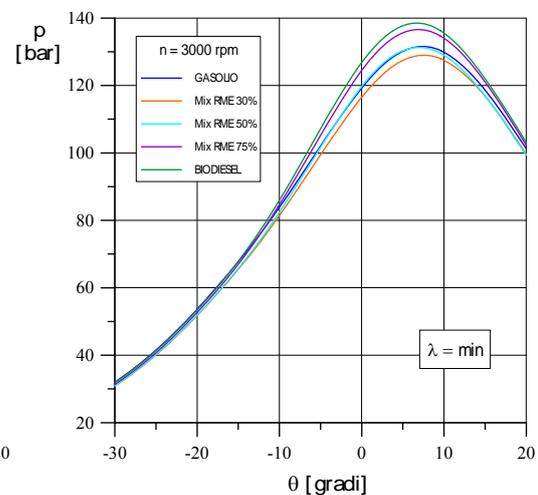


Fig. 4.19

Per spiegare questo particolare andamento dei cicli indicati, occorre tenere presente i due principali parametri che determinano in questo caso un comportamento differente. Essi sono: il potere calorifico del combustibile e la quantità di combustibile iniettata, e giocano un ruolo chiaramente diverso.

All'aumentare del potere calorifico del combustibile iniettato, a parità di tutte le altre condizioni, la curva del ciclo indicato tende chiaramente a spostarsi verso l'alto, ciò che dovrebbe favorire valori maggiori del picco di pressione del gasolio.

D'altra parte occorre sempre ricordare che, nelle nostre prove, si è tenuto costante l'indice d'aria per cui diverse sono le quantità iniettate dei diversi combustibili in ciascuna delle condizioni di funzionamento analizzate. La maggiore quantità di combustibile che si inietta quando il motore è alimentato, a parità di indice d'aria (e a pari velocità di rotazione), con Biodiesel, fa sì che l'iniezione risulti anticipata, come vedremo in seguito,

rispetto all'istante in cui essa ha luogo quando invece si utilizza il gasolio. Di conseguenza, la pressione e la temperatura dell'aria presente in camera, quando comincia l'iniezione, sono minori, sicché aumenta il ritardo all'accensione che comporta un aumento sia del picco che del gradiente di pressione. Gli effetti del maggior anticipo all'iniezione sono poi, in un certo senso, amplificati dalla maggiore viscosità del biodiesel, la quale determina una polverizzazione meno fine del combustibile (goccioline di maggiore diametro e, dunque, tempi necessari per la vaporizzazione del combustibile ancora superiori).

Gli effetti congiunti della maggiore quantità di combustibile iniettata e della maggiore viscosità prevalgono su quelli derivanti dal minor valore del potere calorifico del combustibile, sicché i cicli indicati relativi al biodiesel sono caratterizzati da valori della pressione massima e del gradiente di pressione leggermente superiori.

Per finire, si vuole avvertire che un altro fattore, non menzionato finora, potrebbe giocare una influenza non trascurabile, e comunque non quantificabile con il tipo di prove condotte: si tratta della presenza, nella molecola del biocombustibile (che, si ricorda è un monocomponente) di un gruppo ossigeno. L'influenza di questo fattore potrà essere meglio valutata in seguito all'analisi sulla legge di rilascio di calore effettuata nei capitoli seguenti.

#### 4.1.3 LE EMISSIONI

Le prove sulle emissioni inquinanti del motore in prova hanno riguardato lo studio delle seguenti specie:

- monossido di carbonio, CO
- ossidi di azoto, NO<sub>x</sub>
- fumo.

I risultati rilevati per il CO

L'andamento del monossido di carbonio in funzione dell'indice d'aria, riportato nella fig. 4.20, ricalca il tipico profilo di questa specie inquinante che, nei motori Diesel, cresce costantemente all'aumentare del carico, impennandosi poi per i valori più bassi dell'eccesso d'aria.

Si evidenzia che quando si opera, in un motore Diesel, con miscele di aria e combustibile che si avvicinano allo stechiometrico (pur permanendo nel campo delle miscele povere) da un lato divengono più elevati i picchi di temperatura (ciò che favorisce la dissociazione della CO<sub>2</sub>), dall'altro si rischia di avere dei valori locali di  $\lambda$ , all'interno

delle zone che circondano le singole goccioline di combustibile in sospensione, particolarmente bassi.

Il diagramma di fig. 4.20 evidenzia un comportamento molto simile per ciascuna delle miscele investigate; si può notare, tuttavia come nessuna delle miscele contenenti biodiesel dia luogo, in corrispondenza del carico massimo, ai valori di CO rilevati per il gasolio. D'altra parte, va pur ricordato, che alla condizione di carico massimo il motore opera con un valore dell'eccesso d'aria che è diverso per le varie miscele esaminate e che è minimo proprio per il gasolio.

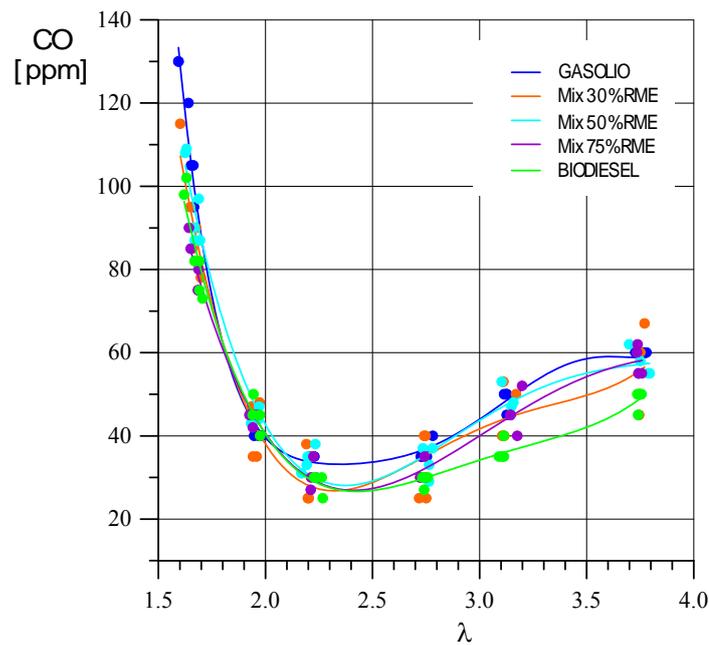


Fig. 4.20

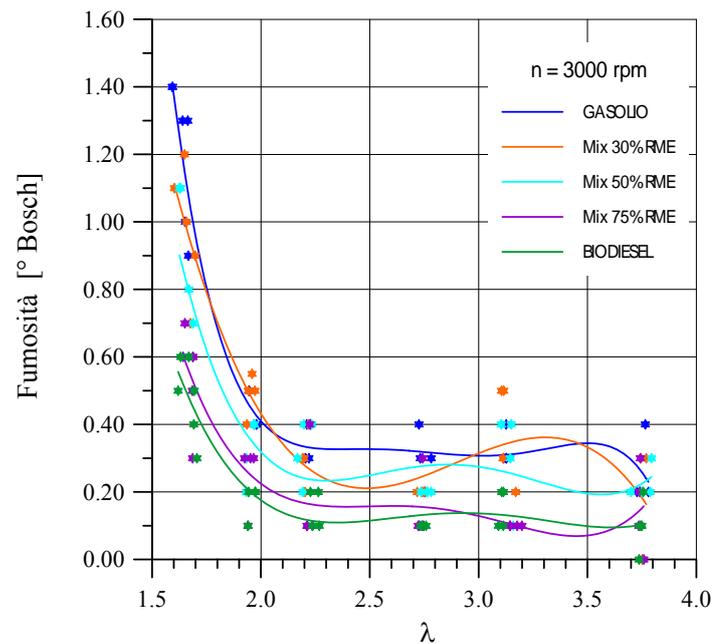


Fig. 4.21

### La fumosità

Il diagramma di fig. 4.21 riporta l'andamento della fumosità in unità Bosch, in funzione del carico. Anche questa volta, come nel caso del monossido di carbonio, l'andamento rilevato delle varie curve risulta quasi esponenziale al diminuire dell'indice d'aria: quando l'eccesso d'aria diviene troppo contenuto, come già osservato a proposito del CO, si hanno localmente delle miscele eccessivamente ricche per cui il combustibile crackizza, senza ossidarsi, e da luogo a valori elevati di fumosità.

Risulta apprezzabile, nel diagramma, una certa diversità nel comportamento delle singole miscele: è evidente, ad esempio, una fumosità nettamente minore del biodiesel rispetto al gasolio. Procedendo dal basso verso l'alto si incontrano successivamente miscele con tenori di Biodiesel sempre minori, soprattutto per valori elevati del carico. Il comportamento della miscela al 30% è molto prossimo a quello del gasolio, pur rilevando una minore fumosità nella condizione di massimo carico.

### Gli ossidi di azoto

I valori della concentrazione, nei gas di scarico, degli NOx, rilevati in quasi tutti i lavori sperimentali sul Biodiesel risultano superiori a quelli registrati nelle prove con gasolio convenzionale, nonostante l'andamento preciso vari a seconda del tipo di estere o metilestere utilizzato, e del tipo di motore.

I risultati ottenuti con le nostre prove (vedi fig. 4.22) confermano pienamente questo trend. I dati rilevati per le concentrazioni di NOx nelle varie condizioni di carico evidenziano un andamento a campana che sovente ricorre, per questo tipo di emissioni, nei motori ad accensione per compressione.

Le cause all'origine delle maggiori emissioni di ossidi di azoto nei motori alimentati con biodiesel, oggetto di numerosi studi, sono chiaramente da mettere in relazione con l'andamento ottenuto della legge di rilascio del calore. In particolare, si presume che a determinare entrambi i fenomeni sia, come già detto, la presenza di un gruppo ossigeno nella molecola del biocombustibile che dovrebbe determinare un più rapido sviluppo del processo di combustione premiscelata e, di conseguenza, valori locali più elevati del picco di temperatura cui, si sa, corrispondono proporzionali incrementi delle concentrazioni di NOx.

Il momento più critico per la formazione degli NOx è senza dubbio quello in cui la temperatura raggiunge il massimo (nei motori in genere, la quasi totalità degli NOx che si

forma è di origine termica): è in corrispondenza del picco di temperatura, che precede quello di pressione, che si verificano le reazioni che danno luogo a una quantità di ossidi di azoto anche superiore a quella registrata allo scarico. Con l'espansione e il contatto con l'aria in eccesso, i gas si raffreddano e, dopo la riduzione di una modestissima frazione degli ossidi di azoto prima generatisi (il fenomeno è molto più modesto rispetto a quanto accade per i motori ad accensione comandata per via del notevole eccesso d'aria), si assiste al congelamento della concentrazione che interessa tutte le specie chimiche presenti in camera.

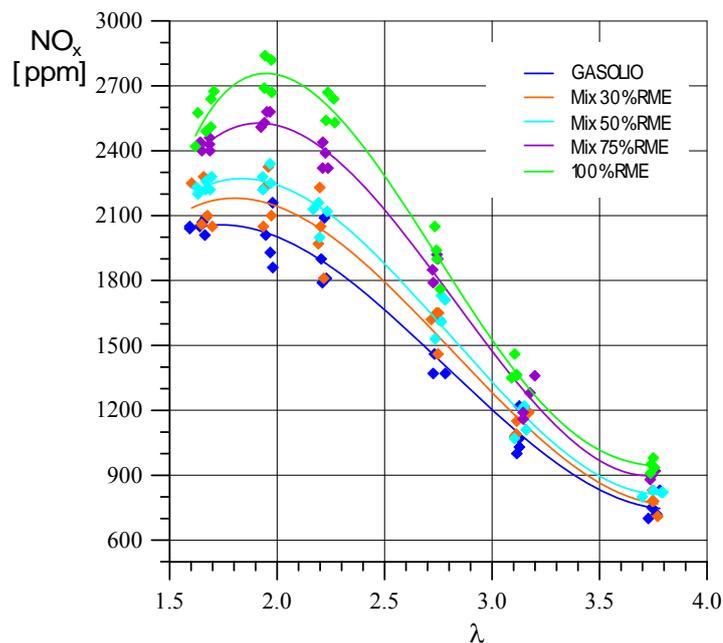


Fig. 4.22 – Emissioni di NO<sub>x</sub>

Dunque, se si ritarda l'iniezione, lo stesso processo di combustione risulta ritardato; la formazione degli ossidi di azoto avviene dopo, e le concentrazioni risultano più basse, dal momento che il picco di temperatura risulta più basso. Viceversa, se si anticipa l'istante di alzata spillo, come già osservato, il combustibile iniettato non trova in camera le condizioni più favorevoli alla propria autoaccensione: aumenta il tempo di ritardo all'accensione, e, logicamente, la quantità di combustibile nel frattempo iniettata e che si trova a bruciare pressoché simultaneamente una volta trascorso il delay-time. Chiaramente si assiste a un aumento sia del picco di temperatura, sia della concentrazione di NO<sub>x</sub>.

In definitiva, la motivazione di tale comportamento è presumibilmente ascrivibile ad un diverso andamento del rilascio di calore in camera combustione che determina una proporzionale differente "storia termica" dei prodotti di combustione, alla quale, come è

ben noto, è legato il meccanismo di formazione di questa specie inquinante. Conseguentemente, per verificare tale ipotesi è stato effettuato uno studio sperimentale dell'evoluzione del processo di combustione mediante l'analisi della velocità del rilascio di calore nelle diverse condizioni di prova prima specificate che sarà trattato nel prossimo paragrafo.

#### 4.1.4 IL RILASCIO DI CALORE

Modalità di calcolo della legge di rilascio del calore

Nel presente paragrafo vengono analizzate le differenti modalità con cui avviene il rilascio di calore, durante la combustione, per i vari combustibili testati.

La legge di rilascio del calore [38] [39] è, in sostanza, la legge con cui viene rilasciata, nel processo di combustione, l'energia chimica del combustibile. Quest'ultima può essere calcolata, a partire dai dati di pressione nel cilindro rilevati con il ciclo indicato in funzione dell'angolo di manovella, come la quantità di energia rilasciata necessaria a dar luogo alla pressione misurata. Una semplice tecnica di calcolo è esposta nel paragrafo seguente.

L'analisi della legge di rilascio del calore fornisce utili indicazioni per lo studio del processo di combustione che ha luogo nel cilindro. La conoscenza dell'andamento della combustione, risulta d'altra parte utile soprattutto per comprendere i meccanismi che comportano una maggiore o minore presenza delle varie sostanze inquinanti allo scarico e spiegare il diverso comportamento, in questo senso, dei vari combustibili. I risultati dello studio condotto sulla legge di rilascio saranno in particolare utilizzati per spiegare l'andamento delle emissioni di NO<sub>x</sub> dei due combustibili.

Il differente comportamento di questi, in termini di velocità di rilascio del calore, quantità di calore rilasciata e andamento stimato della temperatura e del gradiente di questa, sarà evidenziato, al solito, mediante una serie di diagrammi di confronto.

I dati di pressione rilevati con il ciclo indicato, relativi all'andamento della pressione all'interno del cilindro in funzione dell'angolo di manovella, lungo le corse di compressione ed espansione del ciclo di funzionamento del motore, possono essere utilizzati per ottenere informazioni quantitative sull'andamento della combustione.

Tra i metodi di analisi che consentono di determinare la velocità di rilascio dell'energia chimica del combustibile (o rilascio di calore) nel corso del processo di

combustione in un motore Diesel, quelli più efficaci, e più utilizzati, si basano sulla prima legge della termodinamica. L'analisi seguita nel presente lavoro, definita nella letteratura tecnica come “simple air model”, si basa sulle seguenti ipotesi fondamentali :

- composizione dei gas e proprietà termodinamiche uniformi in tutta la camera di combustione;
- assenza di dissociazione delle specie chimiche;
- calori specifici funzione della sola temperatura;
- processo di combustione considerato a livello globale, come processo di trasferimento, al sistema, di una quantità di calore equivalente alla variazione tra le entalpie di formazione dei prodotti e dei reagenti;

Con particolare riferimento ai motori Diesel, si fanno poi, solitamente, le seguenti ulteriori ipotesi:

- la eterogeneità della carica viene trascurata (ad esempio, soprattutto nei programmi di calcolo più semplici, la vaporizzazione del combustibile e la formazione della miscela sono completamente ignorate);
- l'intero processo di combustione si svolge secondo modalità corrispondenti al rapporto di miscela globale (sicché si può ritenere nota la composizione dei gas combusti).

Per quanto riguarda i motori Diesel a iniezione diretta, mentre le valvole di aspirazione e scarico sono chiuse, il volume del cilindro può essere schematizzato come un unico sistema aperto (vedi fig. 4.23) nel quale, oltre all'iniezione del combustibile, si manifestano altri modesti flussi di massa quali i flussi da e verso gli interstizi tra le fasce, il pistone e le pareti del cilindro, e i trafiletti di carica.

Per tale sistema, nelle ipotesi in cui ci si è messi, la prima legge della termodinamica può essere così scritta:

$$dE_s = \delta Q_{co} - \delta Q_{sc} - \delta W + \sum dm_i h_i \quad (4.1)$$

in cui,  $dE_s$  rappresenta la variazione di energia del sistema; il termine  $\delta Q_{co}$  rappresenta l'energia chimica rilasciata con la combustione, mentre  $\delta Q_{sc}$  è il calore scambiato con le pareti del cilindro e della camera;  $\delta W$  è il lavoro e, infine,  $dm_i$  rappresenta il flusso di massa  $i$ -esimo che attraversa i confini del sistema (in ingresso o in uscita) e  $h_i$  è la sua entalpia sensibile: hanno segno positivo eventuali contributi in ingresso e negativo quelli in uscita.

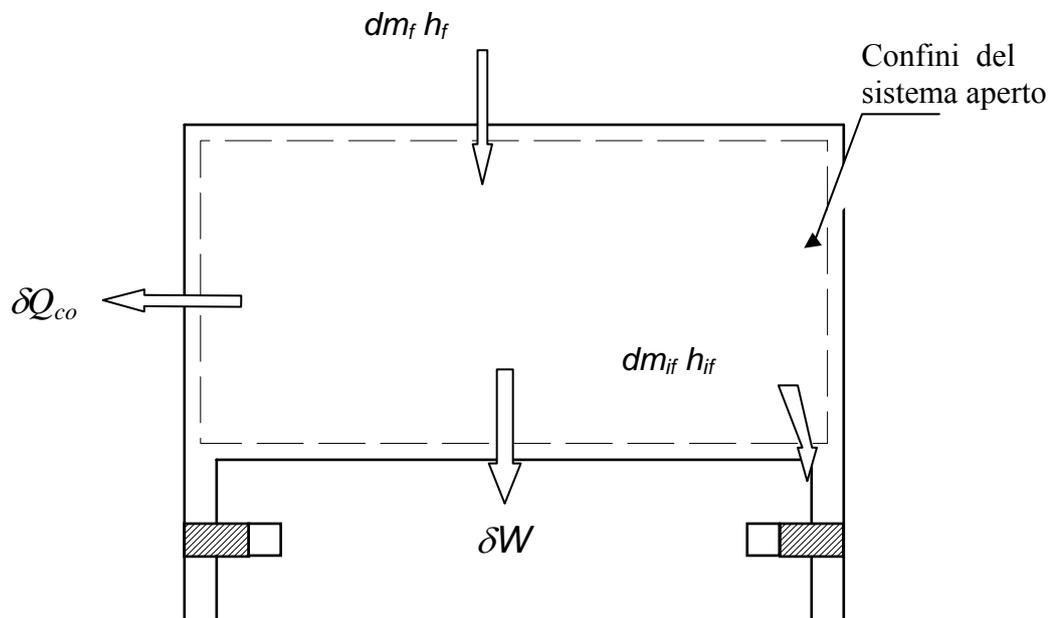


Fig. 4.23 - Sistema aperto utilizzato per schematizzare la camera di combustione nella analisi di rilascio del calore

Tenendo presente, ora, che la variazione di energia del sistema  $E_s$  è in realtà una variazione della sua energia interna sensibile  $U_s$  (non essendoci variazione dei termini potenziale e cinetico) e che il lavoro compiuto dal sistema è un lavoro di variazione di volume, si ottiene:

$$dU_s = \delta Q_{co} - \delta Q_{sc} - pdV + \sum dm_i h_i \quad (4.2)$$

Se adesso indichiamo con  $\delta Q_n$  il calore netto rilasciato, che si ottiene sottraendo al calore globalmente rilasciato dalla combustione (definito, in contrapposizione, lordo) l'aliquota corrispondente al calore ceduto alle pareti della camera di combustione la (4.2) può scriversi:

$$\delta Q_n = \delta Q_{co} - \delta Q_{sc} = dU_s + pdV - \sum dm_i h_i \quad (4.3)$$

o anche, indicando con  $dm_{if} h_{if}$  il contributo convettivo dei gas attraverso gli interstizi delle fasce (la cui entalpia andrà valutata a una temperatura pari a quella regnante all'interno del cilindro o a una temperatura sensibilmente più bassa di questa, che tenga conto delle effettive condizioni termodinamiche negli interstizi delle fasce, a seconda che si tratti, rispettivamente, di flussi verso l'esterno o verso l'interno del sistema) con  $dm_f h_f$  il

contributo convettivo del combustibile iniettato (riferendosi ovviamente alla sola entalpia sensibile), e trascurando, inoltre, i trafiletti di carica verso il basamento:

$$\delta Q_n = \delta Q_{co} - \delta Q_{sc} = dU_s + p dV - dm_{if} h_{if} - dm_f h_f \quad (4.4)$$

Se adesso andiamo ad esplicitare il differenziale dell'energia interna, nell'ipotesi di comportamento da gas ideale, risulta, indicando con  $m$  la massa all'interno delle pareti del sistema:

$$dU_s = d(mu) = m du + u dm = m c_v(T) dT + u(T) dm \quad (4.5)$$

Sostituendo tale espressione nella (4.4), trascurando il termine  $dm_f h_f$  (l'entalpia sensibile del combustibile è  $h_f \cong 0$ ), nonché la variazione di massa ad esso associata, sicché si può scrivere  $dm_{if} = dm$ , si ha:

$$\delta Q_n = \delta Q_{co} - \delta Q_{sc} = m c_v dT + p dV + (u - h_{if}) dm \quad (4.6)$$

Differenziando rispetto all'angolo di manovella  $\theta$  (che, assegnata la velocità di rotazione è univocamente legato al tempo  $t$ ), e trascurando ogni variazione di massa, la (4.6) diventa:

$$\frac{\delta Q_n}{d\theta} = \frac{\delta Q_{co}}{d\theta} - \frac{\delta Q_{sc}}{d\theta} = m c_v \frac{dT}{d\theta} + p \frac{dV}{d\theta} \quad (4.7)$$

Dalla legge dei gas ideali  $pV = mRT$ , assumendo  $R$  costante, si ottiene, differenziando:

$$\frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} = \frac{dT}{T} \quad (4.8)$$

Questa equazione può essere utilizzata per eliminare la variabile  $T$  dalla (4.7); mediante dei semplici passaggi si ottiene la seguente espressione:

$$\frac{\delta Q_n}{d\theta} = \frac{\delta Q_{co}}{d\theta} - \frac{\delta Q_{sc}}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{d\theta}$$

Questa equazione può essere risolta allo scopo di calcolare la apparente velocità di rilascio del calore netto (tale dizione è invalsa, stante l'enorme grado di difficoltà connesso a una determinazione precisa), in un dato istante, assegnando un valore noto per la pressione e per la derivata di questa, dopo aver calcolato, in quell'istante, il volume del cilindro a disposizione del fluido e la derivata di questo rispetto all'angolo di manovella.

Tale ultimo calcolo, può essere agevolmente condotto tenendo presente che in ogni istante il volume a disposizione del fluido si ottiene sommando al volume della camera di

combustione quel volume che risulta disponibile per il fatto che il pistone non è ancora giunto (o ha già superato) il punto morto superiore: il primo termine di questa somma è chiaramente costante, mentre il secondo può calcolarsi, nota la geometria del motore, utilizzando le formule che forniscono il valore dello spostamento del pistone (adimensionalizzato rispetto al raggio di manovella) e della derivata di questo, in funzione dell'angolo di manovella, riportate in qualsiasi manuale di Meccanica applicata alle macchine.

Per il calcolo di  $\gamma$  che, si ricorda, è il rapporto tra i calori specifici ( $c_p/c_v$ ), può essere utilizzata la seguente relazione :

$$\gamma = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_p - R} \quad (4.10)$$

per il valore di  $c_p$  potendosi utilizzare una delle seguenti correlazioni (si è già osservato che, in virtù delle ipotesi formulate, esso dipende dalla sola temperatura):

per  $T < 1000$  K

$$\bar{c}_p = \left( 3.6359 - 1.33736 \frac{T}{1000} + 3.29421 \frac{T^2}{10^6} - 1.91142 \frac{T^3}{10^9} + 0.275462 \frac{T^4}{10^{12}} \right)$$

e, per  $T > 1000$  K:

$$\bar{c}_p = \left( 3.04473 - 1.33805 \frac{T}{1000} + 0.488256 \frac{T^2}{10^6} - 0.0855475 \frac{T^3}{10^9} + 0.00570132 \frac{T^4}{10^{12}} \right)$$

Un adeguato range di valori per  $\gamma$ , nelle analisi di rilascio di calore per motori Diesel è tra 1.30 e 1.35. In particolare, ci attenderemo valori di  $\gamma$  intermedi tra quello dell'aria alla temperatura di fine corsa di compressione (prima della combustione,  $\approx 1.35$ ) e quello dei gas combusti corrispondente al rapporto di miscela globale adoperato ( $\approx 1.26 \div 1.30$ ). Talvolta l'equazione (4.9) è utilizzata con un valore costante di  $\gamma$  compreso in questo range.

Una analisi del tipo di quella finora condotta, per quanto approssimata, consente di determinare un andamento per la velocità di rilascio del calore netto, non troppo discosto dalla realtà. Per conoscere l'andamento della velocità di rilascio del calore lordo,  $Q_{co}$ , occorre in qualche modo valutare l'aliquota di calore che il sistema ha scambiato con le pareti del cilindro e della camera di combustione. A riguardo va osservato che, tranne che nella prima fase della corsa di compressione, quando le pareti sono più calde dell'aria in ingresso, questo scambio è sempre da intendersi come un flusso dal sistema verso le pareti.

Pertanto, il calore lordo si ottiene sommando al calore netto il calore scambiato  $Q_{sc}$ . Per la determinazione di quest'ultimo si fa uso, in genere, di correlazioni semiempiriche, ricavate dall'esperienza e basate su leggi di similarità con flussi turbolenti all'interno di tubi. In tal modo, il flusso termico convettivo in uscita verso le pareti può essere espresso come:

$$Q_{sc} = hc S (T_g - T_p) \quad (4.11)$$

dove  $S$  è l'area della superficie di scambio termico (che chiaramente varia in continuazione con l'angolo di manovella),  $T_g$  è la temperatura media dei gas,  $T_p$  è la temperatura media di parete e  $hc$  è il coefficiente di scambio termico convettivo, mediato su tutta l'area della superficie di scambio.

Tra le varie formule disponibili per la determinazione del coefficiente medio di scambio termico  $hc$ , una tra le più affidabili, in quanto appositamente ricavata per i motori Diesel a iniezione diretta è quella proposta da Hohenberg [93], come particolarizzazione, per il tipo di motori in questione, della più generale formula di Woschni [94,95]:

$$h_c = C_1 V^{-0.06} p^{0.8} T^{-0.4} \left( v_p + C_2 \right)^{0.8} \left[ W / m^2 K \right] \quad (4.12)$$

nella quale  $C_1$  e  $C_2$  sono opportune costanti che assumono rispettivamente i valori di 130 e 1.4, come risulta dagli esperimenti condotti dallo stesso Hohenberg su diversi Diesel a iniezione diretta.

Va notato che nel computo del calore scambiato, occorrerebbe tenere conto anche del flusso termico radiativo. Esso è dovuto a due fonti principali, all'interno del cilindro: i gas combusti a elevata temperatura e le particelle di soot caratteristiche dei motori Diesel. A motivo della unicità del fronte di fiamma e della caratteristica struttura di questo, dai contorni meno frastagliati rispetto a quelli che si riscontrano nei Diesel (chiaramente legati alla forma dello spray del combustibile iniettato) il contributo radiativo nei motori ad accensione comandata è decisamente trascurabile, rispetto a quello convettivo. Lo stesso non può dirsi per i Diesel che oltre ad avere per i motivi appena esposti una fiamma più raggiante, sono caratterizzati da una combustione che è sempre accompagnata dalla formazione di soot. La radiazione globalmente emessa dalle particelle di soot, nella fiamma di un motore Diesel, è pari a circa 5 volte la radiazione emessa dalla combustione dei prodotti gassosi.

Il calore scambiato per irraggiamento contribuisce dunque, in questi motori, per una percentuale compresa tra il 20 e il 35% del totale calore scambiato, e per una

percentuale anche maggiore per quanto riguarda la massima velocità di rilascio. Varie correlazioni consentono di tenere conto anche di questo contributo.

È inutile dire che vari metodi di calcolo, sempre basati sulla prima legge della termodinamica, più precisi di quello suggerito possono essere utilizzati per analizzare la legge di rilascio: in particolare, sono stati proposti metodi che usano modelli più sofisticati per la determinazione delle proprietà dei gas prima, durante e dopo la combustione, che tengono conto della non uniformità della miscela aria-combustibile, degli scambi di massa con le regioni (interstizi o crevice) compresi tra le fasce di tenuta e le pareti del pistone e del cilindro, dell'aliquota di calore sottratta dal riscaldamento e la vaporizzazione del combustibile, e che, infine, consentono una determinazione più accurata del calore scambiato.

La velocità di rilascio del calore lordo può essere integrata per conoscere, noto il potere calorifico inferiore del combustibile utilizzato, la frazione del combustibile iniettato che ha bruciato in un dato istante: essa è data, molto semplicemente, dal rapporto tra il calore lordo rilasciato in un certo istante e il potere calorifico del combustibile.

Nei prossimi paragrafi analizzeremo il comportamento dei combustibili utilizzati applicando l'analisi sopra esposta ai cicli indicati rilevati durante le prove sperimentali.

#### **4.1.5 VELOCITÀ DI RILASCIO DEL CALORE NETTO**

Al fine di poter spiegare l'aumento di ossidi di azoto rilevato per i biocombustibili, nelle pagine seguenti si riportano i risultati dell'analisi istantanea del calore netto rilasciato. I dati riportati si ottengono in maniera diretta dal programma di calcolo, dalla (4.9) senza bisogno di alcuna operazione aggiuntiva.

Rilascio

Nelle figure 4.24 – 4.37 sono riportati i grafici relativi alla velocità di rilascio del calore netto rilevata per le diverse condizioni di funzionamento, rispettivamente per il gasolio, il metilestere puro e le relative miscele.

Come si può osservare da tali figure, la velocità di rilascio del calore ha inizialmente un andamento decrescente, corrispondente alla fine della fase di compressione con l'iniezione di combustibile, per poi subire un improvviso cambio di pendenza, corrispondente all'inizio del processo combustione. Dall'analisi di tali diagrammi si nota che quando si alimenta il motore con il biodiesel si verifica un anticipo dell'inizio del

processo, in tutte le condizioni di funzionamento, che diventa più marcato all'aumentare del carico.

Un'attenta osservazione dei diagrammi fornisce le seguenti indicazioni:

- la velocità di rilascio del calore netto risulta superiore per il biodiesel rispetto al gasolio in tutto l'intervallo angolare precedente il punto morto superiore;
- il picco della velocità di rilascio del calore netto del gasolio, tranne che al minimo, è sempre superiore a quello del biodiesel e si verifica sempre con un certo ritardo angolare rispetto all'istante in cui ha luogo quello del biodiesel;
- in seguito all'iniezione del combustibile, quando si utilizza il gasolio, si ha una sottrazione di calore con una velocità che è sempre maggiore di quella che si ha con il biodiesel;
- questo tipo di fenomeno ha un'entità appena apprezzabile al minimo ma ben evidente già per valori medi del carico: la differenza sembra in qualche caso superare il Joule/grado;

Il differente andamento della legge di rilascio, soprattutto nella prima fase del processo di combustione, risulta avere una sensibile influenza sul meccanismo di formazione degli NOx.

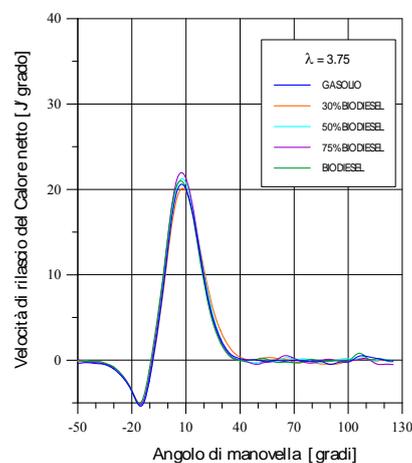


Fig. 4.24

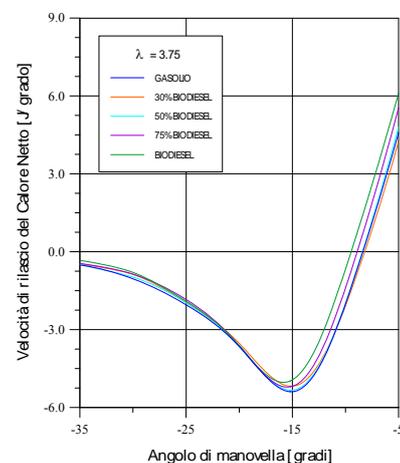


Fig. 4.25

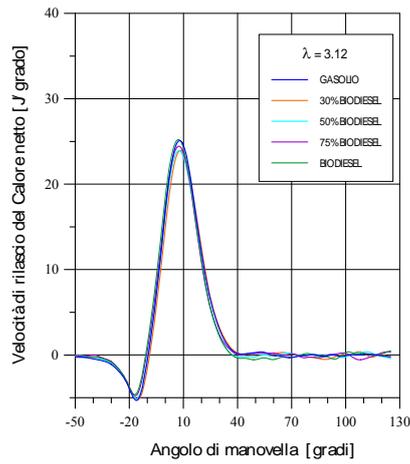


Fig. 4.26

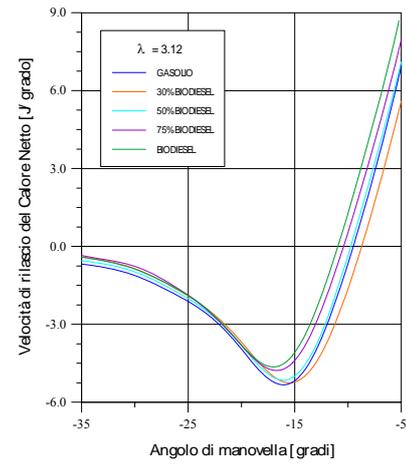


Fig. 4.27

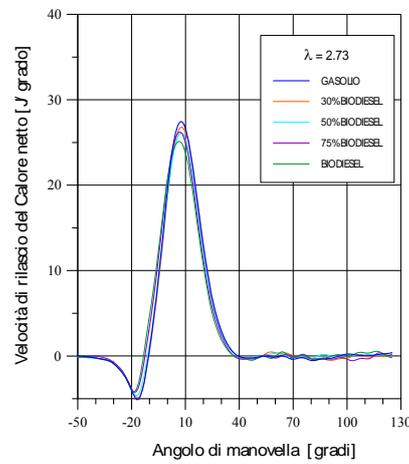


Fig. 4.28

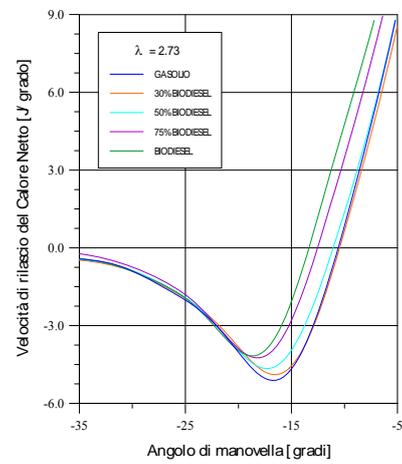


Fig. 4.29

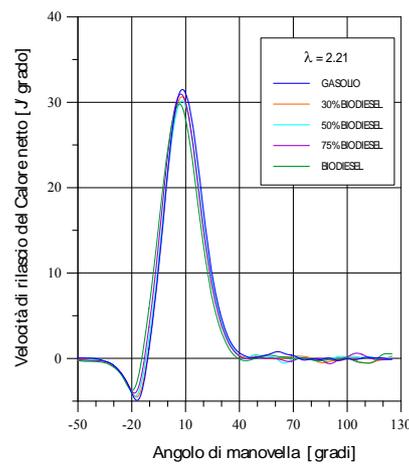


Fig. 4.30

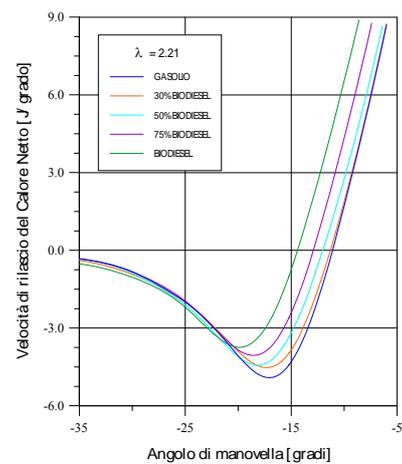


Fig. 4.31

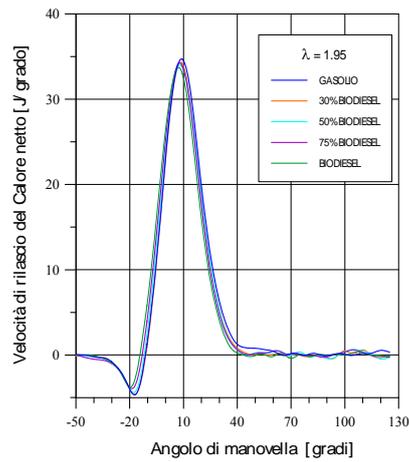


Fig. 4.32

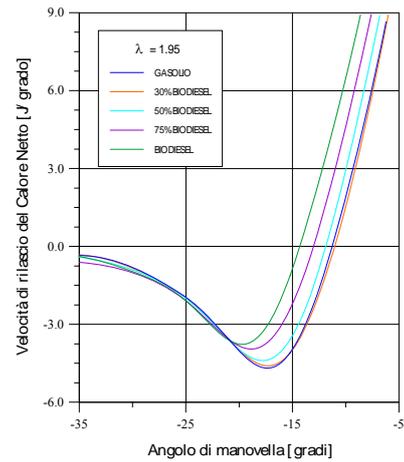


Fig. 4.33

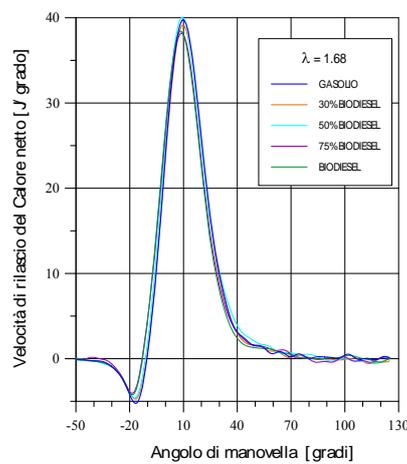


Fig. 4.34

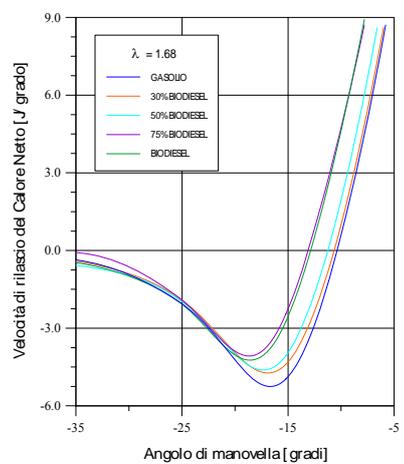


Fig. 4.35

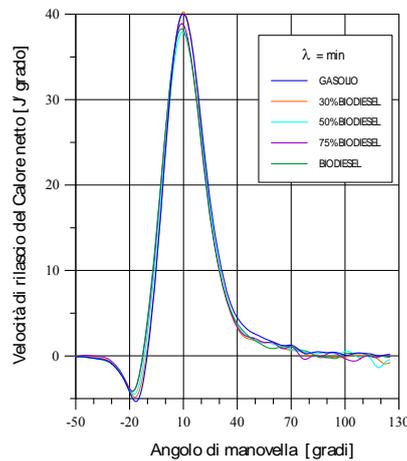


Fig. 4.36

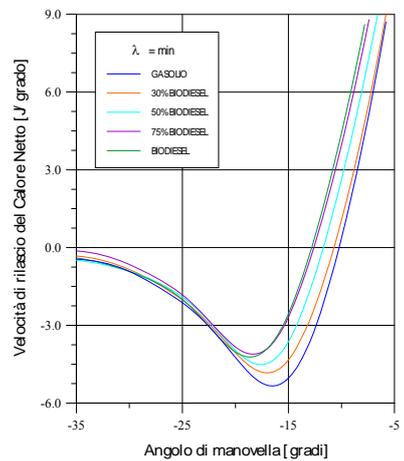


Fig. 4.37

## 4.2 LE PROVE: MOTORE INIEZIONE ELETTRONICA

La stessa tipologia di prove è stata poi ripetuta utilizzando un motore Diesel [8] [9] dotato di un sistema di iniezione elettronica. Lo scopo di questa parte dell'attività è stato quello di usare leggi di iniezioni del combustibile identiche, sia alimentando il motore con

gasolio che con Biodiesel; per questo è stato utilizzato un motore diesel Common Rail prodotto dalla Fiat, che adottando un sistema di iniezione controllato elettronicamente dalla centralina motore, permette un timing dell'iniezione indipendente dal combustibile utilizzato, in particolare indipendentemente dalla sua densità che nelle prove poc'anzi esposte, avevano dimostrato essere influenti sull'iniezione.

#### 4.2.1 EMISSIONI INQUINANTI

Verranno ora riportati i risultati delle emissioni di un motore Diesel Common Rail di 1910 cm<sup>3</sup>, alimentato con Biodiesel puro e con gasolio commerciale.

Per le ragioni spiegate nel paragrafo precedente, le specie inquinanti analizzate sono espresse in funzione dell'indice d'aria  $\lambda$ .

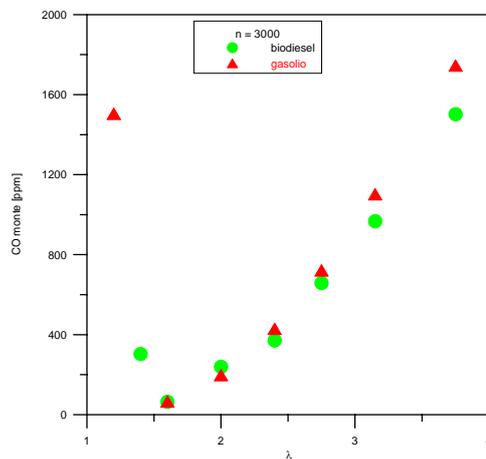


Fig. 4.38

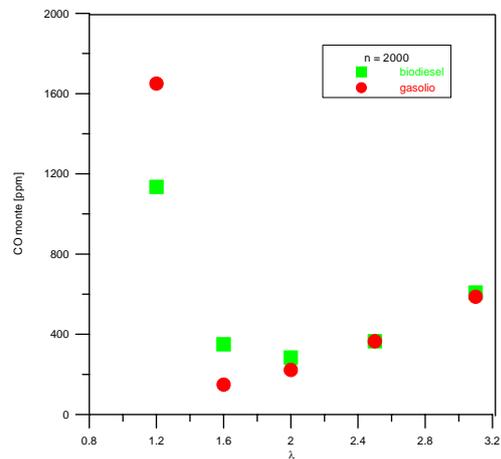


Fig. 4.39

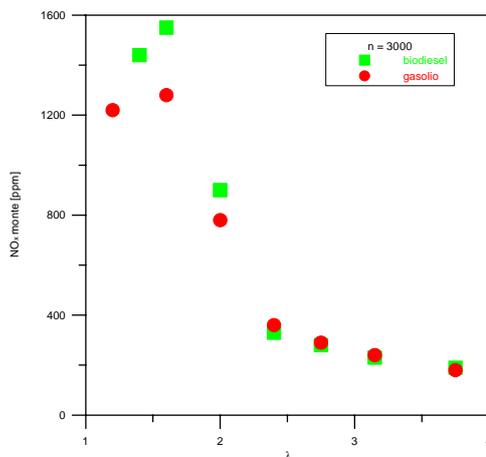


Fig. 4.40

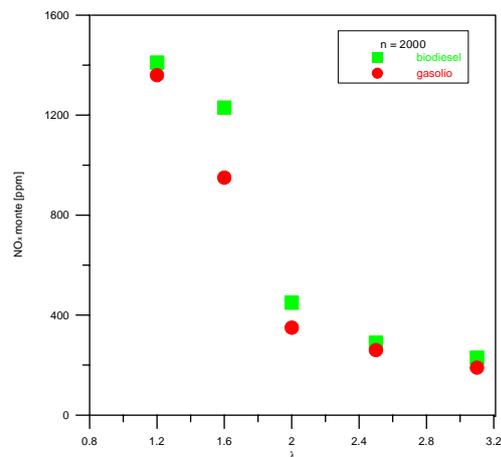


Fig. 4.41

Adottando un motore con iniezione elettronica del combustibile, i livelli di emissioni sono sensibilmente inferiori rispetto al motore analizzato nei precedenti

paragrafi. L'aspetto che maggiormente si evidenzia è che le emissioni allo scarico, al variare del combustibile utilizzato mostrano differenze molto meno marcate, grazie al corretto timing dell'iniezione che con la tipologia di motore in prova, non è più influenzato dalla diversa densità del Biodiesel diverso al gasolio.

#### 4.2.2 PRESTAZIONI

Nelle figura 4.42 – 4.45 sono riportate le curve di potenza e coppia a diversi numeri di giri in funzione dell'indice  $\lambda$ .

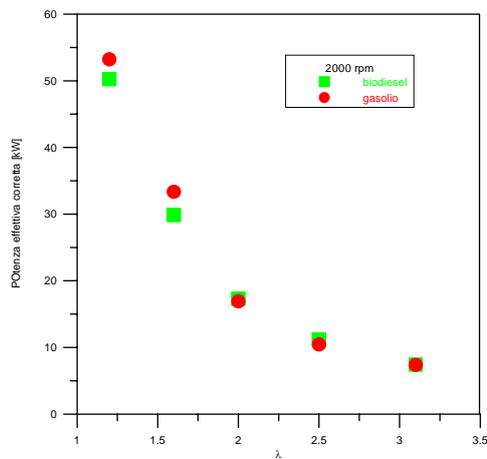


Fig. 4.42

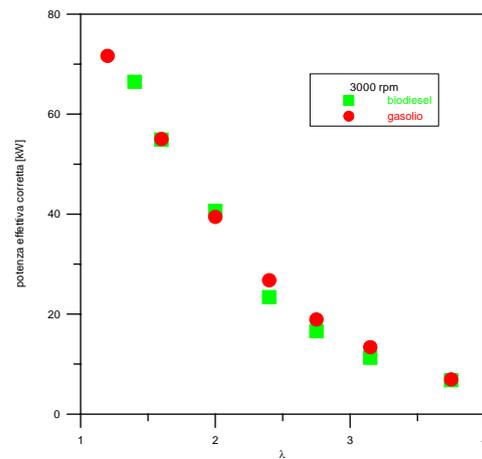


Fig. 4.43

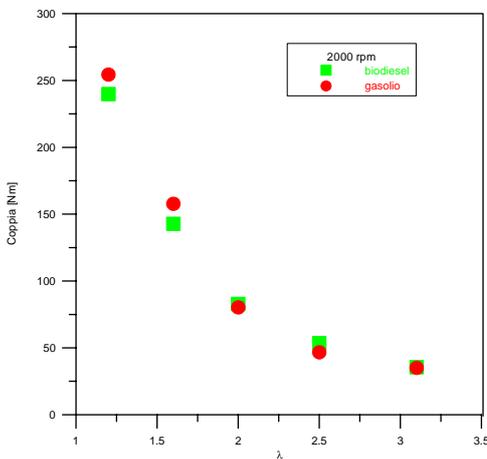


Fig. 4.44

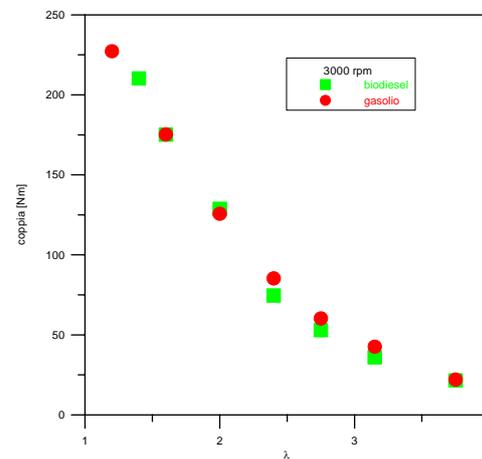


Fig. 4.45

Anche in questo caso è possibile notare come le differenze tra Biodiesel e gasolio sono meno marcate rispetto al motore testato precedentemente. Si nota comunque un piccolo calo di potenza, ben visibili per carichi più alti.

### 4.2.3 CICLI INDICATI E ALZATA SPILLO

Nelle figure seguenti si riportano i cicli indicati e leggi di alzata spillo misurate sul motore Diesel Common Rail, alimentato sia a Biodiesel che a gasolio commerciale. Per le ragioni più volte esposte tali diagrammi sono espressi in funzione dell'indice d'aria.

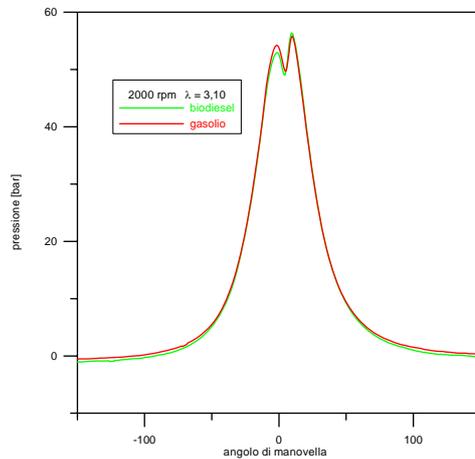


Fig. 4.46

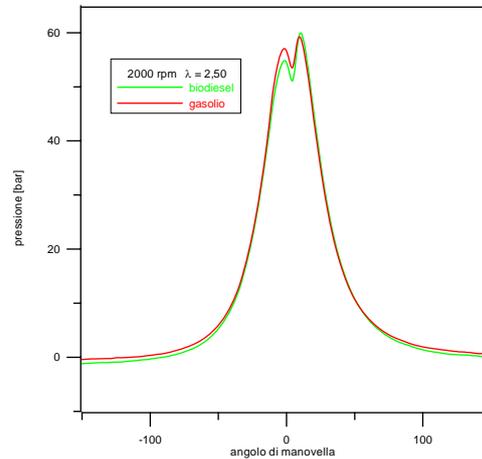


Fig. 4.47

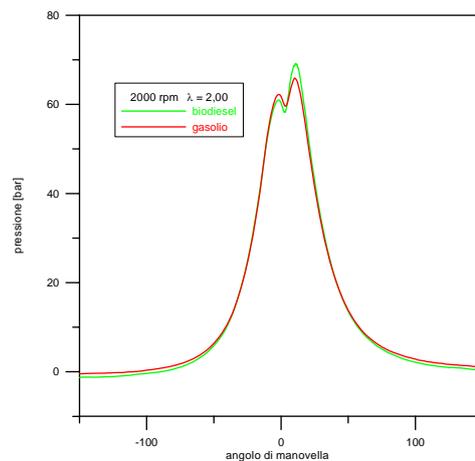


Fig. 4.48

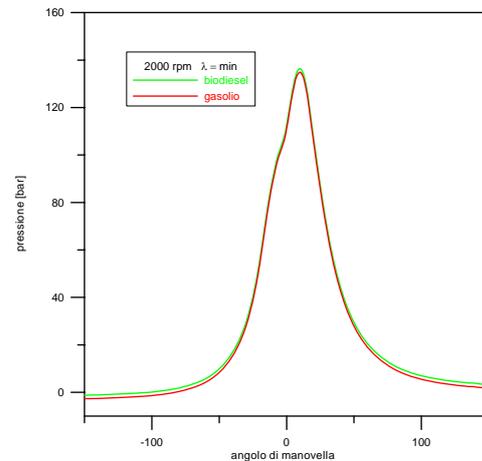


Fig. 4.49

Anche per i cicli indicate le differenze tra il funzionamento con Biodiesel e con gasolio sono minime.

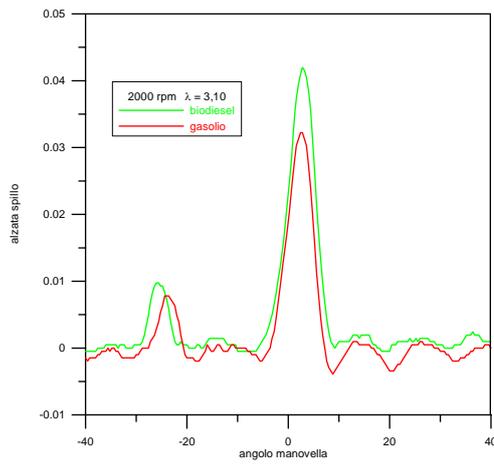


Fig. 4.50

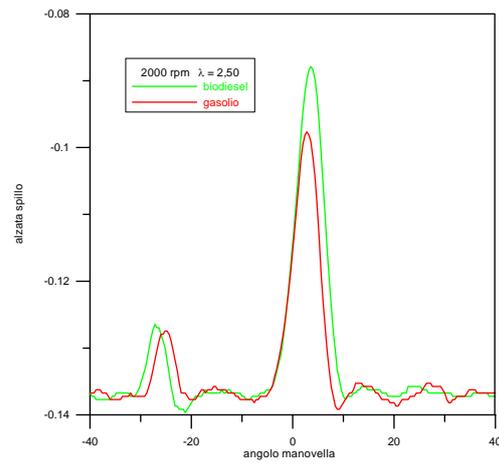


Fig. 4.51

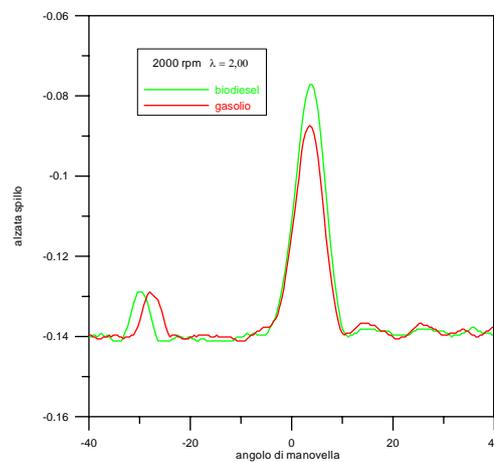


Fig. 4.52

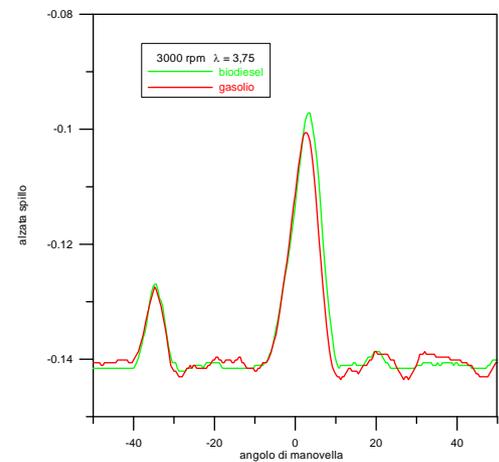


Fig. 4.53

Per quanto riguarda la legge di alzata dello spillo dell'iniettore è possibile notare solo un maggiore picco dell'iniezione principale, dovuto alla maggiore quantità di combustibile che è necessario iniettare quando il motore è alimentato con Biodiesel, per ottenere le stesse condizioni del funzionamento con gasolio.

#### 4.2.4 RILASCIO

A partire dai cicli indicati è stata effettuata anche una legge del rilascio del calore con le modalità esposte precedentemente. Nelle figure 4.54 – 4.57 si riportano 4 condizioni diverse per il motore in esame, alimentato con gasolio e con Biodiesel.

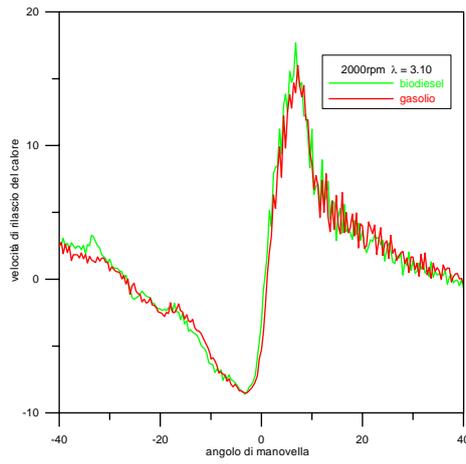


Fig. 4.54

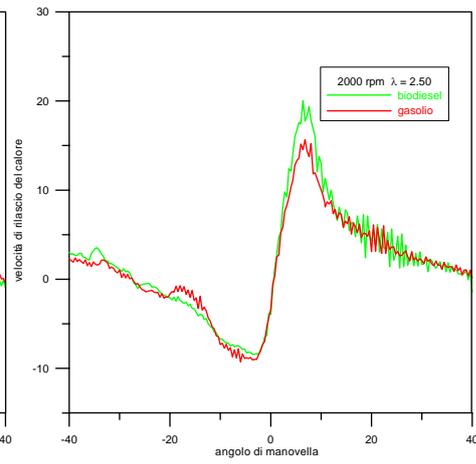


Fig. 4.55

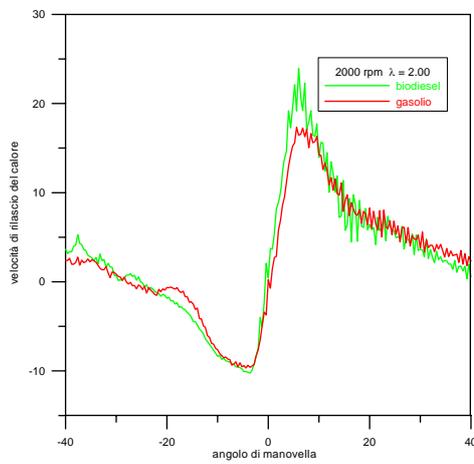


Fig. 4.56

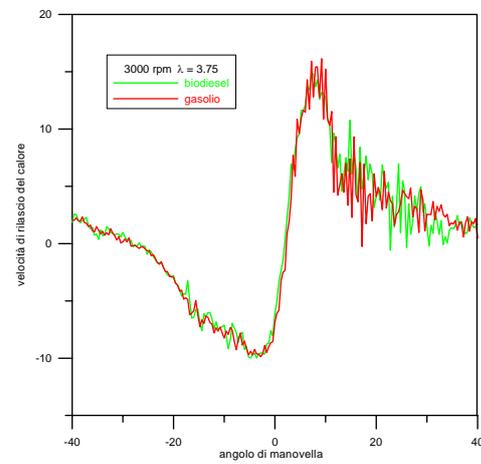


Fig. 4.57

Analizzando dettagliatamente questi grafici è possibile notare la maggiore velocità di combustione del Biodiesel, che comporta anche un picco più alto della velocità di rilascio.

# Capitolo V

*Allestimento sala prova*

## ***Introduzione***

*A seguito dei risultati mostrati nei precedenti capitoli, si è deciso di effettuare prove su un moderno motore Common rail di seconda generazione e di implementare la sala prova con una strumentazione hardware/software che permettessero di modificare i parametri di centralina durante il funzionamento del motore.*

*Lo scopo della attività, come sarà più ampiamente descritto in seguito, è stato quello di trovare una metodologia che permettesse di migliorare il funzionamento del motore alimentato con Biodiesel, cioè con un combustibile con caratteristiche chimico/fisiche diverse da quelle per cui è stato progettato e ottimizzato.*

*Nel presente capitolo verrà descritto nel dettaglio il motore installato al banco prova e l'allestimento della sala prova motori.*

## 5.1 IL MOTORE IN PROVA

In questo paragrafo si darà una descrizione del motore installato al banco prova della sala del D.I.M.E. Per prima cosa si effettuerà una breve descrizione generale del motore e del suo sistema di sovralimentazione, accompagnato da una caratterizzazione sperimentale dello stesso.

### 5.1.1 DESCRIZIONE DEL MOTORE

Il motore sul quale è stata effettuata l'attività di sperimentazione è l'**Alfa Romeo 1.9 JTD 16v**. Si tratta di un moderno diesel ad iniezione diretta Common Rail di seconda generazione, dotato di un sistema di iniezione Multijet, di 1910 cm<sup>3</sup> di cilindrata e distribuzione a doppio albero a camme in testa e quattro valvole per cilindro. Questo motore, equipaggia la Alfa Romeo 159 attualmente in commercio.

Nella figura 5.1 è possibile osservare uno spaccato del motore in esame.

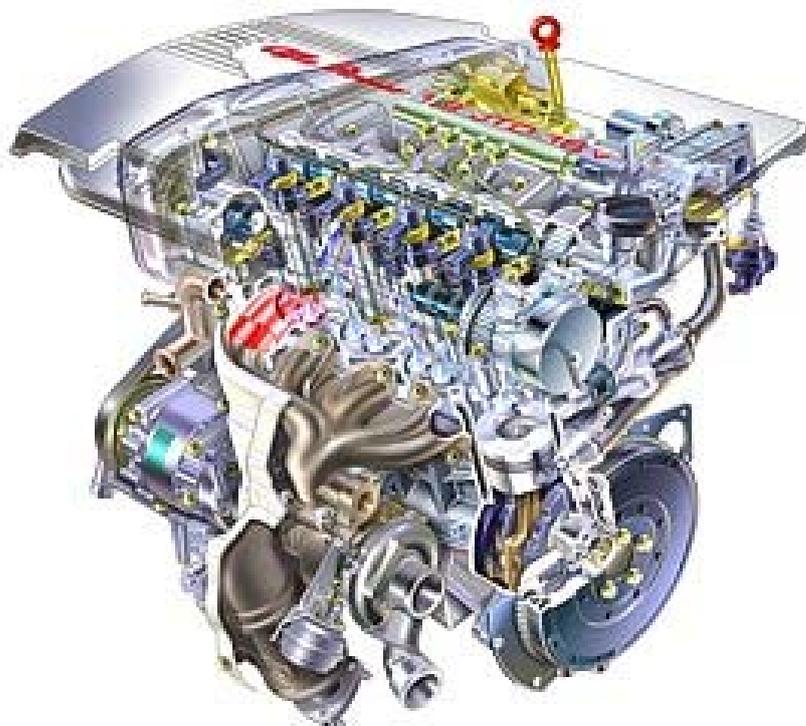


Fig. 5.1: Spaccato del motore

In tabella 5.1 vengono presentate schematicamente alcune delle caratteristiche principali del motore:

Ciclo	Diesel, 4 tempi
Cilindri	4, in linea
Alesaggio	92 mm
Corsa	90,4 mm
Cilindrata totale	1910 cm <sup>3</sup>
Rapporto di compressione	17.5:1
Potenza massima	150 CV (110 kW) a 4000 RPM
Coppia massima	305 Nm a 2000 RPM
Distribuzione	4 valvole per cilindro
Alimentazione	Iniezione diretta Common Rail Multijet, pompa Bosch CP1H, elettroiniettori Bosch, gruppo turbocompressore GARRETT, intercooler aria-aria
Dispositivi antinquinamento	Catalizzatore ossidante, EGR, DPF
Lubrificazione	Forzata, capacità del circuito 4,2 l
Raffreddamento	A liquido, circolazione forzata, capacità del circuito 6 l
Alternatore	85 A, 14 V
Batteria	60 Ah, 12 V

Tabella 5.1

### 5.1.2 IL SISTEMA DI SOVRALIMENTAZIONE

Il motore oggetto di questa trattazione è sovralimentato mediante turbocompressore Garret a geometria variabile (fig.5.2 e fig.5.3)

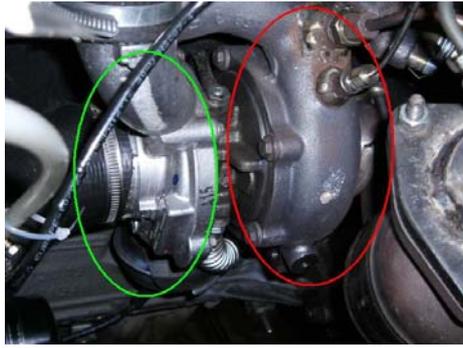


Fig. 5.2: Gruppo turbocompressore

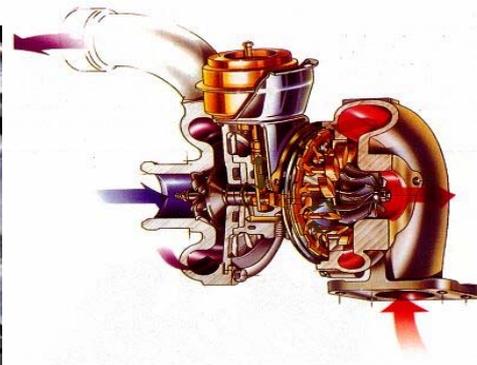


Fig.5.3: Schema di funzionamento del gruppo turbocompressore

Sulla parte destra della figura 5.2 si nota la turbina a geometria variabile (cerchiata in rosso) mentre sulla sinistra si trova il compressore (cerchiato in verde) con ingresso assiale e uscita radiale.

Il gruppo turbocompressore è del tipo Garrett, pesa circa 3,3 kg, ha un ingombro piuttosto ridotto ed è equipaggiato con cuscinetti raffreddati ad acqua che gli permettono di garantire prestazioni affidabili fino a 230.000 RPM, anche se nel normale utilizzo raramente si superano i 130.000 RPM.

La turbina in esame è a geometria variabile. Il suo funzionamento è illustrato nella seguente figura.

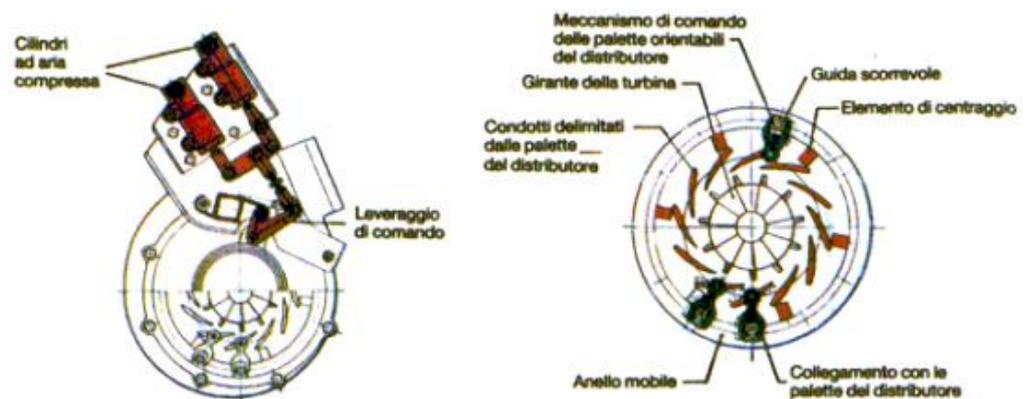


Fig. 5.4: Turbina a geometria variabile

Dalla figura si può osservare che lo statore della turbina, cioè l'elemento che convoglia i gas di scarico verso la girante, è dotato di palette che tramite un meccanismo a depressione comandato dalla centralina, variano la loro inclinazione in funzione del regime di rotazione del motore e del carico. Questo permette di avere un controllo delle sezioni di passaggio dei gas di scarico e di conseguenza una maggiore flessibilità del sistema.

La turbina a geometria variabile permette di attenuare uno dei problemi più importanti dell'applicazione di un turbocompressore: il turbolag, cioè la brusca impennata di coppia dovuta alla scarsa flessibilità del sistema, e di minimizzare il ritardo di risposta del motore al pedale dell'acceleratore.

### 5.1.3 IL SISTEMA DI INIEZIONE MULTIJET

Il motore in esame è provvisto di un sistema di iniezione Multijet. Questo sistema, insieme ad altri elementi presenti sul motore in esame, costituisce un notevole contributo alla riduzione delle emissioni oggi largamente inferiori ai limiti imposti dalla normativa EURO 4.

Le iniezioni multiple (Multijet) rappresentano una forte evoluzione tecnologica dell'ormai noto sistema Common Rail.

Sfruttando le potenzialità del Common Rail il Centro Ricerche Fiat ha sviluppato un sistema di gestione del processo di combustione attraverso l'utilizzo delle iniezioni multiple. Tale sistema, chiamato MULTIJET, consente una forte riduzione delle emissioni di NOx e particolato senza una rilevante penalizzazione in termini di costi. Altri contributi che sono stati possibili grazie agli studi condotti su questa tecnologia sono il miglioramento del polverizzatore, l'innalzamento della pressione gasolio massima da 1350 a circa 1600-1700 bar e il miglioramento dei sistemi del post-trattamento dei gas combusti.

I sistemi Common Rail di prima generazione gestiscono una piccola iniezione, detta Pilot, attuata alcuni millisecondi prima dell'iniezione principale (Main). Tale iniezione garantisce una forte riduzione del rumore di combustione, una migliore avviabilità a freddo e un incremento della coppia a bassi regimi a scapito di un certo peggioramento del particolato. In aggiunta, una iniezione Post può essere attuata per gestire sistemi di post-trattamento dei gas (DeNOx – DPF).

Il concetto che sta alla base delle iniezioni multiple è di suddividere l'iniezione principale in una sequenza di tre iniezioni ravvicinate (Pre-Main-After), mantenendo la possibilità di attuare le iniezioni Pilot e Post (vedi figura 5.5) con molta più flessibilità temporale.

Con questo approccio la durata dell'iniezione principale può essere gestita indipendentemente dalla pressione di iniezione.

La pre iniezione permette di controllare la velocità di combustione della fase premiscelata, riducendo ulteriormente il rumore di combustione rispetto al common rail di prima generazione, e favorendo l'accendibilità e quindi il comportamento del motore a

freddo in termini di rumore e emissioni di idrocarburi (fumosità azzurra). La pre iniezione si comporta quindi in modo simile alla iniezione Pilot, garantendo però un contenimento del particolato (soot) e del CO.

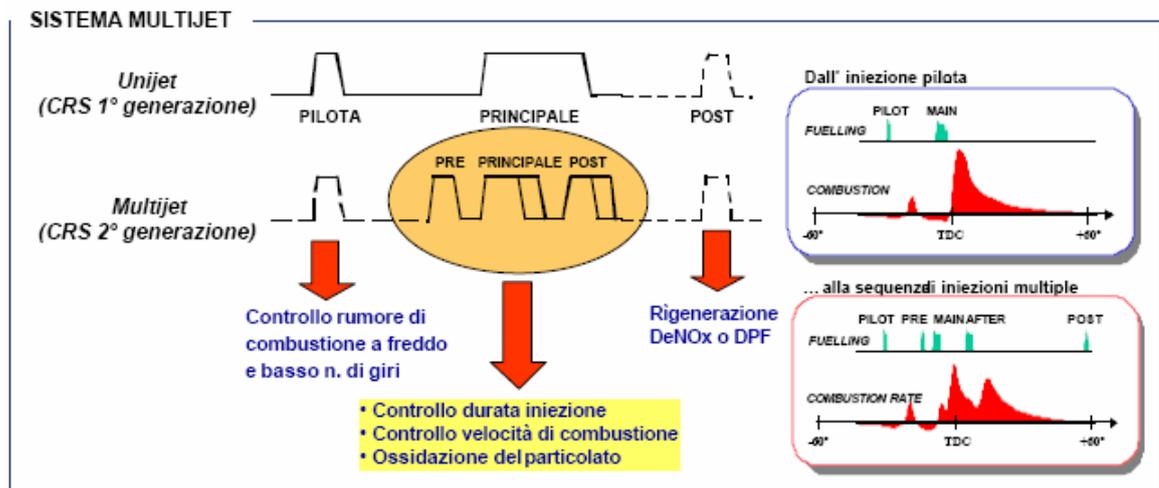


Fig. 5.5: Sistema di iniezione Multijet

L'iniezione After, posizionata alcune centinaia di microsecondi dopo la main, produce un innalzamento della temperatura in camera di combustione favorendo una post-ossidazione del soot generato precedentemente nella fase di combustione, consentendo di migliorare il trade-off tra emissioni di NOx e di Particolato (Fig. 5.6).

L'effetto complessivo delle iniezioni multiple sulle emissioni, rumore e consumo specifico (BSFC) in un punto caratteristico del ciclo emissioni NEDC è riportato in figura 5.6.

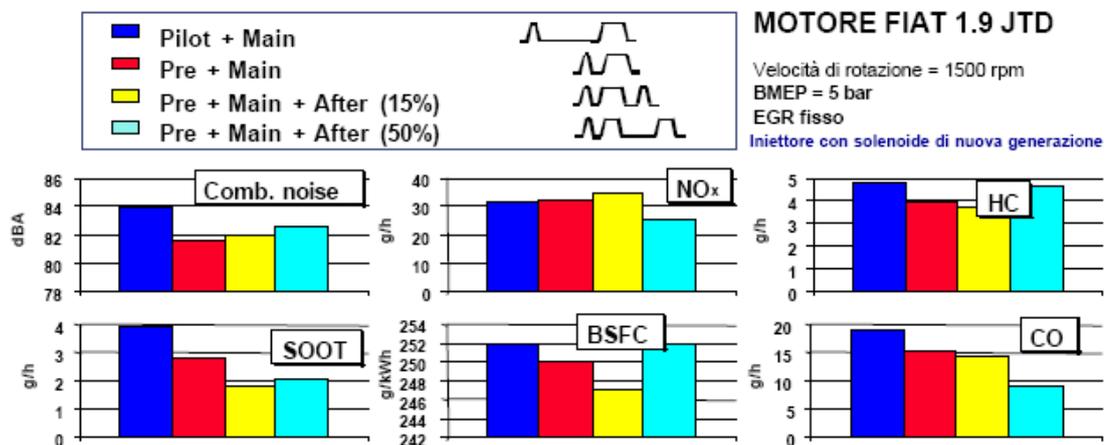


Fig.5.6: Effetto di varie configurazioni di iniezione su emissioni, rumore, consumo

L'utilizzo combinato di Pilot + Pre insieme ed entrambe ravvicinate consente di ridurre ulteriormente la rumorosità e favorire l'accendibilità. Tale configurazione risulta molto utile, quindi, a freddo o durante le accelerate a basso regime.

Riassumendo quanto visto, è possibile affermare che un sistema di iniezione Multijet capace di gestire in modo completamente flessibile il numero di iniezioni, il loro posizionamento angolare e la quantità introdotta, consente di definire in ogni condizione motore la strategia di iniezione ottimale, in termini di emissioni, rumorosità, prestazioni, consumo.

Gli iniettori installati sul motore, grazie a un avanzato sistema di servo-valvole, permettono di realizzare iniezioni molto ravvicinate nel tempo, in particolare riesce a gestire iniezioni con dwell time fino a poche decine di microsecondi.

Durante questa attività sperimentale è stata utilizzata una centralina in grado di gestire fino a 5 iniezioni consecutive con dwell time minimi di soli 10ms. . Tale centralina presenta anche una serie di altre funzionalità innovative Tra le varie funzioni ricordiamo per esempio:

- Controllo pressione combustibile;
- Diagnosi combustibile evolute;
- Gestione intelligente dello spunto e del riconoscimento marcia;
- Gestione della trappola di particolato.

Utilizzando opportunamente le iniezioni multiple e le strategie di controllo dell'aria aspirata, è possibile ottenere temperature dei gas di scarico sufficientemente alte in modo da poter permettere la rigenerazione senza utilizzare complicati e costosi sistemi di additivazione. Dalle considerazioni precedenti si comprende il ruolo sempre centrale e fortemente innovativo del sistema di iniezione Multijet nella riduzione degli inquinanti gassosi.

Buone performances, in termini di riduzione delle emissioni, possono essere raggiunte anche sfruttando il contributo della pressione di iniezione: quanto più elevata è tale pressione, tanto più si riesce ad ottenere una buona penetrazione delle goccioline di combustibile in seno alla carica d'aria, con conseguente miglioramento del processo di combustione che risulta essere più completo.

L'elevata pressione di iniezione viene garantita dalla pompa di iniezione che, nel caso in esame, è una pompa Bosch CP1H (figura 5.7) capace di garantire una pressione in mandata fino a 1.600 bar.



Fig. 5.7: Pompa di iniezione Bosch CP1H

In figura 5.8 è invece facilmente individuabile il Rail all'interno del quale è presente il combustibile in pressione, ed i collegamenti tra esso e i quattro iniettori, uno per ogni cilindro.

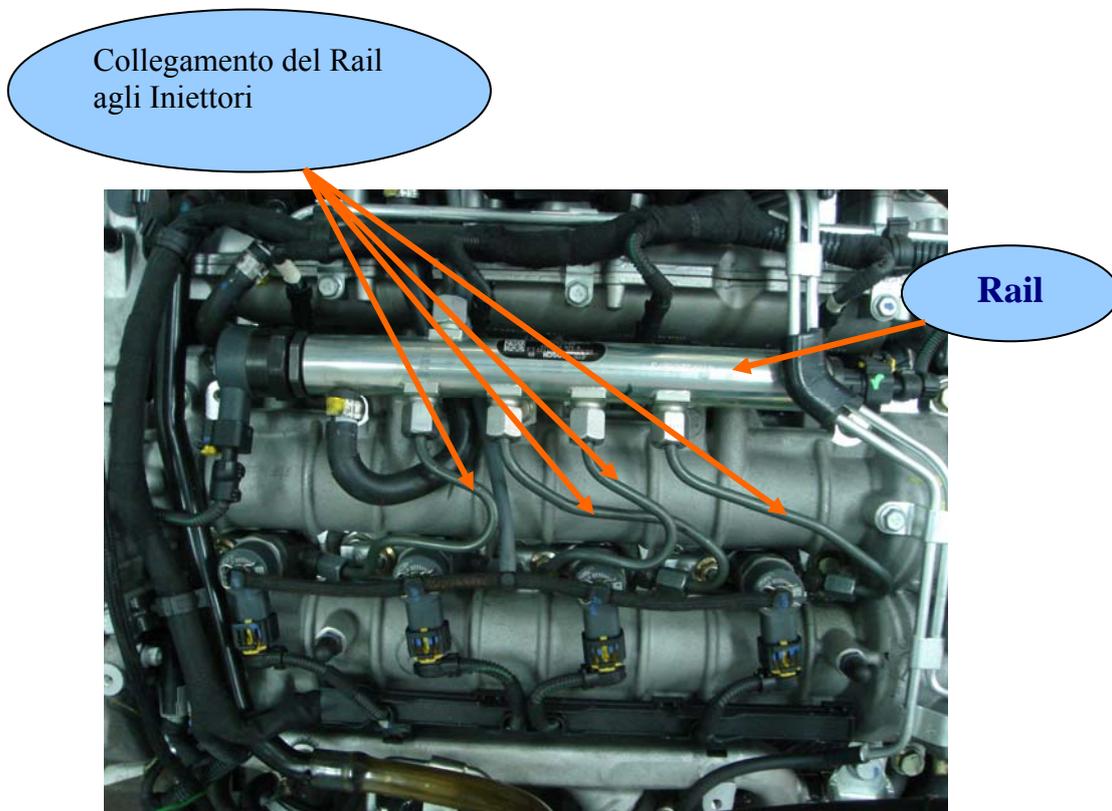


Fig. 5.8 – Vista Motore dall'alto.

Nella figura 5.9 sono schematizzati i vantaggi dovuti all'utilizzo del sistema Multijet:

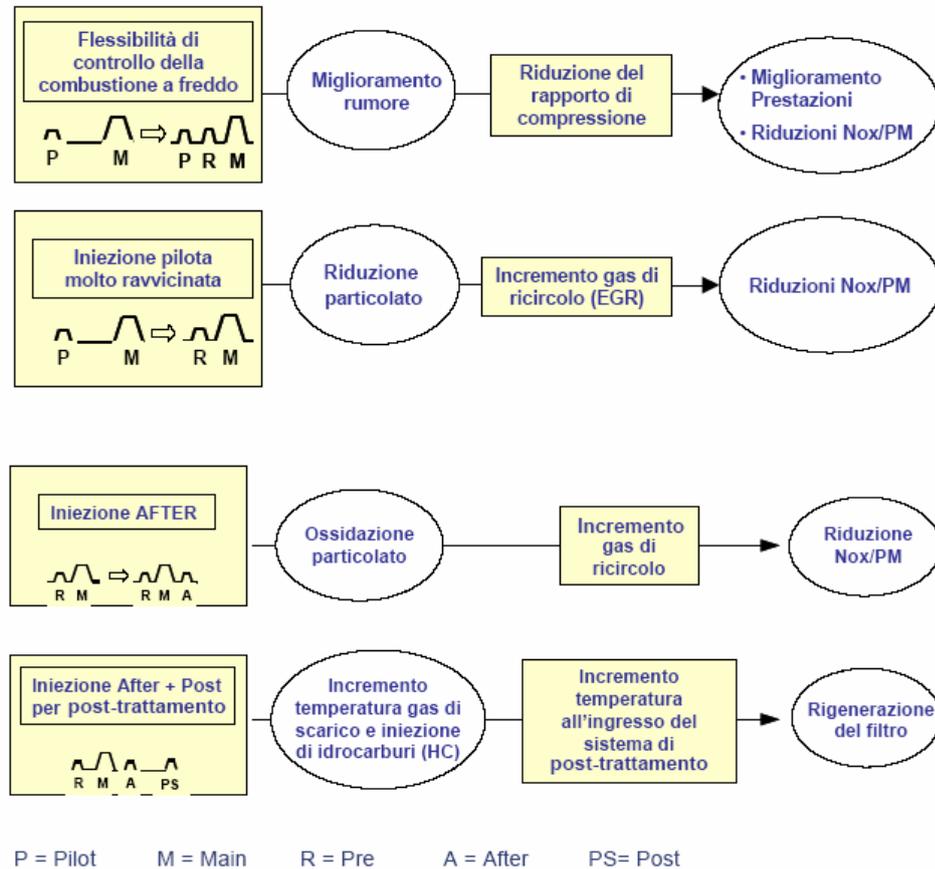


Fig. 5.9: Le iniezioni multiple: i benefici

Nonostante i grossi passi effettuati in questi anni, ci sono ancora ampi margini di miglioramento del sistema Common Rail in particolare per quanto riguarda l'integrazione del Common Rail con sistemi di fasatura variabile. Tali sistemi, in avanzata fase di sviluppo sui motori a benzina, possono portare grossi miglioramenti anche nel campo dei motori Diesel. Un utilizzo fortemente innovativo in questo senso, combinato con una gestione versatile delle iniezioni multiple può portare a rivoluzionare il tipo di combustione Diesel (da stratificata ad omogenea).

#### 5.1.4 IL SISTEMA DI RICIRCOLO DEI GAS DI SCARICO EGR

EGR è l'acronimo di Exhaust Gas Recirculation ovvero ricircolo dei gas di scarico.

Per riuscire ad ottenere un abbassamento della formazione degli ossidi di azoto bisogna abbassare la temperatura nel cilindro e per ottenere questa condizione si possono seguire due strategie:

- 1) ritardare il tempo di iniezione;
- 2) ridurre la quantità di ossigeno nel cilindro inibendo, in tal modo, il processo di combustione.

Seguendo la prima strategia si fa in modo che il processo di combustione inizi in un punto non ottimale riducendo in tal modo l'efficienza del processo stesso; questa tecnica da un lato abbassa la temperatura nel cilindro ma dall'altro riduce l'economia del motore, le sue performances e genera un eccesso di soot. Tutte queste conseguenze negative rendono la prima strategia inadatta allo scopo.

Il miglior modo per ridurre la formazione degli ossidi di azoto è quindi quello di ridurre la quantità di ossigeno presente nel cilindro. Ciò può essere ottenuto grazie all'utilizzo del dispositivo EGR.

L'EGR invia in camera di combustione una certa portata di gas di scarico; questi gas sono già combusti quindi non bruciano nuovamente; in tal modo viene limitato il picco massimo di temperatura che si ha nella camera di combustione di qualche centinaio di gradi; una tale condizione infatti porta ad una diminuzione della formazione degli  $\text{NO}_x$ .

I motori Diesel funzionano in eccesso di aria per cui viene a mancare la possibilità di utilizzare un catalizzatore a tre vie (ossidante e riducente). L'eccesso di ossigeno, infatti, rende impossibili le reazioni di ossidoriduzione necessarie per il trattamento degli ossidi di azoto. L'utilizzo del dispositivo di ricircolo dei gas esausti permette quindi di by-passare questo inconveniente, agendo a monte della formazione degli  $\text{NO}_x$ .

Il funzionamento dell'EGR viene gestito dalla centralina elettronica: in funzione del numero di giri e della posizione del potenziometro comandato dal pedale dell'acceleratore, esso trasmette un segnale ad una elettrovalvola regolatrice in modo tale da determinare la quantità di gas combusti da rinviare in aspirazione.

In seguito alla lettura della temperatura del liquido refrigerante, esegue una prima correzione che consente l'esclusione dell'EGR per temperature inferiori a  $15^\circ\text{C}$  e una riduzione dell'apertura dal 100% allo 0% variabile per valori di temperatura compresi tra  $15^\circ\text{C}$  e  $35^\circ\text{C}$ . Un'altra eventuale correzione viene effettuata in funzione della pressione ambiente; infatti la diminuzione di pressione in quota comporta la diminuzione della densità dell'aria che va ad esaltare la fumosità in presenza di ricircolo dei gas di scarico. Per questo motivo la centralina quando riceve dal sensore di pressione un valore di

pressione assoluta inferiore ai 660-670 mmHg, ovvero per altitudini superiori ai 1000-1500 m, provvede ad escludere il ricircolo. Il ricircolo dei gas è consentito comunque solo a bassi-medi carichi cioè quando il rapporto di miscela è elevato.

### 5.1.5 IL CIRCUITO DI BLOW-BY

Durante il funzionamento di un motore a combustione interna accade che una certa quantità di olio lubrificante, in forma di vapore, fuoriesca dal basamento con la possibilità che venga rilasciato in ambiente contribuendo ad incrementare il tasso di inquinanti in uscita dal motore. Per ovviare a questo problema viene utilizzato sul motore un particolare dispositivo, denominato blow-by. Esso ha lo scopo di prelevare i vapori di olio e di convogliarli nel condotto di aspirazione in modo tale che vengano introdotti nel ciclo motore e bruciati.

Tra il punto di prelievo e il punto di immissione dei vapori è posizionato un separatore che provvede ad eseguire una separazione: la parte liquida condensata, torna nella coppa dell'olio, e i vapori vengono convogliati in aspirazione.

### 5.1.6 DISPOSITIVI PRESENTI ALLO SCARICO DEL MOTORE

Allo scarico del motore in esame sono collocati alcuni dispositivi atti al contenimento delle emissioni inquinanti del propulsore stesso.

Nella figura 5.10 possiamo osservare l'architettura base del sistema di scarico; sono presenti:

- 1) il **Pre-cat** e il **Front-cat** che hanno la funzione di controllare le emissioni di HC e CO, e di favorire la rigenerazione del DPF;
- 2) il **Diesel Particulate Filter (D.P.F.)** o trappola del particolato che ha la funzione di intrappolare il particolato per filtrazione.

Analizzeremo nei prossimi paragrafi il Precat e il DPF.

### 5.1.7 IL PRE-CATALIZZATORE

A valle della turbina è posizionato il **Pre-Catalizzatore ossidante o Precat** mostrato nelle figure 5.10 e 5.11.

Nella figura 5.10 è presentata la vista d'assieme del precat: si tratta di un involucro di acciaio inossidabile, all'interno del quale è contenuta una struttura monolitica alveolare metallica come mostrato nella figura 5.11.

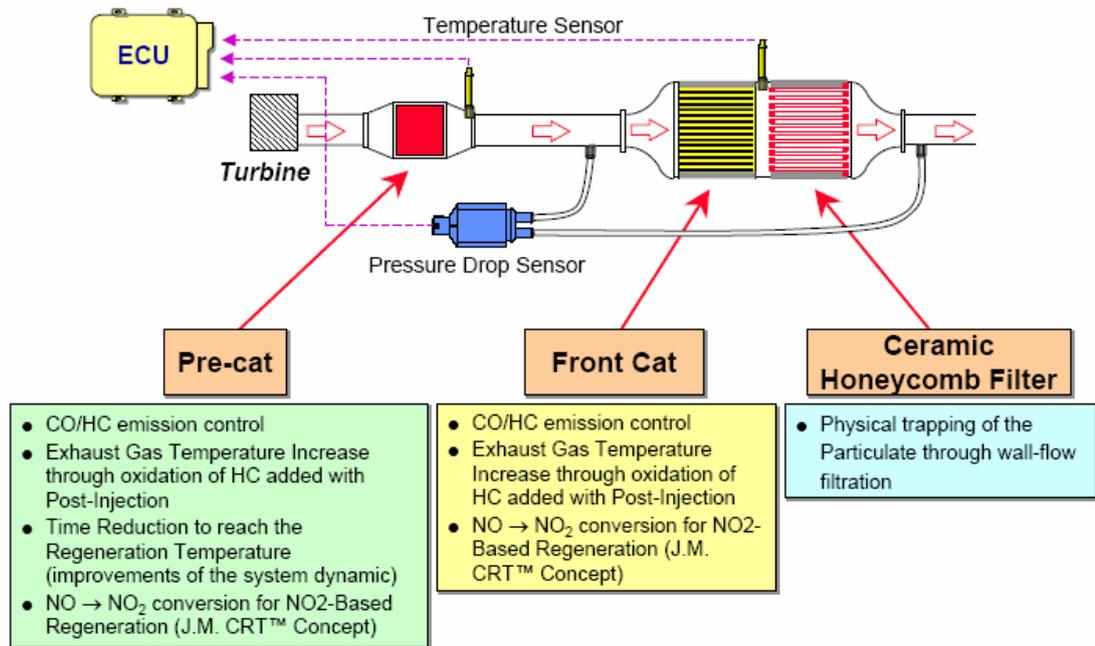


Fig. 5.10: Architettura base del sistema



Fig. 5.10: Precatalizzatore



Fig. 5.11: Particolare del Pre-cat

Il monolite offre una superficie adatta per mettere in contatto i gas con gli elementi attivi. Questo è possibile grazie ad un rivestimento delle celle detto "washcoat" che, rendendole ruvide, ne può aumentare la superficie effettiva fino a 7.000 volte; dopo il trattamento di "washcoat" viene impregnata la superficie con metalli preziosi (platino - palladio - rodio) per ottenere l'attività catalitica necessaria. Nella figura 5.12 si nota la struttura porosa del catalizzatore con il rivestimento catalitico.

In particolare, le reazioni all'interno del precatalizzatore sono: trasformazione del monossido di carbonio (CO) in anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e degli idrocarburi incombusti (HC) in vapore acqueo (H<sub>2</sub>O) e anidride carbonica (CO<sub>2</sub>). Per gli ossidi di azoto invece non

sono possibili le reazioni di riduzione a causa della presenza non trascurabile di ossigeno presente nei gas di scarico.

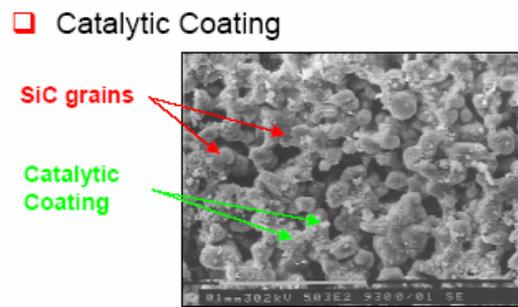


Fig. 5.12: Microstruttura del Precat

La particolare posizione del precatalizzatore a valle della turbina è dettata da un'esigenza di funzionamento del dispositivo stesso: esso inizia a funzionare alla temperatura di 350°C ed ha necessità, per il funzionamento a regime, di una temperatura compresa tra i 400 e i 600°C. Per tale motivo si cerca di montare il catalizzatore il più vicino possibile ai collettori di scarico, dove i gas più caldi lo portano prima alla temperatura di esercizio, garantendone un funzionamento efficiente.

### 5.1.8 CURVE DI PRESTAZIONE DEL MOTORE

Prima di iniziare l'attività col Biodiesel, il motore è stato caratterizzato, effettuando diverse prove alimentandolo con gasolio commerciale. Tali prove sono servite per verificare la corretta installazione del motore, il buon funzionamento del motore e del sistema di acquisizione.

In particolare in figura 5.13 sono rappresentate le curve di potenza, coppia e consumo specifico di combustibile in funzione del numero di giri del motore e a carico massimo.

Il consumo specifico varia tra un minimo di 217 g/kWh raggiunto a 2500 RPM ed un valore massimo di 288 g/kWh a 1000 RPM.

Analizziamo adesso l'andamento della curva di potenza, sempre facendo riferimento alla figura 5.13.

Al crescere del numero di giri la potenza aumenta fino a raggiungere un massimo in corrispondenza di un certo valore di RPM sopra il quale si ha un rapido calo. Tale andamento si giustifica considerando che in un primo tratto l'incremento di potenza è da attribuire all'incremento del numero di giri e della pme (la pme aumenta a causa di un migliore riempimento del cilindro). Esiste quindi un valore del numero di giri in

corrispondenza del quale è massima la quantità di fluido che evolve in ogni ciclo; sempre in corrispondenza di questo valore si avrà la massima pme e di conseguenza la massima coppia motrice. Superato questo numero di giri, la potenza continua ancora ad aumentare ma meno velocemente in quanto, sebbene diminuisca la quantità di fluido che evolve in ogni ciclo, aumenta la quantità totale di fluido che evolve nell'unità di tempo; questa condizione di funzionamento permane fin quando non si arriva al valore massimo della potenza. Oltre questo valore massimo la curva della potenza decresce rapidamente poiché la quantità di fluido che evolve in ogni ciclo diminuisce più rapidamente di quanto non aumenti il numero di giri.

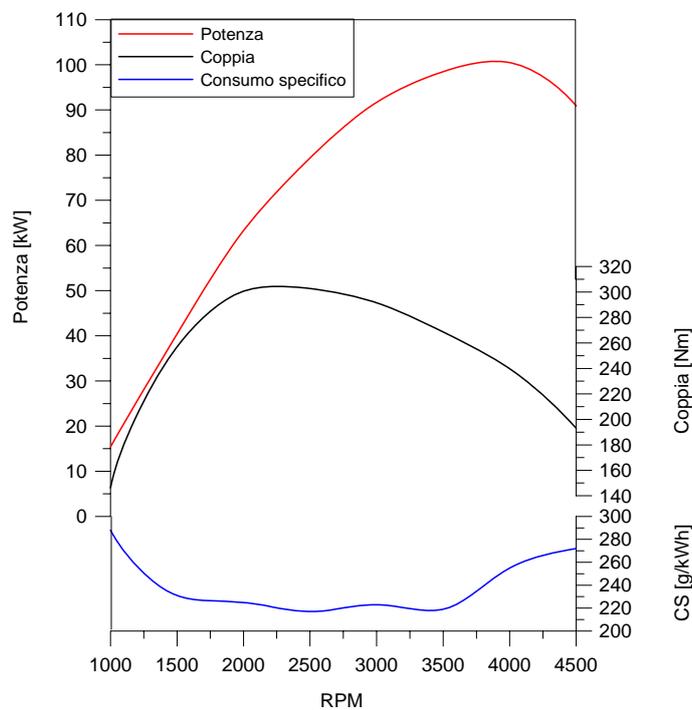


Fig. 5.13: Curve di coppia, potenza e consumo specifico

Di seguito (fig.5.14) sono riportate le curve della potenza in funzione del numero di giri, parametrizzate in funzione della pme; solo la curva più in alto si riferisce alla condizione di carico massimo e dunque coincide con la curva analizzata nella figura precedente.

Mantenendo costante il valore della pme la potenza cresce linearmente con il numero di giri: questo spiega l'andamento rettilineo delle curve di potenza iso-pme. Nella curva a pme massima oltre alla variabilità del numero di giri bisogna tener conto anche della variabilità della stessa pme con il numero di giri e l'andamento della potenza è dovuto ai ragionamenti visti sopra.

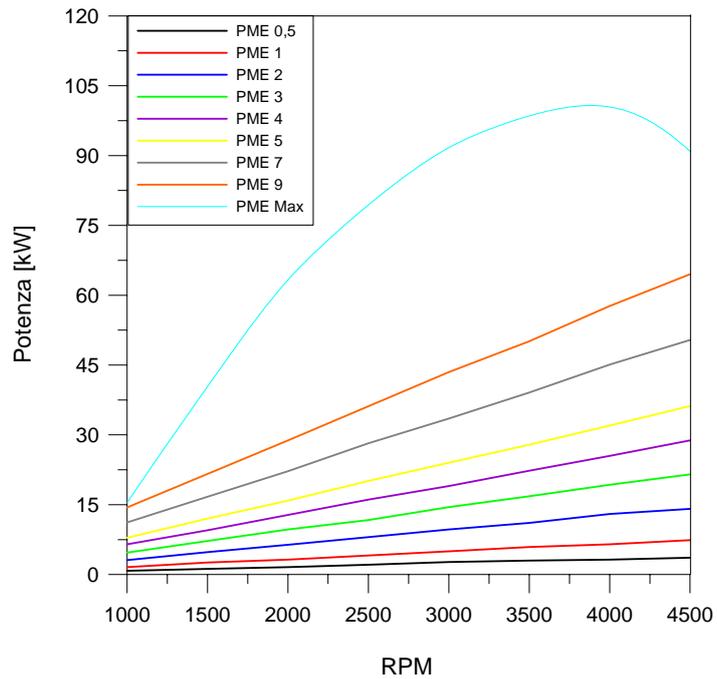


Fig. 5.14: Andamento della potenza al variare del numero di giri per diversi valori del carico.

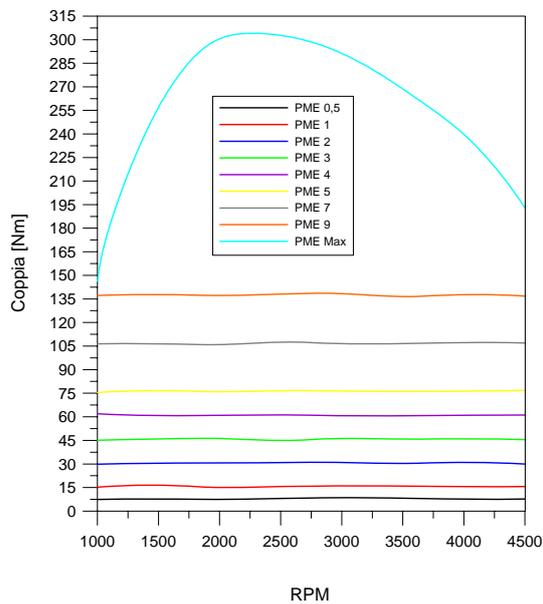


Fig .5.15: Andamento della coppia al variare del numero di giri per diversi valori del carico

Analogamente a quanto fatto per la potenza, nel diagramma di figura 5.15 è riportato l’andamento della coppia in funzione del numero di giri del motore; ogni curva è parametrata per valori costanti della pme tranne l’ultima che si riferisce al valore massimo della pme (valore che varia con il numero di giri).

Nella figura 5.16 è rappresenta la variabilità del consumo specifico di combustibile.

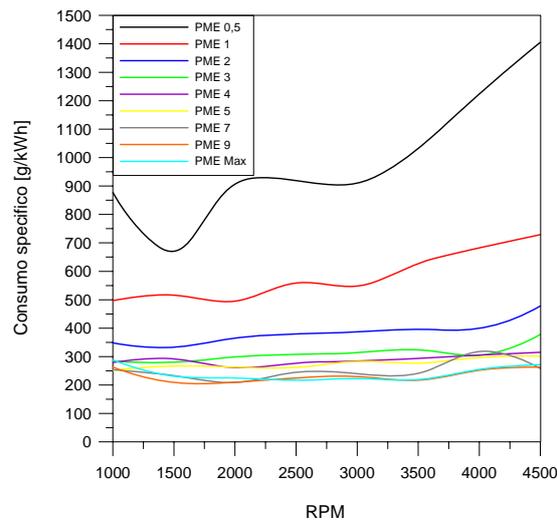


Fig. 5.16: Andamento del consumo specifico di combustibile al variare del numero di giri

## 5.2 LA SALA PROVA MOTORI

Nel Dipartimento di Ingegneria Meccanica per l'Energetica (D.I.M.E.) sono presenti due locali per la sperimentazione sui motori a combustione interna: uno utilizzato per le prove su motori a benzina e l'altro per le prove su motore Diesel. Ognuna delle due sale è divisa in due zone, una adibita alla messa su banco del motore (sala motore), l'altra utilizzata per il controllo delle prove (sala comando). La sala motore è totalmente visibile dalla sala comando tramite un doppio vetro, unico elemento di separazione tra le due, che garantisce anche l'insonorizzazione di quest'ultima.

Nella sala motore sono presenti:

- il motore montato sul banco, strumentato con una serie di sensori per il rilievo delle grandezze di interesse;
- il freno dinamometrico, collegato al motore;
- i circuiti di raffreddamento del motore,
- un ventilatore mobile che, provvede al raffreddamento del motore ed in particolare della linea di scarico;
- un impianto aspirante per i gas di scarico;
- la bilancia per la misurazione della portata di combustibile;
- il sistema di campionamento ed analisi dei gas di scarico,

- una stazione termometrica, per la misura della temperatura di bulbo umido e bulbo asciutto e della umidità relativa del locale motore;
- un sistema di acquisizione veloce dei segnali di sala
- dispositivo di attuazione del comando acceleratore;
- un sistema hardware per la gestione della centralina motore

Nella sala comando, invece, sono presenti unità di controllo e di lettura a cui sono collegati i vari misuratori e sensori che strumentano il motore. Ai lati del doppio vetro divisorio, si trovano due rack.



Figura 5.17: Sala Comando

Il rack di destra (figura 5.17) contiene:

- indicatori analogici della Borletti di tipo automobilistico, per la lettura della pressione e della temperatura dell'olio motore, della temperatura dell'acqua di raffreddamento e della pressione di sovralimentazione; tali grandezze sono visualizzate su uno dei due monitor della sala comando;
- gli indicatori di tensione ed intensità di corrente del freno dinamometrico, un contagiri ed un indicatore digitale della forza esercitata dal freno;
- indicatori analogici della temperatura dell'acqua sia all'ingresso, sia all'uscita degli scambiatori di calore; tali indicatori sono inoltre dotati di circuiti elettrici che comandano l'apertura delle elettrovalvole poste sul circuito dell'acqua di raffreddamento degli scambiatori, che entrano in funzione nel

momento in cui si raggiunge una preimpostata temperatura;

- l'indicatore digitale del consumo di combustibile proveniente dalla bilancia;
- le spie di innesto della refrigerazione;
- i comandi delle elettrovalvole che selezionano la provenienza dell'acqua di raffreddamento degli scambiatori e del freno. Nel seminterrato del dipartimento, infatti, sono presenti tre grosse capacità contenenti acqua, che sono collegate, mediante tubazioni, agli scambiatori ed al freno; questi possono essere alimentati o con acqua presente nei suddetti serbatoi tramite pompe di circolazione, oppure con acqua proveniente dall'acquedotto (capacità esterna), qualora la prima arrivasse a temperature troppo elevate per l'utilizzo;
- il quadro d'accensione del motore, con la chiave e la spia delle candele di preriscaldamento (queste ultime presenti sul motore ma non collegate);
- due alimentatori a corrente continua stabilizzati.

Il rack di sinistra contiene invece:

- due personal computer equipaggiati con le schede di acquisizione PCI 6023, PCI 6024, NI PCI 4351, PCI MIO 16E1 della National Instruments;

Nella parte anteriore della sala sono presenti:

- due monitor per la visualizzazione delle grandezze rilevate dal sistema di sensori collocati sul motore e delle misure delle emissioni gassose del motore (S.I.A.D. Server);
- un computer utilizzato per interfacciarsi con il software di centralina INCA;
- due tastiere per operare sui sistemi INCA e SIAD;
- un quadro comando che comprende il controllo del freno dinamometrico e dell'acceleratore.

Da notare che nell'allestire la disposizione della sala comando, si è scelto di disporre davanti all'operatore i due monitor che visualizzano le grandezze più critiche per il motore (temperature e pressioni) in modo da poter effettuare un frequente e comodo controllo di queste senza trascurare il controllo visivo sul motore (attraverso il vetro che separa la sala comando dalla sala motore) e sul software di centralina.

Si è altresì optato per il collocamento del quadro di controllo freno/acceleratore in posizione frontale per evidenti motivi di comodità.

**5.2.1 DESCRIZIONE DELLA SENSORISTICA E DEI DISPOSITIVI PER IL CONDIZIONAMENTO E L'ANALISI DEI SEGNALI.**

Nei seguenti paragrafi verranno descritti tutti i dispositivi hardware e software per l'acquisizione, il condizionamento e l'elaborazione dei segnali.

Particolare attenzione verrà posta alla sensoristica utilizzata nelle prove sperimentali e alla caratterizzazione della catena di misura per il prelievo e la misura delle grandezze tipiche di funzionamento di un motore a combustione interna.

Si deve innanzitutto descrivere la disposizione della sensoristica e le grandezze da essa misurate. Si osservi la figura 5.18, tenendo conto che gli indicatori con sfondo color arancione indicano sensori allestiti nella sala motore del DIME, mentre i restanti appartengono alla configurazione originale del motore.

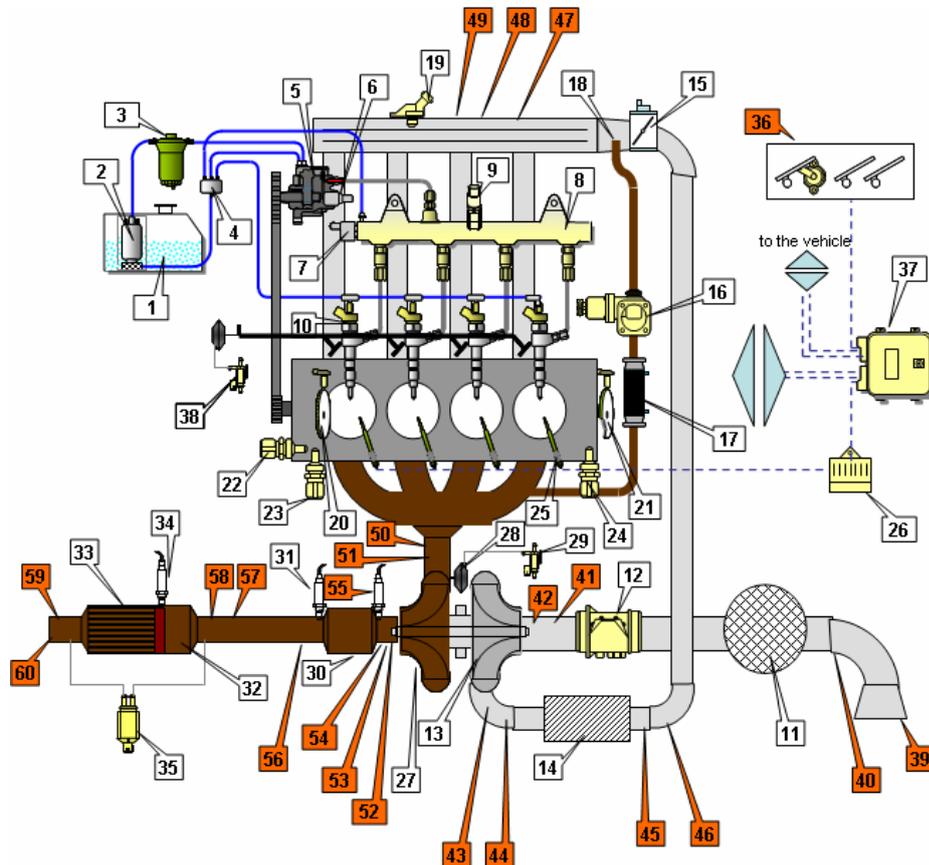


Fig 5.18 – Disposizione della sensoristica

*Sensoristica appartenente alla configurazione originale motore*

<b>1. Tank</b>	<b>20. Crankshaft</b>
<b>2. Electric Fuel-</b>	<b>21. Camshaft</b>
<b>3. Fuel Filter</b>	<b>22. Coolant</b>
<b>4. Damper Volume</b>	<b>23. Oil Minimum</b>

<b>5. High Pressure</b>	<b>24. Oil Level Sensor</b>
<b>6. Fuel metering</b>	<b>25. Glow Plugs</b>
<b>7. Pressure Regulator</b>	<b>26. Glow Plug</b>
<b>8. Rail</b>	<b>27. Variable</b>
<b>9. Rail Pressure</b>	<b>28. VGT Actuator</b>
<b>10. Injectors</b>	<b>29. VGT Vacuum</b>
<b>11. Air Filter</b>	<b>30. Pre-catalyst</b>
<b>12. Air Flow Meter</b>	<b>31. Outlet Pre-</b>
<b>13. Compressor</b>	<b>32. Main Catalyst</b>
<b>14. Intercooler</b>	<b>33. Diesel Particulate</b>
<b>15. Electronic</b>	<b>34. Inlet DPF</b>
<b>16. EGR Electric</b>	<b>35. DPF Differential</b>
<b>17. EGR Cooler</b>	<b>36. Pedal Assembly</b>
<b>18. EGR Distributor</b>	<b>37. Engine Control</b>
<b>19. Intake Manifold</b>	<b>38. Variable Swirl</b>

*Sensoristica di sala (color arancio)*

<b>39. Temperatura Aria</b>	<b>51. Temperatura</b>
<b>40. Portata Aria</b>	<b>52. Temperatura Valle</b>
<b>41. Temperatura</b>	<b>53. Pressione Valle</b>
<b>42. Pressione Ingresso</b>	<b>54. Prelievo per analisi</b>
<b>43. Pressione Valle</b>	<b>55. Sonda UEGO</b>
<b>44. Temperatura</b>	<b>56. Temperatura Valle</b>
<b>45. Pressione Uscita</b>	<b>57. Temperatura Monte</b>
<b>46. Temperatura</b>	<b>58. Pressione Monte</b>
<b>47. Temperatura</b>	<b>59. Temperatura Valle</b>
<b>48. Prelievo per CO2</b>	<b>60. Pressione Valle DPF</b>
<b>49. Pressione</b>	
<b>50. Pressione Monte</b>	

Nei rilievi sperimentali e allo scopo di caratterizzare completamente i parametri di funzionamento del motore sono stati utilizzati i seguenti dispositivi di rilevazione (sensori):

- Misuratori di pressione.
- Termocoppie di tipo K per i rilievi delle temperature.
- Anemometro a filo caldo per la misura della portata d'aria.
- Bilancia gravimetrica per la misura della portata di combustibile.
- Encoder incrementale o dispositivo marca angoli per la misura del numero di giri.
- Analizzatori dei gas di scarico..
- Sonda UEGO per l'acquisizione del rapporto aria-combustibile

### Misuratori di pressione

I misuratori di pressione utilizzati per strumentare sono di tipo piezoresistivo. I trasduttori piezoresistivi sono del tipo RS-348-8093, rappresentati in figura 5.19. Essi sono alimentati da un apposito alimentatore con una tensione pari a 12 Volt ed hanno il fondo scala a dieci bar. Il segnale acquisito è mandato al blocco BNC prima di arrivare al terminale del rack sinistro nella sala comando (SIAD)



Fig. 5.19: Trasduttore piezoresistivo RS-348-8093

### Misuratori di temperatura: termocoppie

Per le misure di temperatura vengono impiegate le termocoppie. Le termocoppie sfruttano principi termoelettrici dei metalli e rispetto alle termoresistenze hanno una maggiore velocità di risposta ed un minor costo.

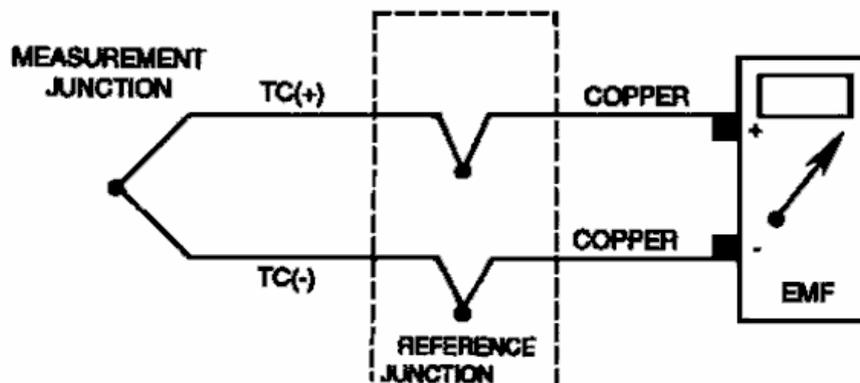


Fig. 5.20: Schema di una termocoppia

Se consideriamo un filo di materiale metallico avente due temperature differenti alle sue estremità, viene a formarsi una forza elettromotrice nota come Seebeck electromotive force (emf); questo fenomeno avviene se esiste un gradiente termico e non necessita di avere un circuito chiuso. Una generica termocoppia è costituita, infatti, da due fili metallici collegati ad un estremo avente una certa temperatura  $T_1$  (hot junction) e aventi, all'altro estremo, una stessa temperatura  $T_2$

(cold junction); la tensione che si va a misurare sul giunto caldo agli estremi dei due fili è strettamente correlata con la differenza di temperatura tra i due giunti. L'entità di corrente che circola dipende chiaramente dal tipo di metallo.

Una termocoppia, come si vede dalla figura 5.20, per la sua natura di strumento di misura differenziale, produce una emf dovuta alle diverse temperature dei due giunti. Una delle due giunzioni è alla temperatura che vogliamo misurare, l'altra è la giunzione di riferimento ad una certa temperatura. La presenza del rame (copper) che collega la giunzione di riferimento al voltmetro non introduce nessuna forza elettromotrice (legge dei metalli intermedi). Nelle tabelle fornite dalle case produttrici è data una forza elettromotrice riferita al giunto freddo avente temperatura di 0 °C.

### Misuratore della portata d'aria: anemometro o debimetro a filo caldo

Lo scopo del misuratore della portata d'aria facente parte della sensoristica propria della gestione del motore, installato immediatamente a valle del filtro dell'aria, è quello di misurare il flusso dell'aria che viene aspirato dal motore e di fornire l'informazione relativa alla centralina di controllo del sistema di iniezione stesso. In sala è stato aggiunto, a monte del filtro aria, un altro anemometro con lo scopo di tarare e rendere quindi disponibile il segnale di centralina relativo al debimetro del motore.

Esistono diversi tipi di debimetro:

- Hot wire MAF Sensor;
- Vane Air Flow meter;
- Karmen Vortex Air Flow Meter.

Il debimetro da noi utilizzato è del tipo a “filo caldo” (Hot Wire) il cui schema è rappresentato in figura 5.21.

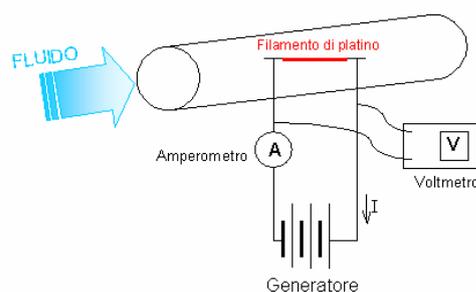


Fig. 5.21: Anemometro a filo caldo

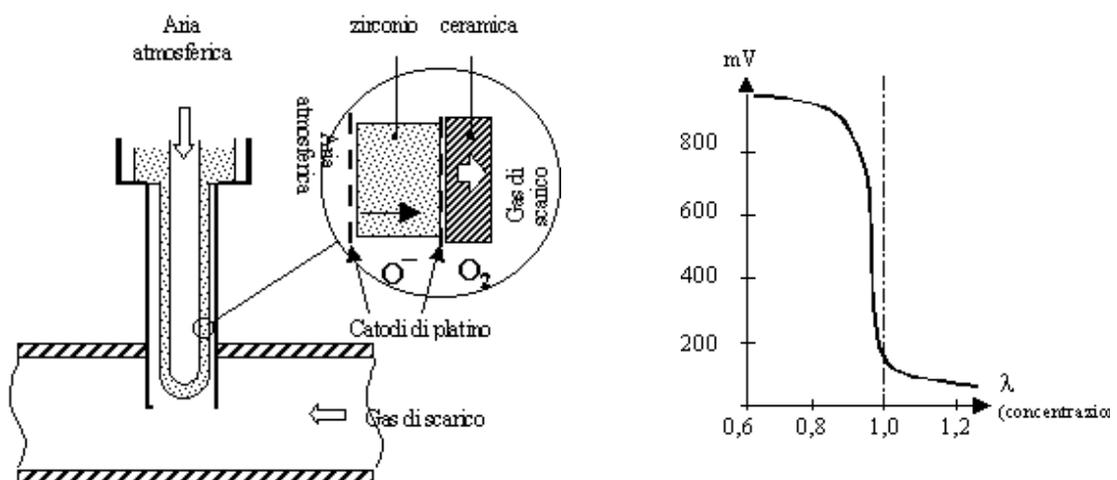
**Sonda UEGO (Universal Exhaust Gas Oxygen Sensor)**

La sonda UEGO è posizionata a monte del Pre-Cat per tenere sotto controllo il rapporto Aria/Combustibile (A/F) allo scarico; che può essere utile anche per la gestione di una trappolo per gli NOx.

In figura 5.22 è riportato lo schema della sonda lambda. La sonda, inserita nel condotto in cui viaggiano i gas di scarico, è costituita da due elettrodi di platino separati da uno strato di zirconio, della forma di tubo ma con una sola estremità chiusa. L'estremità aperta consente all'aria atmosferica di entrare e venire a contatto con l'elettrodo interno. L'estremità chiusa è rivestita completamente di ceramica, che è a contatto dei gas di scarico.



Fig. 5.22



**Schema elementare di una sonda lambda**

**Andamento della tensione ai capi della sonda lambda al variare della concentrazione di ossigeno nei gas di scarico**

Fig. 5.23 – Schema Sonda UEGO

Quando lo strato ceramico raggiunge una temperatura di circa 350°C, diventa poroso consentendo all'ossigeno molecolare dei gas di scarico di raggiungere l'elettrodo interno. Se le pressioni parziali dell'ossigeno presente rispettivamente nell'aria e nei gas di scarico sono diverse, l'ossigeno O<sub>2</sub> con maggiore pressione parziale (quindi sicuramente quello dell'aria atmosferica), a contatto con l'elettrodo di platino, si riduce in ioni O<sup>-</sup> che attraversano lo strato di zirconio; di conseguenza, tra gli elettrodi si stabilisce una differenza di potenziale che è funzione inversa della pressione parziale di ossigeno presente nei gas di scarico.

### **Bilancia gravimetrica**

La bilancia (figura 5.24) presente nella sala motore è un misuratore del tipo AVL 703D e permette misure molto precise essendo di tipo gravimetriche; queste eliminano la possibilità di errori imputabili a variazioni di temperatura. E' in grado di effettuare cicli di misura completamente automatizzati.



Fig. 5.24: Bilancia gravimetrica

L'impianto è costituito da una bilancia di combustibile controllata elettronicamente e da due contatori digitali. La bilancia rileva, attraverso un sistema di fototransistor, lo svuotamento progressivo di un recipiente, stabilendo così la massa di combustibile consumata dal motore in un tempo predefinito. L'unità di controllo AVL 7011, che si relaziona con il sistema S.I.A.D., controlla l'esatta sequenza e durata delle fasi dei singoli cicli di misura e la successione dei cicli.

### Encoder Incrementale (contagiri o dispositivo marca-angoli)

L'Encoder è un dispositivo che converte uno spostamento lineare o rotatorio in un segnale digitale o impulsivo (fig. 5.25).

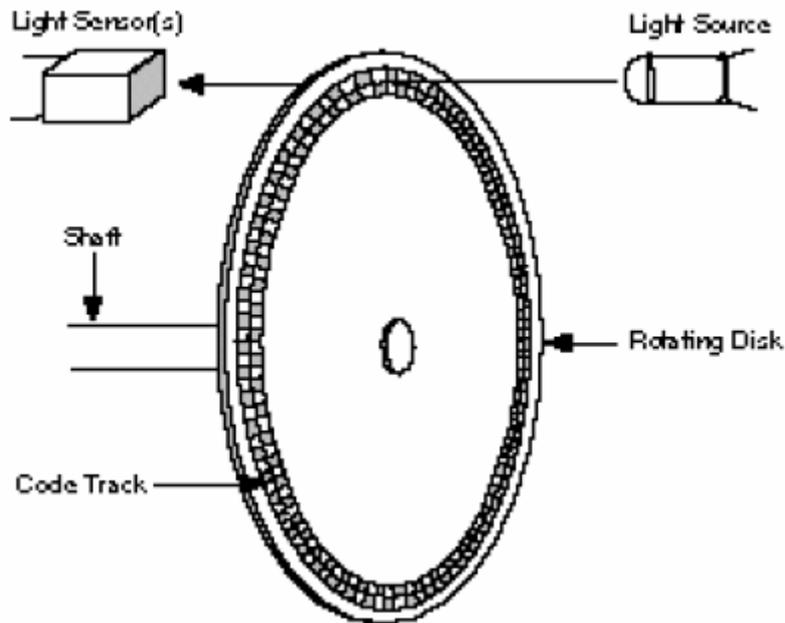


Fig. 5.25: Encoder incrementale.

Le varianti più diffuse di encoder sono di tipo ottico e consistono di un disco rotante, una sorgente di luce, e un photodetector (sensore di luce).

Il disco, montato su di un albero rotante, è costituito da uno o più tracce codificate (code track) divise in settori (il cui numero dipende dalla risoluzione) opachi o trasparenti. Durante la rotazione del disco i settori interrompono la luce emessa dalla sorgente generando un segnale digitale o impulsivo.

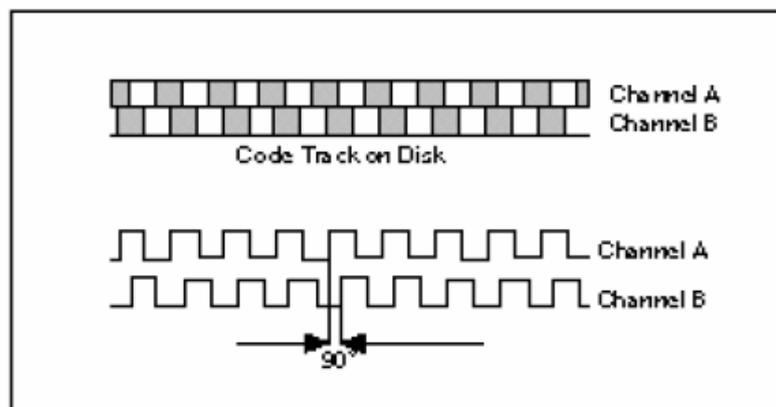


Fig. 5.26: Canali di output A, B di un encoder incrementale

Veniamo all'applicazione dell'encoder nella sala prova descritta in questo capitolo.

Per la misura corretta del ciclo indicato è necessaria la correlazione tra i valori di pressione, misurati all'interno del cilindro tramite sensori veloci, ed i rispettivi angoli di manovella.

Tale compito è affidato al dispositivo marca angoli. Esso è costituito da un disco di piccole dimensioni di materiale impermeabile alla luce, rigidamente vincolato all'albero motore, sulla cui periferia sono incise 600 piccole tacche, utilizzate come marks degli angoli di manovella, attraverso le quali può passare la luce. Due sorgenti di luce infrarossa ed altrettanti ricevitori, sono disposti avanti e dietro tale ruota. Ogniqualvolta il ricevitore viene raggiunto dal raggio luminoso, un'apposita cellula fotoelettrica provvede a fornire un impulso elettrico. Tale segnale viene poi inviato ad un moltiplicatore di impulsi che fornisce elettronicamente 1800 impulsi in onda quadra per ogni giro dell'albero motore, cioè ogni  $0,2^\circ$  di angolo di manovella. Alcuni degli strumenti descritti di seguito sfruttano questo segnale per correlare il valore di pressione misurato al corrispondente angolo di manovella, e dunque alla cilindrata, in tempo reale.

Le 600 tacche non sono tutte della medesima dimensione; una di esse, quella corrispondente al punto morto superiore, è più grande delle altre e, generando un segnale diverso, serve ad individuare tale punto.



Fig. 5.27: Installazione del dispositivo marca angoli

Durante l'installazione del dispositivo marca angoli sul motore si è dovuto considerare il fatto che il suo braccetto deve rimanere solidale al motore, in modo

tale da permettergli di vibrare insieme ad esso. Qualora infatti il braccetto fosse stato ancorato a terra e non al motore, le vibrazioni di questo avrebbero portato a sollecitazioni anomale sull'elemento che avrebbero potuto danneggiarlo.

Per evitare l'insorgere di tale problema, si è scelto di ancorare il braccetto della ruota ottica al blocco motore tramite una staffa ancorata ad un alloggiamento di un supporto motore presente in vettura ma non in sala.

### Analizzatori dei gas di scarico

Il banco di campionamento ed analisi dei gas di scarico, presente nella sala motori del D.I.M.E., consta di quattro unità fondamentali: il rack di prelievo e tre analizzatori di gas (Fig. 5.28).



Fig. 5.28: Analizzatori dei gas di scarico

1) Il rack, fabbricato dalla ditta Hartmann & Braun Italia, appare come un grosso “armadio”, contenente al suo interno dei sistemi necessari per il corretto funzionamento degli analizzatori.

Tra di essi si distinguono una serie di termoregolatori con cui è possibile monitorare e pilotare la temperatura sia delle linee in uscita dal banco e dirette agli analizzatori, sia della linea di prelievo del motore. La temperatura definita è di 190°C. E' presente anche un pannello contenente gli interruttori di funzionamento delle varie linee riscaldate all'interno dell'armadio.

I gas diretti alle rispettive linee vengono smistati grazie ad una serie di elettrovalvole, che consentono anche l'ingresso di gas (per esempio azoto, anidride carbonica) necessari alla taratura degli analizzatori.

Siccome gli analizzatori di CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ed HC sono strumenti che funzionano nel campo dell'infrarosso, la presenza di acqua al loro interno porterebbe ad avere delle interferenze nella misura; è necessario dunque provvedere ad una sua

eliminazione. Per tale ragione, all'interno del rack è presente anche un frigo CGEK5 che, raffreddando i gas, porta alla condensazione dell'acqua in essi contenuta. L'acqua, così condensata, viene poi raccolta all'esterno mediante uno scarico posizionato sul lato del rack.

Nel rack si trovano anche una pompa CGKA1 riscaldata, che provvede all'aspirazione dei gas di scarico all'interno del banco, ed anche una serie di flussimetri che indicano il valore della portata per ciascuna linea di campionamento.

Prima della cella di condensa si registra pure la presenza di un vano riscaldato; si tratta di un vero e proprio fornello che mantiene la temperatura della linea, e quindi del gas in analisi, sempre al di sopra di un limite ben preciso.

Nel rack è presente un filtro in grado di bloccare particolati dissolti nel flusso di scarico che potrebbero danneggiare gli analizzatori.

2) Gli analizzatori forniscono una misura di quella che è la concentrazione volumetrica delle specie gassose; il primo misura la concentrazione degli ossidi di azoto, espressa in parti per milione, mentre gli altri due servono per quantificare la presenza di idrocarburi incombusti, monossido di carbonio, anidride carbonica ed ossigeno.

2a) L'analizzatore degli  $\text{NO}_x$  è un analizzatore a chemiluminescenza del tipo ECO PHYSICS CLD 700 EL ht. Al fine di ottimizzare la risposta dello strumento, è possibile scegliere tra quattro diversi campi di misura: da 0 a 10, da 0 a 100, da 0 a 1000, da 0 a 10000 ppm.

L'analizzatore a chemiluminescenza si basa sul principio che l'NO presente (che costituisce il componente fondamentale degli  $\text{NO}_x$ ) si combina con l'ozono  $\text{O}_3$  dando origine a molecole di  $\text{NO}_2$  eccitate elettronicamente, che ritornano allo stato normale emettendo radiazioni luminose di intensità proporzionale alla percentuale di NO contenuta nel campione da esaminare. L'ossido  $\text{NO}_2$  è trasformato in NO, facendo passare il gas da analizzare in un convertitore catalitico.

2b) Gli analizzatori degli altri gas, invece, sono due fotometri industriali a raggi infrarossi non dispersivi (N.D.I.R., Nondispersive Infrared Detectors) del tipo URAS 14, realizzati dalla ABB; regolando i diversi canali di funzionamento, è possibile ottenere la misura delle diverse specie.

I due fotometri della sala prova del D.I.M.E. per utilizzare una sola pompa, anziché due, prevedono il funzionamento in serie.

Gli analizzatori N.D.I.R. sfruttano il fatto che un gas, esposto a radiazioni

infrarosse, assorbe quelle di una particolare lunghezza d'onda, legate alle caratteristiche della sua struttura atomica. Tali analizzatori sono particolarmente idonei per la misura di CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>. Per l'analisi del quantitativo di HC presenti sarebbero più adatti strumenti a ionizzazione di fiamma F.I.D. (Flame Ionization Detector) che si basano sul principio che una fiamma di idrogeno puro, che brucia in aria, forma un trascurabile numero di ioni, mentre la combustione di idrocarburi produce una ionizzazione abbastanza forte.

Il frontale dei due fotometri, analogamente a quello relativo all'analizzatore degli NO<sub>x</sub>, presenta un indicatore digitale a cristalli liquidi e una tastiera di parametrizzazione. Un ricevitore di radiazione, riempito con lo stesso gas di cui s'intende misurare la concentrazione, permette di effettuare la misura. La radiazione assorbita, che determina l'effetto di misura, è rappresentata da una funzione esponenziale (legge di Lambert-Beer). Tale relazione non lineare tra l'assorbimento e la concentrazione dei gas, richiede una linearizzazione delle curva, il che viene realizzato mediante il software dello strumento.

Il preamplificatore del primo ricevitore è munito di un sensore di temperatura che provvede a compensare la variazione di densità del gas causata da una variazione della temperatura ambiente (valutabile mediamente intorno al 3% ogni 10°C). Le eventuali oscillazioni di pressione, che pure possono inficiare la misura, sono invece compensate dall'impiego di un sensore di pressione. Si stima che, ad ogni variazione di 10 mbar della pressione, corrisponda una variazione dell'1% sulla misura dei gas.

### **Analizzatore CO<sub>2</sub>-EGR**

L'analizzatore in questione serve a misurare la frazione di CO<sub>2</sub> presente nel collettore di aspirazione.

Un campione gas viene prelevato dal collettore di aspirazione, in un punto a valle della immissione dei gas ricircolati.

Il principio funzionamento di tale analizzatore è lo stesso di quelli usati per l'analisi CO<sub>2</sub> dei gas di scarico prelevati a monte (Pre-Cat), futuro LNT. Esso è infatti un NDIR (Non Dispersive InfraRed Detector).

Il vantaggio di tale apparecchio è che esso, avendo due prese di prelievo, può analizzare i gas nel collettore di aspirazione e nel collettore di scarico. Dalle frazioni di CO<sub>2</sub> presenti nei due campioni di gas, esso effettua automaticamente il calcolo del rate EGR adoperando la seguente formula:

$$\%EGR = \frac{CO_{2\text{aspirazione}}}{CO_{2\text{scarico}}} * 100$$

Nel nostro caso però, abbiamo acquisito il CO<sub>2</sub> in aspirazione ed abbiamo calcolato il rate EGR con la stessa formula mostrata sopra.



Fig. 5.29 – Analizzatore CO<sub>2</sub>-EGR

### Condizionamento del segnale

In ogni catena di misura è sicuramente il sensore ( trasduttore ) la parte sensibile alle variazioni del misurando; esso deve inoltre convertire il fenomeno fisico in un segnale elettrico.

In ogni caso, il segnale elettrico prodotto varia in dipendenza del parametro fisico monitorato e deve essere opportunamente condizionato prima di essere elaborato dal dispositivo di misura.

Le principali caratteristiche richieste ad un qualunque sistema (accessorio) dedicato al condizionamento del segnale sono dunque:

- Amplificazione del segnale (guadagno)
- Filtraggio
- Riduzione del rumore e delle distorsioni.

Una termocoppia, per esempio, combina due materiali diversi per generare

una differenza di potenziale variabile con la temperatura. Tale differenza di potenziale genera un segnale elettrico di pochi micron di Volt per ogni variazione di un grado della temperatura, dunque una misura accurata della stessa richiede un sistema di condizionamento capace di amplificare il segnale con un elevato guadagno e un basso rumore.

Di seguito verranno descritti tutti gli accessori di condizionamento del segnale utilizzati nelle prove sperimentali.

### **L'alimentatore**

Come è stato già rilevato nella sala motore è presente una postazione sulla quale è posizionato un alimentatore (Figura 5.30) regolabile sia in corrente che in tensione.

L'alimentatore ha il compito di fornire una tensione ed una corrente prestabilita alla centralina ed alla sonda UEGO, la sua flessibilità consente in oltre di alimentare altre eventuali utenze di sala.



Fig. 5.30: Alimentatore

### **I blocchi di connessione**

Si è già detto in precedenza che nella sala motori sono presenti due blocchi di connessione: il TC 2190 e il BNC 2090 (figure 5.31 e 5.32). Il primo permette di rilevare fino a quattordici segnali provenienti dalla misura delle temperature; il secondo è un blocco al quale, tramite cavi BNC vengono mandati i segnali dei cinque misuratori di pressione di tipo estensimetrico, dei tre di tipo piezoresistivo, i segnali dei rilevatori dei gas di scarico, il segnale del freno, la bilancia.



Fig. 5.31: Blocco di connessione TC 2190



Fig. 5.32: Blocco di connessione BNC 2090

### **Amplificatore di carica differenziale SC 2040**

Il segnale (una carica elettrica), generato per esempio dal cristallo, va amplificato utilizzando un amplificatore ad elevata impedenza d'ingresso.

In sostanza, l'amplificatore agisce da integratore di carica, compensando la carica del trasduttore con una carica di valore uguale ma polarità opposta, producendo così una tensione ai capi del condensatore. In linea di principio, più che di amplificatore si dovrebbe quindi parlare di convertitore carica-tensione.

In particolare, l'SC 2040 è un amplificatore differenziale ad otto canali con otto circuiti di track-and-hold che consentono l'acquisizione in contemporanea di tutti i canali preservando la relazione temporale tra gli stessi (fig. 5.33). Più chiaramente, il circuito analogico di input consiste in un amplificatore programmabile ad otto canali seguito da otto circuiti di tack-and-hold.

Il circuito di track-and-hold è completamente programmabile nel senso che esso può porsi in modalità track o hold dipendentemente dalle specifiche necessità.

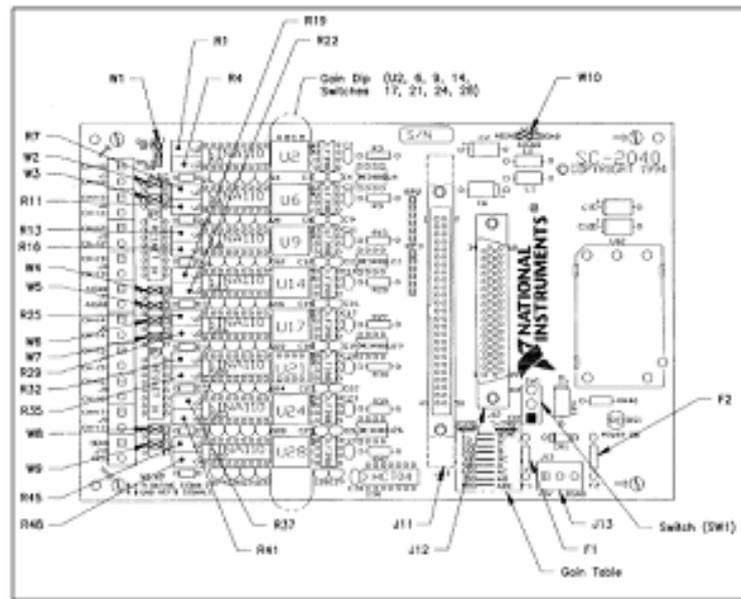


Fig. 5.33: SC 2040

Ogni circuito di tack-and-hold, in modalità track, registra in un buffer comune il segnale proveniente dagli otto canali, quando si passa nella modalità hold il buffer viene svuotato; la simultaneità delle due operazioni per tutti gli otto circuiti è tale da preservare la relazione temporale tra tutti i canali. In ogni caso i circuiti di tack-and-hold sono soggetti ad una serie di imperfezioni le più rilevanti delle quali sono dovute al tempo necessario per il riposizionamento del circuito in modalità track e alla stabilizzazione del circuito in modalità hold. Questo chiaramente comporta un tempo di attesa affinché il dispositivo di acquisizione che segue nella catena di misura possa prelevare i campioni.

### Schede di acquisizione

Come abbiamo sopra detto, al sensore-trasduttore è delegato il compito di seguire le variazioni del misurando e di trasformare tali variazioni in un segnale in corrente o in tensione più facilmente trattabile dai dispositivi che seguono nella catena di misura; al sistema di condizionamento è delegato invece il compito di amplificare ed eventualmente filtrare il segnale infine il dispositivo di acquisizione deve provvedere ad una conversione digitale del segnale analogico e rendere disponibile i campioni digitali all'unità di visualizzazione.

La mappatura del segnale analogico da parte del convertitore A/D viene effettuata tramite due operazioni: il campionamento e la quantizzazione.

## Il campionamento e la quantizzazione

Il campionamento consente di ottenere un segnale a tempo discreto, cioè una successione o sequenza  $x[n]$  di numeri rappresentabile con una funzione di variabile intera relativa avente valori reali o complessi, partendo dal segnale analogico.

Campionare un generico segnale  $x(t)$  significa “estrarre” dal segnale stesso i valori che esso assume a istanti temporali equispaziati, cioè multipli di un intervallo  $T$  detto periodo di campionamento. Con questa operazione viene a crearsi una sequenza il cui valore  $n$ -esimo  $x[n]$  è il valore assunto dal segnale a tempo continuo all’istante  $nT$ :  $x[n]=x(nT)$ .

L’operazione di campionamento viene simbolicamente effettuata da un dispositivo, il campionatore, indicato con una sorta di interruttore che si chiude per un intervallo di durata infinitesima. La cadenza con cui l’interruttore si chiude è pari a:

$$fc = \frac{1}{T}$$

e prende il nome frequenza di campionamento (sample rate), misurata in Hz o in campioni/secondo. Prima dell'avvento del digitale il campionamento era ottenuto tramite filtri analogici passivi. In Figura 5.19 è rappresentato un generico segnale analogico in funzione del tempo  $t$ , si può vedere come vari con continuità. “L” in ordinata rappresenta il livello del segnale.

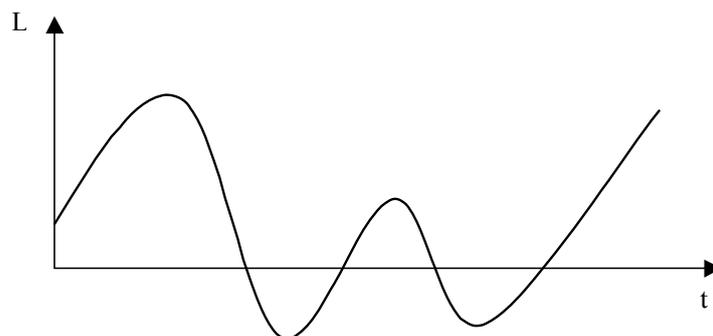


Fig. 5.34: Piano analogico.

La Figura 5.20 rappresenta il corrispettivo digitale del precedente segnale analogico: in questo caso si vede chiaramente che abbiamo a che fare con una sequenza discreta di valori e non più con un continuo, con i valori della sequenza che distano tra loro un tempo  $T$  pari al periodo di campionamento.

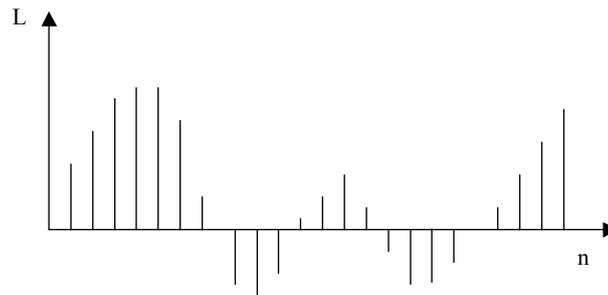


Fig. 5.20: Piano digitale.

Il convertitore A/D è comandato da un segnale di clock (temporizzazione) alla frequenza di campionamento. Il campionatore ideale estrae in corrispondenza di ogni impulso di clock il valore del segnale in ingresso all'istante di campionamento, che è in generale un numero reale con infinite cifre decimali. Diversamente dal campionatore ideale, il convertitore A/D rende invece una rappresentazione finita di questo numero reale (segnale numerico), e precisamente in aritmetica binaria su un numero finito di cifre (bit), variabile da 8 a 24. Il piccolo errore insito nella rappresentazione del numero reale su un numero finito di cifre rappresenta la seconda operazione del convertitore: la quantizzazione.

Di fatto quindi il convertitore effettua una doppia operazione di "discretizzazione": la prima sull'asse dei tempi, dove determina gli istanti in cui si deve considerare il segnale; la seconda sull'asse delle ampiezze dove il segnale viene approssimato al "quanto" più vicino in base alla risoluzione in bit del convertitore.

I convertitori A/D sono caratterizzati da due parametri fondamentali:

- Numero di livelli discreti con cui può essere descritta l'ampiezza del segnale.
- Periodo di campionamento o frequenza di campionamento.

Parlando di campionamento si deve almeno enunciare il teorema di Shannon (o di Nyquist) che fornisce la condizione necessaria affinché un segnale dopo il campionamento possa nuovamente essere ritrasformato in analogico, tramite un convertitore D/A, riottenendo il segnale di partenza.

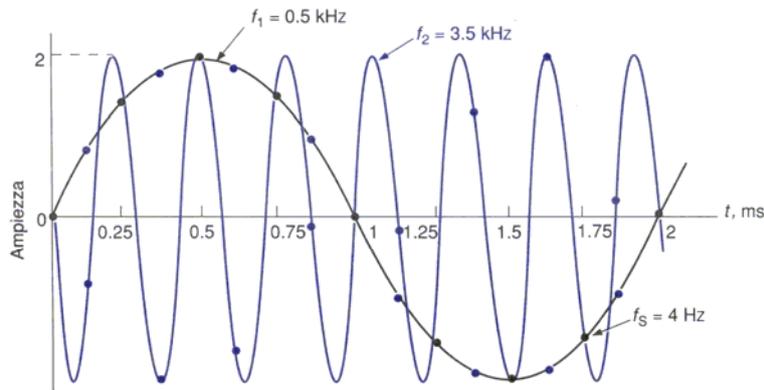
Teorema: la frequenza di campionamento di un segnale deve essere:

$$f_c \geq 2f_{\max}$$

dove  $f_{\max}$  rappresenta la frequenza massima contenuta nel segnale, ed è anche conosciuta come frequenza di Nyquist, mentre  $f_c$  è la frequenza di campionamento.

Se nel campionare non si rispetta questa condizione, le componenti del segnale a frequenza maggiore vengono sottocampionate e quindi se la frequenza di

campionamento non è scelta correttamente potrebbe verificarsi l'errore di aliasing (figura 5.21).



Esempio di aliasing. Le sinusoidi a 0.5 kHz (nera) e a 3.5 kHz (in colore) hanno la stessa ampiezza se queste forme d'onda vengono campionate ogni 0.25 ms (punti neri corrispondenti a una frequenza di campionamento di 4 kHz). Campionando invece ogni 0.125 ms (punti in colore corrispondenti a frequenza di campionamento di 8 kHz) si ottengono valori diversi per le ampiezze dei due segnali.

Fig. 5.35: Aliasing.

La frequenza limite utilizzabile per evitare aliasing è quella di Nyquist:

$$f_N = \frac{f_c}{2}$$

Per evitare problemi di aliasing si utilizza un filtro anti-aliasing che si realizza tramite un filtro passa-basso, in modo da eliminare dal segnale le frequenze più alte, cioè quelle superiori alla frequenza di Nyquist, che sono le frequenze che provocano aliasing. Chiaramente il taglio effettuato dal filtro deve essere tale da non ridurre eccessivamente la qualità del segnale stesso. Un filtro passa-basso ideale ha un andamento caratterizzato da una caduta netta (Figura 5.22 in rosso). Di fatto però, tutti i filtri reali hanno una zona di caduta non trascurabile. L'ampiezza di questa è correlata al numero di bit del segnale e alla frequenza di Nyquist.

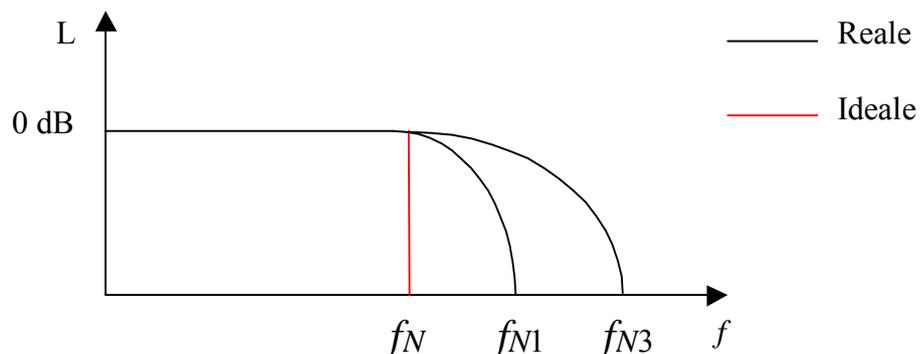


Fig. 5.36: Filtro passa-basso.

Esistono sostanzialmente due tecniche di campionamento reale, il sample and hold e il chopper.

Nel sample and hold (fig 5.23) il segnale  $x(t)$  viene campionato (sample) ad ogni intervallo di tempo  $T_c$  e il suo valore viene mantenuto costante (hold) per un intervallo di tempo  $\tau \leq T_c$ .

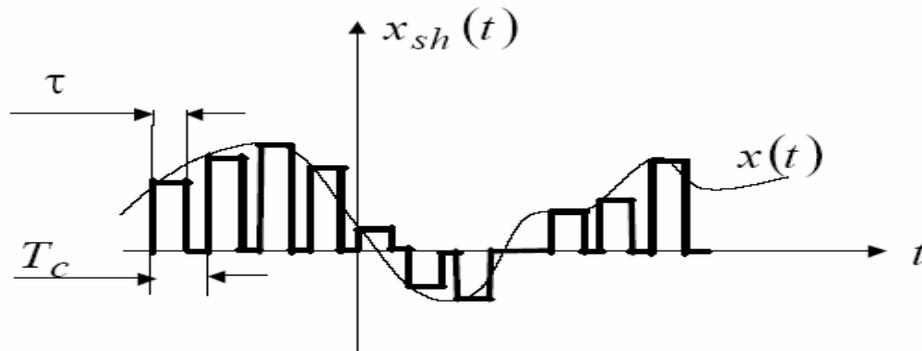


Fig. 5.37: Sample and hold.

Nel caso del chopper il segnale  $x(t)$  viene campionato per un intervallo di tempo  $\tau$  ogni  $T_c$  e per il restante tempo vale zero (figura 5.38).

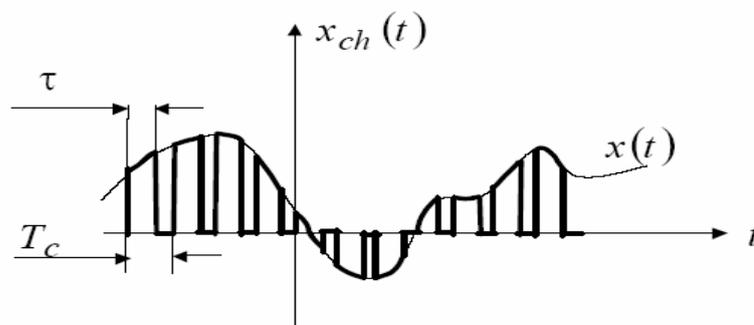


Fig. 5.38: Chopper.

### Multiplexing

Solitamente nei rilievi sperimentali sono presenti decine di sensori, per cui non è economico riservare a ciascun segnale un sistema di acquisizione (amplificazione, conversione analogica/digitale) dedicato.

In tal caso lo schema di acquisizione prevede uno stadio di moltiplicazione dei segnali in ingresso in un unico canale di acquisizione, implementato mediante particolari dispositivi denominati multiplexer.

I multiplexer sono dispositivi caratterizzati da molti ingressi ed una sola

uscita e possono essere di tipo analogico e digitale. In funzione di opportuni segnali logici di selezione, uno ed un solo ingresso è messo in comunicazione con l'unica uscita. L'unità di governo scandisce, uno dopo l'altro, tutti gli ingressi e li legge ad una velocità tale da garantire il rispetto del teorema del campionamento su quel determinato segnale.

Il multiplexer analogico è un dispositivo che consente di commutare  $n$  canali analogici in ingresso in un unico canale analogico di uscita. La commutazione viene comandata da un segnale digitale che codifica il canale di ingresso da selezionare.

Il multiplexer è tipicamente utilizzato come primo componente di un sistema di acquisizione, per cui può essere collegato a trasduttori remoti, che possono avere una tensione di uscita con valore molto diverso dal riferimento di tensione del multiplexer. Questo può produrre un possibile danneggiamento del componente, e quindi è giustificata la presenza di un dispositivo di protezione dalle sovratensioni sul segnale di ingresso.

Il circuito di limitazione di sovratensioni di ingresso utilizza anche una resistenza  $R$  posta in serie a ciascun ingresso analogico. Tuttavia la presenza di tale resistenza può peggiorare la qualità del segnale analogico in transito.

### **Schede di acquisizione National Instruments Serie E.**

La famiglia di schede della serie E sono equipaggiate con un convertitore A/D a 16 o 12 bit, con 16 canali di ingresso analogico, 8 canali digitali e due linee di clock-timing. Il sistema di controllo temporale (timing controller) è affidato al DAQ-STC, che consiste di tre gruppi di controllori che gestiscono l'input e l'output.

Ingressi analogici: gli ingressi possono essere unipolari o bipolari: ingresso unipolare vuol dire che il segnale in tensione varia tra 0 ed un valore di riferimento  $V_{ref}$  (10 V), ingresso bipolare vuol dire invece che il segnale varia tra  $-V_{ref}$  e  $+V_{ref}$  ( $\pm 5$  V).

Uscite analogiche: la scheda prevede due uscite analogiche in tensione il cui valore viene impostato dal software di controllo; anche per la sezione di uscita sono possibili due configurazioni: unipolare e bipolare. E' da tenere presente che in configurazione unipolare i dati in uscita vengono interpretati sempre come positivi.

Trigger analogico: in aggiunta ad eventi di trigger (inizializzazione) generati via software e ad eventi di trigger digitali, queste schede supportano anche trigger analogici.

### 5.2.2 DESCRIZIONE DELLA SALA COMANDO

Nei precedenti paragrafi si è fornita una descrizione delle principali apparecchiature presenti principalmente in sala motore, alcune delle quali hanno interfaccia nella sala comando. Le apparecchiature descritte in seguito, invece, sono localizzate interamente nella sala comando.

#### **Il Sistema Integrato di Acquisizione Dati: S.I.A.D**

Sulla base delle reali necessità e allo scopo di automatizzare la sala prova motori è stato realizzato un Sistema Integrato di Acquisizione Dati (S.I.A.D.) che consente di monitorare e gestire in tempo reale i principali parametri di funzionamento del motore.

- Al sistema è affidato dunque il compito di:
- Interfacciarsi con i dispositivi di acquisizione.
- Prelevare i campioni acquisiti.
- Elaborare ed analizzare i campioni acquisiti.
- Visualizzare e salvare su file il risultato dell'elaborazione.
- Il sistema di acquisizione dati utilizzato nella fase di sperimentazione, può essere suddiviso in due blocchi:
  - 1) S.I.A.D. Server.
  - 2) S.I.A.D. Client

#### **S.I.A.D. Server**

Questo sistema è costituito da un personal computer sul quale sono alloggiare tre schede di acquisizione National Instruments:

- PCI 6023;
- PCI 6024;
- NI PCI 4351

Poichè le grandezze da acquisire e visualizzare sono numerose, si è deciso di dotare il PC di una scheda video dual head in grado, cioè, di gestire la presenza contemporanea di due monitor e permettere quindi visualizzazione contemporanea di tutti i parametri acquisiti.

Attraverso le schede PCI è possibile collegare il PC ai blocchi di connessione

BNC 2090 e TC 2190 e quindi acquisire i segnali provenienti dalla sala motori. La catena di misura utilizzata nelle prove è quindi così costituita:

1. sensore: direttamente interfacciato al mondo fisico e quindi al misurando di interesse. Ha il compito di seguire le variazioni del misurando e di trasformarle in un segnale elettrico;
2. sistema di condizionamento del segnale: ad esso è affidato il compito di amplificare e filtrare il segnale in modo tale da renderlo idoneo all'acquisizione;
3. sistema di acquisizione: il suo compito è quello di effettuare una conversione del segnale da analogico a digitale.

Il computer è inoltre dotato di un software in grado di gestire tutte le grandezze di interesse; tale programma è stato implementato utilizzando il NI-DAQ (National Instruments Data Acquisition) che è una libreria di funzioni in grado di controllare e gestire un qualunque dispositivo di acquisizione dati con una interfaccia di programmazione. Con questo sistema è possibile acquisire:

- 14 temperature;
- 8 pressioni;
- portate: aria e combustibile;
- coppia;
- potenza in CV e kW;
- PME;
- numero di giri;
- NO (%), NO<sub>x</sub> (%), CO (ppm e %), CO<sub>2</sub> (nei gas di scarico e nell'EGR in %), O<sub>2</sub> (%), HC (ppm).

Nelle figure 5.39 e 5.40 sono rappresentate le schermate così come appaiono all'utente sui monitor del sistema.

Analizziamo adesso più in dettaglio le caratteristiche del software di acquisizione.

Esso offre la possibilità di impostare in tempo reale il canale di acquisizione permettendo, qualora si dovesse riscontrare il malfunzionamento di un canale o si volessero cambiare le connessioni sul blocco, di impostare le nuove condizioni direttamente tramite l'interfaccia utente senza dover modificare il codice sorgente del programma. Questa funzionalità permette di dare una grossa versatilità e facilità di utilizzo del software.



Fig. 5.39: Prima schermata del sistema di visualizzazione

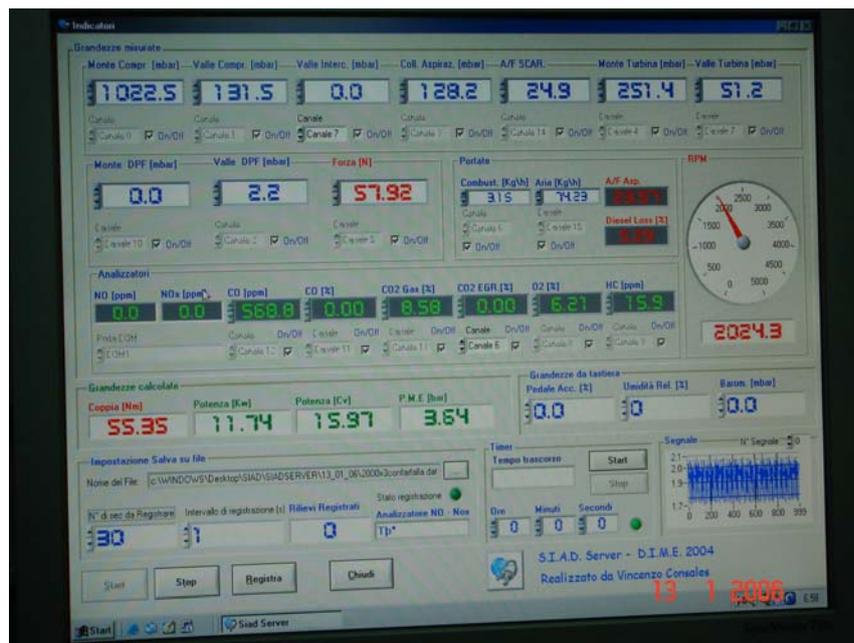


Fig. 5.40: Seconda schermata del sistema di visualizzazione

Altra caratteristica è quella di poter definire per ogni canale, quindi per ogni grandezza acquisita, un range di validità: quando l'entità del misurando esce fuori dal range, l'utente viene avvisato tramite un segnale acustico e visivo. Anche questa funzionalità riveste grande importanza in quanto permette di avvertire tempestivamente l'utente di una qualche anomalia nel funzionamento del propulsore che potrebbe non essere rilevata qualora non fosse presente il sistema descritto.

Nella figura 5.40 si può notare, in basso a destra, una finestra all'interno della quale viene visualizzato l'andamento del segnale che arriva ad uno qualsiasi dei canali di acquisizione; in tal modo l'utente può vedere in maniera chiara come varia il segnale.

Il software ha anche la funzionalità di registrazione che permette di salvare su un file, definibile dall'utente, l'insieme dei dati che vengono prelevati dalla sala motore; è inoltre possibile definire il numero di rilievi da registrare.

### 5.2.3 ALTRE APPARECCHIATURE FONDAMENTALI PRESENTI IN SALA PROVA

Il freno dinamometrico (Figura 5.41) presente nella sala motori è un freno elettrico a correnti parassite modello SCHENCK WS260. Esso è costituito dai seguenti elementi:

- un apparato elettronico di controllo;
- una custodia ad alloggiamento pendolare in cui sono calettati una bobina di eccitazione alimentata da corrente continua e due dischi polari sagomati in periferia con una caratteristica dentatura a stella;
- la cella di carico HBM U2, per la misura della forza applicata al braccio del freno;
- un telaio in cui si trovano le tubazioni per l'acqua di raffreddamento.

Il freno utilizzato in sala non può funzionare da motore (cosa che può essere fatta con i freni elettrici a corrente continua), e pertanto l'avviamento del propulsore è affidato al motorino di avviamento del motore.



Fig.5.42

Passiamo adesso a descrivere il suo funzionamento.

Il rotore è costituito da due dischi polari ad alta permeabilità magnetica ed è connesso attraverso un giunto all'albero a gomiti del motore; il moto di quest'ultimo trascina con se il rotore i cui avvolgimenti, eccitati da corrente continua, generano un campo magnetico. Tale campo è causa di insorgenza di correnti parassite negli avvolgimenti di eccitazione: esse danno origine ad un campo magnetico, che si oppone al moto relativo tra rotore e statore, tanto più intenso quanto più velocemente gira il motore. La rotazione dello statore, attraverso il braccio ad esso solidale, genera una forza che agisce sulla cella di carico piezoelettrica; tale forza moltiplicata per il braccio, ovvero per la distanza tra essa e l'asse di rotazione, fornisce la coppia resistente esplicata dal freno che, a regime, è uguale ed opposta alla coppia motrice del motore. I valori della coppia e della forza possono essere letti sul monitor del SIAD Server.

Variando l'intensità di corrente continua negli avvolgimenti di eccitazione statorica, è possibile effettuare la regolazione della coppia frenante; l'unità di comando che determina tale variazione è posizionata nella parte frontale della sala comando (in un recente passato era ancora parte integrante del test Test Commander, oggi dismesso).

Si deve evidenziare che è necessario garantire che sussistano le condizioni ideali per un corretto funzionamento del freno come la temperatura dell'acqua di raffreddamento, dell'olio lubrificante e della stabilità del punto di funzionamento. Infatti la presenza di correnti parassite nel freno determina una generazione di calore per effetto Joule. È necessario quindi un circuito d'acqua refrigerante che asporti tale calore.

# Capitolo VI

*Le prove sperimentali*

## **Introduzione**

*I moderni motori Diesel Common Rail sono normalmente ottimizzati per essere alimentati con gasolio commerciale. La calibrazione della centralina motore è, conseguentemente, definita per ottenere il giusto compromesso tra prestazioni ed emissioni allo scarico. E' chiaro che, se il motore è alimentato con un combustibile con caratteristiche chimico/fisiche diverse (potere calorifico, rapporto stechiometrico, densità, viscosità, etc. ) la calibrazione deve essere modificata.*

*Le esperienze mostrate hanno evidenziato che il Biodiesel presenta una combustione più veloce, e temperature in camera di combustione maggiori, rispetto al gasolio commerciale, inoltre è necessario iniettare quantità di combustibili maggiori per compensare il minor potere calorifico del Biodiesel rispetto al gasolio tradizionale.*

*Nel presente capitolo si dimostrerà che è possibile ottimizzare le emissioni e le prestazioni di un motore Diesel Common Rail, alimentato con Biodiesel puro o miscelato con gasolio commerciale, modificando la mappatura della centralina motore in funzione del combustibile utilizzato.*

## 6.1 CARATTERISTICHE DEL BIODIESEL

Il Biodiesel è un combustibile che può essere prodotto a partire da diverse fonti rinnovabili, tra cui una grande quantità di oli vegetali (Soia, colza, palma, ecc.). Il processo di transesterificazione permette di ottenere un combustibile adatto per alimentare motori a ciclo Diesel.

Il Biodiesel è generalmente ottenuto con una miscela di diversi oli transesterificati, sia per tener conto della disponibilità dei prodotti in commercio e sia per ottenere un prodotto finale che soddisfi i requisiti richiesti dalle diverse direttive oggi esistenti.

Gli oli vegetali presentano caratteristiche molto diverse tra di loro, anche a causa della quantità di acido grasso contenuto. Si tenga presente che un considerevole contenuto di acidi grassi insaturi migliora la combustione a basse temperature e che il numero di cetano è strettamente dipendente dalla distribuzione di acido grasso.

Per queste ragioni, oli vegetali caratterizzati da differenti porzioni di acidi grassi insaturi, sono miscelati durante la produzione del Biodiesel.

Proprietà	Gasolio	RME
Numero di cetano	48	52
C/H/O (rapporto molare)	16:30:0	19:34:2
Densità, g/cm <sup>3</sup> (15 C)	0.83	0.89
Viscosità cinematica, cSt (37.8 C)	3.3	4.5
Potere calorifico inferiore, kJ/kg	43000	36000
Contenuto di carbonio C (wt%)	86.5	77.4
Contenuto di idrogeno H (wt%)	13.4	12
Contenuto di ossigeno O (wt%)	-	10.5
Contenuto di zolfo S (wt%)	0.05	< 0.01
Rapporto stechiometrico A/F	14.5	12.6
Numero di iodio, g I <sub>2</sub> /100g	-	118
<b>Curva di distillazione</b>		
10% EV.	181	332
50% EV.	255	340
90% EV.	337	350
F.B.P.	372	353
Residuo carbonioso (wt%)	0.01	0.05
Biodegradabilità	no	si

Tabella 6.1 – Caratteristiche chimico fisiche del Biodiesel

Nella tabella 6.1 sono riportate le caratteristiche del Biodiesel utilizzato in tutta la attività mostrata nella presente tesi: si tratta di un Biodiesel ottenuto dalla miscela di 70%

di olio di colza e 30% di olio di soia e girasole, in modo da ottenere un combustibile con un numero di iodio minore di 120, per assicurare un processo di ossidazione stabile.

## 6.2 OTTIMIZZAZIONI DELLA CALIBRAZIONE

Le prove sperimentali sono state realizzate alimentando il motore con Biodiesel puro al 100% (B100) ed una miscela al 25% in volume di Biodiesel e 75% di gasolio commerciale (B25). I risultati ottenuti, in termini di emissioni e prestazioni, sono stati confrontati con prove effettuate alimentando il motore con gasolio commerciale (Diesel fuel).

L'obiettivo della ricerca è stato l'ottimizzazione dei parametri di controllo motore in funzione del combustibile utilizzato, in modo da raggiungere il miglior compromesso tra prestazione del motore e i livelli di emissione, una volta noto il combustibile utilizzato. Per tale scopo è stato utilizzato un software che permette, in tempo reale e durante il funzionamento del motore, di cambiare i parametri motoristici gestiti dalla centralina motore. Come riferimento sono state utilizzate le prestazioni e le emissioni rilevate con il funzionamento a gasolio, ed è stata ricercata una mappatura che permettesse al motore, alimentato con Biodiesel e con la miscela Biodiesel-gasolio, di funzionare in modo analogo a quando viene alimentato a gasolio.

### 6.2.1 LE PRESTAZIONI

Nel presente paragrafo si riportano le prestazioni massime del motore alimentato con Biodiesel. Questa parte dell'attività si è focalizzata sulla ricerca dei parametri motoristici che permettessero al motore alimentato con Biodiesel di erogare la stessa coppia e potenza massima rilevate con il funzionamento a gasolio. Durante questa fase, non sono stati tenuti in conto le emissioni inquinanti allo scarico del motore. Il parametro di centralina su cui si è agito principalmente è stato quello relativo alla coppia richiesta dal sistema di controllo, che a sua volta controlla la quantità di combustibile iniettato per ciclo, il timing dell'iniezione e la pressione di sovralimentazione.

La figura 6.1 riporta la coppia e la potenza massima relativa a tre casi differenti:

- 100% Biodiesel con la calibrazione standard (B100 ECU std)
- 100% Biodiesel con la calibrazione ottimizzata (B100 ECU mod)

- o 100% gasolio (Diesel fuel) con la calibrazione standard

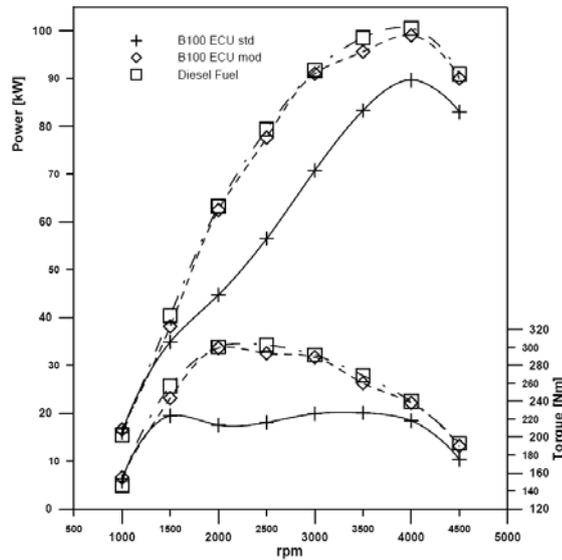


Figura 6.1

E' evidente che, quando il motore è alimentato con Biodiesel, le prestazioni sono sostanzialmente inferiori, a causa delle diverse caratteristiche del combustibile utilizzato: infatti la massa di combustibile iniettata e l'anticipo all'iniezione non tengono conto del più basso potere calorifico e della diversa legge di rilascio del calore del Biodiesel rispetto al gasolio.

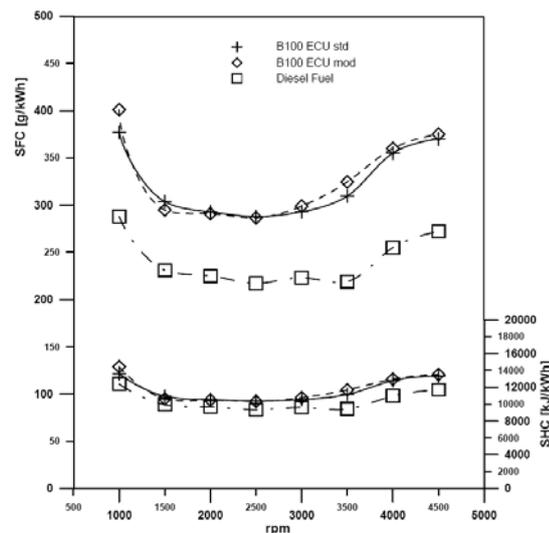


Figura 6.2

Al fine di ottimizzare le prestazioni massime del motore alimentato con Biodiesel, è stato necessario, principalmente, incrementare la massa di combustibile iniettata per ciclo: in questo modo è stato possibile ottenere le medesime prestazioni rispetto al gasolio.

Di conseguenza, il consumo specifico di combustibile (SFC) aumenta, come è possibile notare analizzando la figura 6.2. Ricordando quanto affermato sul consumo specifico e sul consumo specifico di calore nel capitolo precedente, le differenze del consumo di calore in funzione del numero di giri tra i due combustibili sono minime, anche considerando la mappa ottimizzata (B100 ECU mod).

## 6.2.2 LE EMISSIONI INQUINANTI

Nel presente paragrafo vengono illustrate le emissioni inquinanti del motore alimentato con Biodiesel, con la mappatura standard e quella ottimizzata. In particolare verranno analizzati i miglioramenti che è possibile ottenere, per le emissioni di CO e NOx, modificando alcuni parametri motoristici.

Le emissioni dei gas combusti sono state analizzate testando il motore in 12 diverse condizioni di funzionamento (velocità di rotazione e carico motore). Queste condizioni, che rappresentano un largo campo operativo del motore, sono mostrate nella tabella 6.2.

In questo paragrafo verranno mostrati gli andamenti delle emissioni del monossido di carbonio (CO) e degli ossidi di azoto (NOx) per tutte le condizioni motoristiche analizzate e per due diversi combustibili:

- B100 – Biodiesel puro
- B25 – 25 Biodiesel e 75% gasolio (in volume)

	<b>BMEP [bar]</b>			
<b>1500 RPM</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>12</b>
<b>2000 RPM</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>12</b>
<b>3000 RPM</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>12</b>

Tabella 6.2

I risultati saranno confrontati con le emissioni misurate alimentando il motore con gasolio commerciale (Diesel fuel). Inoltre, si precisa, che le emissioni di ossidi di azoto, per tutti i combustibili analizzati, non sono state corrette con l'umidità dell'aria in aspirazione. In questo modo, comunque, i risultati mostrati sono congruenti tra di loro. In questa attività sperimentale non sono state effettuate misure di particolato (PM) a causa della sua bassa concentrazione, che non permette una misura affidabile con un fumimetro convenzionale. In ogni modo, come è stato mostrato nel capitolo IV, precedenti attività effettuate con motori Diesel di vecchia concezione, in cui le emissioni di PM sono sensibilmente superiori rispetto al motore in prova, hanno evidenziato concentrazioni di

particolato più basse.

### 6.2.3 LE EMISSIONI INQUINANTI: BIODIESEL PURO

Le figure 6.3 – 6.8 mostrano i risultati sperimentali delle emissioni regolamentate riferite alle condizioni motoristiche prima specificate. In particolare nelle figure 6.3, 6.5, 6.7 è mostrato l'andamento delle emissioni degli ossidi di azoto in funzione della pressione media effettiva al freno (BMEP) per tre condizioni di numero di giri, mentre nelle figure 6.4, 6.6, 6.8 è riportato l'andamento monossido di carbonio nelle stesse condizioni.

Quando il motore è alimentato con Biodiesel puro (B100 ECU std) a 1500 RPM è possibile notare un piccolo incremento delle emissioni di NOx, mentre le emissioni di CO diminuiscono. Variando opportunamente la quantità di gas combusti riciclati (EGR) e il timing dell'iniezione (B100 ECU mod), è stato possibile diminuire il livello di ossidi di azoto, rendendolo pari o inferiore al caso del gasolio riuscendo, contemporaneamente, a mantenere le emissioni di CO a valori inferiori al gasolio. Si ricorda che gli andamenti delle emissioni di CO e NOx, come noto in letteratura, presentano in trend opposto (all'aumentare del primo diminuisce il secondo), per cui, durante la fase di ottimizzazione della calibrazione è stato necessario trovare il giusto compromesso tra i due inquinanti. Come è possibile evincere da tutti i grafici mostrati in questo paragrafo, è stato possibile trovare una calibrazione che permettesse di mantenere i livelli di emissione più bassi di entrambi gli inquinanti, rispetto al caso del gasolio.

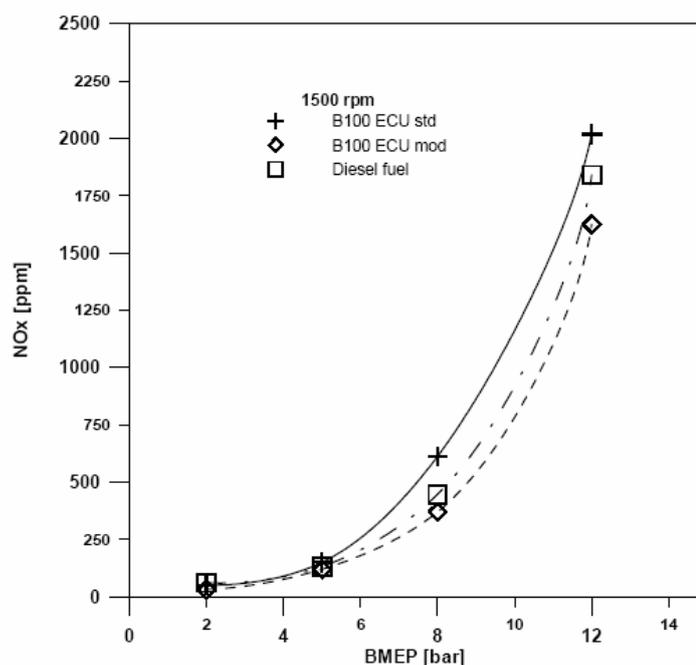


Figura 6.3

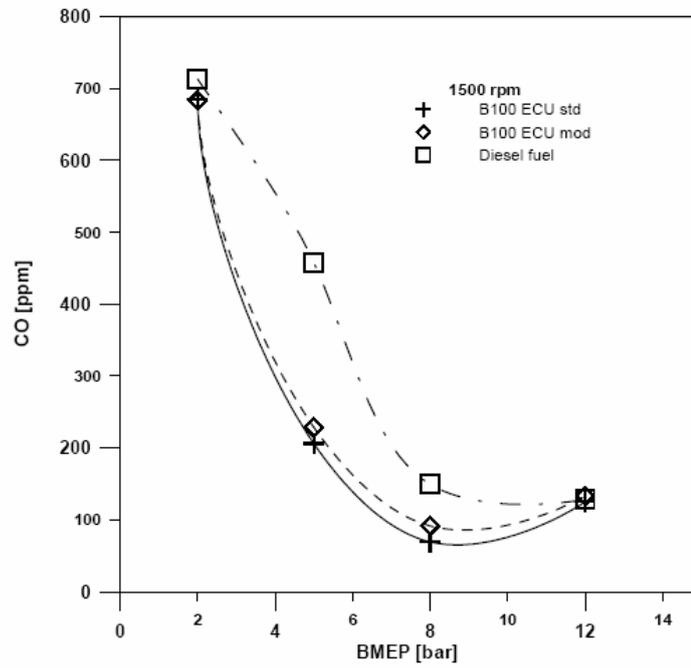


Figura 6.4

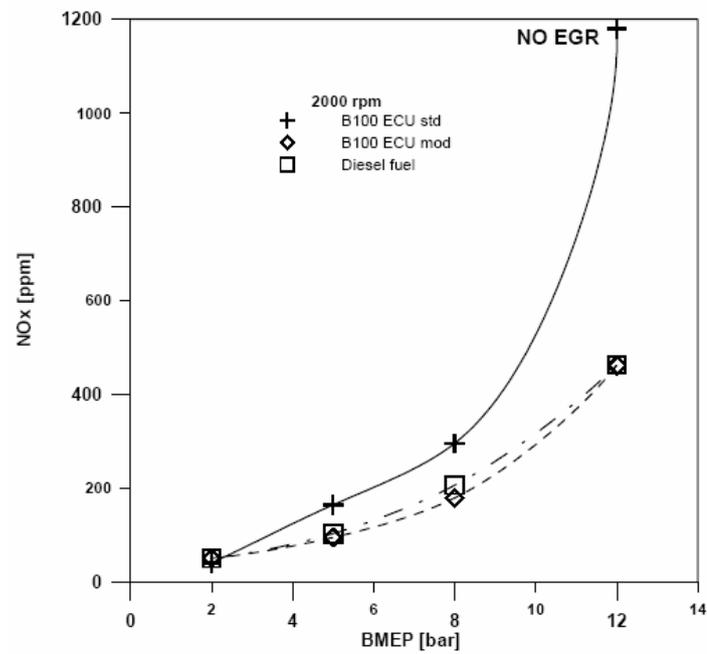


Figura 6.5

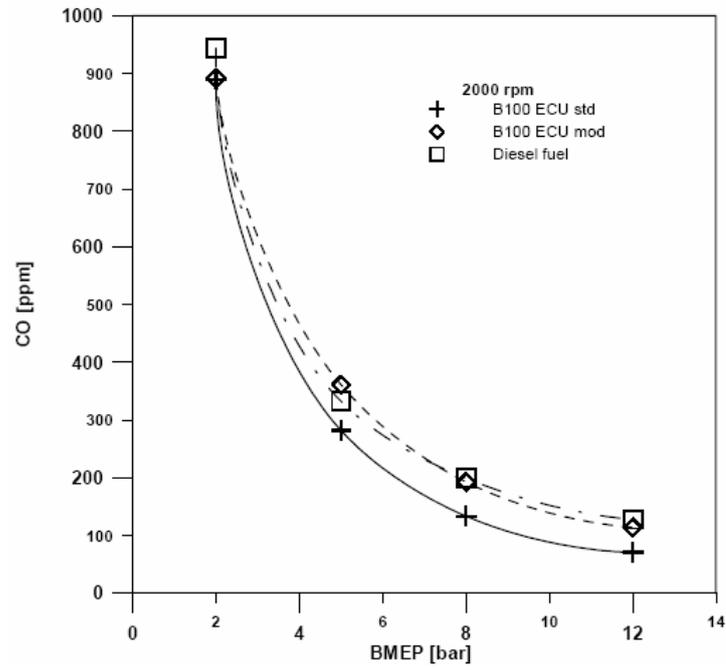


Figura 6.6

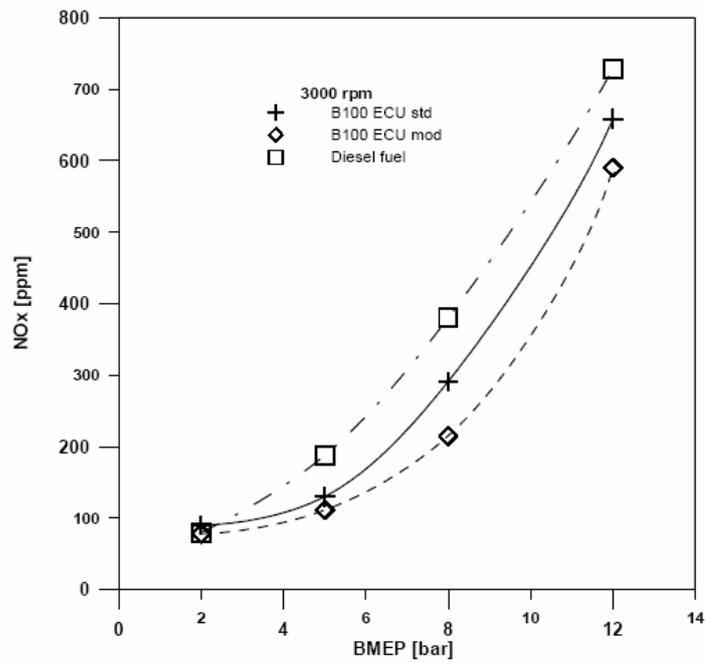


Figura 6.7

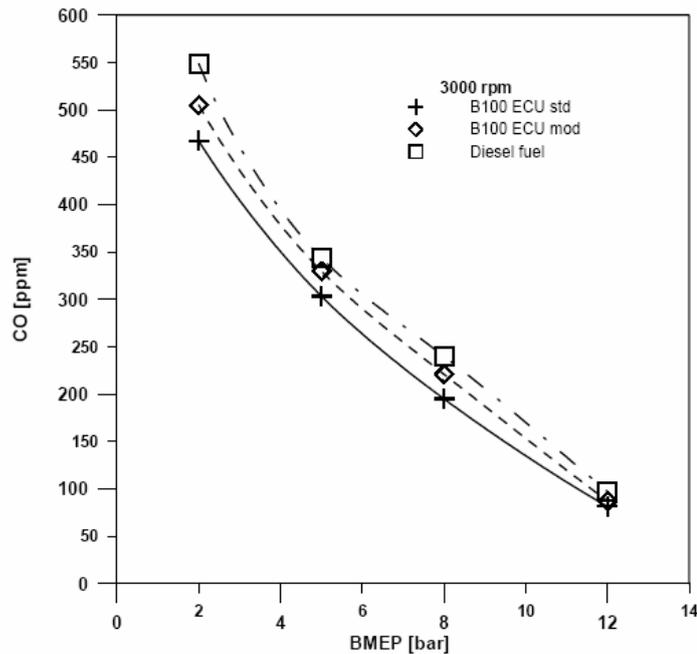


Figura 6.8

Nella figura 6.5 è ben evidente l'influenza dell'EGR sull'emissioni di NOx. Quando il motore è alimentato a gasolio a 2000 RPM e 12 bar di pressione media effettiva, il livello di EGR nella calibrazione standard è circa il 30%; quando il motore è alimentato con Biodiesel tale livello è zero, sempre nella calibrazione standard, e le emissioni di NOx sono molto elevate. Questo fenomeno è spiegato dal fatto che con Biodiesel è necessario iniettare una maggiore quantità di combustibile per ciclo (percentuale di acceleratore maggiore), quindi il punto di funzionamento nella mappa della centralina è diverso per i due combustibili, e nel caso del Biodiesel tale punto corrisponde a una condizione di funzionamento che non è prevista nel ciclo di omologazione della vettura; in queste condizioni tutti i costruttori di automobili privilegiano le prestazioni del propulsore a discapito delle emissioni

Sempre al punto in oggetto, attivando l'EGR (B100 ECU mod) il livello di NOx si riporta a livelli pari del gasolio, senza comportare significativi incrementi del CO, che comunque anche con la mappa ottimizzata, sono più bassi rispetto al caso del gasolio.

Le figure 6.7 e 6.8 mostrano l'andamento delle emissioni di CO e NOx a 3000 RPM. Entrambi gli inquinanti hanno livelli più bassi rispetto al caso del gasolio, per cui una ricalibrazione della mappatura non era strettamente necessaria. Comunque, modificando i parametri motoristici è stato comunque possibile ottenere livelli di emissioni di NOx più bassi.

## 6.2.4 LE EMISSIONI INQUINANTI: MISCELA BIODIESEL - GASOLIO

Nelle figure 6.9 – 6.14 è mostrato l'andamento delle emissioni allo scarico nel caso in cui il motore è stato alimentato con una miscela al 25% di Biodiesel e 75% di gasolio commerciale per autotrazione (percentuali in volume). I risultati sperimentali evidenziano un comportamento abbastanza simile per la miscela B25 e il gasolio. Comunque c'è da osservare che anche al 25% (B25) le emissioni di NOx sono leggermente superiori e quelle di CO inferiori, rispetto al gasolio con la calibrazione standard della centralina motore.

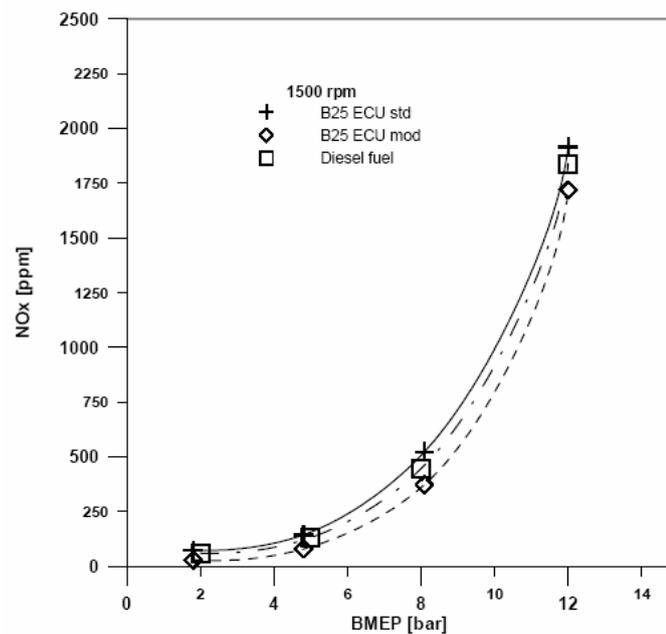


Figura 6.9

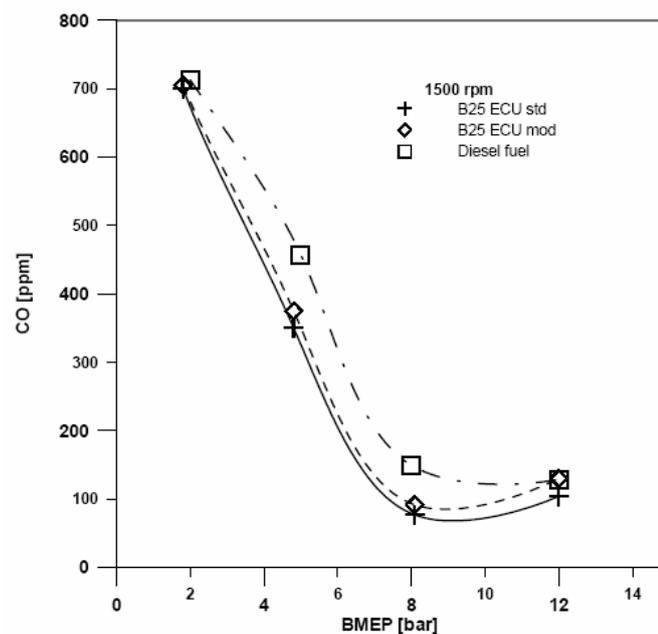


Figura 6.10

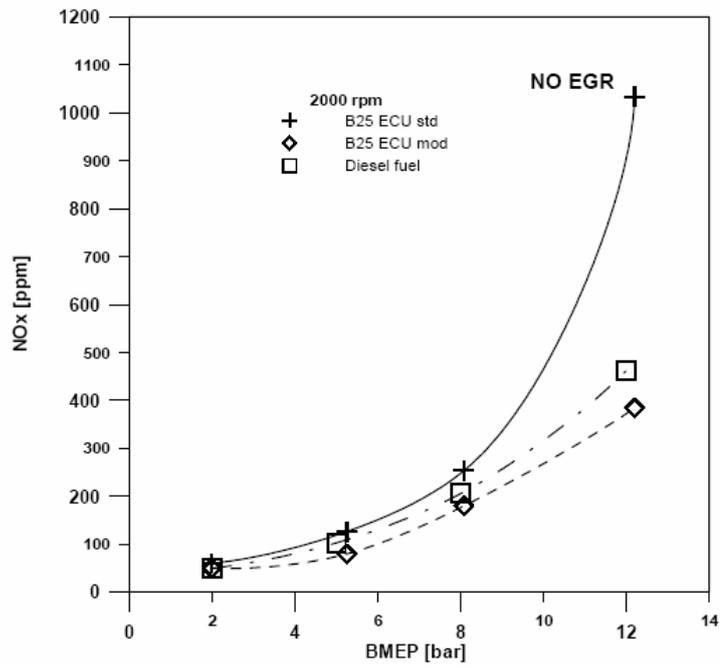


Figura 6.11

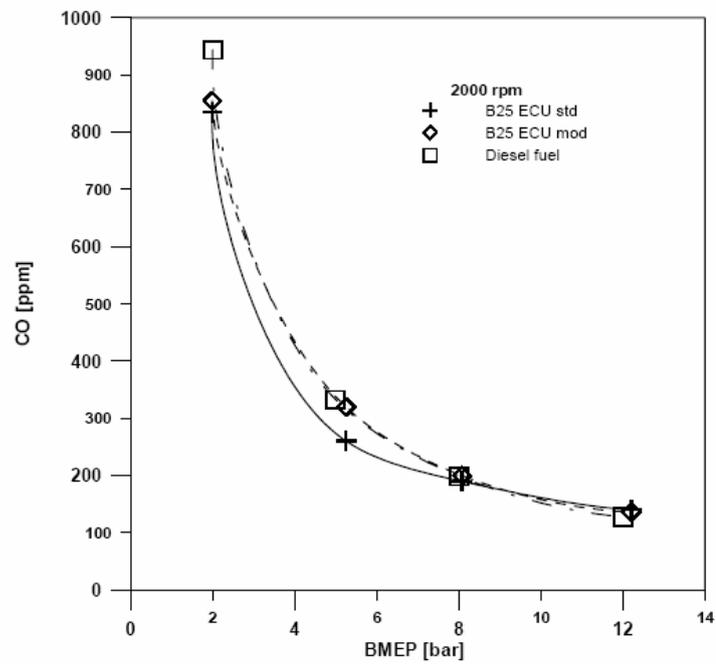


Figura 6.12

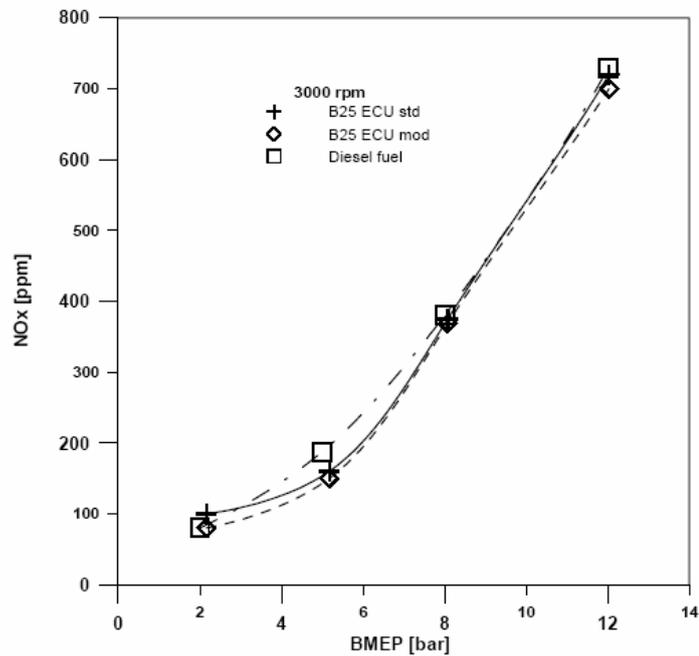


Figura 6.13

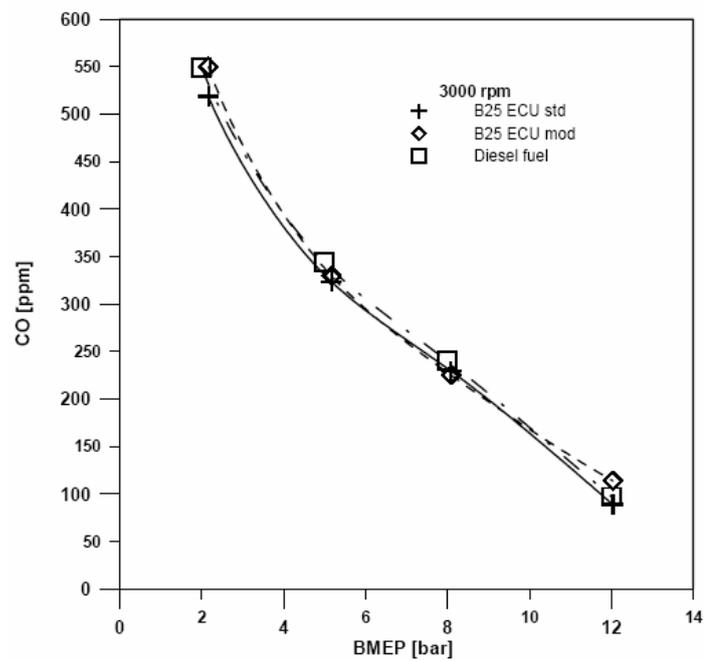


Figura 6.14

Come già osservato per il caso del Biodiesel puro, nella figura 6.11 può essere osservata l'influenza dell'EGR sulle emissioni degli NOx. A 2000 RPM e 12 bar di pressione media effettiva, con la calibrazione standard della centralina, quando è usato il

gasolio la valvola che regola l'EGR è aperta, invece quando si usa la miscela Biodiesel/gasolio con la calibrazione standard, tale valvola è chiusa causando il picco degli NOx mostrato nella figura. Anche in questo caso, l'uso dell'EGR riduce il livello di emissioni di NOx rendendolo equivalente al caso del Biodiesel.

### 6.2.5 ANALISI DEI RISULTATI

L'analisi delle emissioni allo scarico mostrate nei due paragrafi precedenti permette di affermare che quando il motore è alimentato con Biodiesel (puro o miscelato) senza alcuna modifica alla calibrazione motore, le emissioni di NOx aumentano mentre diminuiscono quelle di CO. La spiegazione di questi risultati va ricercata nelle diverse caratteristiche chimico/fisiche dei combustibili, in particolare nella diversa curva di distillazione e alla presenza di una molecola di ossigeno nella struttura chimica del Biodiesel. Queste proprietà comportano una combustione più rapida e picchi locali di temperatura maggiori rispetto al gasolio.

Per trarre vantaggio delle minori emissioni di CO e della migliore combustione del Biodiesel, la calibrazione standard della centralina motore è stata modificata per migliorare il livello di emissioni di NOx, variando l'anticipo all'iniezione di carburante e la percentuale di EGR. Come noto, l'uso dell'EGR in un motore a combustione interna riduce la temperatura (e i suoi gradienti) dei gas in camera di combustione, ma, come rovescio della medaglia, questo comporta un incremento della concentrazione di CO nei gas di scarico. In questo modo, ricercando il miglior compromesso tra emissioni di CO e NOx, la calibrazione della centralina motore è stata ottimizzata per il funzionamento del motore alimentato a Biodiesel e alla miscela Biodiesel/gasolio.

Va comunque evidenziato che, in queste condizioni, i cambiamenti non sono sostanziali: tali cambiamenti corrispondono al massimo a 2 – 3 gradi di ritardo dell'anticipo dell'iniezione e un aumento di circa del 15% del livello di EGR. Inoltre è molto importante sottolineare il fatto che le modifiche in questione sono facilmente applicabili a tutti i motori Diesel Common Rail attualmente in commercio.

In conclusione di questo paragrafo, possiamo affermare che, in tutte le condizioni di prova esaminate, è possibile ottimizzare la mappatura della centralina motore in funzione del combustibile utilizzato. Sia con Biodiesel che con la sua miscela con il gasolio sono stati raggiunti livelli più bassi o al più uguali delle emissioni dei gas regolamentati, rispetto al gasolio, come conferma della buona qualità del Biodiesel come

combustibile per motori Diesel e dell'importanza di una calibrazione specifica a seconda del combustibile utilizzato per alimentare il motore.

### **6.3 ANALISI DELLA LEGGE DI RILASCIO DEL CALORE**

Una buona conoscenza del processo di combustione, anche in termini globali, è estremamente utile se si necessita capire meglio il processo che governa una maggiore o minore concentrazione di inquinanti nei gas combusti di un motore a combustione interna.

Per questo motivo, la legge di rilascio del calore rende possibile la valutazione, almeno globalmente, degli effetti che i diversi combustibili analizzati in questa sezione hanno sul processo di combustione. In particolare, i risultati della legge di rilascio del calore saranno nel prosieguo usati per analizzare le emissioni di NO<sub>x</sub>, a seconda del combustibile utilizzato (biodiesel puro o gasolio) e l'influenza dei parametri motoristici (EGR e angolo di anticipo all'iniezione) sulla sua formazione.

Così come ampiamente descritto nel capitolo IV, l'andamento della legge del rilascio del calore in un motore Diesel può essere ottenuto a partire dall'analisi della pressione in camera di combustione. Nel prossimo paragrafo si riportano gli andamenti del ciclo indicato rilevato sperimentalmente, l'andamento della legge di iniezione ricavato misurando la corrente di eccitazione degli iniettori e infine la legge di rilascio del calore valutata a partire dal ciclo indicato.

#### **6.3.1 LE PROVE SPERIMENTALI**

Nel presente paragrafo si riportano i risultati sperimentali acquisiti, per le condizioni motoristiche indicate nella tabella 6.1, per la calibrazione standard e quella ottimizzata. In particolare si riporta il ciclo indicato, la legge di iniezione e la velocità di rilascio del calore.

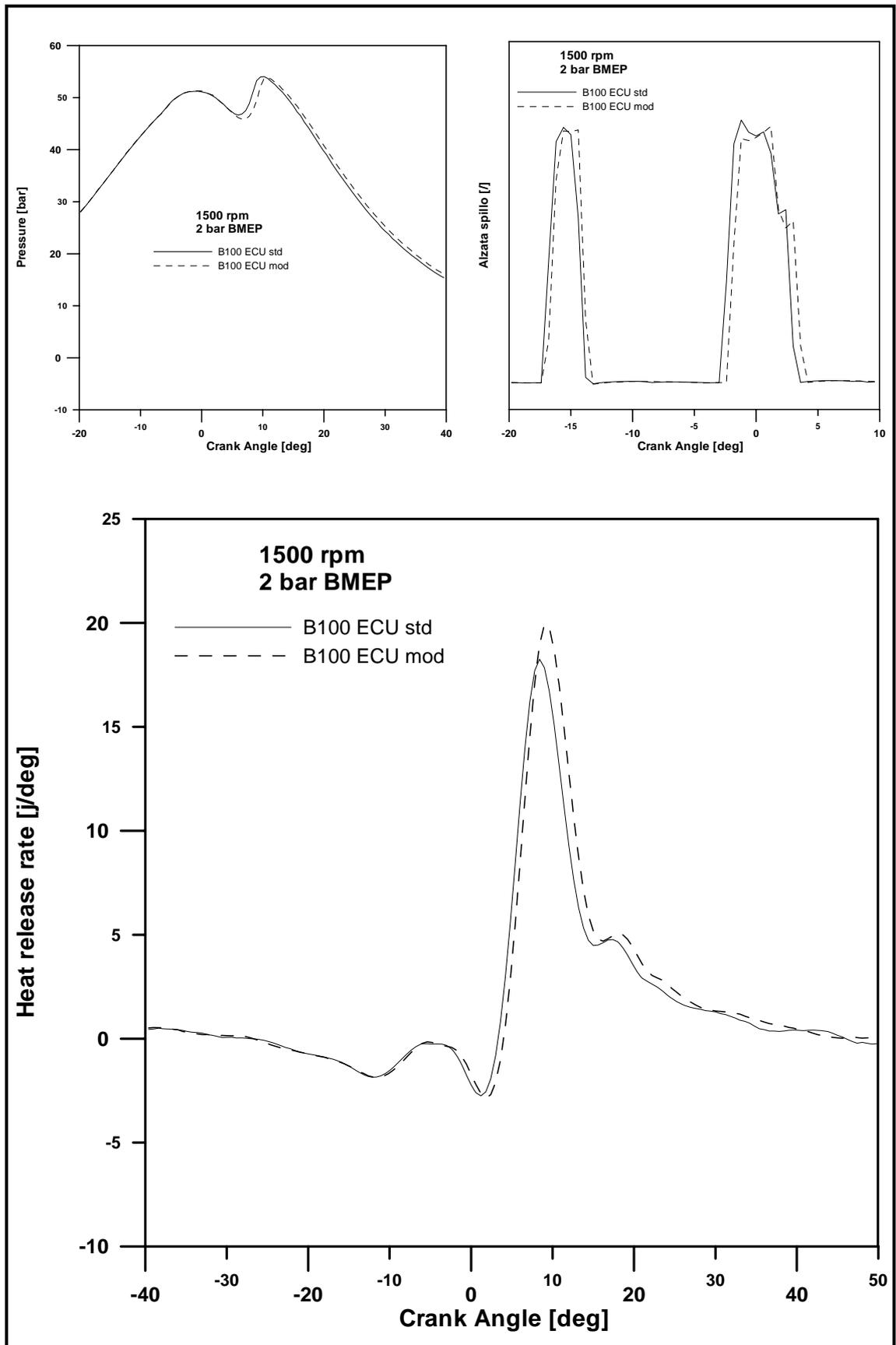


Figura 6.15

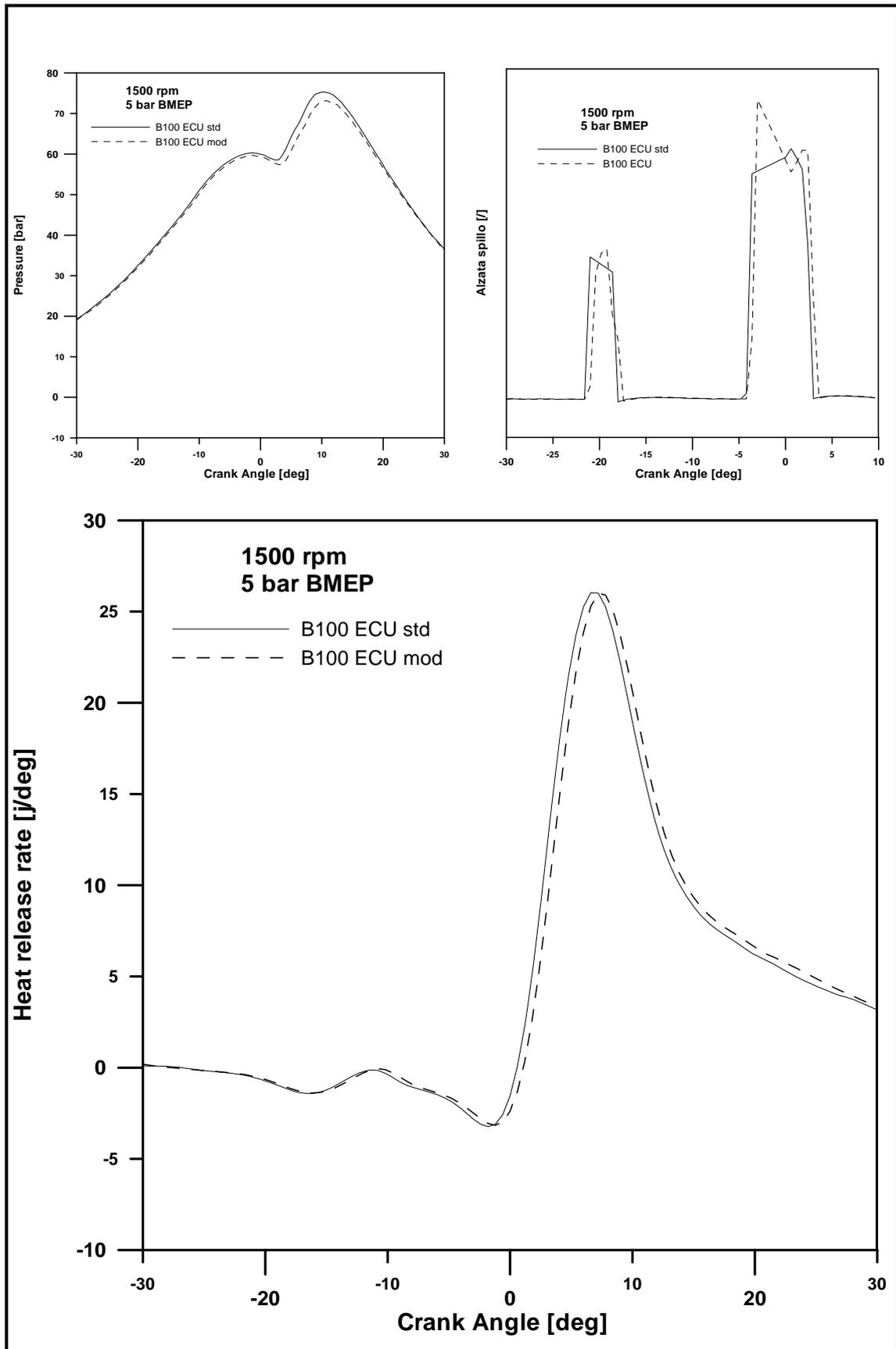


Figura6.16

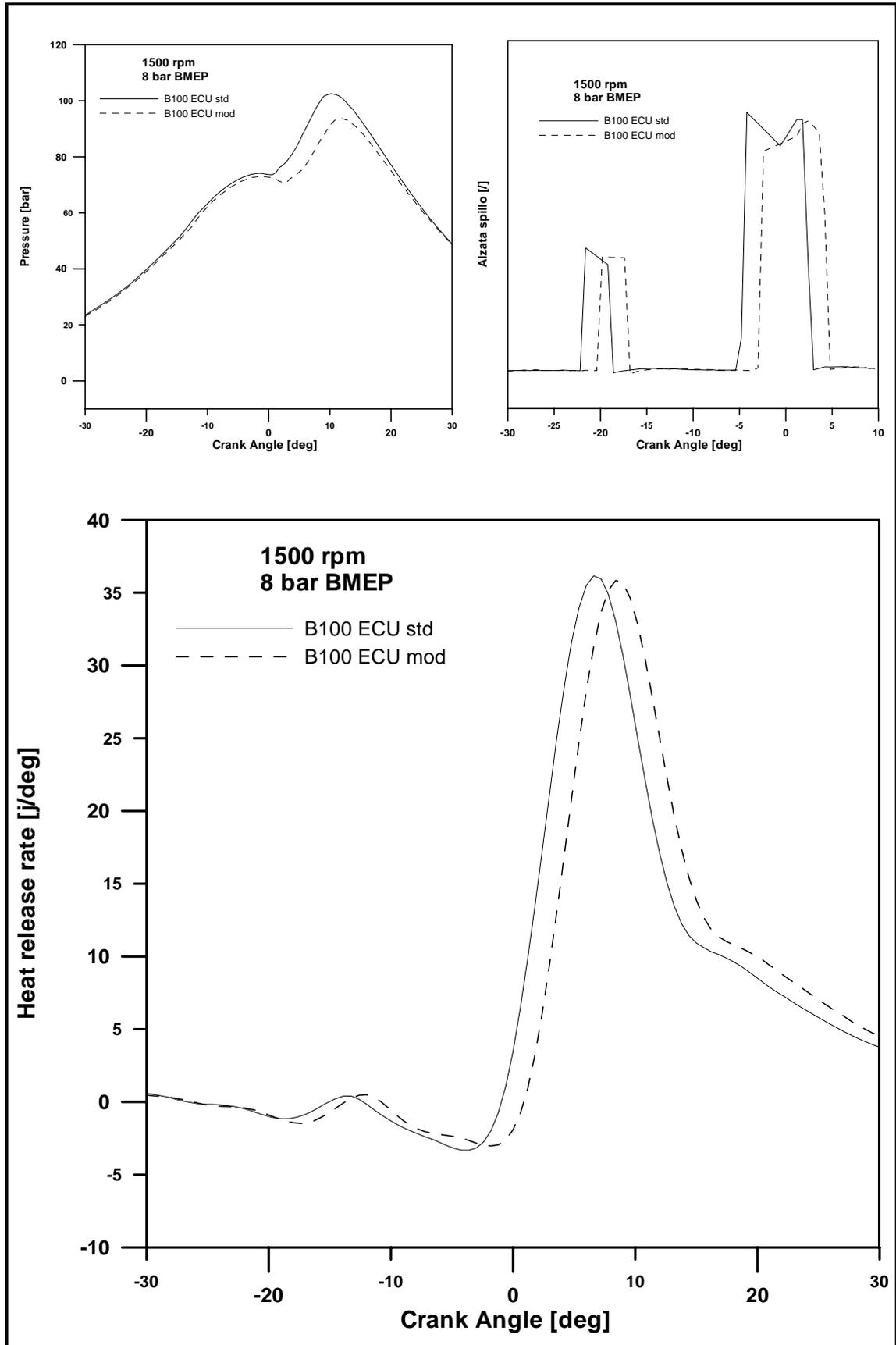


Figura 6.17

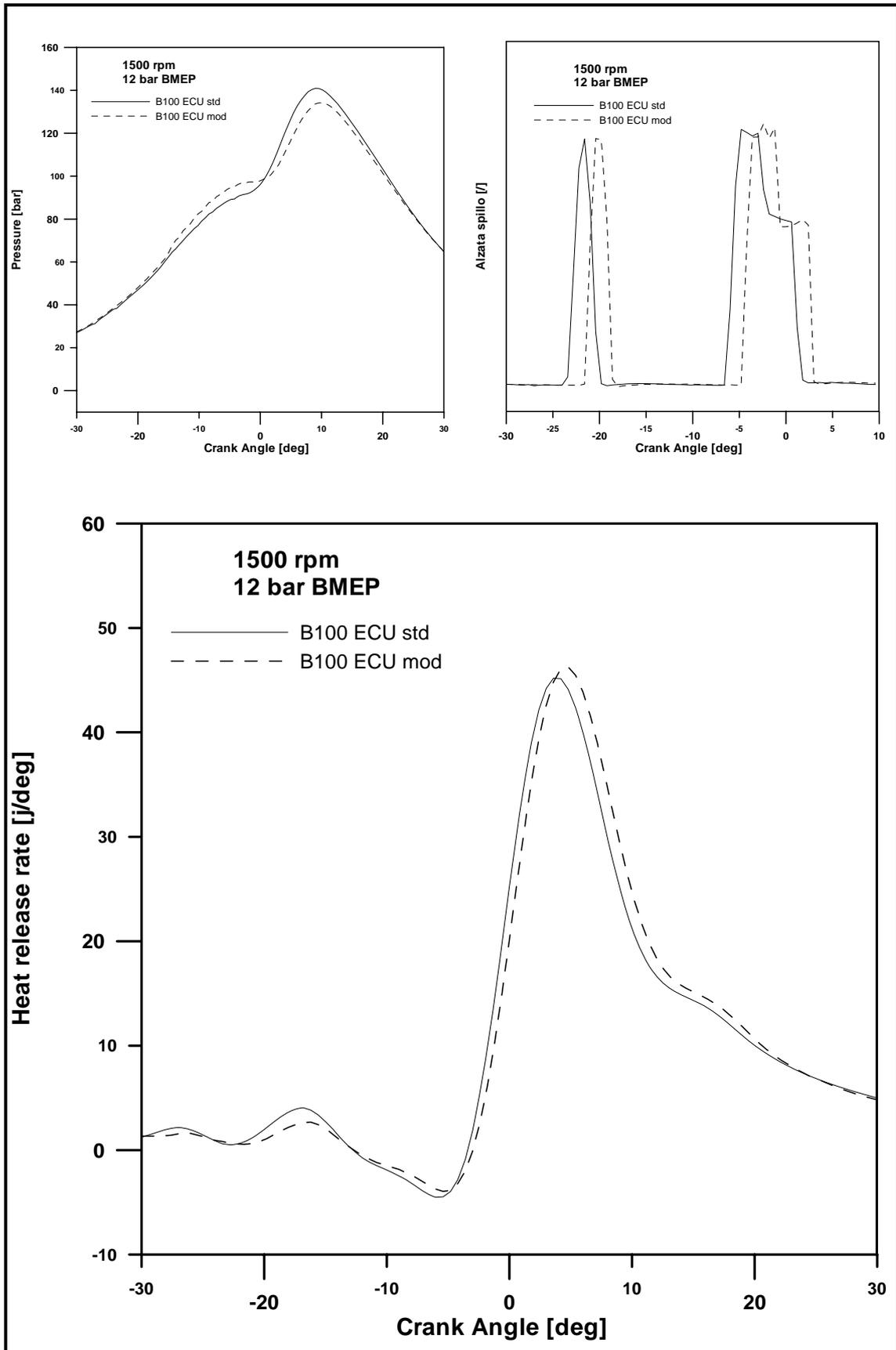


Figura 6.18

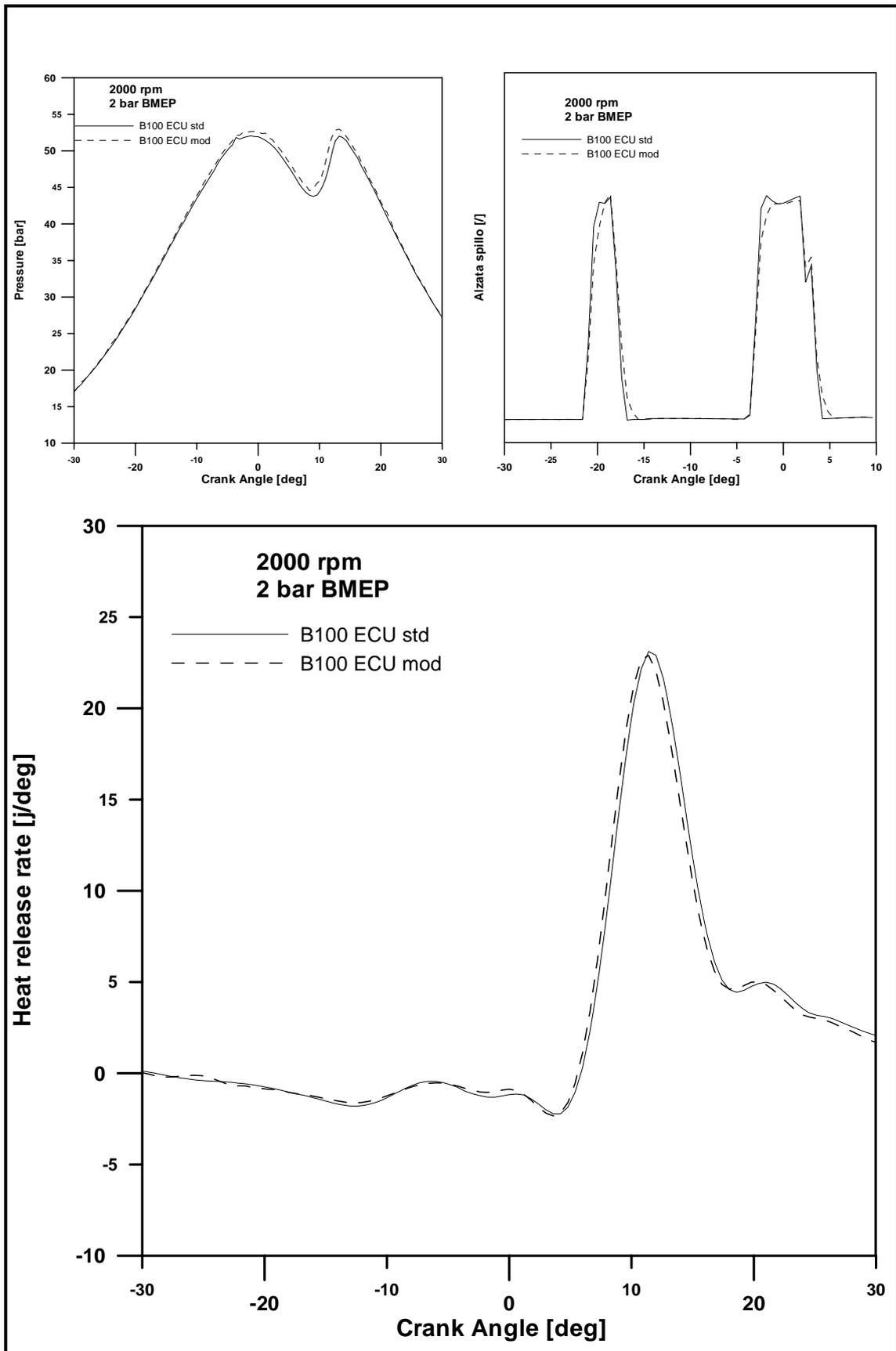


Figura 6.19

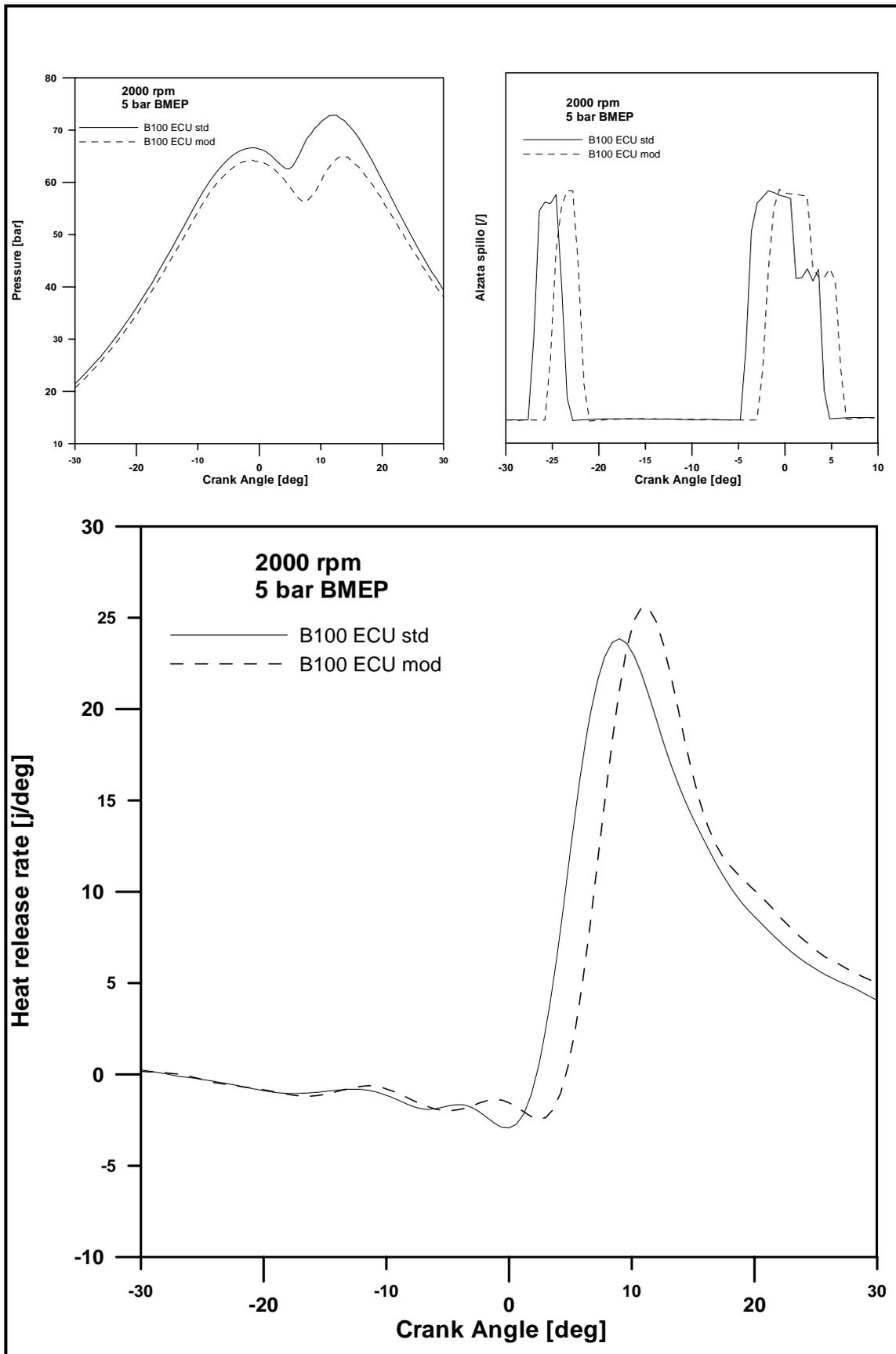


Figura 6.20

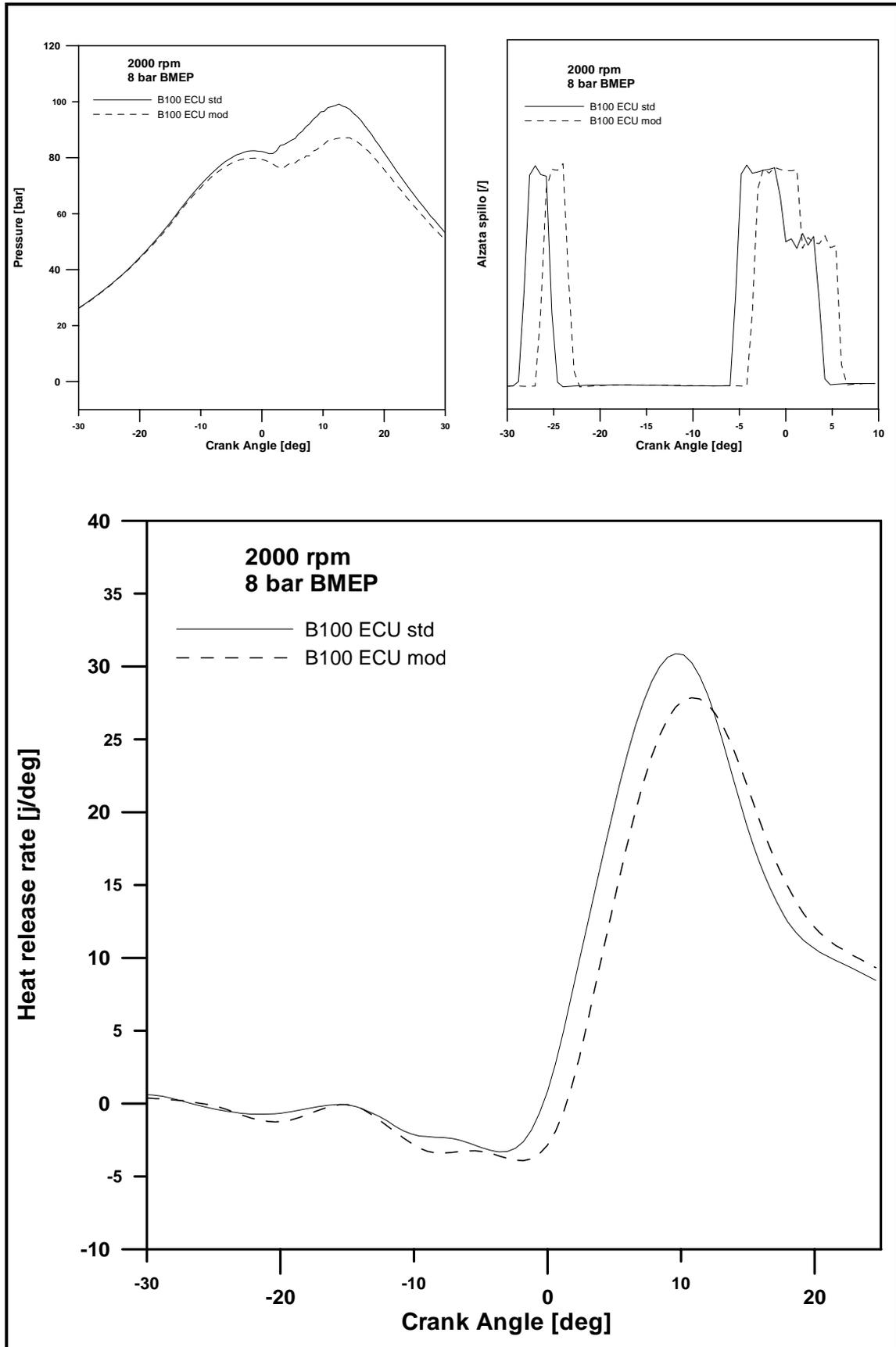


Figura 6.21

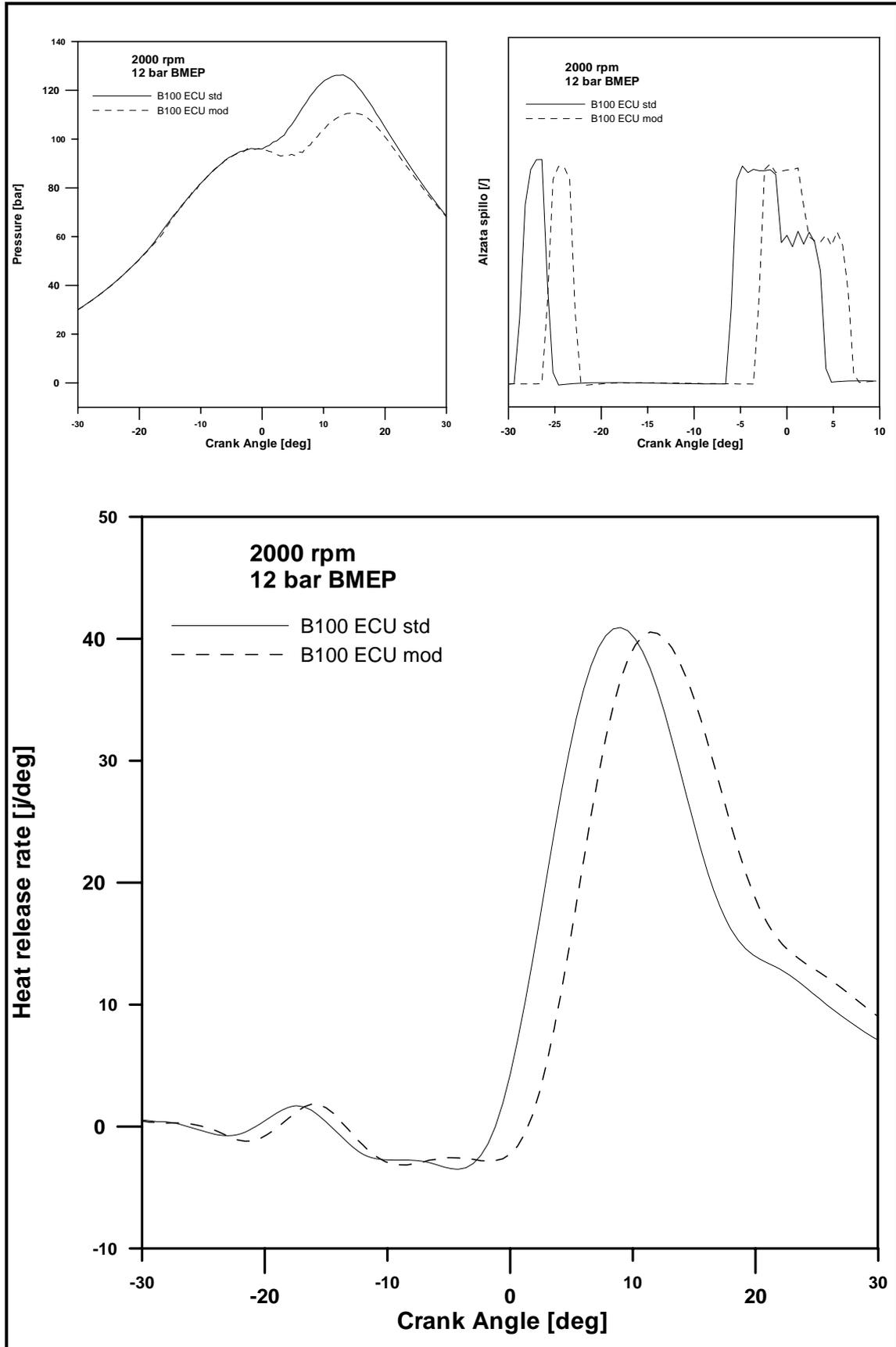


Figura 6.22

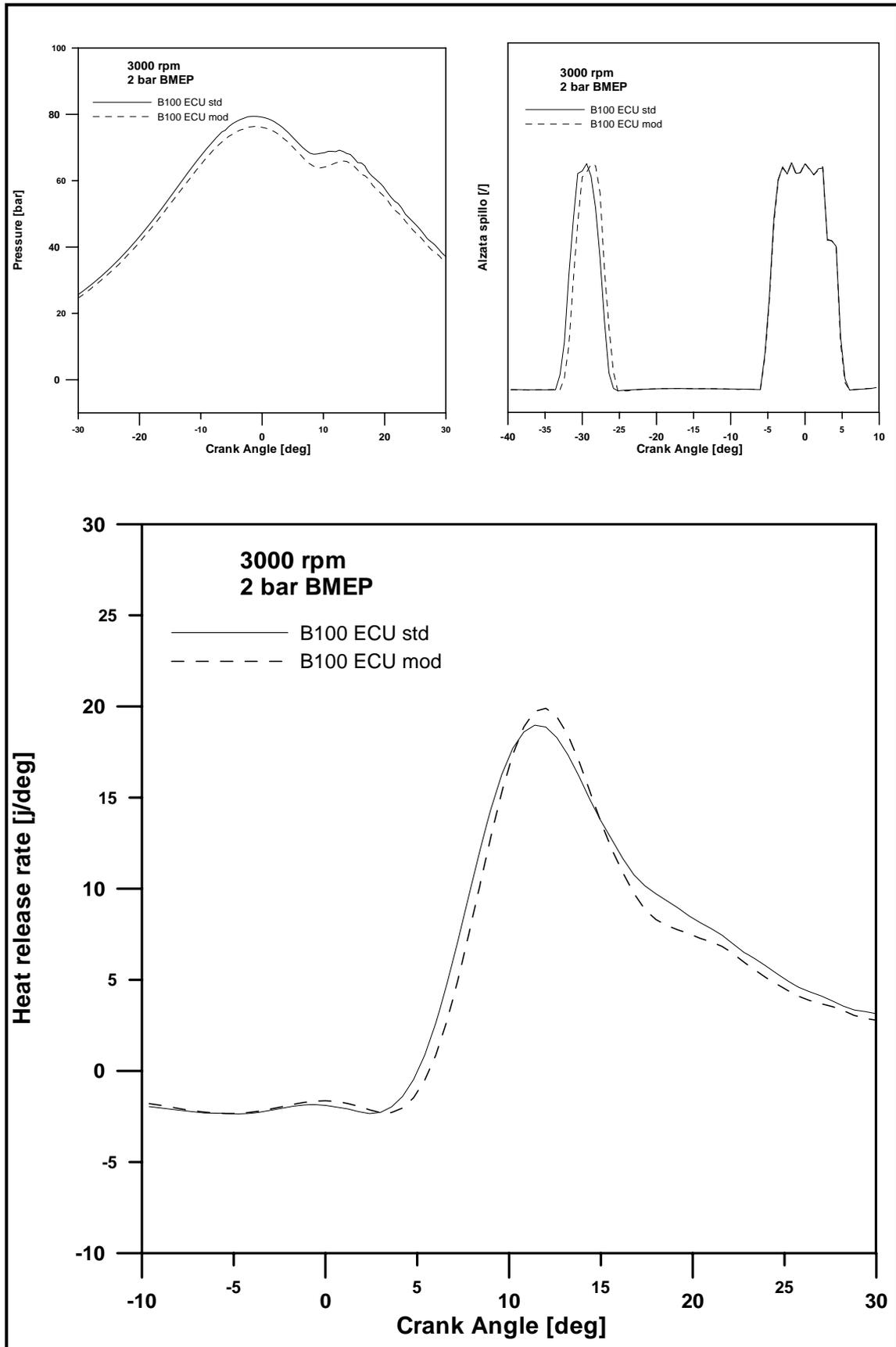


Figura 6.23

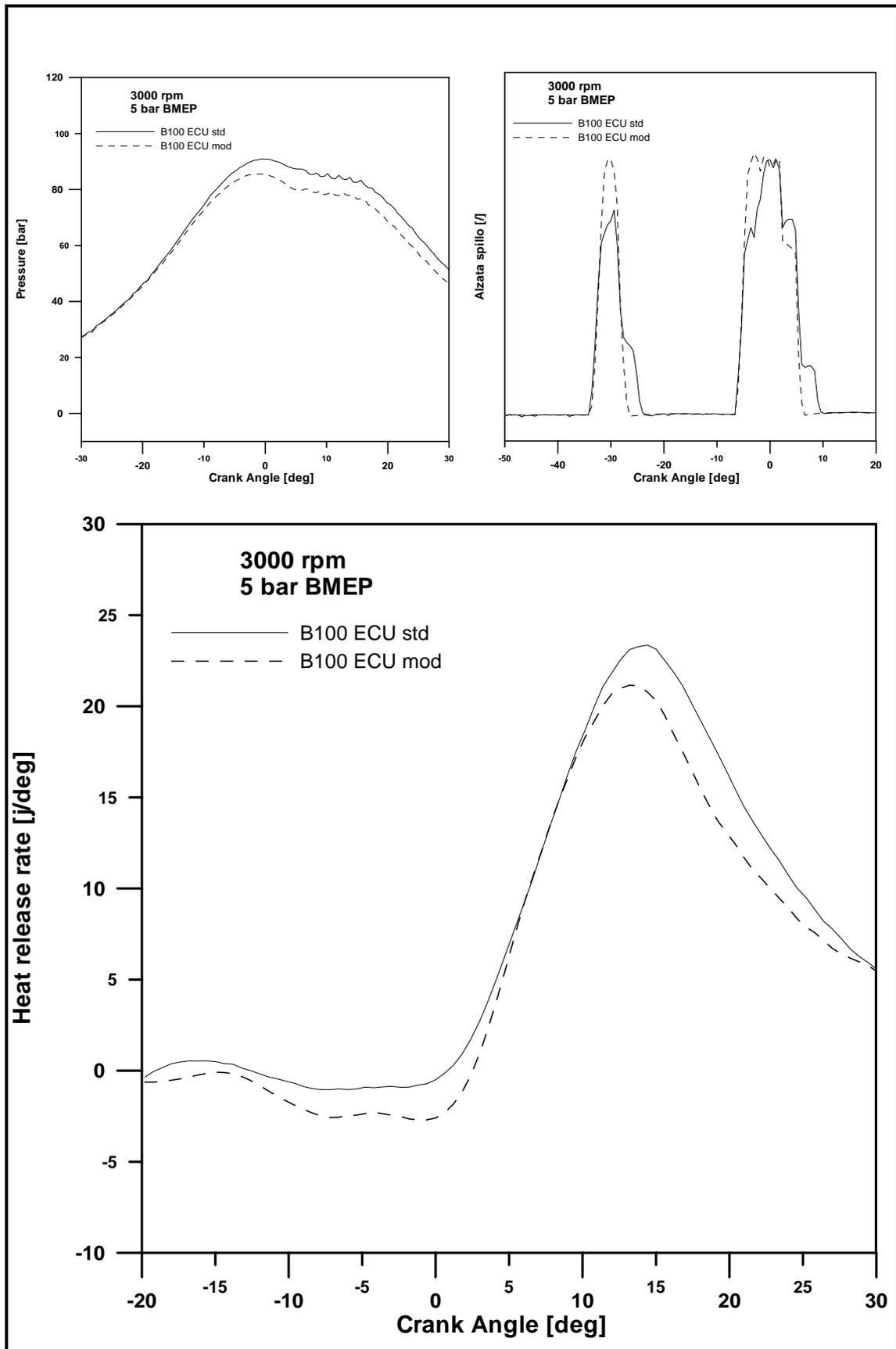


Figura 6.24

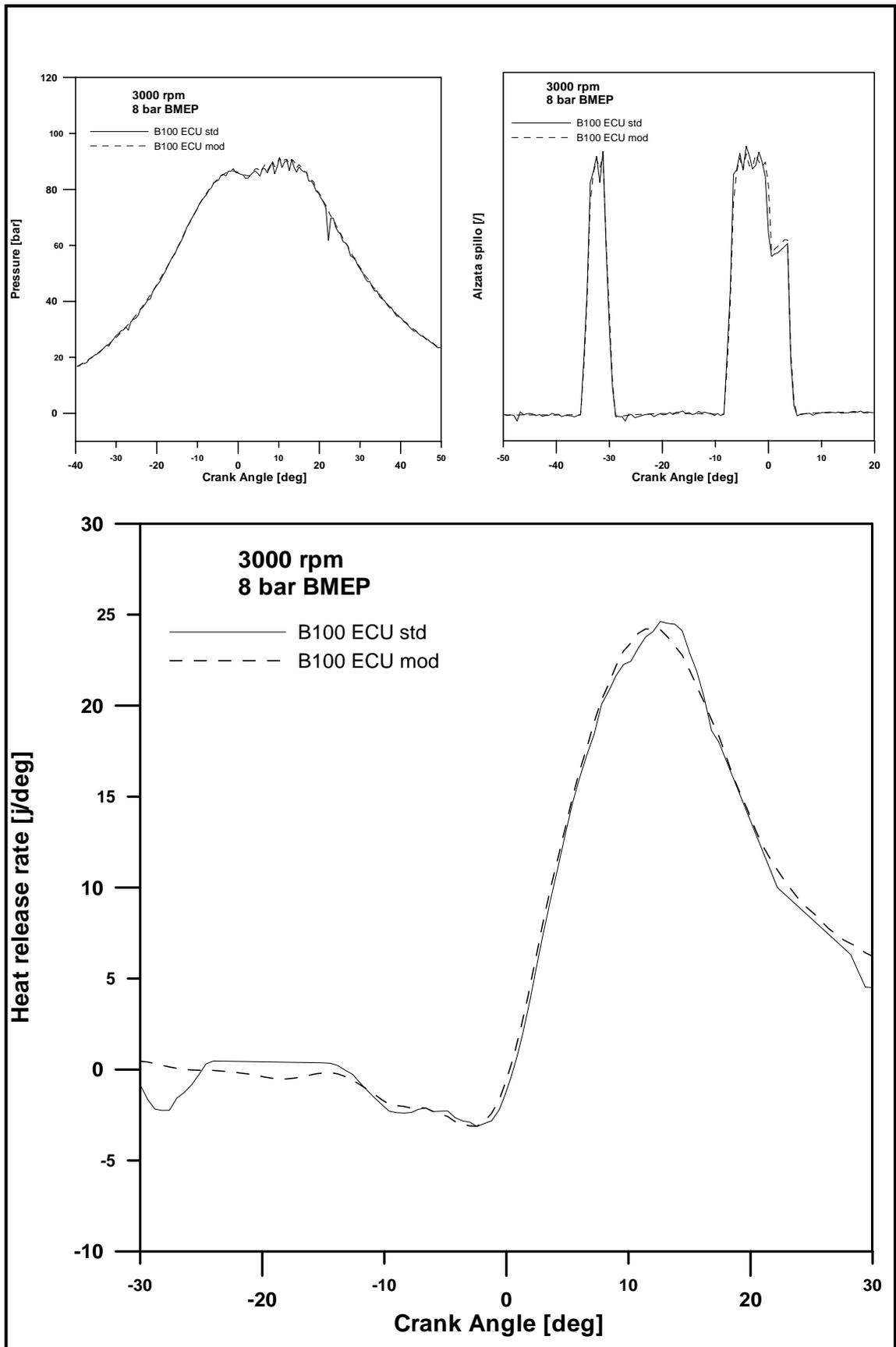


Figura 6.25

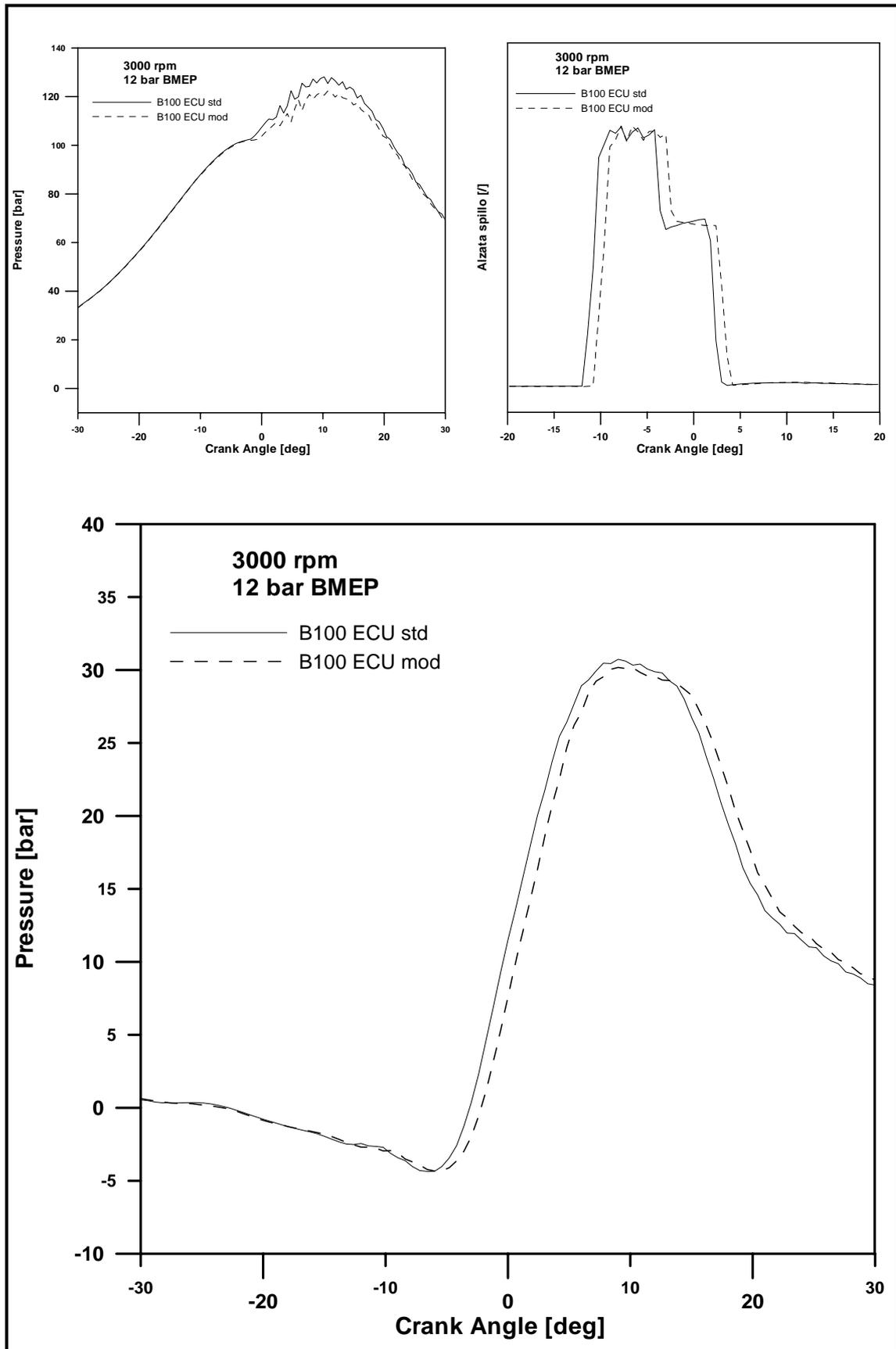


Figura 6.26

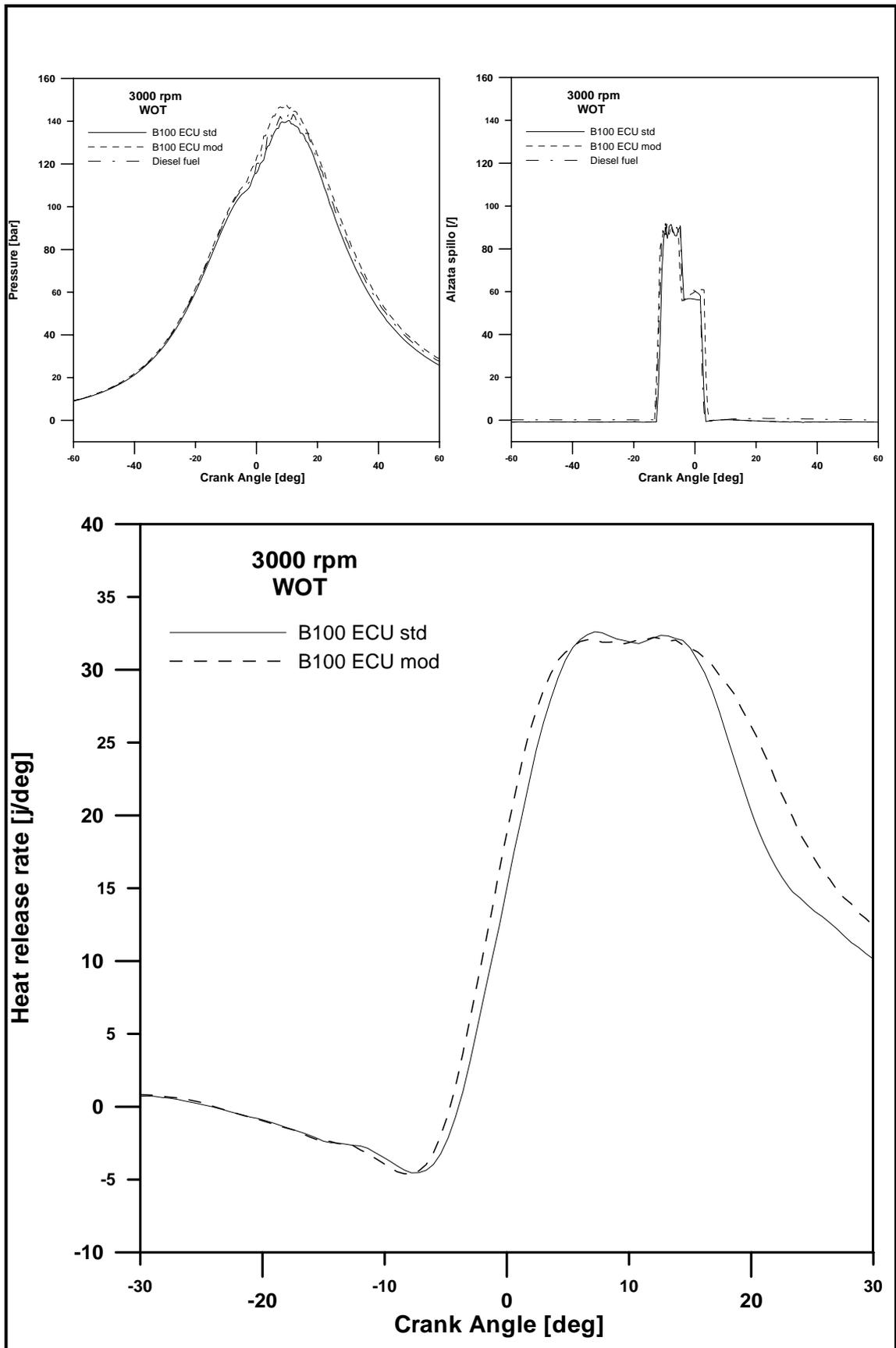


Figura 6.27

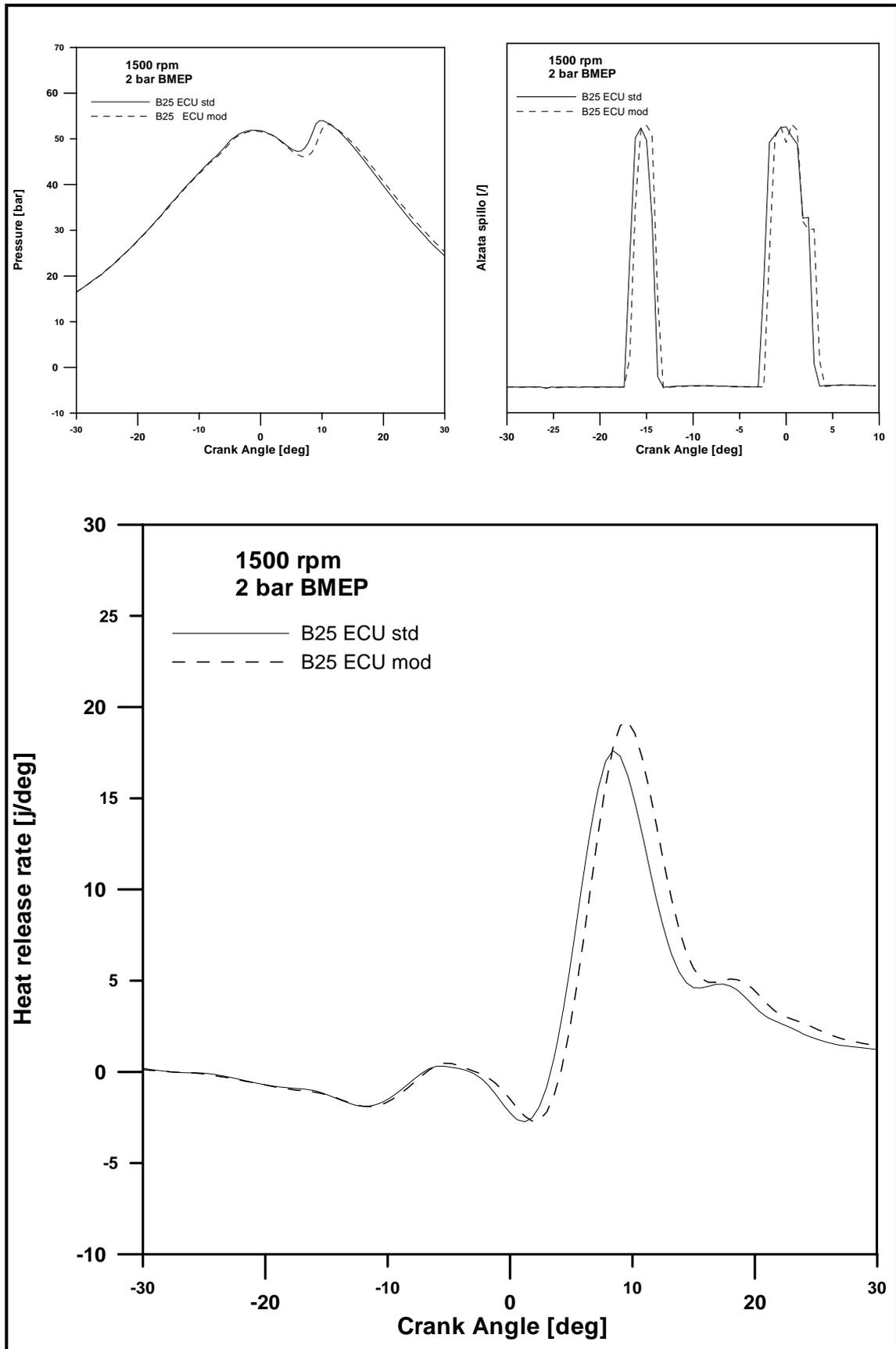


Figura 6.28

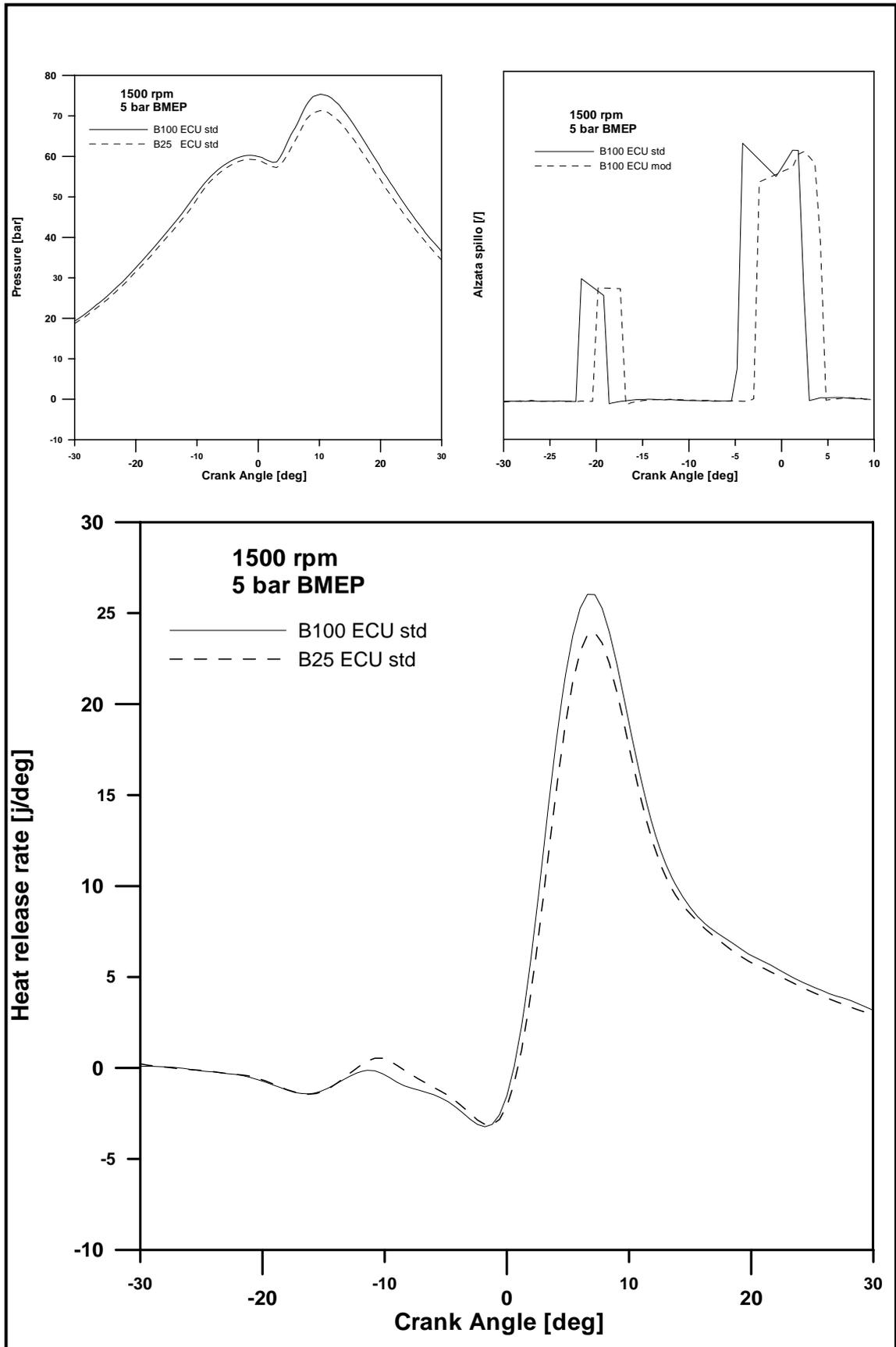


Figura 6.29

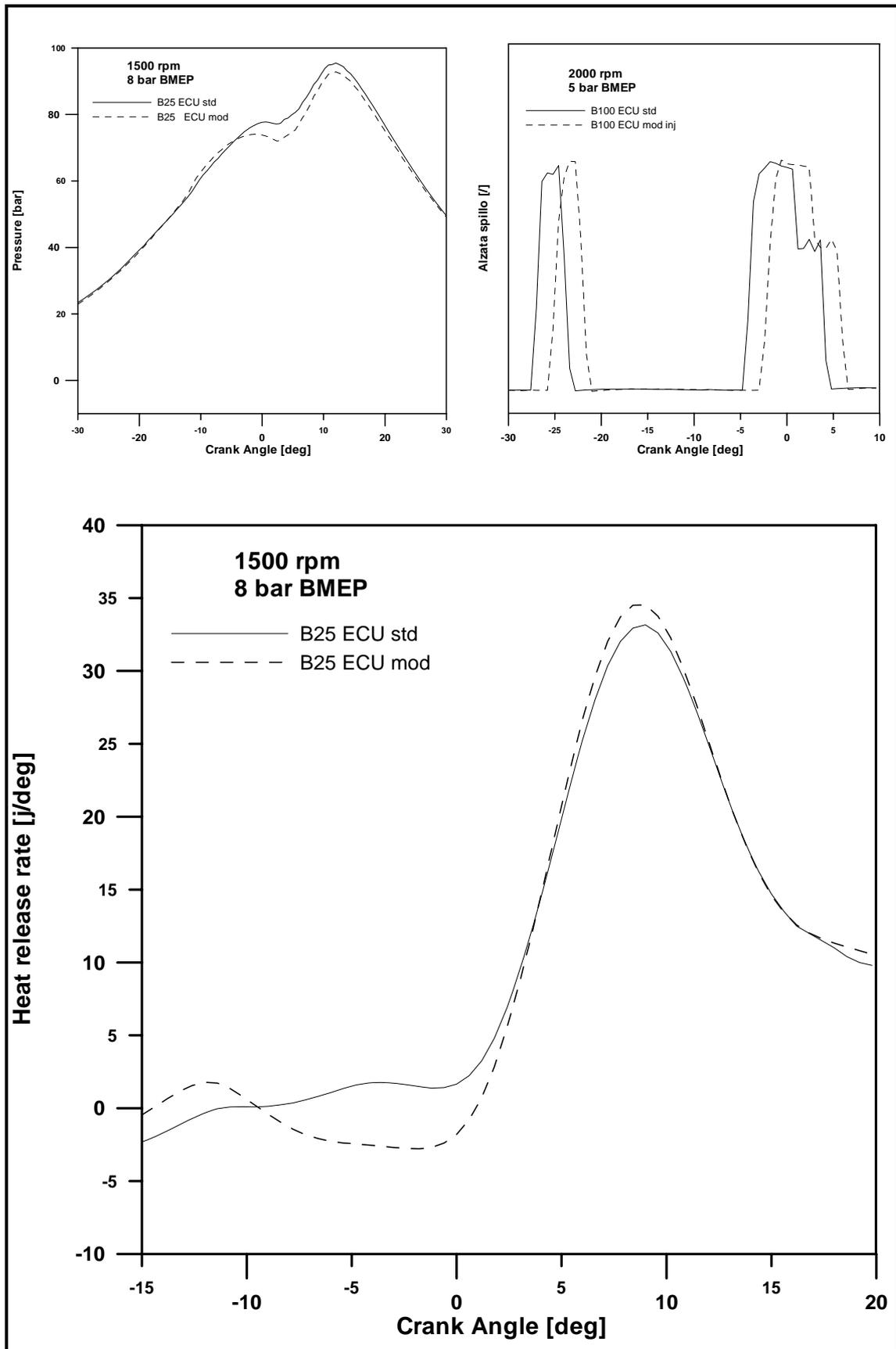


Figura 6.30

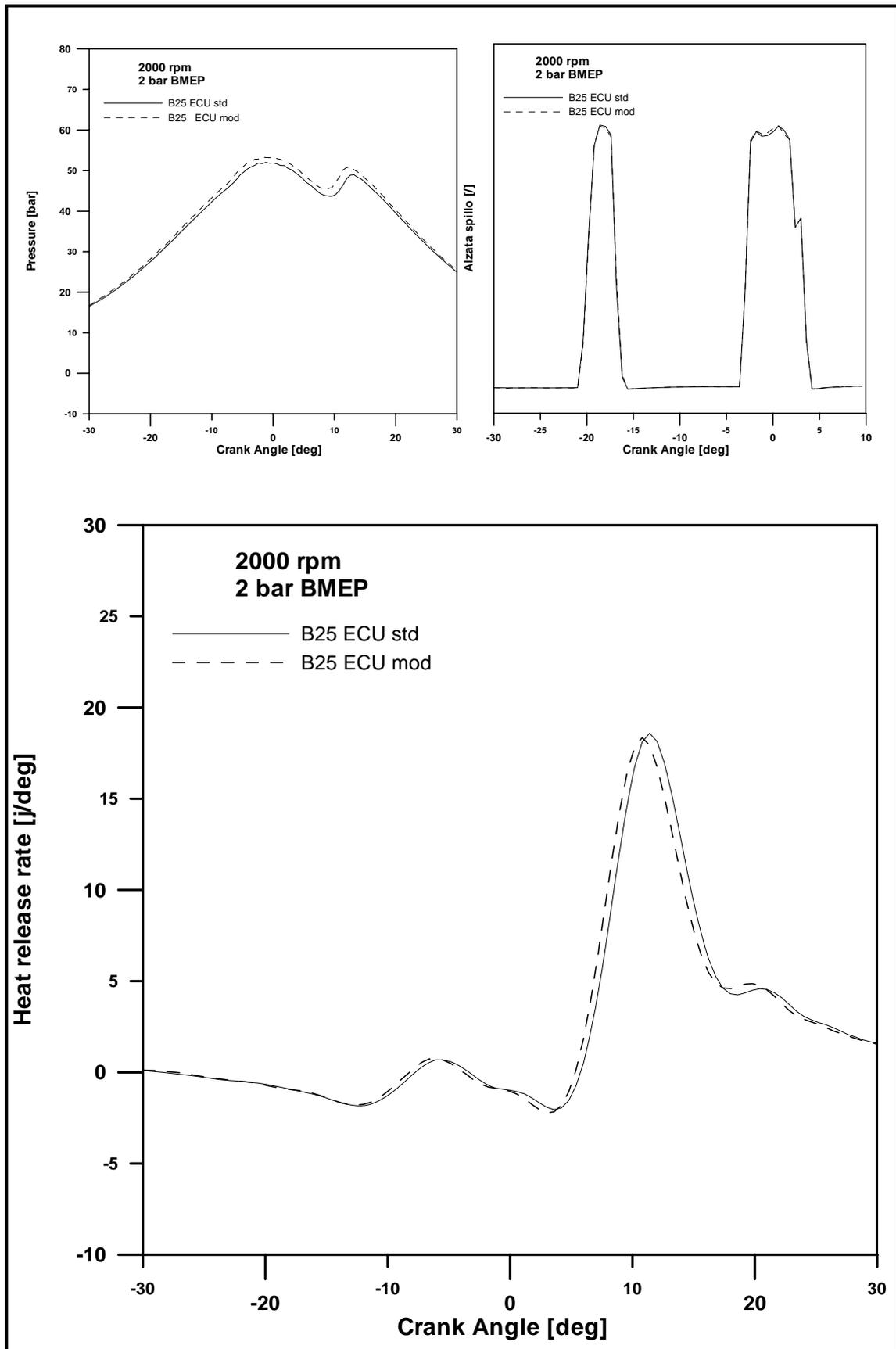


Figura 6.31

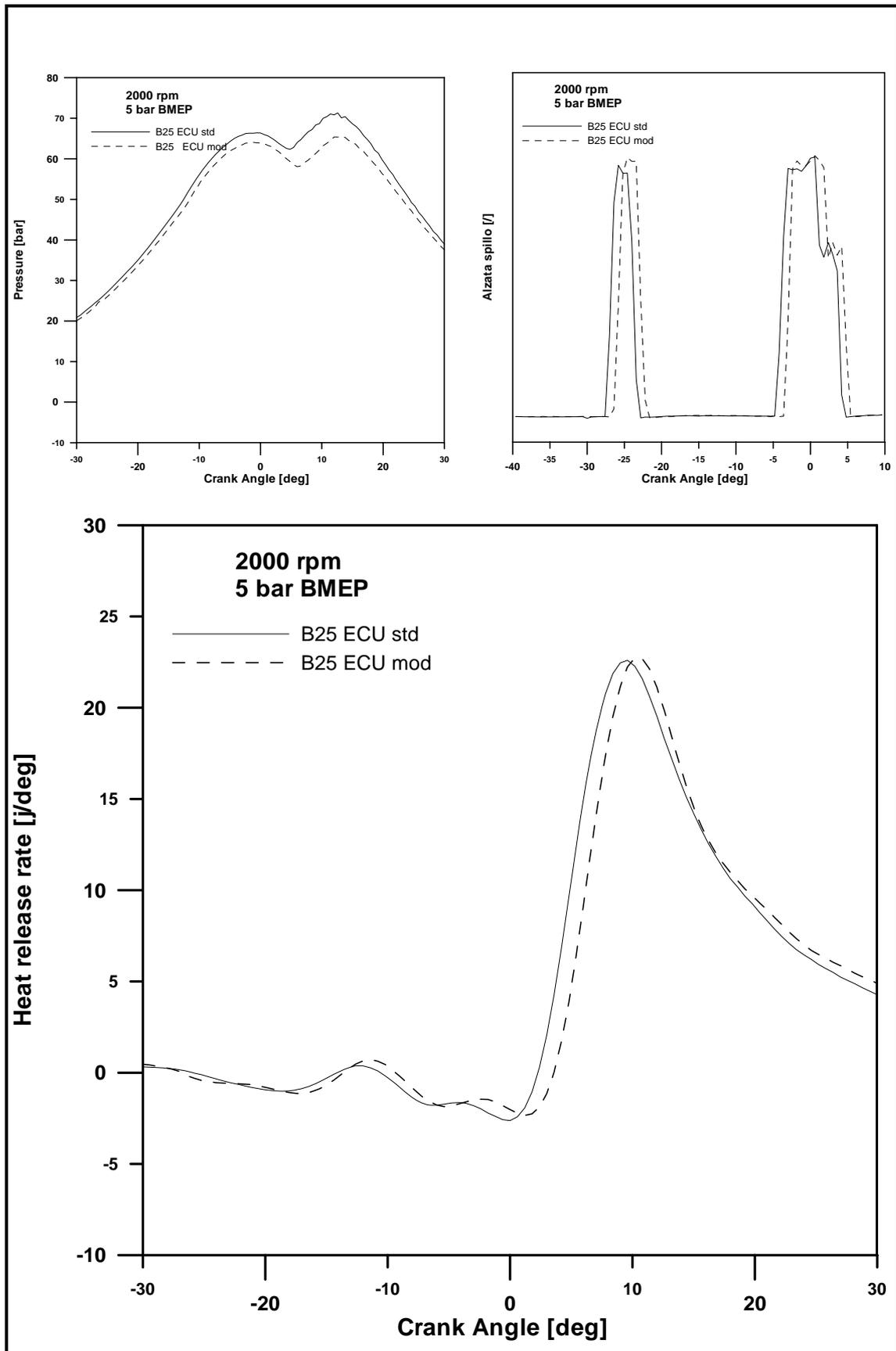


Figura 6.32

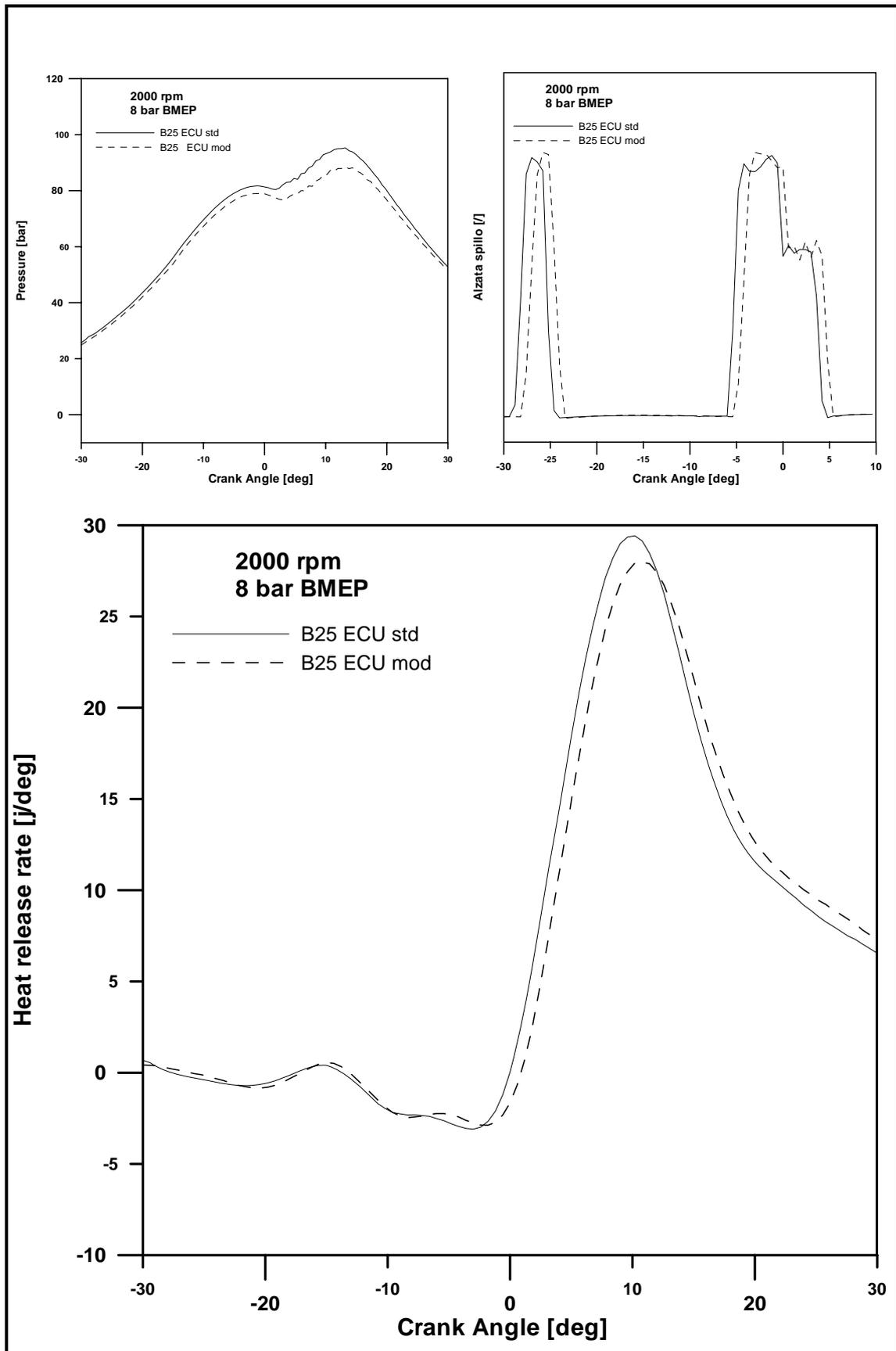


Figura 6.33

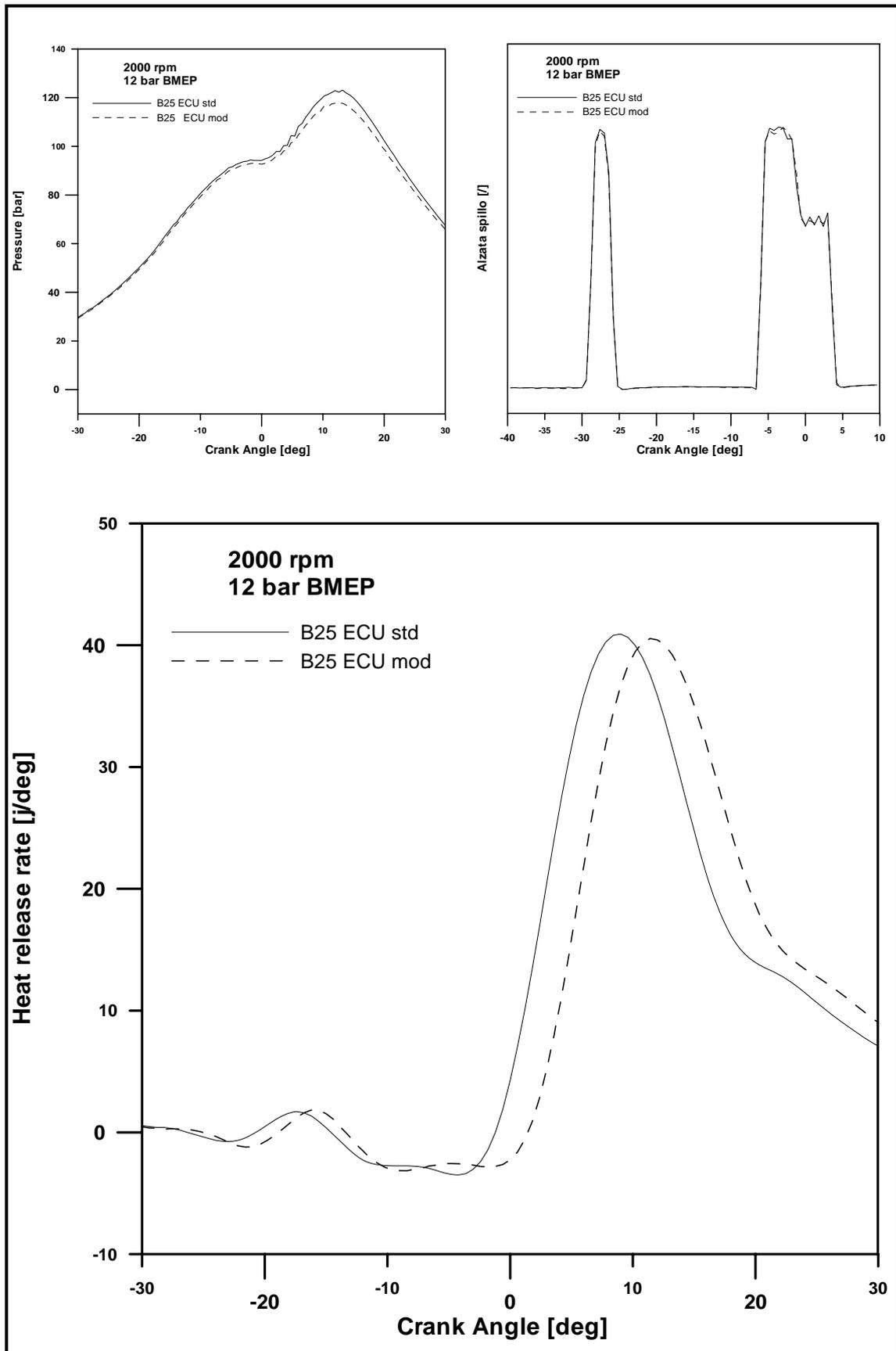


Figura 6.34

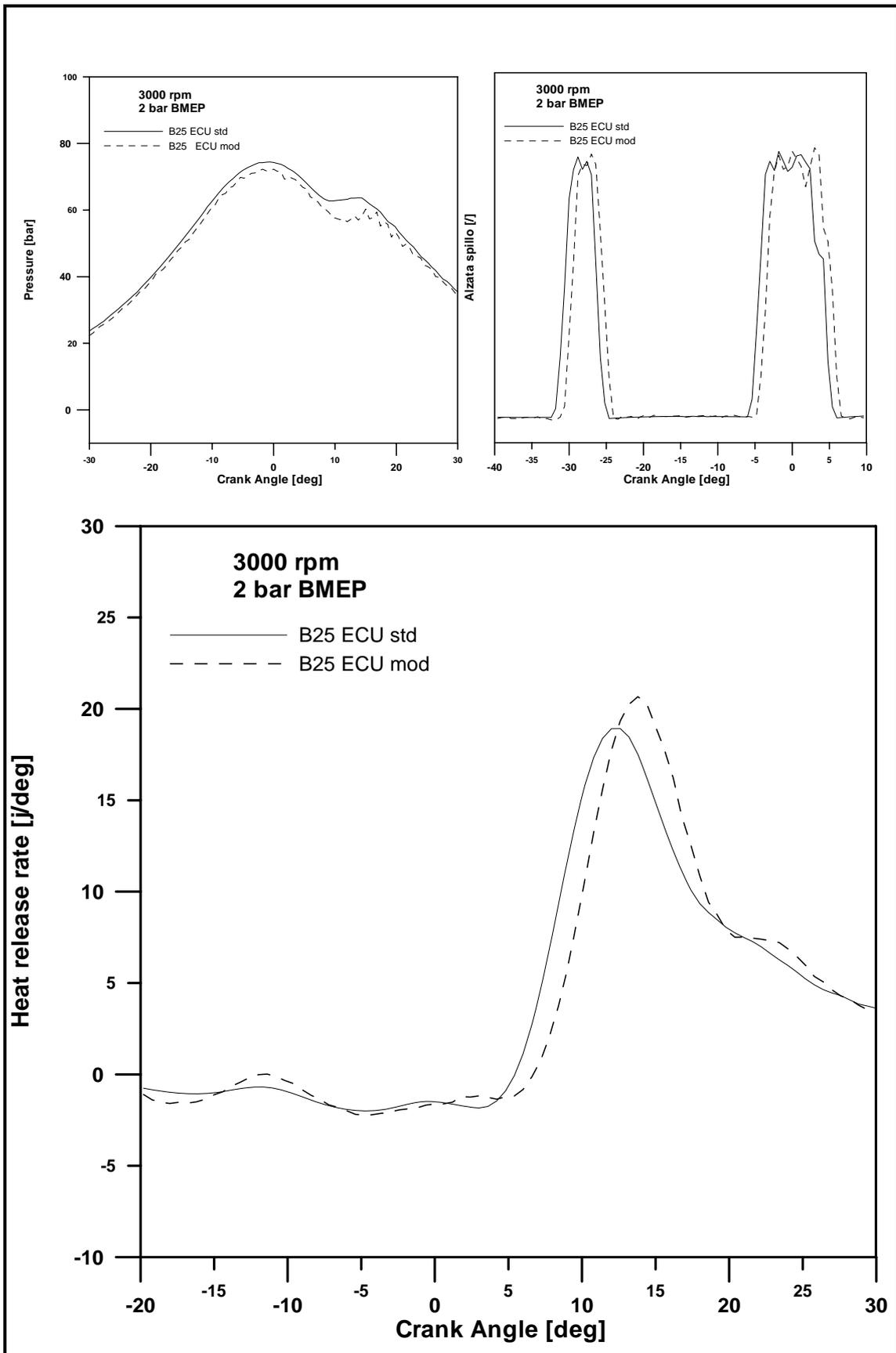


Figura 6.35

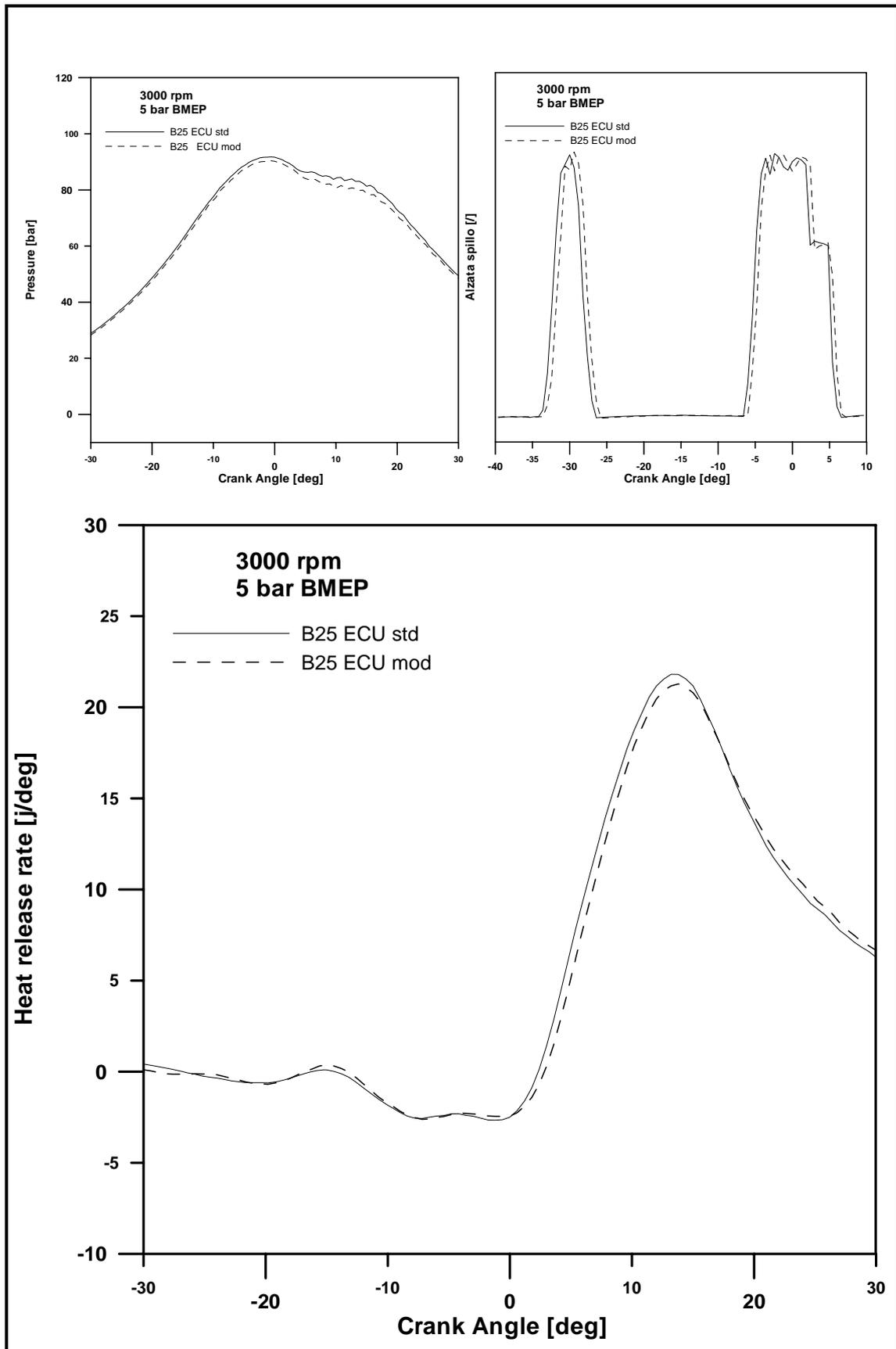


Figura 6.36

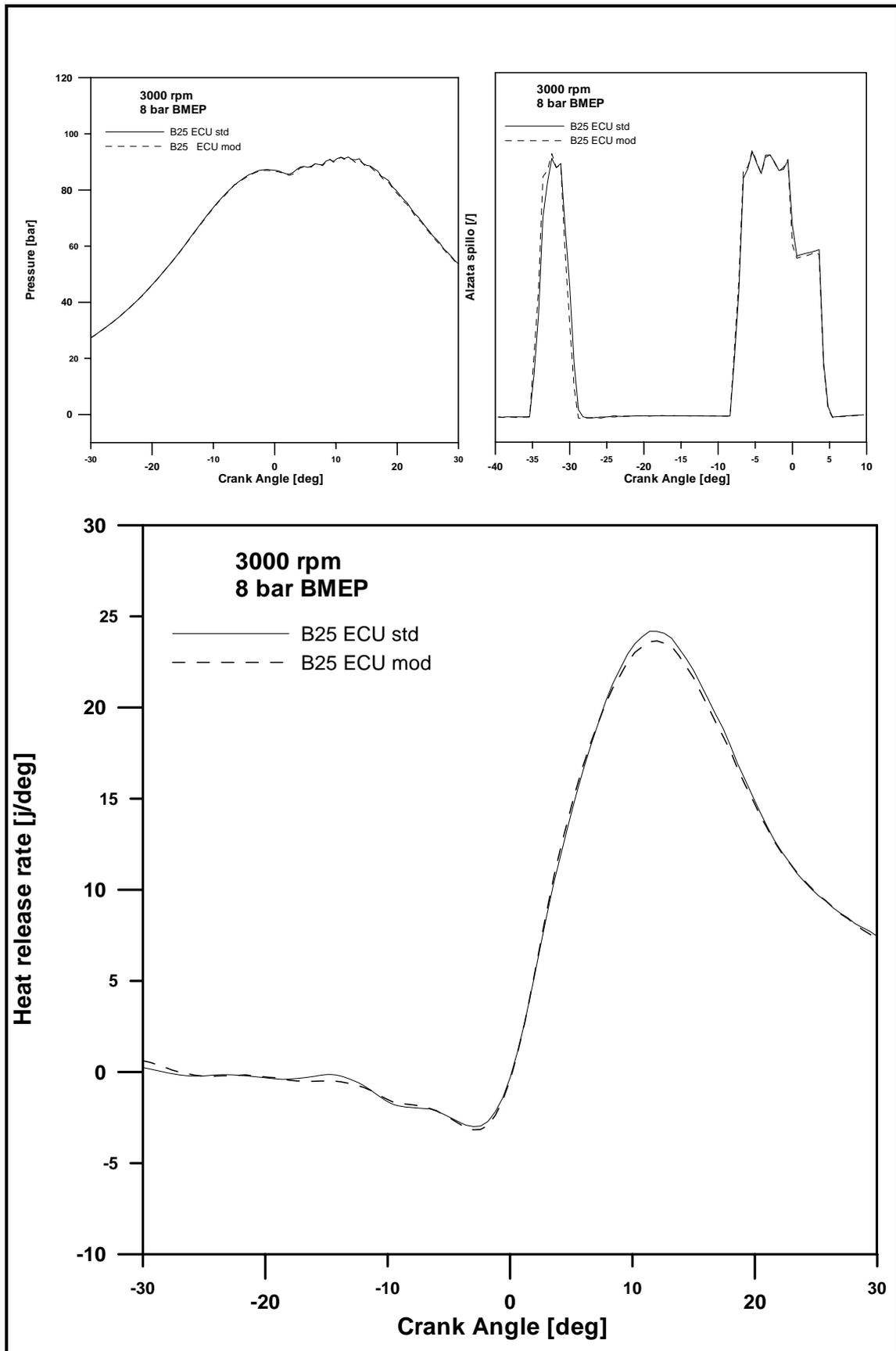


Figura 6.37

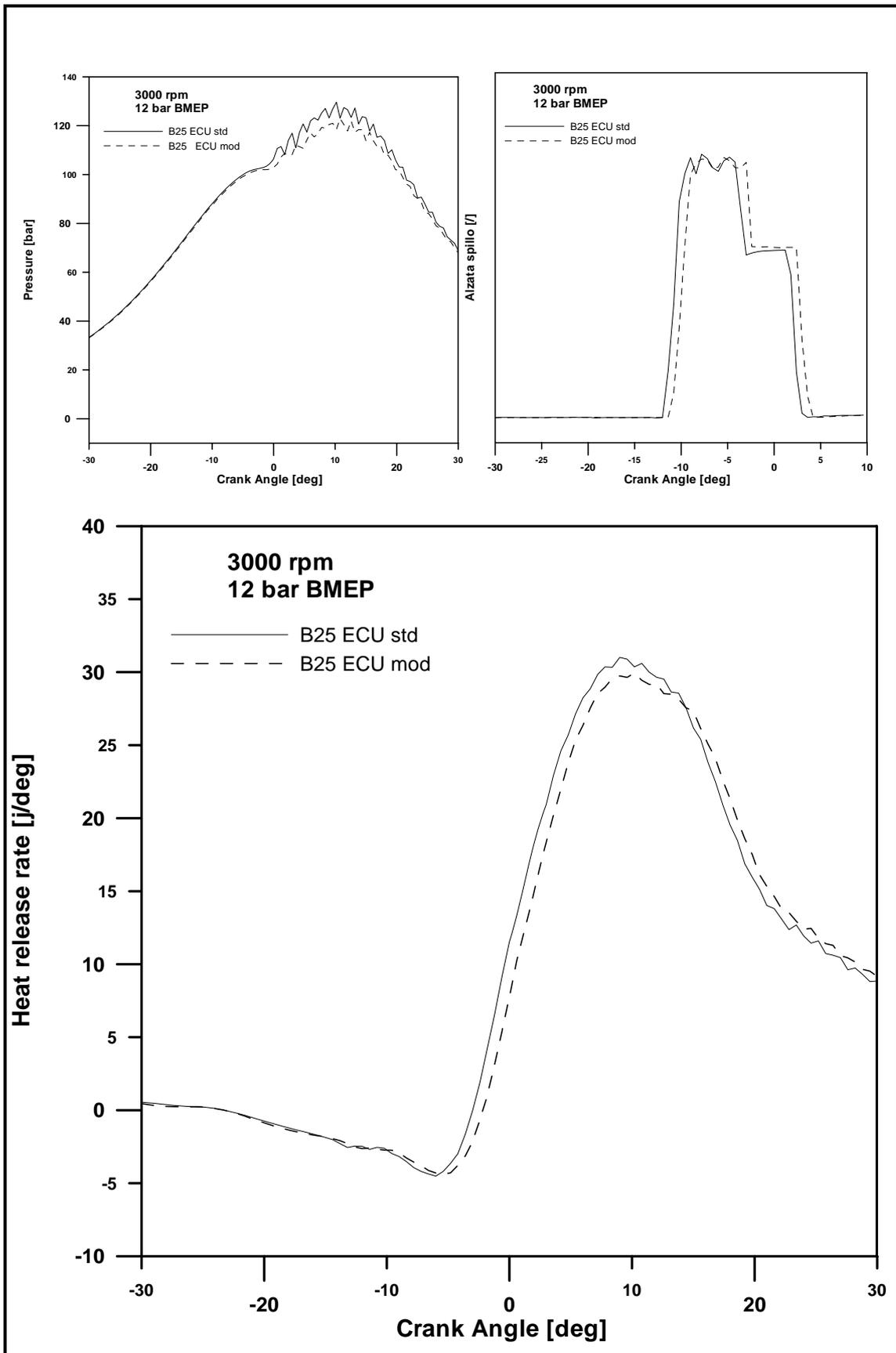


Figura 6.38

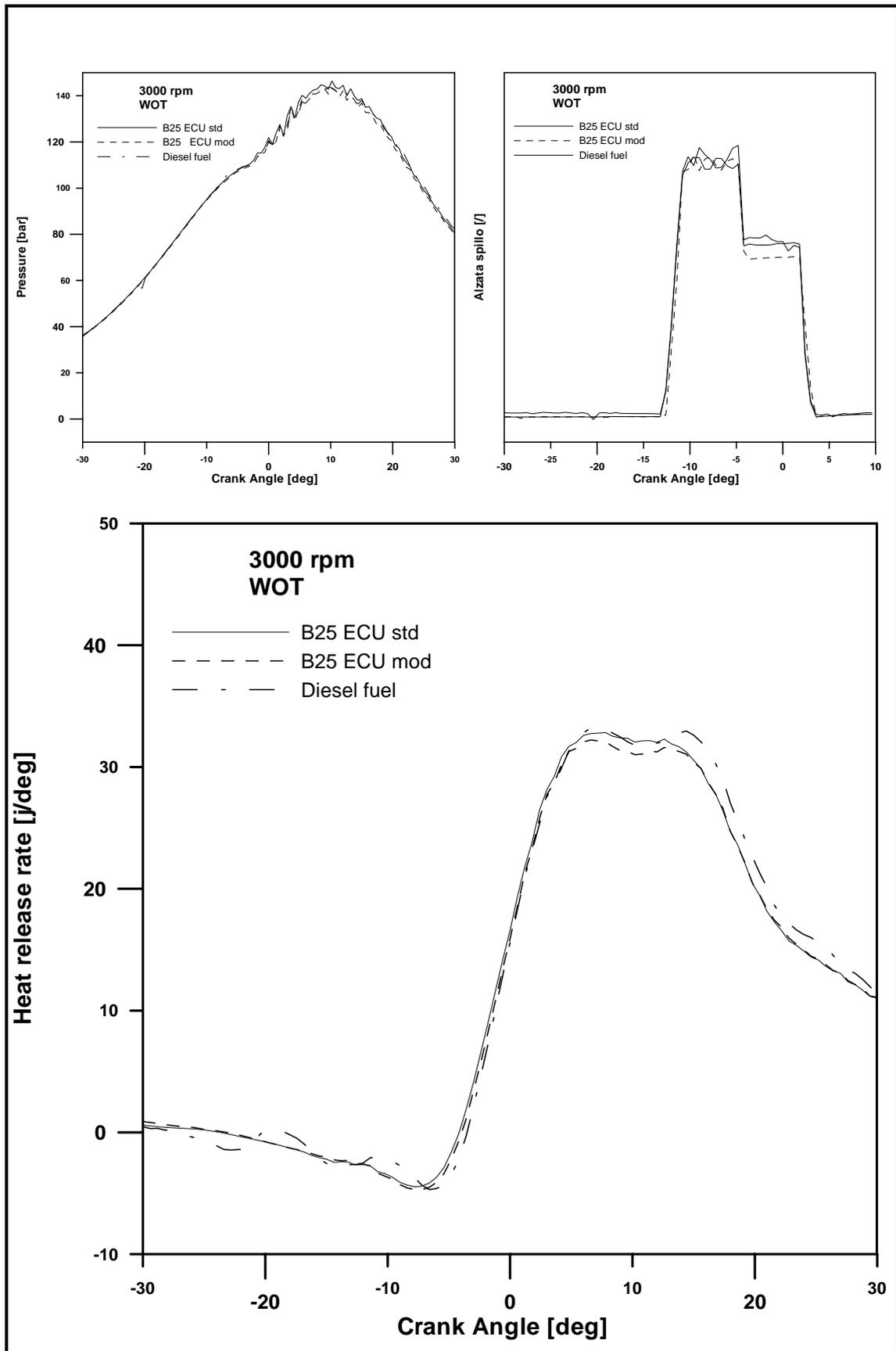


Figura 6.39

Nei prossimi paragrafi verranno presi in considerazione alcune condizioni di funzionamento e verranno messe in luce le differenze sulla combustione in funzione del combustibile e sulla mappa utilizzata.

### 6.3.2 ANALISI DEI PARAMETRI MOTORISTICI

Nella tabella 6.3 sono riportati la variazione (rispetto alla calibrazione standard) del timing dell'iniezione e della percentuale di EGR che è stata implementata nella calibrazione della centralina durante l'ottimizzazione della stessa per il miglioramento delle emissioni di monossido di carbonio e degli ossidi di azoto

<b>B100 ECU mod</b>						
	1500 RPM		2000 RPM		3000 RPM	
BMEP [bar]	EGR level	Inject. Angle [deg]	EGR level	Inject. Angle [deg]	EGR level	Inject. Angle [deg]
2	0%	-0,5	+1%	0	+2%	0
5	+2%	-0,5	+2%	-2	+2%	-0,5
8	+3%	-2	+4%	-2	0%	-1
12	0%	-1,5	30%	-3	0%	-1
<b>B25 ECU mod</b>						
2	+3%	-0,5	+1%	-0,5	+4%	-1
5	+2%	-2	+2%	-1	+1%	-1
8	0%	-2	+2%	-1	0%	0
12	0%	-3	+30%	0	0%	-1

Tabella 6.3

Come è facile osservare, le modifiche implementate non hanno modificato in maniera significativa la calibrazione standard, infatti l'anticipo all'iniezione di combustibile è stato ritardato di uno o due gradi di angolo di manovella, mentre solo ai carichi motore alti è stato necessario attivare l'EGR che nel funzionamento a gasolio non è previsto dal costruttore nella calibrazione standard. Come già osservato, le condizioni di funzionamento del motore cambiano in funzione del combustibile utilizzato, e precisamente durante il funzionamento con Biodiesel, a pari pressione media effettiva, è necessario iniettare una quantità di combustibile maggiore rispetto al funzionamento a gasolio, a causa del minore potere calorifico del biocombustibile. Quindi, a parità di numero di giri e di coppia erogata, il punto di funzionamento individuato sulla mappa della

centralina, sarà diverso per i due combustibili in prova. Il caso più esemplificativo di questo fenomeno è rappresentato dal punto 2000 x 12 bar di pressione media effettiva, in cui analizzando le emissioni di NO<sub>x</sub> è chiaro che quando il motore è alimentato con Biodiesel, l'EGR viene disattivato, in quanto la centralina riconosce un punto non interessato dal ciclo di omologazione, in cui quindi sono privilegiate le prestazioni e i consumi di combustibile.

Cambiando i punti di funzionamento sulla mappa della centralina, vengono a cambiare anche altri parametri motoristici, non espressamente citati in questa trattazione, (ad esempio la pressione di sovralimentazione), in questo sede si è dato risalto alla possibilità di ottimizzazione durante il funzionamento del motore alimentato con Biodiesel, illustrando i parametri su cui si è agito e mostrando come varia il processo di combustione con la mappa ottimizzata.

### 6.3.3 ANALISI DELL' EGR

Come esempio della attività svolta su questo argomento, nella figura 6.40 è mostrato l'andamento della pressione in camera di combustione per il punto 2000 RPM e 12 bar di pressione media effettiva. In questa figura viene riportato anche il ciclo acquisito durante una prova in cui il motore è stato alimentato con gasolio commerciale.

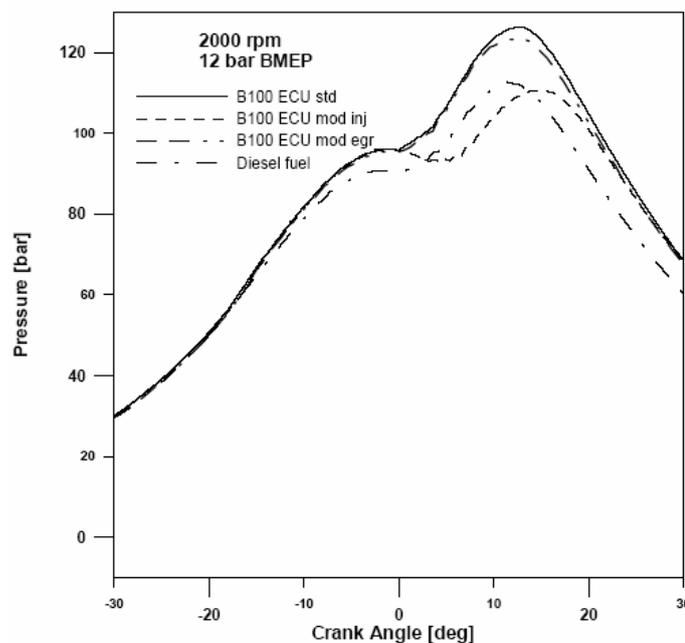


Figura 6.40

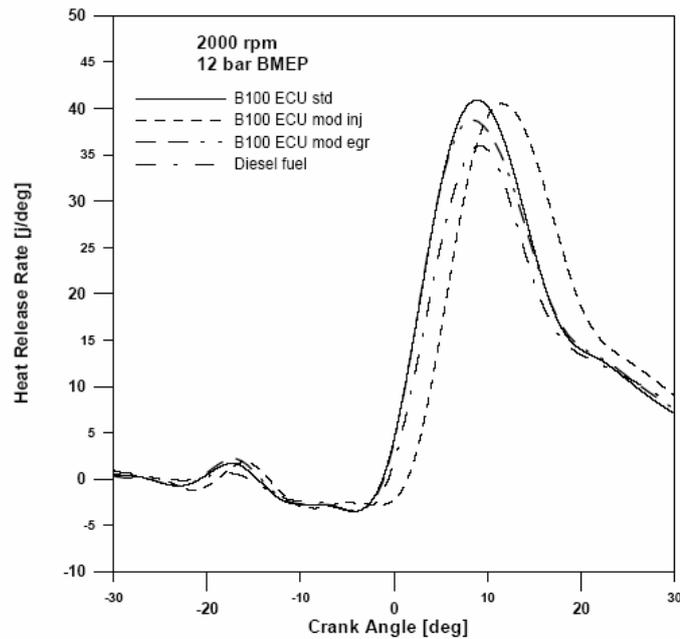


Figura 6.41

In questa figura la linea continua rappresenta il caso di Biodiesel puro con la calibrazione standard (B100 ECU std) con EGR escluso, la linea tratto punto al gasolio con EGR attivo (Diesel fuel), la linea tratteggiata fa riferimento al Biodiesel puro in cui l'anticipo all'iniezione è stato ritardato di 3 gradi rispetto alla calibrazione standard e sempre con EGR staccato, infine la linea tratto-tratto punto-punto si riferisce al Biodiesel puro in cui è stato attivato l'EGR.

	CO [ppm]	NOx [ppm]
B100 ECU std	71	1180
B100 ECU mod inj	97	830
B100 ECU mod egr	114	460
Diesel fuel	128	470

Tabella 6.4

Quando il motore è alimentato con Biodiesel in condizioni standard, le emissioni di NOx sono molto elevate, come è possibile evincere analizzando la tabella 6.4, a causa principalmente dell'assenza dell'EGR. infatti diminuendo l'anticipo all'iniezione del combustibile (B100 mod inj) si nota una diminuzione e un ritardo del picco di pressione in

camera di combustione ma il livello di emissioni di NOx anche se più basso è sempre maggiore rispetto al caso con gasolio. Per ottenere valori di NOx equivalenti al gasolio è stato necessario attivare l' EGR (B100 ECU mod egr).

Al fine di comprendere meglio la combustione del motore al variare del combustibile utilizzato, a partire dai dati della figura 6.40 è stata effettuata una analisi sulla legge di rilascio del calore, evidenziata in figura 6.41. In tale figura è chiaramente evidente la maggiore velocità del processo di combustione quando il motore è alimentato con Biodiesel. Lo stesso comportamento è stato notato nel caso rappresentato dalla linea tratteggiata, ma una piccola riduzione di NOx si verifica dovuta al ritardo dell'inizio della combustione. L'introduzione dell' EGR fa sì che la velocità di combustione rimane sostanzialmente la stessa, ma il picco massimo diminuisce, in questo modo si verificano temperature locali medie dei gas più basse.

#### 6.3.4 ANALISI DEL TIMING DELL' INIEZIONE

In figura 6.42 è riportato il ciclo indicato a 2000 RPM e 12 bar di pressione media effettiva per il Biodiesel con la mappatura standard e modificata confrontati con il ciclo relativo al gasolio, mentre nella tabella 6.5 sono riportati i principali parametri di funzionamento e i livelli di emissioni di inquinanti, per i tre combustibili analizzati.

<b>2000 RPM @ 8 bar</b>			
	B100 std	B100 mod	Diesel fuel
Consumo [kg/h]	7,9	8	6,8
Iniez. PILOT [deg/crs]	28	26	28
Iniez.Main [deg/crs]	5,6	3,6	5,1
EGR [deg/crs]	35	35	38
NOx [ppm]	295	179	205
CO [ppm]	133	192	199
HC [ppm]	15	15	66

Tabella 6.5

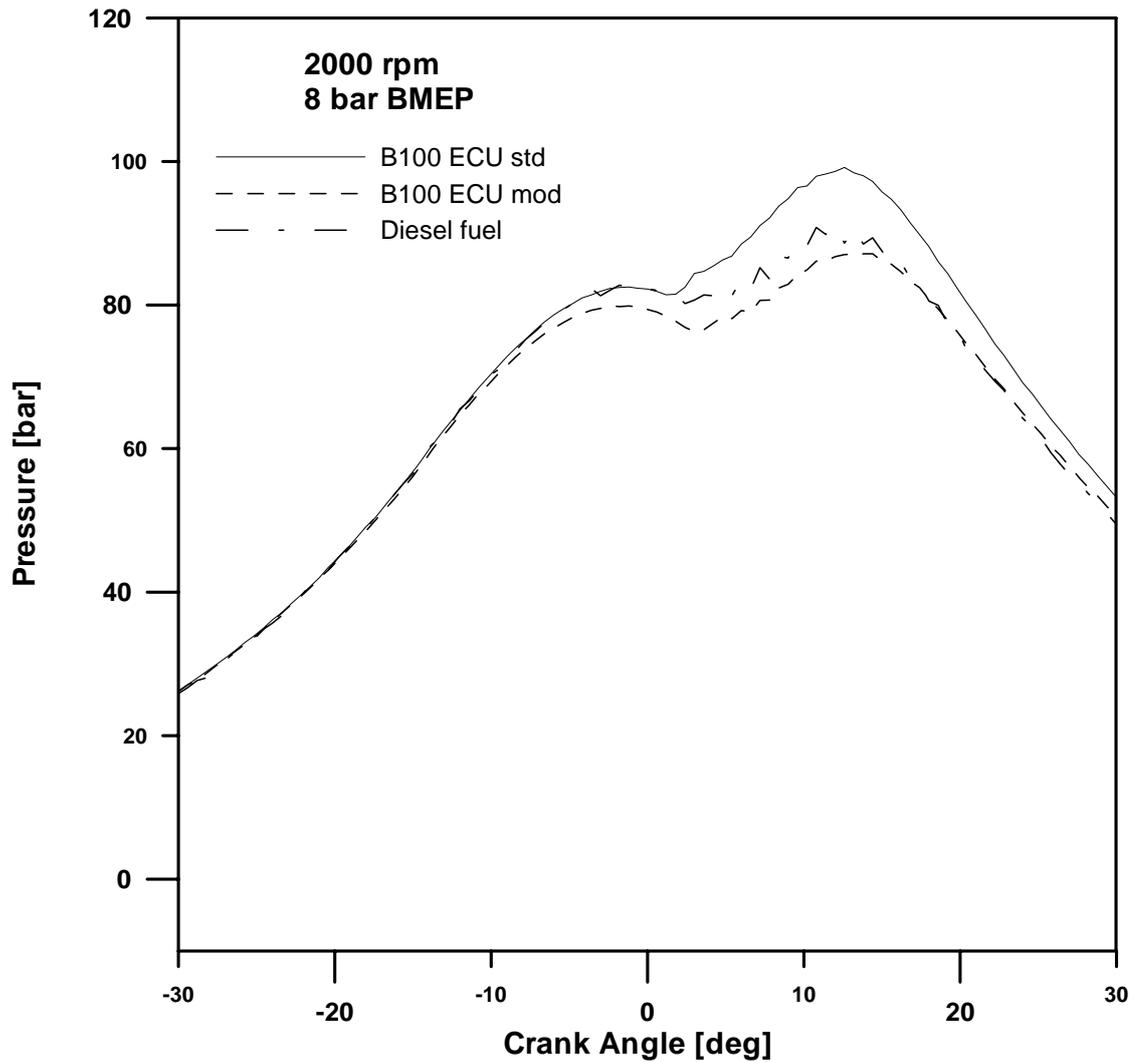


Figura 6.42

Tralasciando l'analisi del consumo di combustibile perché più volte affrontata, si osservi come il posticipo di 2 gradi di angolo di manovella, migliori la combustione, infatti il picco massimo del ciclo B100 ECU mod è più basso, nonostante sia rimasta invariata la percentuale di EGR, rispetto alla mappatura standard (B100 ECU std) e diminuiscono anche le emissioni ossidi di azoto.

In confronto con il caso gasolio, si nota che alle condizioni esaminate, la percentuale di EGR utilizzata è maggiore quando il motore è alimentato con il gasolio stesso, infatti il picco di pressione dovuto all'iniezione principale è minore; inoltre è possibile notare come l'ottimizzazione del timing dell'iniezione per il Biodiesel comporti un ciclo molto simile quando il motore è alimentato con gasolio commerciale e con Biodiesel con la mappatura ottimizzata per questo combustibile.

Ulteriori informazioni sulla combustione possono essere ricavate dall'analisi della legge di rilascio del calore, riportata nella figura 6.43:

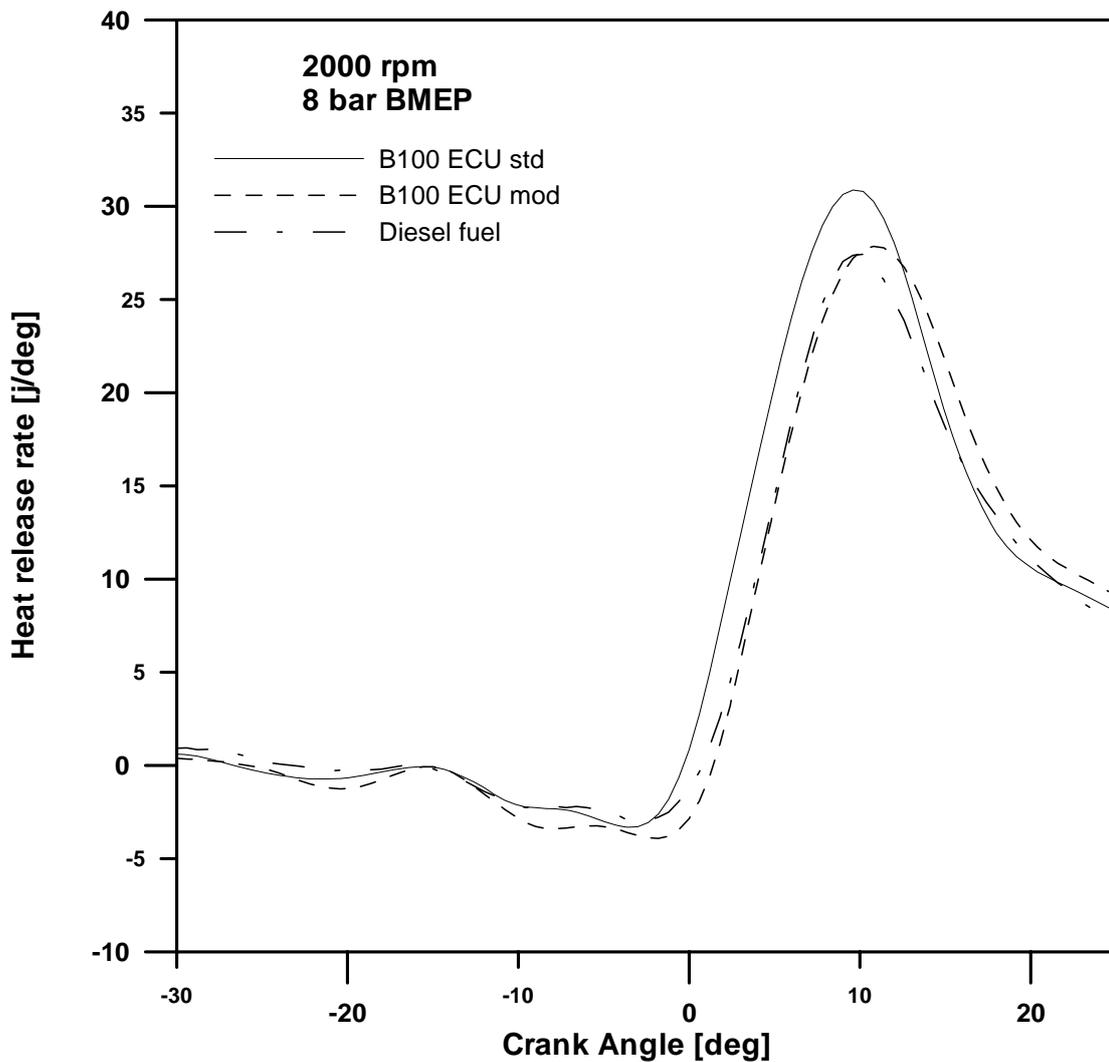


Figura 6.43

Anche dall'analisi della legge di rilascio emerge come, la combustione, in caso di posticipo di due gradi dell'iniezione rispetto alla mappa standard (B100 ECU mod), comporti che la legge di rilascio del Biodiesel con la mappa modificata si avvicini molto alla legge del gasolio. Entrando più nel dettaglio è comunque possibile osservare (pochi gradi dopo il punto morto superiore) che la velocità di combustione del Biodiesel risulti maggiore, infatti nell'intervallo angolare considerato, la pendenza della curva del rilascio del Biodiesel è maggiore rispetto al gasolio. Inoltre, in corrispondenza del massimo della curva del rilascio (circa 10° CS), la curva del ciclo del Biodiesel è più ampia, dovuta alla maggiore quantità iniettata di combustibile.

Analoghe considerazione possono essere ripetute per il caso della miscela al 25% Biodiesel-gasolio, va osservato che nel caso della miscela il ciclo si avvicina di più a quello del gasolio. Per meglio approfondire questo discorso, nella figura seguente si riporta il confronto, tra Biodiesel e la sua miscela con il gasolio, sempre, in tutti e tre i casi la mappatura è quella standard.

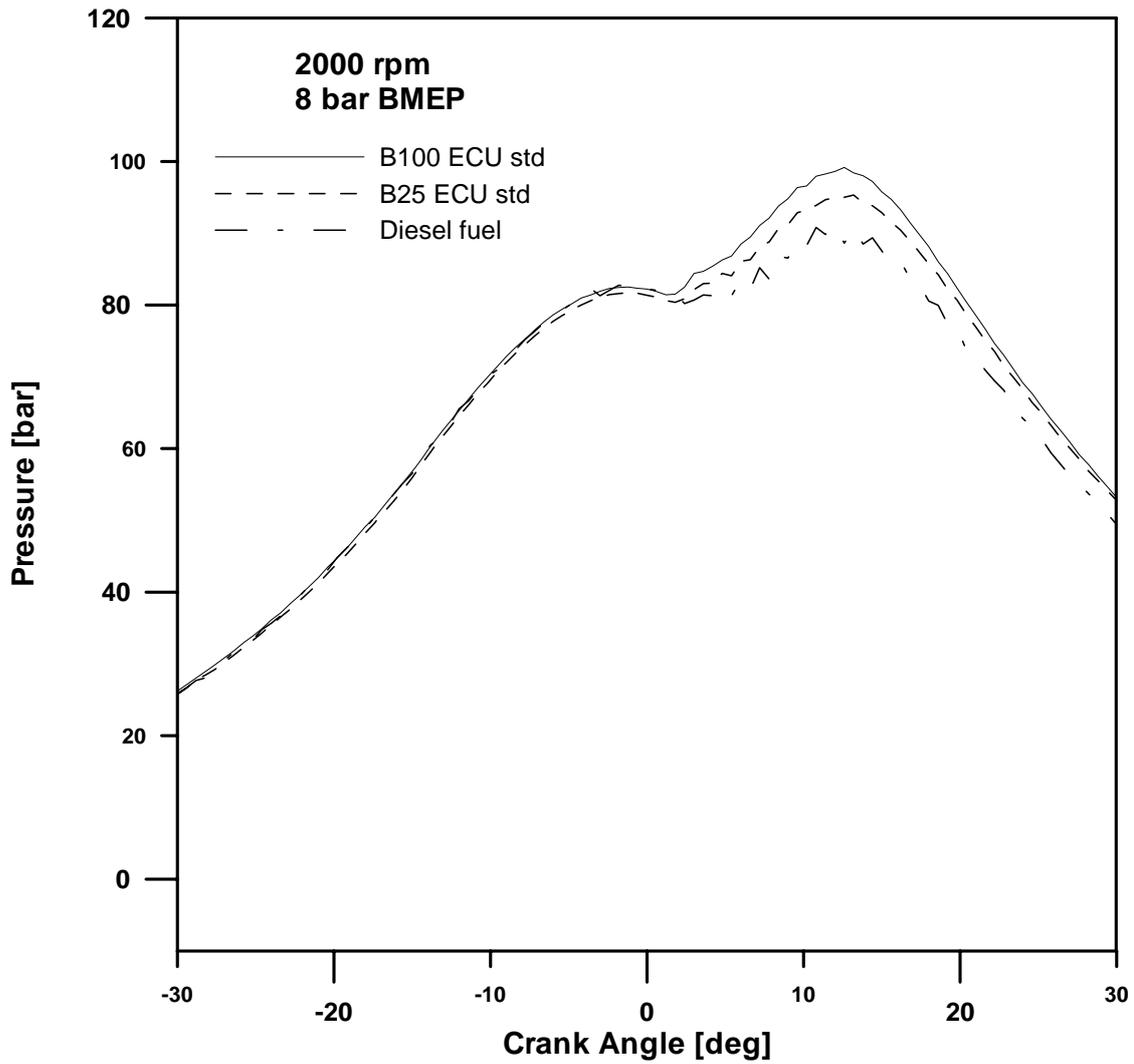


Figura 6.44

Evince subito come, almeno per la condizione di funzionamento indagata, la differenza tra i 3 combustibili è minima, e che miscela presenti differenze con il gasolio minime, come si può evincere anche dall'analisi della legge di rilascio del calore riportata nella figura 6.45:

## **Conclusioni**

*Negli ultimi anni il Biodiesel ha suscitato molto interesse grazie alla sua biodegradabilità e all'assenza di zolfo e al suo basso impatto ambientale in termine di riscaldamento del pianeta per le emissioni di anidride carbonica.*

*Nel presente lavoro di tesi si è analizzato lo stato dell'arte del Biodiesel, la sua applicabilità come combustibile nei moderni motori Diesel veloci, e sono state analizzate le prestazioni e le emissioni di un motore Diesel Common Rail di ultima generazione alimentato con Biodiesel puro e con una miscela di Biodiesel e gasolio commerciale, confrontandole poi con il gasolio al fine di verificarne la applicabilità. E' stata poi condotta un attività sulla ottimizzazione dei parametri motoristici gestiti dalla centralina motore, in modo da migliorare il comportamento del motore al variare del combustibile utilizzato, implementando modifiche solo al software di gestione della centralina senza applicare modifiche strutturali al motore, in modo da rendere tali modifiche applicabili anche a motori già esistenti.*

*In genere, quando un moderno motore Diesel è alimentato con Biodiesel (puro o miscelato) senza alcuna modifica alla calibrazione motore, le emissioni di ossidi di azoto aumentano mentre la concentrazione di monossido di carbonio nei gas di scarico diminuisce. Questi risultati sono dovuti alle caratteristiche chimiche*

*del Biodiesel (presenza di una molecola di ossigeno nella struttura chimica) che rendono la combustione più veloce ma con picchi locali di temperatura molto elevati.*

*Per sfruttare le basse emissioni di CO e la migliore combustione del Biodiesel, la calibrazione standard del motore è stata modificata al fine di migliorare i livelli di emissioni di NOx, agendo principalmente sul timing dell'iniezione e sul ricircolo dei gas combusti. In questo modo, cercando il miglior compromesso tra emissioni di monossido di carbonio e ossidi di azoto, la calibrazione motore è stata ottimizzata sia per il Biodiesel che per una miscela Biodiesel/gasolio.*

*Dall'analisi delle attività sperimentali svolte su un motore Diesel con iniezione elettronica alimentato con Biodiesel, è stato possibile anche evidenziare il comportamento del motore, in termini di prestazioni, emissioni, combustione quando diversi combustibili (biocombustibili o di origine petrolifera) vengono utilizzati.*

*Al fine di approfondire l'analisi del processo di combustione, anche in termini globali, è stata condotta un'analisi della legge di rilascio del calore. In particolare i risultati di queste analisi sono stati utilizzati per analizzare le emissioni di ossidi di azoto in funzione del combustibile utilizzato (Biodiesel puro e gasolio puro) e l'influenza di alcuni parametri motoristici, quale EGR e angolo di anticipo all'iniezione di combustibile).*

*Inoltre, lo studio delle prestazioni del motore, del rilascio di calore e della sua influenza sulle emissioni inquinanti allo scarico, in diverse condizioni di funzionamento, ha portato a poter disporre di una grande di dati la cui analisi ha*

*permesso di implementare una strategia di ottimizzazione del controllo motore in funzione della composizione (chimica) del combustibile.*

*Infatti, come risultato principale dell'attività sperimentale svolta, è possibile quindi enunciare che quando un motore è alimentato con combustibili di diverse composizioni, è sempre possibile elaborare una mappa della centralina motore in grado di ottimizzare sia le prestazioni (coppia e potenza) che le emissioni dei gas di scarico. In ogni caso, sono stati misurati livelli di emissioni più bassi o al più uguali al gasolio, quando il motore è stato alimentato con Biodiesel o con una miscela al 25% di Biodiesel e 75% di gasolio commerciale per autotrazione, come conferma della buona qualità del combustibile Biodiesel, che inoltre, può esprimere ottime prestazioni (coppia e inquinanti) a patto di avere una calibrazione "ad hoc".*

*Il risultato finale di tutta l'attività svolta presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Meccanica per l'Energetica è che le modifiche alla centralina motore, necessarie al buon funzionamento del motore alimentato con un combustibile rinnovabile e pulito come il Biodiesel, sono facilmente applicabili a tutti i moderni motori Diesel in commercio, dotati di un sistema Common Rail per la gestione dell'iniezione di combustibile.*

## Bibliografia

- [1] *Il libro verde*, COMMISSIONE DELLE COMUNITA' EUROPEE, Bruxelles, 28/06/2005 (COM2004), 379
- [2] *Ribelliamoci al petrolio*, di Jeremy Rifkin, da L'ESPRESSO del 25/11/2005
- [3] *Il Brasile primo produttore mondiale di metanolo*, [www.italiaestera.net](http://www.italiaestera.net) ,
- [4] *Che cos'è il Biodiesel*, Associazione Italiana Produttori Biodiesel, [www.assobiodiesel.it](http://www.assobiodiesel.it)
- [5] *Il Biodiesel, carburante ecologico alternativo*, [www.biodiesel.it](http://www.biodiesel.it)
- [6] L. Allocca, M. Cardone, V. Rocco, A. Senatore, S. Vitolo “*Experimental Characterization of a Common Rail Engine Fuelled with Different Biodiesel*” SAE paper n. 2005-01-2207 SAE BRASIL Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition, Rio de Janeiro, Brazil – May 11-13, 2005
- [7] S. Alfuso, L. Allocca, M. Cardone, A. Montanaro, A. Senatore “*Optical Characterization of Biodiesel and Diesel Fuel Sprays from a CR Injection Apparatus*” FISITA 2004 World Automotive Congress, Barcelona, 23-27 May 2004
- [8] M. Cardone, A. Senatore “*Efficienza del Biodiesel ed Emissioni in Atmosfera*” Terrafutura - Convegno Internazionale delle Buone Pratiche di Sostenibilità, Firenze, 1-4 aprile 2004
- [9] M. Cardone, M. Mazzoncini, S. Menini, V. Rocco, A. Senatore, M. Seggiani, S. Vitolo “*Brassica carinata as an alternative oil crop for the production of biodiesel in Italy: agronomic evaluation, fuel production by transesterification and characterization*” Biomass and Bioenergy 25 (2003) 623 – 636
- [10] *Storia dell'inquinamento ambientale*, [www.iam.cnr.it](http://www.iam.cnr.it)
- [11] *Inquinamento ambientale*, [www.miw.it/inquinamentoambientale.htm](http://www.miw.it/inquinamentoambientale.htm)
- [12] *Effetto serra: i gas serra*, [www.nonsoloaria.com](http://www.nonsoloaria.com)
- [13] *Che cosa è l'effetto serra*, [www.legambiente.it](http://www.legambiente.it)
- [14] *Un combustibile di origine vegetale*, [www.gliamicidelbiodiesel.it](http://www.gliamicidelbiodiesel.it)
- [15] *Il Biodiesel*, di Andrea Salis, Università di Cagliari, Dipartimento di Scienze Chimiche, 13 Ottobre 2005, Turismo ambiente energia, Oristano,
- [16] *Biodiesel: energia pulita*, Ing. Massimo Grotti, [www.progettomeg.it](http://www.progettomeg.it)
- [17] *Filiera Biodiesel*, [www.isci.it](http://www.isci.it)
- [18] Cosannuti R., Pinna L., Versori M., *Carburanti alternativi di origine agricola: i derivati degli oli vegetali*, Technical Report Abiotech, 1992
- [19] Goering C.E., Schwab A.W., Champion R.M., Pryde E.H., *Evaluation of Soybean Oil-Aqueous Ethanol Micromulsions for Diesel Engines*, Proc. Int. Conf. on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo (ND) 2-4 Agosto 1982, ASAE, St. Joseph (MI) 1982.
- [20] *Biodiesel: assegnazione del contingente agevolato per l'annualità 2006, nell'ambito del programma esennale 2005-2010 previsto dalla legge n. 311 del 30.12.2004*, AGENZIE DELLE DOGANE, 9041/ACVCT

- [21] *Biodiesel: Assegnazione del contingente agevolato per l'annualità 2006*, AGENZIE DELLE DOGANE, 7512ACVCT
- [22] *Biodiesel: Assegnazione del contingente per l'annualità 2003-2004 e dei quantitativi non assegnati per le annualità 2001-2002 e 2003-2003 nell'ambito del programma triennale 2001-2004 di cui all'articolo 21 della legge 23 dicembre 2000, N.388*, AGENZIE DELLE DOGANE, 468
- [23] *Le decisioni di Kyoto*, Ferrara V., ENEA Dipartimento Ambiente
- [24] Padovani L., Carrabba P., Di Giovanni B., 2003. *Da Rio a Johannesburg: il percorso verso lo sviluppo sostenibile*. Energia, Ambiente e Innovazione, anno 49, 2/2003. ISSN/1124-0016.
- [25] GARAGUSO G., MARCHISIO S., *Rio 1992: Vertice per la Terra*, Milano, Franco Angeli, 1993
- [26] MARCHISIO S., RASPADORI F., MANEGGIA A., *Rio cinque anni dopo*, Franco Angeli, Milano, 1998
- [27] R. ROSSANDA, *Una lezione anche per i verdi*, in Il Manifesto, 14 giugno 1992
- [28] Amici della terra, ISAT (Istituto per le Scelte Ambientali e Tecnologiche), *Da Rio a Johannesburg: un bilancio critico dell'indirizzo di sviluppo sostenibile*
- [29] ASSOCIAZIONE TERMOTECNICA ITALIANA: *Sezione Lombarda, Ingegneria e tecnologia di combustione per il rispetto dell'ambiente*, convegno: Milano, 15 ottobre 1996
- [30] Amici della terra, ISAT (Istituto per le Scelte Ambientali e Tecnologiche), *Da Rio a Johannesburg: un bilancio critico dell'indirizzo di sviluppo sostenibile*
- [31] *A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impact on Exhaust Emission*, Draft Technical Report, UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Air and radiation, EPA420-P-02-001, Ottobre 2002
- [32] E Trapel, C Mayer, C Schulz, P Roth, "*Effects of Bio Diesel Injection in a DI Diesel Engine on Gaseous and Particulate Emission Erica Trapel*", 2005 SAE Brasil Fuels & Lubricants Meeting, Rio De Janeiro, Brasile, maggio 2005
- [33] K Eiji\*, H Kazunori, M T Kagoshima, "*Combustion characteristic of a Diesel engine with palm oil methyl ester and its blended fuel with gas oil*", FISITA 2004, World Automotive Congress, 23 – 27 Maggio, Barcellona, Spagna
- [34] Reksowardojo, Iman K, Hanif, Hidayat, M. Rachman, Brodjonegoro, Tirta Prakoso, Soerawidjaja, Tatang Hernas, Arismunandar, Wiranto, *The performance and exhaust emission of a Diesel engine using Biodiesel fuel from crude palm oil (CPO) and refined bleached deodorized oil from palm oil*, FISITA 2004, World Automotive Congress, 23 – 27 Maggio, Barcellona, Spagna
- [35] Kapilan, Natesan, Mohanan P, Reddy, Rana Pratap, Nagarjuna, *Studies on esters of sunflowers oil as fuel for LPG Biodiesel dual fuel engine*, FISITA 2004, World Automotive Congress, 23 – 27 Maggio, Barcellona, Spagna
- [36] K Yamane, R Yuuki and K Kawasaki, "*Characteristics of DPF for Diesel Engine Fueled with Biodiesel Fuel - Second Report: Exhaust Gas Emission Characteristics at Self-Regeneration of DPF*" 2005 SAE Brasil Fuels & Lubricants Meeting, Rio De Janeiro, Brasile, maggio 2005

- [37] K. Yamane, Biodiesel, Potential of Existing Emission Control Technologies for Diesel Engines Fuelled with Biodiesel, FISITA 2006, World Automotive Congress, 22-27 ottobre, Yokohama, Japan
- [38] Heywood J.B., Internal Combustion Engine Fundamentals, Mc Graw- Hill Book Company, 1988
- [39] Gambino M., Migliaccio M., Carburanti alternativi per l'autotrazione, Liguori, 1993.
- [40] Della Volpe R., Migliaccio M., Motori a combustione interna per autotrazione, Liguori, 1995
- [41] Rocco V., Montanari R., Prati M.V., Senatore A., *Analysis of Particulate Emitted from an IDI Turbocharged Small Diesel Engine Fuelled with Diesel Fuel, Biofuel and their Blend*, 1995 Fall Technical Conference Volume 3 ASME, 1995
- [42] Rocco V., Prati M.V., Senatore A., Cerri E., Benfenati M., *Fuelling a Small Diesel Engine by Using Gasoil and RME: Comparative Results and Particulate Characterization*, ATA n. 96A3005, 1996.
- [43] Cardone M., Prati M.V., Rocco V., Senatore A., *Analisi sperimentale delle prestazioni e delle emissioni di un motore diesel alimentato con miscele di biocombustibile e gasolio*, Mis-Mac V, Roma, 1998
- [44] A. Williams, R.L. McCormick, R. Hayes, J. Ireland, H. Fang, *Effect of Biodiesel Blends on Diesel Particle Filter Performance*, Powertrain & Fluid Systems Conference and Exhibition, Toronto, ON, CANAD, Session: Alternative Fuels - Bio-esters (Part 1 of 2) , October 2006
- [45] H.L. Fang, T.L. Alleman, R.L. McCormick, *Quantification of Biodiesel Content in Fuels and Lubricants by FTIR and NMR Spectroscopy*, Powertrain & Fluid Systems Conference and Exhibition, Toronto, ON, CANAD, Session: Alternative Fuels - Bio-esters (Part 2 of 2) , October 2006
- [46] ] A.J. Marchese, T.L. Vaughn, M. Hammill, M. Harris, *Ignition Delay of Bio-Ester Fuel Droplets*, Powertrain & Fluid Systems Conference and Exhibition, Toronto, ON, CANAD, Session: Alternative Fuels - Bio-esters (Part 2 of 2) , October 2006
- [47] R. L. McCormick, B. Terry, M. Natarajan, *Impact of Biodiesel Blends on Fuel System Component Durability*, Powertrain & Fluid Systems Conference and Exhibition, Toronto, ON, CANAD, Session: Alternative Fuels - Bio-esters (Part 1 of 2) , October 2006
- [48] L. Li, *Experimental Study of Biodiesel Spray and Combustion Characteristics*, Powertrain & Fluid Systems Conference and Exhibition, Toronto, ON, CANAD, Session: Alternative Fuels - Bio-esters (Part 2 of 2) , October 2006
- [49] G. Knothe, *The Lubricity of Biodiesel*, Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition, San Antonio, TX, USA, Session: Oxygenated Fuels - Biodiesels (Part 1 of 2), October 2005
- [50] B. Tormos, *Heavy-Duty Diesel Engine Performance and Emission Measurements for Biodiesel (From Cooking Oil) Blends Used in the Ecobus Project*, 2005 SAE Brasil Fuels & Lubricants Meeting, Rio De Janeiro, BRAZI, Session: Oxygenated Fuels - Part 1, May 2005
- [51] E. Verhaeven, *Results of Demonstration and Evaluation Projects of Biodiesel From Rapeseed and Used Frying Oil on Light- and Heavy-Duty Vehicles*, 2005 SAE Brasil

Fuels & Lubricants Meeting, Rio De Janiero, BRAZIL Session: Oxygenated Fuels - Part 3, May 2005

- [52] I.K. Reksowardojo, B. Shofwatuzaki, D. Darnoko, T.P. Brodjonegoro, T.H. Soerawidjaja, I. Syaharuddin, W. Arismunandar, *Biodiesel Fuel from Refined Bleach Deodorized Palm Oil (RBDPO) on an Direct Injection (DI) Diesel Engine for Electric Generator and Vehicles*, International Pacific Conference on Automotive Engineering - IPC-13 August 05
- [53] N.N. Dung, R.I. Kartolaksolo, P.X. Mai, O. Hideyuki, T.Q. Tuyen, R. Sopheak, B. Kusuma, *The Influence of Using Biodiesel Fuel from Physic Nuts Oil on a Direct Injection Diesel Engine*, International Congress on Automotive Technology, October 2005
- [54] K. Kawasaki, K. Yamane, T. Hara, *Accelerated Oxidation Process in Biodiesel and its Effect on Diesel Combustion and Emission Characteristics*, The 18th Internal Combustion Engine Symposium (International), December 2005
- [55] A.A. Aziz, M.F. Said, M.A. Awang, *Performance and Emission Evaluations of Palm Oil-Based Biodiesels with Conventional Diesel using Single Cylinder Direct Injection Emgine*, 2005 Small Engine Technology Conference September 2005
- [56] I.K. Reksowardojo, R.P. Buddy Kusuma, I. Made Mahendra, T.P. Brodjonegoro, T.H. Soerawidjaja, I. Syaharuddin, W. Arismunandar, *The Effect of Biodiesel Fuel from Physic Nut (Jatropha Curcas) on an Direct Injection (DI) Diesel Engine*, International Pacific Conference on Automotive Engineering - IPC-13 August 2005
- [57] B. Kegl, S. Pehan, *Diesel Engine Characteristics using Biodiesel*, International Congress Motor Vehicles & Motors MVM 2006
- [58] L.T.N.Y, *Biodiesel - Alternative Fuel - Produced by Transesterification of Vegetable Oils*, International Congress on Automotive Technology, October 2005
- [59] I. Barabas, N. Burnete, A. Todorut, C. Coldea, F. Mariasiu, *Experimentation with Fuels Based on Sun Flower Oil on Diesel Engines*, International Conference for Road Vehicles CAR 2005 November 2005
- [60] W. Mitianiec, *Experimental and Simulation Study of Exhaust Emission in Direct Injection Biofuel Diesel Engine*, The Tenth International Congress, CONAT 2004
- [61] N. Burnete, N. Filip, A. Naghiu, M. Chintoanu, A. Todorut, E. Borza, B. Varga, A. Costea, *Biofuels-Diesel Fuel Mixtures – Alternative Fuels for Running Buses from Big Cities*, International Conference for Road Vehicles CAR 2005
- [62] E. Marinov, N. Stancheva, I. Cvetkov, B. Kopchev, *Operational Research in a Diesel Engine Working with Biofuel*, International Congress Motor Vehicles & Motors MVM 2006
- [63] G. Plassat, *Pollutants Emissions, Global Warming Potential effect - Comparison using External Costs on Urban Buses*, European Congress: Alternative Energy Sources for Automobiles, April 2006