

IL COMMON RAIL: LA STORIA DI UN SUCCESSO – PARTE II

Vincenzo Damiani*, Callisto Genco**, Giuseppe Starace***

*Engineering consultant; vip29@libero.it

**Engineering consultant; callisto@genco.org;

***Università LUM SS.100 km 98 70010 Casamassima (BA), starace@lum.it

SOMMARIO

Com'era necessario per comprendere origini, motivazioni e stimoli, nella "Parte I", il protagonista è stato il contesto storico che, insieme allo stato dell'arte della tecnica di quel periodo, ha fatto da contorno e da condizione allo sviluppo del Common Rail nella realtà pugliese dell'ELASIS. In quell'articolo si è evidenziato quanto l'innovazione introdotta con il nuovo sistema di alimentazione dei motori Diesel sia stata dirompente sul mercato e ne abbia determinato l'evoluzione fino ad oggi.

Poi, l'ing. Ausiello, il visionario del progetto *Common Rail*, ha voluto aggiungere il suo punto di vista, con elementi della storia (certo non noti a tutti) che ha vissuto in prima persona e che ha contribuito fortemente a scrivere nelle sue fasi iniziali. La sua intervista è stata appassionante e ricca di particolari interessanti.

Qui, nella "Parte II" il racconto dell'avventura del Common Rail continua e informa degli sviluppi paralleli al progetto ELASIS, della ricchezza brevettuale e dei contenuti tecnici del progetto che ne hanno determinato il successo sul mercato.

GLI SVILUPPI PARALLELI A QUELLI DI ELASIS

Ai tempi, ELASIS non era l'unica realtà impegnata nello sviluppo dei sistemi di alimentazione Diesel (*Common Rail* o di altro tipo). Almeno altre tre produttori del settore *automotive* lavoravano su sistemi di iniezione ad alta pressione, con la finalità ultima di rendere più efficiente la combustione, ridurre le emissioni inquinanti e incrementare le prestazioni:

- **LUCAS** con sede centrale in Blois (Francia) che aveva come obiettivo gli i costruttori francesi (Renault Peugeot e Citroen);
- **Detroit Diesel**, che avrebbe sviluppato il suo prodotto a servizio dei propri motori di grossa cilindrata;
- **NipponDenso**, fornitore di componentistica per Toyota;
- **Siemens VDO**, che insisteva sullo sviluppo iniettore-pompa e che solo in seguito lancerà l'iniettore piezoelettrico.

LUCAS / Delphi¹

1998 – Il Common Rail è un'opportunità

La Delphi Corporation, multinazionale americana, valuta che il common rail è il business del futuro. Il centro di sviluppo in Lussemburgo riprende il concetto common Rail del Dr. Ganser per sviluppare una versione che possa competere con Bosch. Il concetto iniziale si basa su componenti e competenze provenienti dagli iniettori benzina. Un percorso in salita: il gasolio in alta pressione unito a cavitazione corrode rapidamente gli inadatti componenti benzina. Le tenute di alta pressione diventano inefficaci. La cavitazione ed i trafiletti sono capaci di erodere e ridurre la durezza superficiale dei componenti ricuocendo i materiali fino a 250°C. Il

concetto iniziale è molto critico ed il ritardo tecnologico-commerciale è quasi incolmabile.

1999 - 2000 - Delphi compra Lucas-Variety

Nel frattempo Bosch ha protetto la proprietà industriale aggiungendo brevetti ombrello ai brevetti Elasis: vita difficile per la concorrenza. Sul mercato c'è Lucas (proprietà della TRW) che è avanti nello sviluppo e vicina alla produzione. La Delphi, per non raccogliere le briciole del mercato, propone a TRW l'acquisto del business Lucas. L'accordo ha successo e, quindi, si abbandona la soluzione Lussemburgo per adottare la soluzione Lucas sviluppata in Blois (FR) e Gillingham (UK). La Lucas Variety diviene Delphi Diesel System (DDS) nel 2000.

2001 - Delphi lancia il suo Common Rail

La Delphi esce sul mercato fornendo Renault. Fino a quel momento il gruppo PSA si era servita da BOSCH. Il concetto su cui si basa il funzionamento dell'iniettore Lucas è molto buono, ma l'iniettore LUCAS soffre i problemi di cavitazione, dei quali aveva già sofferto anche ELASIS nelle fasi di avvio del suo programma. Gli interventi sulla durezza dei materiali non hanno esito positivo; va rivista la fluidodinamica della valvola di regolazione per evitarne l'erosione/corrosione. La gestione della produzione ha uno stile francese, veloce e flessibile. Il cammino tecnico per risolvere le problematiche della cavitazione esige gli stessi passi fatti precedentemente da Elasis/Bosch. Un chiaro esempio di convergenza tecnologica. Delphi usa anche la teoria dell'*impingement* di "de Haller" per teorizzare la buona soluzione.

Siemens VDO

Siemens non investe nel *Common Rail* e insiste sull'iniettore pompa soddisfacendo quasi totalmente la produzione Volkswagen. Il sistema iniettore pompa è più economico. Nel 2005, in vista delle nuove norme euro 5 l'iniettore pompa mostra tutti i suoi limiti e ciò si

¹ Nel 2017 Delphi diviene Delphi Technologies per poi cambiare ulteriormente nell'ottobre del 2020 in BorgWarner.

rivela un tracollo per Siemens poiché Volkswagen è obbligata a comprare i sistemi di iniezione da Delphi e da BOSCH. Più tardi (Siemens acquisirà alcuni brevetti di Rexroth e darà vita a un sistema a *Rail*/sferico alimentato da una pompa in grado di raggiungere 1500 bar. Il suo cliente è RSA (**R**enault **S**ociété **A**nonyme). Siemens non moltiplica le versioni del sistema per le diverse applicazioni, per cui il prezzo di produzione riesce a rimanere contenuto. Quando Siemens si lancia nel mercato del *Common Rail*, propone immediatamente un iniettore ad attuazione piezoelettrica.

Il concetto Siemens è interessante: si tratta di uno stack piezoelettrico fuori dell'alta pressione e un micro leveraggio amplificato che controlla gli equilibri di pressione delle camere idrauliche interne. Per Siemens è molto difficile recuperare il ritardo tecnologico, visto che i suoi concorrenti sono già in produzione da anni e hanno accumulato esperienza per milioni di pezzi. Dopo ripetute revisioni dell'iniettore e importanti problemi di produzione, nel 2015 Siemens abbandonerà il progetto *Common Rail* e annuncerà il ritiro dal mercato degli iniettori Diesel per poi cedere la business line e la produzione alla Continental.

Nippon-DENSO

La Denso² adotta un approccio estremamente pragmatico. Il suo cliente principale è la giapponese Toyota, ma già nel 1998 si affaccia sul mercato europeo con Renault. Nel 2002 vende il suo sistema Common Rail a Renault. I due veicoli di Renault sono la Espace IV e la Vel satis³. I motori sono tre litri. Denso dimostrerà di saper giocare fuori casa acquisendo clienti come: Peugeot, Fiat, Opel, Citroen, Saab, etc. Non riuscirà ad acquisire Volkswagen, Mercedes, BMW che alterneranno le loro forniture fra Delphi e Bosch con una preferenza per quest'ultima. I motori allestiti con il sistema Denso sono preferibilmente *medium/heavy duty*, ma non sono esclusi anche i motori di 1600 cm³. Non si spingerà sui motori di piccola cilindrata come il Fiat 1,3 litri che resterà un prodigio della collaborazione Fiat -Bosch. Nel 2012 Denso fornirà a Toyota un iniettore con sensore di pressione e *chipset* chiamato iART (*intelligent Accuracy Refinement Technology*). "iART" eleverà a eccellenza il controllo in termini di portata e tempi di attuazione. A detta di colleghi che ci hanno lavorato, la Denso è "estremamente procedurale con una larga visione prodotto e non trascura i dettagli".

ELASIS PROVA ANCHE LO SVILUPPO DEL BENZINA COMMON RAIL

ELASIS e il centro Ricerche FIAT credono tanto nel progetto Common Rail da spingersi oltre il Diesel. Nel 1992 FIAT/CRF pensava di poter applicare lo stesso sistema di alimentazione ai motori benzina.

Con questa finalità ad ELASIS Bari furono commissionate prove di durata sulle pompe Diesel Common Rail alimentate con fluidi dotati di proprietà simili alla benzina e di una bassa infiammabilità (probabilmente Stoddard o N-Heptane) in condizioni di bassa pressione.

L'esperimento andò male per la prevedibile ridotta durata dei componenti della pompa, dal momento che la benzina non presenta lo stesso potere lubrificante del Diesel e l'usura le parti in contatto strisciante delle pompe, ne facevano rapidamente (dopo sole 100 ore di prova al banco) decadere l'efficienza idraulica. Le stesse pompe alimentate con ISO 4113 (il Diesel "da laboratorio") raggiungevano 1000 ore di durata anche in condizioni di alta pressione. Date le difficoltà iniziali e il limitato livello di risorse, il progetto *Common Rail benzina* venne abbandonato, anche dopo che nel 1992 (in anteprima sullo stato dell'arte) era stato già avviato al banco un motore a quattro cilindri a iniezione diretta GDI con circa 400 bar di pressione del *rail*.

I BREVETTI DI ELASIS

Le idee prodotte dall'attività di ricerca sono state concretizzate in brevetti e hanno giocato un ruolo importante nella trattativa tra BOSCH e FIAT per l'acquisizione del progetto. Lo studio Torta di Torino redigeva e depositava i brevetti a nome di ELASIS. A partire dal 1994, BOSCH li rilevò tutti (Tabella 1) e ne allineò la portata alla propria politica brevettuale incentrata sulla generazione di brevetti ombrello a protezione del progetto dalle azioni commerciali della concorrenza.

COME FUNZIONA IL COMMON RAIL DI ELASIS

Si tratta di una rivoluzione in termini di controlli elettronici e prestazioni motore. Il Common Rail si compone di più elementi e strategie. Qui ci si interesserà solo di quelli principali: pompa di alta pressione, regolatore di pressione, valvola MPROP, rail, iniettore e centralina elettronica.

La pompa di alta pressione

È il componente che fa da generatore di fluido in pressione. Nella prima generazione del *Common Rail* la



Figura 1 - I componenti principali del Common Rail

² La Nippon-Denso cambia nome in Denso nel 1997 per evidenziare la loro internazionalità.

³ <https://www.denso-am.eu/e-catalogue/>

Tabella 1 – Brevetti ELASIS passati alla proprietà BOSCH a seguito dell'acquisto del Centro ELASIS

Titolo dell'invenzione	Id del Brevetto	Inventori	Data
Fast solenoid valve, particularly a fuel injection pilot valve for Diesel engines	EP0304744	M. Ricco	01.03.1989
Control circuit for predominantly inductive loads, in particular, electro-injectors	EP0548915	M. Ricco, N. Pacucci; M. Abate; E. Faggioli	30.06.1993
Device for adjusting a fuel injector electromagnetic metering valve	EP604915	M. Ricco	06.07.1994
Electromagnet for controlling the metering valve of a fuel injector	EP0665374	M. Ricco; G. Bruni	02.08.1995
A device for regulating the supply of pressurized fluid accumulator, for example the motor vehicles	EP0735268	M. Ricco	02.10.1996
Improved electromagnetic metering valve for a fuel injector	EP0753658	M. Ricco	15.01.1997
Electromagnetic metering valve with a ball shutter for a fuel injector	EP0851115	M. Ricco	01.07.1998
Piston pump, in particular a radial-piston pump for internal combustion engine fuel	EP0851120	M. Ricco	0.07.1998
Pumping device for feeding fuel from a tank to an internal combustion engine	EP0853194	M. Ricco	15.07.1998

pompa è costituita da tre pompanti disposti radialmente a 120°, ciascuno dei quali dispone alla base di un piattello che poggia sulla faccia piana di un anello triangolare; quest'ultimo accoppiato a un eccentrico circolare sull'albero pompa, genera un movimento assiale del pompante, con il piattello che scorre sulla sua superficie. (vedasi schema in figura 4).

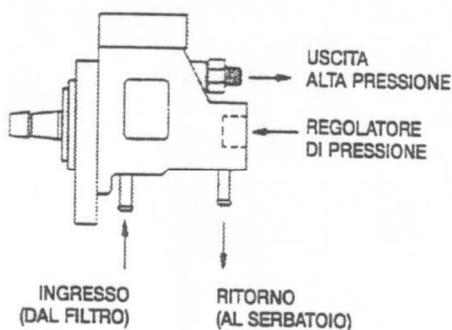
Per comprendere come un fluido (apparentemente incompressibile come un liquido) possa essere compresso all'interno di una capacità bisogna ricorrere alla definizione di modulo di comprimibilità del fluido K (*bulk modulus*⁴), che ha le dimensioni di una pressione, secondo la seguente relazione.

$$K = -V \left(\frac{dp}{dV} \right)_T$$

in cui dp è l'incremento di pressione del fluido inizialmente al volume V e sottoposto a una riduzione di volume dV isoterma (per i liquidi, nei fatti, non è determinante ai fini del reperimento di K la modalità di trasformazione);

Il modulo di comprimibilità K del gasolio vale circa 1700 bar.

Un esempio può aiutare nella compressione: per

**Figura 2** - Schema idraulico della pompa

⁴ Il *bulk modulus* è funzione decrescente della temperatura e crescente della pressione. Si tratta di una definizione "puntuale" per la quale è necessario l'uso della derivata perché se il K fosse costante con la pressione, si ammetterebbe come possibile l'azzeramento del volume a pressioni finite.

comprimere il gasolio fino a 1350 bar in una capacità da 40 cm³ bisognerà aggiungervi circa 3.17 cm³ di gasolio (cioè un 7.5% del volume iniziale). Poiché il gasolio aggiuntivo possa entrare nella capacità di 40 cm³, esso stesso dovrà essere compresso alla stessa pressione. La potenza impegnata in questo processo, adoperando una pompa a 3000 rpm è pari a circa 2,3 kW.

La prima versione della pompa BOSCH chiamata CP1 è una copia migliorata del progetto ELASIS, svolto in collaborazione con Rexroth, che nel 1992 ne aveva ceduto tutti i brevetti. Una delle prime modifiche introdotte da ELASIS fu il disassamento di quasi 4 mm del pompante che, pertanto, non interseca più quello dell'asse dell'albero principale della pompa. In questo modo la pressione di contatto pompante-eccentrico triangolare era più uniforme e ciò garantiva i problemi di rottura della base pompante.

Per ridurre, poi, i trafiletti di pompaggio e quindi il riscaldamento della pompa si determinarono le tolleranze di montaggio tali da garantire giochi di accoppiamento non superiori a 3-4 μm⁵.

Nello stabilimento TDIT (Tecnologie Diesel Italia) di Modugno, nella zona industriale di Bari, la produzione delle pompe ad alta pressione parte nel novembre 1997 e già nel dicembre 1999 si festeggeranno un milione di esemplari prodotti.

Mentre a Bari partiva la produzione della pompa di prima generazione, a Stoccarda la Bosch avviava lo

**Figura 3** – La pompa BOSCH di alta pressione CP1

⁵ ELASIS apprendeva che nello stabilimento di Homburg gli operai riuscivano a comprendere quali fossero le corrette tolleranze di accoppiamento pistone-cilindro delle pompe rotative dallo scorrere del pistoncino nel suo cilindro. Questo confermava il livello tecnologico dei componenti BOSCH di quei tempi.

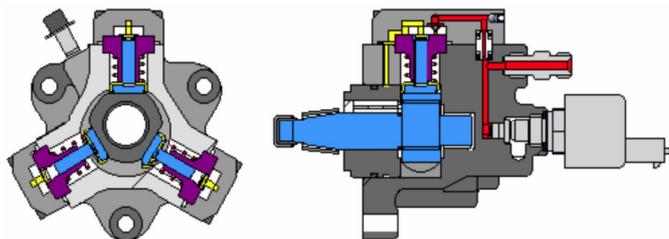


Figura 4 - Sezioni trasversale e longitudinale della CP1

studio della pompa di seconda generazione.

L'obiettivo principale era quello di ottenere una maggiore robustezza, con garanzia di continuità di funzionamento anche nelle condizioni più gravose e pertanto più critiche. Si pensò quindi a una pompa modulare che potesse equipaggiare dal più piccolo motore per "Passenger Car", ai motori più grandi usati nelle applicazioni "Light Duty". Per questo si dovevano garantire chilometraggi maggiori, al posto di una pompetta di pre-alimentazione elettrica, si preferì una pompa di prealimento a ingranaggi, ben più duratura. Inoltre il target di pressione *rail* era più alto: 1600 bar per avere una ancor più spinta polverizzazione del gasolio dai fori dell'ugello dell'elettro-iniettore, che nel frattempo diventavano di diametro sempre inferiore.

Dal punto di vista energetico la caratteristica più importante era costituita il sistema di regolazione della portata, ottenuta parzializzando l'aspirazione della pompa con una valvola a cassetto comandata in PWM⁶. Grazie a questo sistema la pompa elaborava la quantità voluta di gasolio a seconda della richiesta del motore. A questa veniva aggiunta un'ulteriore quantità ridotta, a garanzia della lubrificazione delle bronzine a supporto dell'albero.

Anche questa pompa di seconda generazione, chiamata CP3, era una volumetrica radiale a 3 cilindri, con la base dei pompanti che agiva sulle facce di un anello triangolare guidato da un eccentrico. Questa tipologia di pompa ha goduto subito di un grande successo ed è stata prodotta in un gran numero di esemplari. Si è evoluta sino a raggiungere pressioni di alimentazione di 1800-2000 bar. Le versioni con cilindrata maggiore equipaggiano tuttora motori di camion e pullman e prevedono anche la lubrificazione con olio.

Ma i motoristi non smettevano di richiedere prestazioni sempre maggiori in termini di pressioni e numero di giri, insieme, manco a dirlo, a maggiore semplicità costruttiva e prezzi inferiori.

Ed è così che Bosch sviluppò la CP4, pompa di terza generazione, semplificata perché dotata di uno o, al massimo, di due pompanti, con il corpo in alluminio e solo il cilindro e la testa, contenente i gruppi valvola, costruiti in acciaio. Tramite una tazza, la base del pompante, agisce direttamente sulla superficie di una camma, di pezzo con l'albero, che nelle versioni per

motori più grandi, possono essere bilobate e consentire maggiori portate elaborate.

La soluzione di accoppiamento camma-tazza si rivela più robusta del piattello-anello triangolare, che, giunti a regimi di rotazione e pressioni elevati, non è più in grado di garantire la scorrevolezza tra le parti, generando facilmente un danneggiamento delle superfici a contatto. Al contrario, l'accoppiamento camma-tazza garantisce robustezza fino a 3000 bar e velocità di rotazione massima di 5000 giri.

Sulla base di questo concetto, per dimensioni maggiori, sono state sviluppate le pompe che alimentano anche i motori del segmento Heavy Duty, di cilindrata sino a 1,5 litri per cilindro, con 12 cilindri.

Il regolatore di pressione

Posizionato sulla pompa di alta pressione oppure sul *rail*, il regolatore è il componente che permette di controllare la pressione del *rail* in funzione delle esigenze del motore. Il motore Diesel ottimizza efficienza ed emissioni inquinanti con la corretta erogazione della quantità introdotta in camera di combustione e la giusta pressione. Ad alti regimi e piena potenza, le quantità in gioco sono importanti: un motore quattro cilindri di 1.9 litri e a 4000 rpm può aver bisogno fino a 40 mg di gasolio per ogni ciclo di iniezione. Una rapida decelerata farebbe crescere molto la pressione del *rail* se il regolatore non ne riciclasse al serbatoio la giusta quantità per garantire la pressione di *target*.

Viceversa nessuna ricircolazione è necessaria se si vuol far aumentare rapidamente la pressione nel *rail*. Il *feedback* del valore di pressione viene fornito dal sensore di alta pressione situato sul *rail*.

Il sistema di per sé è inefficiente: il dott. Ricco diceva che portavamo dei materiali su un grattacielo per poi buttarli giù senza aver cura della fatica fatta per salire le scale. Il regolatore di pressione scaldava il gasolio per i continui trafileamenti dall'alta pressione alla pressione di ricircolo. Ci si pose subito il problema del dosaggio della pompa: non si poteva comprimere tutta la cilindrata della pompa per scaricarla dal regolatore di pressione, ma bisognava pensare a una pompa con una cilindrata

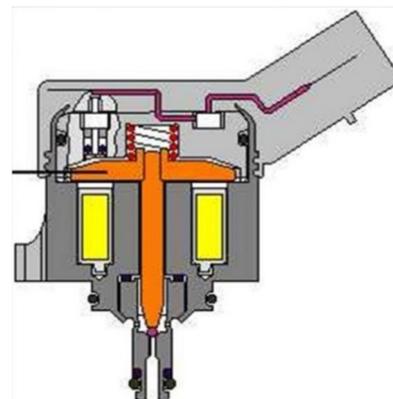


Figura 5 – Il regolatore di pressione

⁶ Pulse Width Modulation

effettiva variabile. Si costruirono e testarono prototipi in cui si disattivava un pompante quando non era necessaria l'intera cilindrata, per ridurre gli sprechi energetici.

Oltre all'inutile lavoro di compressione per l'elaborazione di una portata di gasolio necessaria alla regolazione della pressione del *rail*, si aggiungeva un altro inconveniente costituito dai conseguenti successivi aumenti di temperatura dello stesso gasolio di ritorno al serbatoio. Questi possono essere valutati osservando che i trafiletti del gasolio attraverso il ricircolo seguono una trasformazione isoentalpica.

Il trafiletto da 1350 bar (la pressione massima della prima generazione del sistema *Common Rail*) trasforma l'energia di pressione in energia termica, con l'effetto di riscaldare il gasolio nel serbatoio.

Differenziando la definizione di entalpia si ha, infatti:

$$dH = dU + d(pV) = dU + pdV + Vdp$$

Trascurando rispetto alle altre grandezze in gioco la variazione di volume da alta a bassa pressione ($pdV = 0$) e poiché il trafiletto è isoentalpico ($dH = 0$), l'espressione precedente dà adito alla seguente relazione:

$$dU = cdT = -Vdp \Rightarrow dT = -\frac{dp}{\rho c}$$

dalla quale, utilizzando i valori medi⁽⁷⁾ per il gasolio, scaturisce che trafiletti, da 1350 bar fin giù alla pressione atmosferica possono essere allora associati a un aumento temperatura del gasolio di circa 80°C.

Quando il motore viaggiava a regime di piena potenza, la pompa di alta pressione, dimensionata per garantire la pressione nel *rail*, imponeva il ricorso a un ricircolo continuo e, pertanto, ad un costante riscaldamento del gasolio nel serbatoio, che, sempre più caldo, magari scendendo di livello, rischiava di fare aumentare le temperature in maniera esponenziale, finendo col compromettere il buon funzionamento del sistema.

La continua regolazione della pressione del *rail* fatta per laminazione sembrava richiedere l'utilizzo di un apposito radiatore per raffreddare il gasolio spillato dal *rail* prima che questo tornasse nel serbatoio.

Altre strategie di sistema ne hanno, poi, evitata l'implementazione. Le pompe dopo la CP1 vennero progettate con occhio al risparmio energetico. I nuovi sistemi ridussero il lavoro di compressione, limitandolo alle quantità effettivamente necessarie per l'alimentazione del motore, con riflessi positivi sul rendimento organico del propulsore.

La valvola MPROP

Per i motivi cui si è accennato nel paragrafo precedente dopo la prima generazione *Common Rail* (CP1) una valvola di laminazione all'aspirazione pompa rese

possibile ridurre le perdite di energia dovute all'eccesso di fluido compresso nel *rail*, che, poi, trafiletto ritorna più caldo al serbatoio. Venne utilizzata allo scopo un'elettrovalvola (figura 6) comandata in PWM dotata di solenoide utile alla traduzione del segnale elettrico proveniente dalla centralina motore.

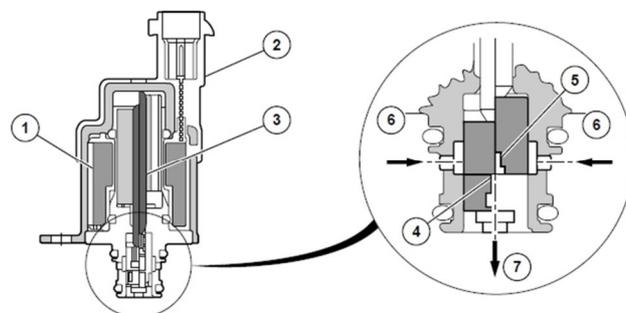


Figura 6 –La valvola MPROP

Il rail

È un volume che si collega a pompa e iniettori mediante delle cannette di alta pressione. La sua funzione è di stabilizzare le oscillazioni di pressione dovute alla mandata pompa e allo spillamento degli iniettori. Si tratta di un serbatoio di piccole dimensioni dimensionato in funzione dell'applicazione motore. In alcune applicazioni con esigenze particolari se ne montavano due in parallelo. Il *rail* evidenzia una dominanza idraulica unidimensionale: le dimensioni scelte sono quelle di un volume cilindrico di capacità complessiva pari a 40cm³ con altezza di 400mm e diametro di 11 mm. Lunghezza e volume sono le due grandezze più importanti per controllare le variazioni di pressione.

Il fenomeno dei battimenti idraulici diveniva importante quando le frequenze pompa o iniettori erano sottomultipli interi della frequenza naturale del *rail*. Con la giusta sperimentazione e gli studi di frequenza, le variazioni di pressione venivano minimizzate. Per ridurre le rotture a fatica i *rail*, in fase di produzione, venivano sottoposti a cicli di pressione idraulica con l'intento di rilassare l'effetto delle tensioni residue legate alla fusione e alle lavorazioni meccaniche.

L'elettroiniettore

È l'interfaccia del sistema di alimentazione con il motore. Nel *Common Rail* è il componente più complesso. Il suo funzionamento è basato sullo sbilanciamento delle forze agenti sull'asta di pressione e sullo spillo-otturatore.

Quando il solenoide comanda l'apertura del foro "A" (figura 7) il volume di controllo si scarica, le forze sull'asta di pressione diminuiscono e divengono inferiori a quelle generate dal volume di accumulo. Lo sbilanciamento delle forze fa sì che lo spillo si sollevi, scoprendo i fori del polverizzatore. L'iniezione in camera di combustione termina quando il solenoide viene de-energizzato chiudendo il foro "A". Allora il foro "Z" fa

⁷ Calore specifico $c \cong 1,80$ [kJ/(kg K)], Densità $\rho \cong 870$ [kg/m³]

risalire la pressione nel volume di controllo ristabilendo rapidamente la pressione nel volume di controllo.

Si tratta di un sistema complesso ove dimensionamenti e tolleranze vanno definiti nel massimo dettaglio. Tolleranze e dimensioni da orologeria ma con i componenti soggetti a forze di centinaia di chili, generate dalle alte pressioni.

Le dimensioni dei fori "Z" (*Zufluß*) e "A" (*Abfluß*) controllano la velocità di svuotamento del volume di controllo; il diametro superiore dell'asta influenza la velocità del movimento dell'asta e la forza con cui lo spillo impatta sulla sede di tenuta durante la chiusura. Il corretto dimensionamento del solenoide, del diametro dell'ancora e della sua forma sono la ricetta per ottenere l'attuazione veloce del movimento d'ancora; accorgimenti per lo smorzamento evitano il rimbalzo dell'ancora sulla sede di tenuta. Le tolleranze dell'asta verso la valvola e dello spillo verso il corpo dell'ugello polverizzatore determinano la quantità di gasolio che trafila e che deve essere ricircolato verso il serbatoio.

Ad esempio per l'asta nel corpo valvola non erano tollerati giochi superiori a $3\ \mu\text{m}$; comunque non si poteva spingersi molto al di sotto per non rischiare il grippaggio a causa delle dilatazioni termiche. L'alta pressione rischiava di incurvare il corpo iniettore a causa del foro laterale che alimentava il polverizzatore. In tali condizioni l'asta rischiava il grippaggio nella valvola.

Il risultato dello sforzo tecnologico era finalizzato a gestire iniezioni multiple: all'inizio si generavano due iniezioni pilota e una principale. Nel tempo e per soddisfare le norme anti-inquinamento che includevano i filtri del particolato (FAP) l'iniettore si evolverà fino a realizzare 8 iniezioni in sequenza nella singola fase attiva del ciclo motore.

La generazione dello spray e il polverizzatore

Gli spray (getti di liquido polverizzato) per l'iniezione di combustibile in camera di combustione hanno lo scopo di incrementare la superficie di contatto del combustibile con l'aria, per massimizzare la sua combustione completa ed esprimere il massimo potenziale energetico, con effetti positivi su prestazioni e impatto ambientale.

Il fenomeno di formazione dello spray Diesel è rapidissimo. La sua durata complessiva dell'ordine del millisecondo (ma dell'ordine della decina di microsecondi se si considerano i cambiamenti significativi possibili nel corso dell'iniezione) e dipende da una miriade di fattori difficili da tenere tutti sotto controllo. La geometria del polverizzatore montato all'estremità dell'elettroiniettore influenza grandemente lo spray.

All'epoca dell'ingresso sul mercato del *Common Rail*, le case automobilistiche si trovarono a fronteggiare una rapida e importante riduzione delle emissioni consentite e, pertanto, dovettero studiare approfonditamente il problema della polverizzazione del combustibile.

Le tecniche di ispezione degli spray divennero molteplici. Ognuna di esse forniva un elemento per la

comprensione delle sue caratteristiche, che sono il risultato di un gran numero di fattori che ne influenzano formazione ed evoluzione. L'approccio sperimentale era necessario, perché quello numerico non era sviluppato e soffriva le limitazioni legate alla scarsa potenza di calcolo effettivamente disponibile anche nei centri di ricerca più dotati di mezzi e conoscenze.

Fu fondamentale determinare le corrette modalità di iniezione (timing, quantità iniettate, numero delle iniezioni, pressioni di alimentazione) e la forma dello spray variabile durante l'iniezione, perché queste informazioni divenissero patrimonio di chi doveva definire le mappature della centralina elettronica di comando del sistema per ottenere le prestazioni e il rispetto dei limiti di emissione per ogni regime di funzionamento motore.

Vennero allora sviluppati nel Laboratorio spray dell'ELASIS Bari 2 dispositivi, strumentazioni, attrezzature, sistemi e protocolli di prova in grado di caratterizzare gli spray dal punto di vista:

- idraulico (quantità iniettate per iniezione al variare della pressione di alimentazione e della durata dell'apertura iniettore);
- della tempistica dell'iniezione (ritardi di apertura, e risposta ai comandi provenienti dalla centralina, effetti legati alle inerzie dello spillo di chiusura del polverizzatore);
- geometrico (lunghezza, angolo di apertura diametro di uscita, regolarità dell'evoluzione temporale, uniformità del comportamento dei singoli fori dei polverizzatori multiforo) anche al variare della contropressione nella camera di iniezione;

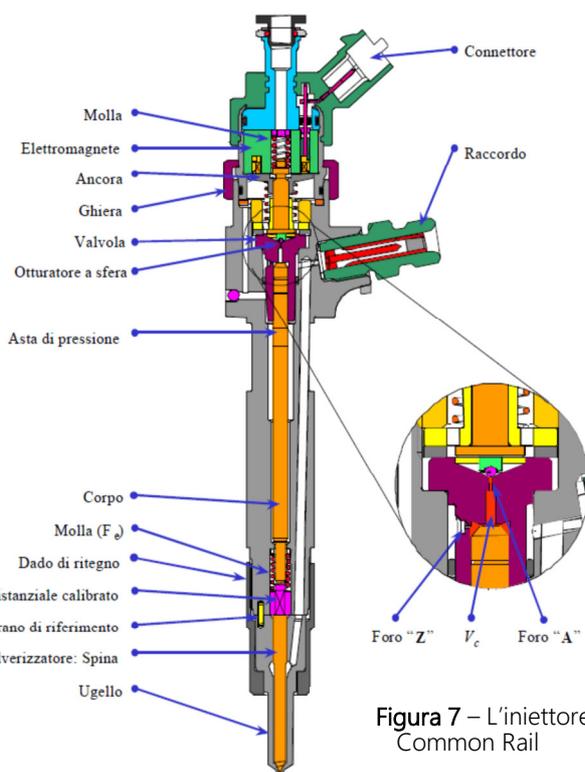


Figura 7 – L'iniettore Common Rail

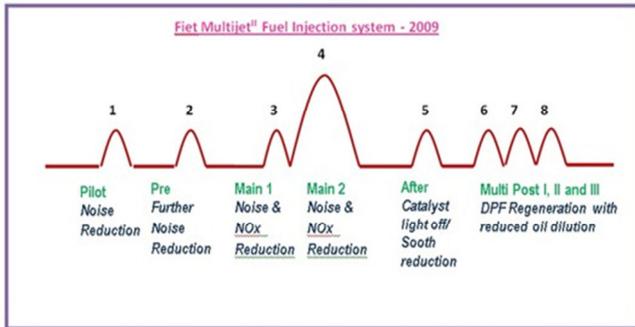


Figura 8 -Lo schema di iniezione multipla

- granulometrico (distribuzione dimensionale delle particelle liquide con metodiche laser non intrusive – diffrattometria e tecnica PDPA ovvero Phase Doppler Particle Analysis - e calcolo dei parametri medi significativi ai fini del rapporto tra superficie di scambio e volume iniettato delle particelle di liquido) anche con riguardo all'evoluzione temporale del campo fluido;
- velocimetrico (velocità di penetrazione dello spray, velocità delle particelle con indagini laser – LDA ovvero laser Doppler Anemometry) al variare dei regimi di funzionamento e del tempo di ispezione

Le analisi svolte fornirono risultati apprezzabili per il confronto tra polverizzatori diversi (*microsac*, *sacless*, a cinque o a sei fori e con diverse geometrie di accoppiamento tra spillo e ugello).

Il Laboratorio Spray forniva agli altri reparti coinvolti nella ricerca e nello sviluppo del *Common Rail* una caratterizzazione completa del singolo polverizzatore montato di volta in volta sull'iniettore da testare. La caratterizzazione veniva completata da una serie di fotografie degli spray acquisite a tempi diversi (isolando il singolo foro o con sguardo di insieme di tutti i fori del polverizzatore) che rendevano ragione di tutti i fenomeni e di tutte le eventuali anomalie. Queste costituivano per progettisti indicazioni preziose per la scelta di soluzioni efficaci ed efficienti in termini di disegno dei componenti e di tecnologie di produzione. Mettere insieme tutti gli elementi per la scelta dei polverizzatori si rivelò un vero rompicapo, risolto alla fine con un approccio tecnico "multidisciplinare" e un affinamento continuo, ovvero molta sperimentazione, calcoli strutturali, calcoli termici e l'applicazione di tecniche giapponesi appena arrivate in Europa come il DOE (Design of Experiment).

Elasis Bari 2 si attrezzò dei mezzi più avanzati al periodo: ANSYS per il calcolo strutturale e magnetico, FLOTRAN per la fluidodinamica, SAS (*Statistical Analysis System*) per il DOE, PTC (*Parametric Technologies*) per il CAD 3D parametrico, il sistema EMI 2 con il controllore EFS per la misura delle variazioni colpo vs colpo e iniettore vs iniettore, sistemi laser a diffrazione (*Malvern*) per l'analisi spray e di fotografia veloce, camere di iniezione pressurizzate in azoto dotate di avanzati sistemi di ricircolo e lavaggio dell'atmosfera ricevente etc.

BOSCH che ereditava un iniettore estremamente avanzato, lo ha anch'essa più volte ottimizzato. Una delle ultime evoluzioni del 2016 vedeva una saldatura laser dello spillo all'asta per eliminare i trafiletti lato valvola e lato polverizzatore, il tutto garantendone coassialità e rettilineità. Una prodezza tecnologica che i concorrenti non osarono nemmeno copiare, per non parlare della realizzazione dei fori degli ugelli, di diametri sempre più piccoli, con bordi arrotondati, con conicità positive o negative, e così via.

Al momento Bosch detiene il know-how per realizzare in grandissime quantità, elettroiniettori e polverizzatori sempre più precisi e affidabili, mantenendo costanti le strettissime tolleranze sulle portate istantanee e di conseguenza sulla quantità iniettata per colpo.

La centralina elettronica

È il cervello del *Common Rail*, ovvero è l'elemento dove risiedono le logiche alla base della regolazione dell'iniezione in funzione del "torque request" del conduttore per dosare potenza e fluidità di guida, nel rispetto delle norme anti inquinamento. Il sistema di alimentazione è gestito dalla centralina tramite il dosaggio del combustibile, la durata e l'anticipo d'iniezione, l'utilizzo di una o più iniezioni pilota, il tutto ottimizzato e calcolato in funzione del rilievo dei parametri di funzionamento effettuato da apposita sensoristica, delle condizioni motore e della richiesta di chi è alla guida.

Vi era già esperienza nella realizzazione delle centraline elettroniche dedicate all'alimentazione dei motori benzina. Tuttavia le sfide del *Common Rail* richiedevano che si facesse un salto di qualità.

I primi esemplari furono programmati in Marelli Autronica, ELASIS ne continuò lo sviluppo nel proprio dipartimento di elettronica.

La programmazione avveniva in *assembler*, un linguaggio che, a differenza dei linguaggi sviluppati in seguito, si basava su istruzioni in codici esadecimali⁸. I primi esemplari erano ingombranti e usavano condensatori per l'accumulo della carica necessaria all'eccitazione dei solenoidi montati sugli elettroiniettori. Ad alti regimi l'hardware si dimostrò ben presto insufficiente, per la necessità di condensatori la cui dimensione produceva ingombri intollerabili nel vano motore.

Nel 1992 la centralina e il sistema di controllo acquisirono una struttura definita e in ELASIS circolava un manuale di progetto redatto dall'ing. R. Buratti.

Lo stadio di potenza aveva ridotte dimensioni e si accoppiava allo stadio di controllo. Il microprocessore era un INTEL 80C196KB a 12 MHz e 16 bit; dotato di memoria EPROM da 32 kbyte e memoria non volatile 2x8kbyte con batteria di backup. Oggi questa architettura farebbe sorridere gli esperti; tuttavia quel sistema è stato sufficiente a sviluppare il *Common Rail*.

⁸ Un codice esadecimale consiste di numeri che si basano su 16 simboli, da "0" a "9" e poi da "A" ad "F".

Un nuovo grande miglioramento scaturì da una intuizione geniale che riconobbe il fatto che l'induttanza dei solenoidi degli iniettori si aggiunge a quella dei componenti di potenza della centralina.

L'idea, poi brevettata, rese centralina ed elettroiniettori un unico sistema. La carica elettrica sull'iniettore di interesse proveniva dalla centralina e da tutti gli altri iniettori a riposo preventivamente caricati.

Lo sviluppo del prototipo montato sulla Mercedes 250 presentata a Stoccarda nel 1994 vide molteplici collaborazioni: Marelli di Bologna, CRF di Orbassano, ELASIS con il dott. Ricco e la sua vulcanica fantasia, l'ing. Nicola Pacucci che programmava in *assembler*⁹.

Il laboratorio elettronico contava su due valenti collaboratori, Franco Petruzzelli e Nicola Sorgente ai quali si deve la realizzazione dei primi cablaggi e la prima applicazione della sensoristica su veicolo.

Nel 1994, dopo la joint venture e la creazione di TDIT, Bosch introdusse microprocessori più performanti con una memoria più grande, con cui era possibile l'utilizzo di linguaggi di più alto livello.

Lo sviluppo software divenne modulare e gli stadi di potenza e di controllo finirono col convivere negli stessi alloggiamenti hardware.

I VANTAGGI DEL SISTEMA DI INIEZIONE COMMON RAIL RISPETTO A QUELLO A POMPA ROTATIVA

Il Common Rail era stato più volte mostrato in pubblicazioni internazionali, una delle ultime prima del lancio produttivo fu la pubblicazione SAE 960870 - "Common Rail – An attractive Fuel Injection System for Passenger Car DI Diesel Engine" a nome di Gerhard Stumpp e Mario Ricco⁽¹⁰⁾

Qui il Diesel *Common Rail* venne confrontato con il Diesel con pompa rotativa Bosch VP 37 e relativo iniettore.

Il *Common Rail*, a differenza di quello "tradizionale" vantava quattro possibili regolazioni indipendenti tra di loro e dal regime motore che lo rendevano una soluzione largamente vincente:

- l'anticipo di iniezione;
- il dosaggio della quantità iniettata;
- la pressione di iniezione;
- la progressività dell'iniezione (*rate of injection*).

I sistemi di iniezione tradizionali comandati da albero a camme, al contrario, generano la pressione di iniezione a ogni iniezione quindi realizzano una pressione di iniezione pulsante con una pressione di picco funzione dei giri motore.

La centralina del *Common Rail* imponeva valori di pressione a monte degli iniettori e quantità iniettate secondo mappature modificabili indipendentemente dai

giri motore. Con il *Common Rail*, allora, il costruttore automobilistico si trovava a scegliere con grande libertà le mappature di alimentazione raggiungendo obiettivi diversi quali

- una combustione ottimizzata per la riduzione delle emissioni di NO_x e particolato allo scarico,
- una riduzione dei consumi, della rumorosità del motore e delle sue vibrazioni;
- la massimizzazione delle prestazioni di potenza e coppia motore, fino ai limiti della sua resistenza strutturale.

Il motore Diesel iniezione diretta aveva bisogno di un progetto **dirimpente**¹¹: il *Common Rail* risolse quasi tutte le problematiche del Diesel alimentato con pompa rotativa. Il mercato dell'auto, senza alcuna diffidenza, lo accolse rapidamente.

L'abolizione del superbollo per i Diesel nel 1997 e l'uscita sul mercato del *Common Rail* favorirono la crescita esponenziale delle vendite di motori Diesel fino a superare la vendite dei motori benzina.

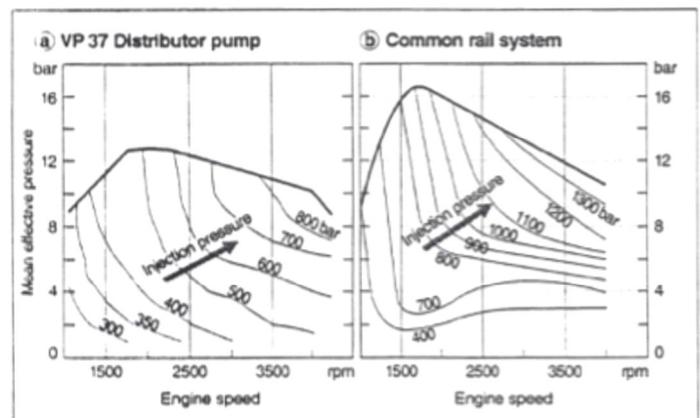


Figura 9 - Prestazioni con e senza *Common Rail* (SAE 960870)

IL DIESEL GATE, IL FUTURO DEL MOTORE DIESEL E LA DIRETTIVA EUROPEA 2035

Venerdì 18 settembre 2015, l'EPA (la statunitense *Environmental Protection Agency*) comunicava che la casa automobilistica Volkswagen aveva illegalmente installato sui propulsori Diesel un software di manipolazione per aggirare le normative ambientali sulle emissioni, in particolare, per il contenimento degli NO_x (ossidi di azoto). Secondo il comunicato, il software rilevava il momento in cui le vetture erano sottoposte ai test sul banco a rullo, riducendone le prestazioni per rientrare nelle normative sulle emissioni. In condizioni di guida "normali", su strada, le autovetture superavano di 40 volte il limite consentito dalla legge. Il governo statunitense ordinava il richiamo dal mercato di quasi 500.000 vetture dotate del TDI. Il motore Diesel fu messo sotto accusa¹².

⁹ L'*assembler* è quasi un linguaggio macchina ed è distante dai moderni linguaggi che offrono una quasi completa leggibilità degli scripts.

¹⁰ Il paper SAE è utilizzato per il confronto tra il Common Rail e il sistema di alimentazione tradizionale.

¹¹ <https://www.viima.com/blog/types-of-innovation>

¹² <https://it.wikipedia.org/wiki/Dieselgate>

Per il mondo industriale e per gli addetti al settore si trattò di uno shock senza precedenti. L'industria automobilistica accusò il colpo e sconvolge i suoi piani industriali di lungo periodo.

La Volkswagen non era stata l'unica casa automobilistica a manipolare le centraline per far rientrare fittiziamente le emissioni nei limiti delle norme anti-inquinamento.

Chi lavora nel settore era già informato dal 2005 di tentativi di frode fatti da altri OEM¹³. Ciò non aveva le stesse conseguenze del 2015. I colpevoli furono solo obbligati a riportare entro i limiti di emissione i sistemi propulsivi dei veicoli già in circolazione e ad aggiustare le produzioni future.

Il 2015 fu l'inizio del declino del motore Diesel a favore degli altri tipi di propulsori. Le case automobilistiche non parlarono più di motori Diesel e nei saloni biennali europei (Ginevra e Parigi) le auto Diesel erano esposte e non pubblicizzate. Nel clamore dei media gli OEM continuano a vendere sempre meno i loro veicoli con motori Diesel.

I progetti che avevano come obiettivo il perfezionamento dell'iniettore Diesel commutando l'attuatore solenoide in piezoelettrico si arrestarono, l'industria automobilistica continuò a lavorare su progetti di abbattimento degli inquinanti e sulla combustione in camera anche se con il ricorso a risorse molto più ridotte. Si focalizzò il lavoro su EGR di alta e bassa pressione e, in particolare, sul sistema SCR (*Selective Catalyst Reducer*), che rappresentava la soluzione tecnica più potente per ridurre gli ossidi di azoto (NO_x) nei veicoli con un peso superiore ai 1800 kg. Dopo un po' di tempo da quello shock, il mercato del Diesel ebbe la forza di ripartire e le case automobilistiche, avvalendosi principalmente di consulenze esterne, proseguirono lo sviluppo dei motori per far sì da star dentro ai nuovi e più stringenti limiti delle emissioni.

Oggi il motore Diesel viene demonizzato e si preferisce indicare nei veicoli elettrici o ibridi a benzina la soluzione ai problemi di inquinamento ambientale, cosa per lo meno opinabile fintantoché la produzione di energia elettrica non sarà in massima parte proveniente da fonte rinnovabile.

Tuttavia, il mercato accusa incertezze legate al fatto che l'adozione di una nuova mobilità impone agli utilizzatori abitudini di utilizzo delle vetture e modelli di comportamento ampiamente differenti da quelli tradizionali.

Alcuni studiosi¹⁴ continuano la ricerca sul motore Diesel dimostrando che il Diesel ha la potenzialità di migliorare ancora il sistema di iniezione.

BOSCH e Mercedes hanno effettuato una serie di esperimenti su strada¹⁵ ("RDE" Real Drive Emission con

PEMS) dimostrando che la demonizzazione del Diesel non ha base scientifica se ci si riferisce alle ultime versioni dei motori che rispettano la norma Euro 6dtemp. I livelli di NO_x e particolato sono molto più bassi dei limiti consentiti.

Il motore Diesel è in grado di garantire un alto rendimento e con le dovute strategie di controllo motore e accessori (EGR HP, EGR LP, SCR) emette meno inquinanti del benzina e meno CO₂ di un motore benzina.

Mercoledì 8 giugno 2022 il Parlamento Europeo ha votato, nell'ambito del programma "fit for 55" (16) lo stop della produzione dei motori termici a partire dal 2035. Punto fondamentale del provvedimento è l'obbligo per i costruttori di vendere esclusivamente veicoli a zero emissioni a bordo dal 2035. Il provvedimento dovrà ancora essere ratificato dal Consiglio d'Europa e dalla Commissione, ma sembra che ciò possa avvenire entro dicembre 2022. Nel frattempo Italia e Germania lavorano alla definizione di combustibili a zero emissioni¹⁷ per prolungare la vita del motore endotermico: benzina, Diesel e gas.

L'ORGOGGIO DEL SUD ITALIA

Il *Common Rail* è l'orgoglio del Sud Italia e della città di Bari, nota sia per i suoi commerci e da sempre considerata porta dell'Italia e dell'Europa verso l'Oriente, non nota ai più per la sua industria meccanica, che, invece, ha dimostrato con questa vicenda di disporre di un patrimonio di conoscenze e di creatività oltre la norma.

Il *Common Rail* è un esempio di caparbietà e, insieme, è la conferma che invenzioni e rivoluzioni possono nascere anche in luoghi considerati nell'opinione generale marginali rispetto allo sviluppo industriale e tecnologico.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori devono senz'altro l'imprinting e l'evoluzione della propria storia professionale all'Università degli studi di Bari e al Politecnico di Bari, al progetto *Common Rail* e a tutti i colleghi di ELASIS. L'entusiasmo della giovinezza e le quotidiane emozioni di un ambiente vivo e stimolante hanno reso tutto molto interessante. Ne hanno giovato creatività, piacere nel lavorare e bagaglio tecnico.

L'augurio alle giovani generazioni è quello di vivere qualcosa di simile a questo all'inizio della loro carriera, per poterne fare tesoro lungo tutto il suo corso.

¹³ Other External Manufacturer

¹⁴ Ducted Fuel Injection: Experimental and numerical investigation on fuel spray characteristics, air/fuel mixing and soot mitigation potential - F. Mollo, A. Piano, B. Peiretti Paradisi, L. Postriotti, L. Pieracci, A. Bianco, F.C. Pesce, A. Vassallo

¹⁵ <https://www.bosch-press.it/pressportal/it/it/press-release-49792.html>

¹⁶ Riduzione delle emissioni europee dei gas ad effetto serra entro il 2030 pari al 55% delle emissioni del 1990. Un obiettivo ambizioso ad oggi ancora possibile se si installano sistemi di generazione di energia basati su fonti rinnovabili associati ad efficienza sui consumi.

¹⁷ Combustibili ottenuti da processi naturali "biodiesel", prodotti in laboratorio e non estratti da giacimenti.

ELENCO DELLE PUBBLICAZIONI REDATTE IN COLLABORAZIONE TRA ELASIS E UNIVERSITA' NEGLI ANNI DELLO SVILUPPO

- *Flow field study throughout a multihole V.C.O. nozzle and its effects on spray.*
CHISA '93 - Paper i9.4 - G. Bruni, v. Damiani, d. Laforgia*
- *Spray visualization and hydraulic characterization of each single hole for a five-hole V.C.O. nozzle of an electronically controlled Diesel injector*
CHISA '93 - paper i9.8 – G. Bruni, R. Campanella*, v. Damiani, D. Laforgia*
- *Fluid mechanics and heat transfer in sprays – Study of the flow field of a multihole V.C.O. nozzle and effects on spray*
ASME 1993 - G. Bruni, V. Damiani, D. Laforgia*
- *Spray characteristic of five-hole V.C.O. nozzle of a Diesel electro-injector*
SAE '94 - Paper 940192 - R. Campanella*, D. Laforgia*, A. Ficarella*, V. Damiani, M. Ricco
- *Indagine sulla granulometria dello spray di un polverizzatore V.C.O. per motori Diesel D.I.*
CROCUS '95 - F. Di Giorgio*, D. Laforgia*, V. Damiani, m. Ricco
- *Investigation of drop size distribution in the spray of a five-hole V.C.O. nozzle at high feeding pressure*
SAE '95 - Paper 950087 - F. Di Giorgio*, D. Laforgia*, V. Damiani
- *Experimental investigation of the spray of an axisymmetric nozzle of a common-rail high pressure electro-injector*
SAE '97 - Paper 970054 - A. Ficarella*, D. Laforgia*, G. Starace*, V. Damiani
- *A theoretical code to simulate the behavior of an electro-injector for diesel engines and parametric*

analysis

SAE '97 - Paper 970349 - A. Ficarella*, D. Laforgia*, V. Amoia*, S. De Matthaes, C. Genco

TESI DI LAUREA con relatore ing. Vincenzo Damiani

- *Caratterizzazione dell'iniezione e di apparati di alimentazione per motori ad accensione spontanea.*
Tesisista: R. Campanella - Università degli studi di Bari
- *Studio degli spray prodotti dai sistemi di iniezione dei motori a combustione interna.*
Tesisista: f. Di Giorgio - Università degli studi di Bari
- *Studio dei campi di moto e della granulometria degli spray prodotti da iniettori per motori ad accensione spontanea con tecniche PDPA.*
Tesisista: G. Starace – Politecnico di Bari
- *Indagine teorico-sperimentale sulla fluidodinamica dei condotti dei sistemi di iniezione diretta diesel UNIJET.*
Tesisista: S. Boggio - Università degli studi di Padova
- *Analisi comparativa dello spray prodotto da polverizzatori Minisac e V.C.O.*
Tesisista: G. Colangelo - Università degli studi di Lecce
- *Simulazione della nuova pompa di alta pressione del sistema Common-rail.*
Tesisista: M. De Vincenti - Università degli studi di Lecce.

TESI DI DOTTORATO

- *Metodologie di caratterizzazione degli spray Diesel*
Dottorando: ing. Giuseppe Starace- Università degli studi di Lecce