

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

DIEM

*Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni Meccaniche,
Nucleari, Aeronautiche e di Metallurgia*

TESI DI LAUREA

in

Laboratorio di sperimentazione sui motori a combustione interna M

**Analisi, sviluppo e validazione sperimentale di un sistema di controllo per un
motore GDI a doppio stadio di sovralimentazione**

CANDIDATO

Nicola Mosconi

RELATORE

Chiar.mo Prof. Nicolò Cavina

CORRELATORI

Ill.mo Ing. Enrico Corti

Ill.mo Ing. Giorgio Mancini

Chiar.mo Prof. Davide Moro

Chiar.mo Prof. Fabrizio Ponti

Anno Accademico 2011/2012

Sessione I

Ai miei genitori

Sommario

Introduzione	13
1 Il motore 1.4 TSI	15
1.1 Generalità	15
1.2 Cenni sulla tecnologia GDI	17
1.3 Caratteristiche tecniche del motore.....	19
1.4 Catena di trasmissione.....	21
1.5 Blocco cilindri	22
1.6 Manovellismo	23
1.6.1 Pistoni	23
1.6.2 Albero motore	24
1.6.3 Bielle.....	24
1.7 Meccanica motore	24
1.7.1 Testata e distribuzione	24
1.7.2 Alloggiamento alberi a camme	24
1.8 Doppia sovralimentazione.....	25
1.8.1 Compressore volumetrico	25
1.8.2 Turbocompressore a gas di scarico	25
1.8.3 Circuito di sovralimentazione	26
1.8.4 Ambiti operativi delle componenti di sovralimentazione	27
1.8.5 Fasi operative	28
1.9 Compressore	33
1.9.1 Comando del compressore meccanico	33

1.9.2	Compressore meccanico	33
1.9.3	Funzionamento del compressore.....	34
1.9.4	Regolazione pressione di sovralimentazione del compressore.....	35
1.10	Componenti della sovralimentazione a gas di scarico.....	36
1.10.1	Collettore di scarico	37
1.10.2	Intercooler.....	37
1.11	Impianto di raffreddamento.....	39
1.12	Impianto di scarico	40
1.13	Giunto magnetico del compressore	41
1.13.1	Funzione	41
1.13.2	Struttura	42
1.13.3	Funzionamento.....	42
1.14	Tumble flap [3].....	44
2	Installazione al banco	47
2.1	Disposizione	47
2.2	Il freno a correnti parassite.....	50
2.3	Il gruppo d'avviamento elettropneumatico	52
2.3.1	Avviamento del motore	55
2.4	Castelletto motore	56
2.5	Impianti dei liquidi.....	58
2.5.1	Circuito acqua	58
2.5.2	Circuito benzina	58
2.6	Scambiatori.....	60
2.6.1	Inverter.....	61
2.7	Cablaggio elettrico	66

2.7.1	Centralina motore	67
2.7.2	Alimentazione scatola fusibili.....	69
2.7.3	Alimentazione e controllo pompa dell'acqua.....	69
2.7.4	Sonde Lambda.....	70
2.7.5	Sensore olio.....	70
2.8	Sensori e strumentazione.....	71
3	Punto "zero"	87
3.1	Primi avviamenti e problematiche di diagnosi <i>misfire</i>	87
3.2	Piano Quotato Ridotto: benchmarking.....	97
3.3	Confronto delle prestazioni	100
3.4	TestIT ed HeatIT [9]	112
	Conclusioni	115
	Appendice A	117
	Appendice B	119
	Bibliografia e riferimenti.....	121

Elenco delle figure

Figura 1.1 Il Motore GDI	16
Figura 1.2 Curve caratteristiche 1.4 TSI 103 kW	20
Figura 1.3 Catena di trasmissione.....	21
Figura 1.4 Blocco cilindri.....	22
Figura 1.5 Manovellismo	23
Figura 1.6 Circuito di sovralimentazione.....	26
Figura 1.7 Campo di utilizzo	27
Figura 1.8 Basso carico	29
Figura 1.9 Alto Carico fino a 2400rpm.....	30
Figura 1.10 Alto carico tra 2400rpm e 3500rpm.....	31
Figura 1.11 Con turbocompressore a gas di scarico	32
Figura 1.12 Compressore volumetrico.....	33
Figura 1.13 Compressore Meccanico.....	34
Figura 1.14 Circuito cinghia compressore meccanico.....	34
Figura 1.15 Regolazione della pressione di sovralimentazione	35
Figura 1.16 Turbocompressore a gas di scarico	36
Figura 1.17 Collettore di scarico	37
Figura 1.18 Intercooler.....	38
Figura 1.19 Impianto di raffreddamento	39
Figura 1.20 Impianto di scarico.....	41
Figura 1.21 Giunto magnetico	42
Figura 1.22 Giunto magnetico azionato	43
Figura 1.23 Tumble flap.....	44
Figura 1.24 Tumble flaps	45
Figura 2.1 Allestimento Argentan	48
Figura 2.2 Vettura al DIEM.....	48
Figura 2.3 Sala Motore e Sala Controllo.....	49

Figura 2.4 Cablaggio e Centralina Motore.....	49
Figura 2.5 Freno Schenck W150	50
Figura 2.6 Curve caratteristiche freno e motore	51
Figura 2.7 Giunto doppio “GIUBO”.....	52
Figura 2.8 Alimentatore, gruppo chiave e scatola alimentazioni	52
Figura 2.9 Gruppo avviamento Borghi&Saveri GR.AV.EP 200	53
Figura 2.10 Puleggia d’adattamento	54
Figura 2.11 Dispositivo elettropneumatico	55
Figura 2.12 Motore TSI sul castelletto.....	56
Figura 2.13 Ancoraggio al banco.....	57
Figura 2.14 Tubi acqua.....	58
Figura 2.15 Circuito benzina	58
Figura 2.16 Bilancia AVL 733S	59
Figura 2.17 Principio di funzionamento bilancia AVL	60
Figura 2.18 Scambiatori e ventilatori.....	61
Figura 2.19 Danfoss MicroDrive VLT FC51	62
Figura 2.20 Connessioni Stella - Triangolo	62
Figura 2.21 Messa a terra	63
Figura 2.22 Collegamento di rete	63
Figura 2.23 Collegamento motore	64
Figura 2.24 Morsetti e connessioni elettriche interne.....	64
Figura 2.25 Morsetti di controllo.....	65
Figura 2.26 Connettori centralina	67
Figura 2.27 Pompa acqua	69
Figura 2.28 Connettore controllo pompa acqua	70
Figura 2.29 Sensori	71
Figura 2.30 G583 e G520	73
Figura 2.31 G31 e G299.....	74
Figura 2.32 G71 e G42.....	75
Figura 2.33 Circuito termocoppia.....	77
Figura 2.34 Sensoristica	81

Figura 2.35 Smoke Meter.....	82
Figura 2.36 Principio di funzionamento Smoke Meter.....	83
Figura 2.37 Componenti testa del riflettometro e componenti principali di misura dello SM	85
Figura 2.38 FSN e PL con Offset di -6%	86
Figura 3.1 Segnali acquisiti durante un regolare avviamento.....	88
Figura 3.2 Segnali acquisiti durante un funzionamento con diagnosi misfire attiva (misfire apparente, ovvero falso allarme da parte della ECU).....	90
Figura 3.3 Sensore “effetto HALL”.....	91
Figura 3.4 Segnali di velocità acquisiti durante test a pari regime e diverso carico	92
Figura 3.5 Segnali di velocità durante test a pari regime e diverso carico - ZOOM.....	93
Figura 3.6 Segnali di velocità durante test a pari regime e diverso carico – ANILISI IN FREQUENZA.....	94
Figura 3.7 Analisi delle problematiche riscontrate a livello meccanico.....	95
Figura 3.8 Flangia Collegamento motore-freno prima e dopo le lavorazioni correttive.....	95
Figura 3.9 Funzionamento regolare a 2000 rpm e 130 Nm (NO MISFIRE).....	96
Figura 3.10 Piano Quotato Completo (in blu) e Piano Quotato Ridotto (in rosso).....	97
Figura 3.11 Coppia e Potenza.....	100
Figura 3.12 Normativa per CF.....	102
Figura 3.13 Coppia e Potenza ISO.....	103
Figura 3.14 Anticipo	104
Figura 3.15 Temperature scarico	105
Figura 3.16 Tempi di permanenza	106
Figura 3.17 Lambda – Tsca	107
Figura 3.18 Lambda target	108
Figura 3.19 Pressione di sovralimentazione.....	109
Figura 3.20 Tempo iniezione.....	109
Figura 3.21 Posizione VVT.....	110
Figura 3.22 Pressione rail.....	110
Figura 3.23 FSN.....	111
Figura 3.24 TestIT.....	112

Figura 3.25 HeatIT..... 113

Elenco delle tabelle

Tabella 1.1 Caratteristiche 1.4 TSI..... 20
Tabella 2.1 Caratteristica pedale..... 68
Tabella 2.2 Caratteristiche sensori..... 72
Tabella 3.1 Tabella di sintesi per il confronto su Piano Quotato Ridotto delle prestazioni nelle due diverse installazioni..... 99
Tabella 3.2 Calcolo del CF – prove DIEM 102

Introduzione

Il seguente lavoro di tesi rappresenta il punto di partenza per la realizzazione di un sistema di controllo per un motore GDI a doppio stadio di sovralimentazione.

Questo studio è un progetto di ricerca del dipartimento DIEM della facoltà d'ingegneria meccanica dell'università di Bologna in collaborazione con Magneti Marelli.

La prima parte del lavoro di sviluppo e calibrazione del sistema di controllo si è svolta presso la sede di Argentan di Magneti Marelli, la seconda parte presso il laboratorio del DIEM in Bologna.

Per quanto riguarda la seconda metà, possiamo suddividere il lavoro in due macro gruppi, quali l'installazione al banco del motore e la realizzazione, con conseguente validazione sperimentale, del sistema di controllo per il GDI.

Si parla di validazione sperimentale in quanto è stato svolto parecchio lavoro preparatorio al sistema di controllo vero e proprio e, nello specifico, si è posta parecchia attenzione alla riproduzione delle medesime condizioni operative con cui il motore lavorava presso Argentan. In questa tesi si approfondiscono in particolar modo questi aspetti, che si possono chiamare "preparatori" alla realizzazione vera e propria del sistema di controllo. Verrà chiarito come si è proceduto per arrivare a questo risultato, i problemi che si sono incontrati e le soluzioni che sono state adottate.

Nel primo capitolo di quest'elaborato verrà presentato il propulsore oggetto di studio, analizzandone l'architettura, gli aspetti funzionali e le peculiarità tecniche. Dopo un breve approfondimento sull'architettura GDI dei motori a combustione interna, verranno analizzati gli aspetti funzionali che in questo motore elevano le prestazioni, limitandone i consumi e le emissioni inquinanti.

Il secondo capitolo è dedicato all'installazione al banco del motore. Partendo dall'adattamento del castelletto motore e della cella di prova in generale, saranno spiegati gli step che dall'arrivo della vettura hanno permesso di accendere il motore svincolato dalla stessa.

Il terzo ed ultimo capitolo sarà incentrato sulla problematica di cui si accennava prima: fare lo "zero" rispetto le condizioni con cui operava il motore presso Argentan in modo da paragonare i risultati. Quindi saranno confrontati i piani quotati prodotti, prima in Francia e poi presso il laboratorio DIEM, analizzando i risultati e le strategie che hanno permesso di giungere a tali conclusioni. Di fatto questo capitolo rappresenta il punto di partenza per la realizzazione vera e propria del sistema di controllo.

1 Il motore 1.4 TSI

1.1 Generalità

Il motore oggetto dello studio è il Volkswagen 1.4 TSI (Turbocharged Stratified Injection).

L'architettura GDI (Gasoline Direct Injection) consente a questo motore di operare con bassi consumi ed emissioni, senza pregiudicare le prestazioni.

Il propulsore è caratterizzato da un doppio stadio di sovralimentazione:

- compressore volumetrico meccanico;
- turbocompressore a gas di scarico.

Il motore viene dunque sovralimentato, a seconda della richiesta di coppia, oltre che dal turbocompressore a gas di scarico, anche dal compressore meccanico.

La sintesi è racchiusa nel concetto di DOWNSIZING: piccola cilindrata unitaria e/o pochi cilindri, onde minimizzare gli attriti e quindi i consumi, a fronte di un motore ad alta potenza specifica (che funziona a carichi mediamente più alti di un motore più grande, riducendo la percentuale di tempo di funzionamento alle condizioni meno efficienti, ovvero appunto a carichi parziali).



Figura 1.1 Il Motore GDI

Il 1.4 TSI dispone di due cinghie di trasmissione , una per gli organi ausiliari ed una per il trascinamento del compressore volumetrico il cui stacco-attacco è comandato tramite una frizione magnetica.

Gli alberi a camme (e la pompa dell'olio, vengono comandati da una catena che prende il moto direttamente dall'albero motore. Un'altra caratteristica di questo motore è essere dotato di variazione di fase in aspirazione (VVT – Variable Valve Timing): sull'asse a camme lato aspirazione è montato un variatore di fase che consente un ottimo ricircolo interno dei gas di scarico (EGR - Exhaust Gas Recirculation - interno) ed una migliore erogazione di coppia.

1.2 Cenni sulla tecnologia GDI

L'iniezione diretta di benzina ha fondamenti in alcuni specifici aspetti funzionali ed operativi [1]:

1. Strategia di preparazione della miscela:
 - carica stratificata → consumi ed emissioni limitati;
 - carica omogenea → prestazioni;
 - mix omogenea/stratificata.
2. Tecnica per la stratificazione della carica:
 - wall-guided;
 - air-guided;
 - spray-guided.
3. Geometria della camera di combustione (cielo del pistone e posizione candela/iniettore).
4. Geometria dei condotti di aspirazione → moti della carica.
5. Tipo di iniettore:
 - swirl;
 - pintle;
 - multiforo.

I motori ad iniezione indiretta operano con combustione premiscelata: occorre introdurre una miscela con un titolo sempre attorno allo stechiometrico per garantire l'accensione. Nei motori ad iniezione diretta invece, viene aspirata solamente aria, iniettando il combustibile in seno alla stessa direttamente all'interno del cilindro, ma la combustione deve comunque avvenire per progressione di un fronte di fiamma in un gas premiscelato. La possibilità di iniettare in camera di combustione permette teoricamente di stratificare la miscela (iniettando, ai carichi parziali, in fase di compressione), potendo così eliminare le perdite per pompaggio. Avendo l'iniettore direttamente in camera di combustione, possiamo andare a creare una miscela stechiometrica solamente sotto candela, garantendo dunque l'accensione, ma operare complessivamente con miscela magra onde limitare i consumi e le emissioni (si riducono appunto le perdite per pompaggio ed anche le cessioni di calore a parete). Purtroppo, ad oggi questa tecnologia non ha trovata ampia diffusione principalmente a causa del problema del post-trattamento di alcuni componenti dei gas di scarico quando il motore funziona in modalità stratificata. Si tratta in particolare degli NOx

(ossidi di azoto), che il catalizzatore trivalente non riesce ad abbattere in ambienti con presenza di ossigeno (miscele magre).

Il motore oggetto di studio, come in generale tutti i motori GDI *downsized*, è in grado di mantenere comunque consumi ed emissioni limitati, senza pregiudicare le prestazioni, pur funzionando sempre in modalità omogenea (miscela sostanzialmente sempre stechiometrica, come si vedrà, e sempre omogenea).

La potenza di un motore è espressa dalla seguente equazione [2]:

$$P = \frac{V_c \rho_a K n}{120} \eta_v \eta_c \eta_{th} \eta_i \eta_o \text{ [kW]}$$

dove V_c [m^3] è la cilindrata, ρ_a [$\frac{kg}{m^3}$] la densità dell'aria, K [$\frac{kJ}{kg}$] la tonalità termica, n [$\frac{giri}{minuto}$] il numero di giri, η_v il rendimento volumetrico, η_c il rendimento di combustione, η_{th} il rendimento termodinamico, η_i il rendimento indicato e η_o il rendimento organico.

Nel cilindro viene aspirata solamente aria e l'iniezione di combustibile avviene in seno alla stessa. La benzina (liquida \rightarrow basso volume specifico), evaporando, sottrae calore all'aria che pertanto diminuisce ulteriormente (il volume specifico della sola aria è minore rispetto a quello della miscela aria-benzina) il proprio volume specifico, andando ad agire positivamente sul rendimento volumetrico:

$$\eta_v = \frac{m_{ar}}{m_{at}} = \frac{m_{ar}}{\rho_a V_c}$$

dove m_{at} rappresenta la massa d'aria aspirata teoricamente, mentre m_{ar} quella realmente aspirata.

È inoltre possibile operare con rapporti di compressione (r) maggiori grazie al raffreddamento dell'aria operato dall'evaporazione del combustibile, ed incrementare quindi il rendimento termodinamico del motore:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

dove $k = \frac{c_p}{c_v}$, è il rapporto fra i calori specifici della miscela aria-benzina.

1.3 Caratteristiche tecniche del motore

- Potenza: 103kW
- Funzionamento omogeneo (Lambda 1)
- Riscaldamento catalizzatore con doppia iniezione
- Turbocompressore a gas di scarico con wastegate
- Sovralimentazione aggiuntiva con compressore meccanico
- Intercooler
- Catena di trasmissione esente da manutenzione
- Coperchio motore con accumulatore di depressione per la gestione del collettore di aspirazione a geometria variabile
- Variatore di fase continuo all'aspirazione
- Blocco cilindri in ghisa
- Albero motore in acciaio
- Pompa olio duocentrica
- Impianto di raffreddamento a doppio circuito
- Impianto di alimentazione carburante a richiesta
- Pompa carburante ad alta pressione con pressione max 150 bar

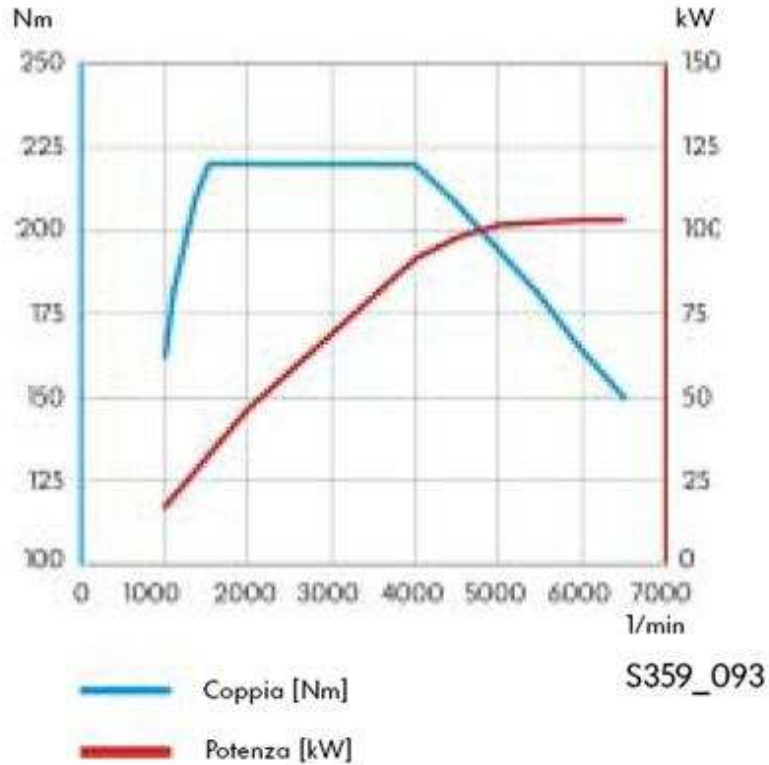


Figura 1.2 Curve caratteristiche 1.4 TSI 103 kW

Architettura	4 cilindri in linea
Cilindrata [cm ³]	1390
Alesaggio [mm]	76.5
Corsa [mm]	75.6
Valvole per cilindro	4
Rapporto di compressione	10:1
Potenza max	103 kW a 6000 g/min
Coppia max	220 Nm a 1500 - 4500 g/min
Carburante	Super senza piombo, RON 95
Trattamento gas di scarico	Catalizzatore principale, controllo Lambda
Normativa antinquinamento	EU 4

Tabella 1.1 Caratteristiche 1.4 TSI

1.4 Catena di trasmissione

Tanto gli alberi a camme quanto la pompa dell'olio vengono comandati da una catena esente da manutenzione che prende il moto dall'albero motore.

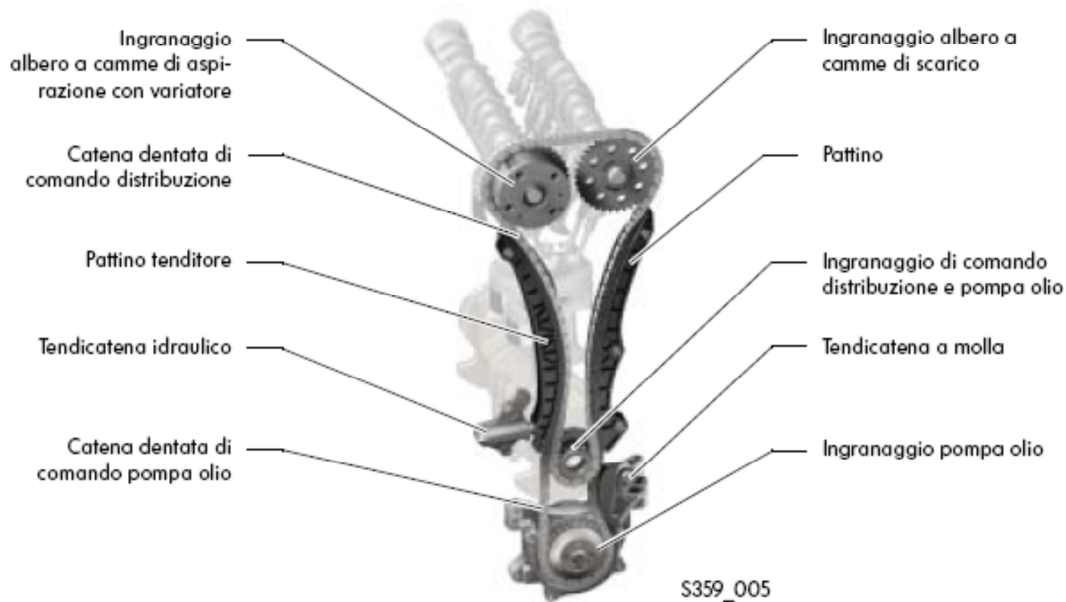


Figura 1.3 Catena di trasmissione

La variazione di fase continua all'aspirazione è affidata ad un dispositivo variatore a palette, controllato in funzione del carico e del regime di rotazione. Il variatore opera su una gamma di regolazione massima di 40° di angolo manovella.

La variazione di fase consente:

- un ottimo ricircolo interno dei gas di scarico;
- una migliore erogazione di coppia.

1.5 Blocco cilindri

Il blocco cilindri del motore 1.4 TSI è realizzato in ghisa a grafite lamellare. Il procedimento con cui viene costruito garantisce sufficiente sicurezza alle elevate pressioni di combustione normalmente raggiunte dal motore TSI. La superiore resistenza di un monoblocco in ghisa a grafite lamellare rispetto a un elemento in alluminio pressofuso consente di smontare l'albero motore.

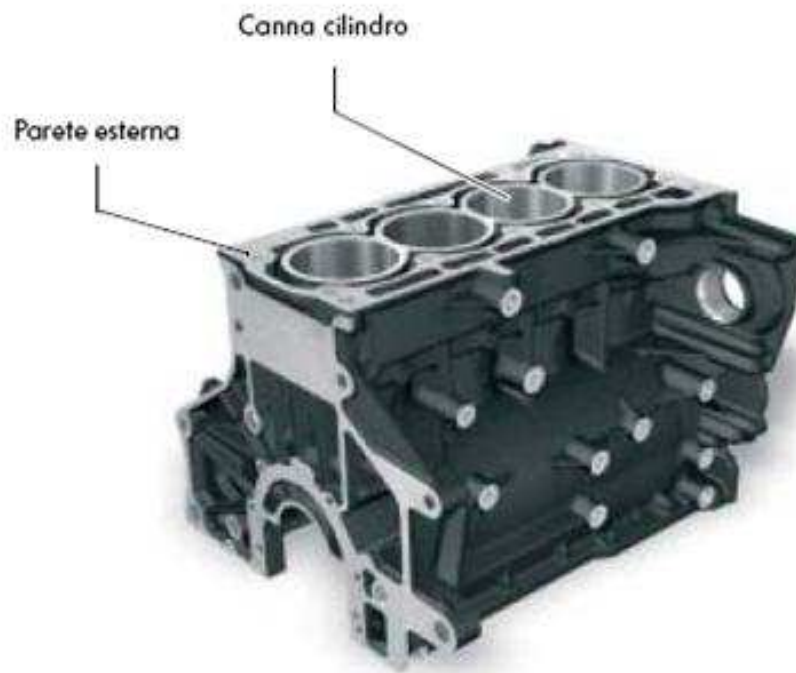


Figura 1.4 Blocco cilindri

Il blocco cilindri è realizzato con la cosiddetta struttura open-deck: questo significa che non vi sono barre tra la parete esterna e le canne dei cilindri, il che comporta tre benefici:

- in questa zona non si formano bolle d'aria, che determinerebbero problemi di sfianto e raffreddamento, proprio in abbinamento all'impianto di raffreddamento a doppio circuito (vedi paragrafo 1.11);
- in fase di imbullonaggio della testata al blocco cilindri, la deformazione della canna cilindro, determinata dal disaccoppiamento fra canna cilindro e blocco cilindri, è inferiore e più uniforme rispetto a un'architettura closed-deck, cioè con elementi di collegamento alle pareti;
- il consumo di olio è inferiore, poiché i segmenti del pistone compensano meglio la deformazione delle pareti.

1.6 Manovellismo



Figura 1.5 Manovellismo

Il manovellismo è costituito da albero motore, biella, bronzine, pistoni e spinotti ed ha subito alcune modifiche, poiché le forze che agiscono sul motore 1.4 TSI sono notevolmente superiori a quelle caratteristiche dei precedenti motori FSI (Fuel Stratified Injection).

1.6.1 Pistoni

I pistoni sono in alluminio pressofuso. Nel cielo del pistone è ricavato un incavo che funge da camera di combustione, ed è dotato di uno spigolo per indirizzare i flussi. Esso consente di creare una forte turbolenza dell'aria aspirata e quindi di ottimizzare la formazione della miscela.

L'impianto di raffreddamento del pistone opera miratamente sul lato di scarico del pistone. I getti si aprono ad una pressione relativa dell'olio pari a 2 bar.

L'attrito del pacchetto pistone è stato ridotto adottando un rivestimento in grafite per il mantello ed aumentando il gioco della corsa del pistone di 55 μm . Il diametro dello spinotto è stato maggiorato da 17 a 19 mm a causa dell'elevata pressione di combustione.

1.6.2 Albero motore

L'albero motore fucinato è realizzato in acciaio ed è più rigido rispetto alla versione in ghisa del motore 1.4/66kW FSI. In primo luogo questo significa ridurre le emissioni acustiche del motore.

1.6.3 Bielle

Le bielle sono ottenute per frattura, in modo che l'accoppiamento delle due componenti sia obbligato. La realizzazione è economica e consente un ottimo accoppiamento dinamico.

1.7 Meccanica motore

In questo motore sono state adottate soluzioni innovative volte al miglioramento delle caratteristiche di robustezza del propulsore.

1.7.1 Testata e distribuzione

Il comando valvole è stato modificato per resistere alle elevate sollecitazioni e temperature dei gas di scarico. A causa delle elevate sollecitazioni, le sedi delle valvole di scarico sono corazzate e le molle sono state realizzate in acciaio bonificato, inoltre, per via delle elevate temperature dei gas di scarico, le valvole di scarico sono riportate in sodio per una migliore dispersione del calore. Questo consente di ridurre la loro temperatura di circa 100°C.

1.7.2 Alloggiamento alberi a camme

Gli alberi a camme ruotano su tre supporti e sono collocati nel proprio alloggiamento. Il gioco assiale viene limitato dai coperchi di chiusura e dall'alloggiamento stesso. La pompa carburante ad alta pressione è avvitata all'alloggiamento dell'albero a camme e viene comandata da un doppio eccentrico presente sull'albero a camme di aspirazione. Date le elevate pressioni di iniezione e la quantità di carburante da inviare rispetto ai precedenti motori FSI, la corsa della pompa è stata fissata a 5.7 mm. L'attrito viene ridotto da un puntalino a rullo tra pompa carburante ad alta pressione e albero a camme; la coppia motrice

richiesta della pompa carburante stessa viene così dimezzata. La tenuta tra alloggiamento alberi a camme e testata è affidata a una guarnizione chimica.

1.8 Doppia sovralimentazione

Gli attuali motori sovralimentati utilizzano nella maggior parte dei casi i turbocompressori a gas di scarico. Il motore in questione è il primo propulsore della sua casa costruttrice che prevede la combinazione fra compressore meccanico volumetrico e turbocompressore a gas di scarico.

1.8.1 Compressore volumetrico

Si tratta di un compressore meccanico che può essere attivato da un giunto magnetico.

Vantaggi:

- creazione più rapida della pressione di sovralimentazione;
- elevata coppia ai bassi regimi;
- attivazione secondo necessità;
- esente da lubrificazione e raffreddamento esterni.

Svantaggi:

- assorbe potenza dal motore per funzionare;
- la pressione di sovralimentazione viene generata in funzione del regime motore e regolata successivamente, il che determina una dispersione dell'energia potenzialmente utile.

1.8.2 Turbocompressore a gas di scarico

Il turbocompressore a gas di scarico viene alimentato costantemente dai gas di scarico del motore, ed è dotato di una valvola WASTE GATE per controllarne il funzionamento.

Vantaggi:

- ottimo grado di efficienza grazie allo sfruttamento dell'entalpia dei gas di scarico.

Svantaggi:

- su un piccolo motore la pressione di sovralimentazione prodotta non è sufficiente ai bassi regimi per creare una coppia elevata;
- elevate sollecitazioni termiche.

1.8.3 Circuito di sovralimentazione

Lo schema evidenzia la struttura sostanziale dell'impianto di "doppia sovralimentazione" e la conduzione dell'aria esterna aspirata.

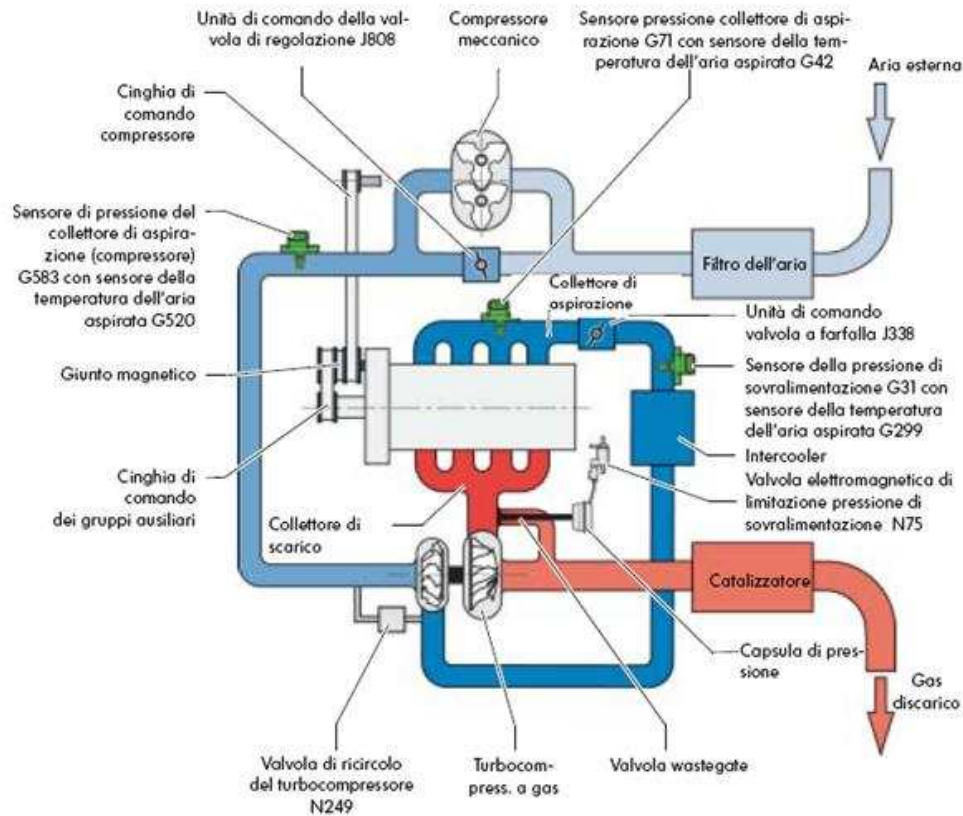


Figura 1.6 Circuito di sovralimentazione

L'aria esterna viene aspirata attraverso il filtro dell'aria.

La posizione della valvola di regolazione nell'unità di comando, determina se l'aria esterna debba passare attraverso il compressore meccanico e/o direttamente al turbocompressore a gas di scarico.

Dal turbocompressore a gas di scarico l'aria esterna fluisce attraverso l'intercooler e, attraversando l'unità di comando valvola a farfalla, confluisce nel collettore di aspirazione e quindi viene aspirata dai cilindri.

1.8.4 Ambiti operativi delle componenti di sovralimentazione

La Figura 1.7 mostra gli ambiti operativi del compressore meccanico e del turbocompressore a gas di scarico. A seconda della richiesta di coppia la centralina motore decide se generare la pressione di sovralimentazione, in quale quantità ed a quale livello. Il turbocompressore a gas di scarico opera in tutte le zone colorate del diagramma. Tuttavia l'energia dei gas di scarico non è sufficiente ai bassi regimi motore per produrre la necessaria pressione di sovralimentazione.

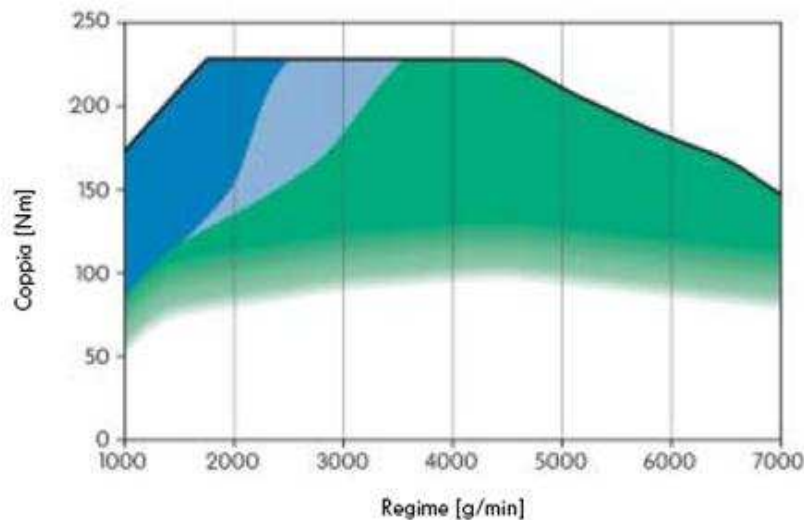


Figura 1.7 Campo di utilizzo

- Campo di sovralimentazione su richiesta del compressore meccanico

Fino a un regime motore massimo di 3500 rpm il compressore volumetrico viene attivato su richiesta. Questo è necessario ad esempio se si viaggia a velocità costante in questa fascia di giri, per poi accelerare repentinamente. Dato il ritardo di risposta del turbocompressore si avrebbe un'accelerazione ritardata (TURBO LAG), ed in questi casi viene quindi attivato il compressore meccanico per ottenere al più presto la necessaria pressione di sovralimentazione.

- **Campo di sovralimentazione costante del compressore meccanico**

A partire da una richiesta minima di coppia e fino a un regime massimo del motore di 2400 rpm, il compressore è sempre attivo. La pressione di sovralimentazione del compressore viene controllata dall'unità di comando della valvola di regolazione.

- **Esclusivo ambito operativo del turbocompressore a gas di scarico**

Nella zona verde il turbocompressore a gas di scarico riesce a creare la necessaria pressione di sovralimentazione. La pressione di sovralimentazione viene regolata dalla valvola elettromagnetica di limitazione della pressione di sovralimentazione (WASTE GATE).

1.8.5 Fasi operative

In funzione del carico e del regime motore la centralina di controllo motore calcola come alimentare il cilindro con la quantità di aria esterna necessaria all'erogazione della coppia richiesta. Essa decide quindi se il turbocompressore a gas di scarico debba creare da solo la pressione di sovralimentazione oppure se si debba aggiungere l'azione del compressore meccanico.

- **Funzionamento aspirato a basso carico**

In fase di funzionamento aspirato la valvola di regolazione è completamente aperta. L'aria esterna aspirata passa attraverso l'unità di comando della valvola di regolazione e va al turbocompressore a gas di scarico. Quest'ultimo viene certamente attivato dai gas di scarico, ma l'energia di questi ultimi è così ridotta che la pressione di sovralimentazione è molto bassa.

La valvola a farfalla si apre o si chiude secondo la volontà del conducente; nel collettore di aspirazione è presente una depressione.

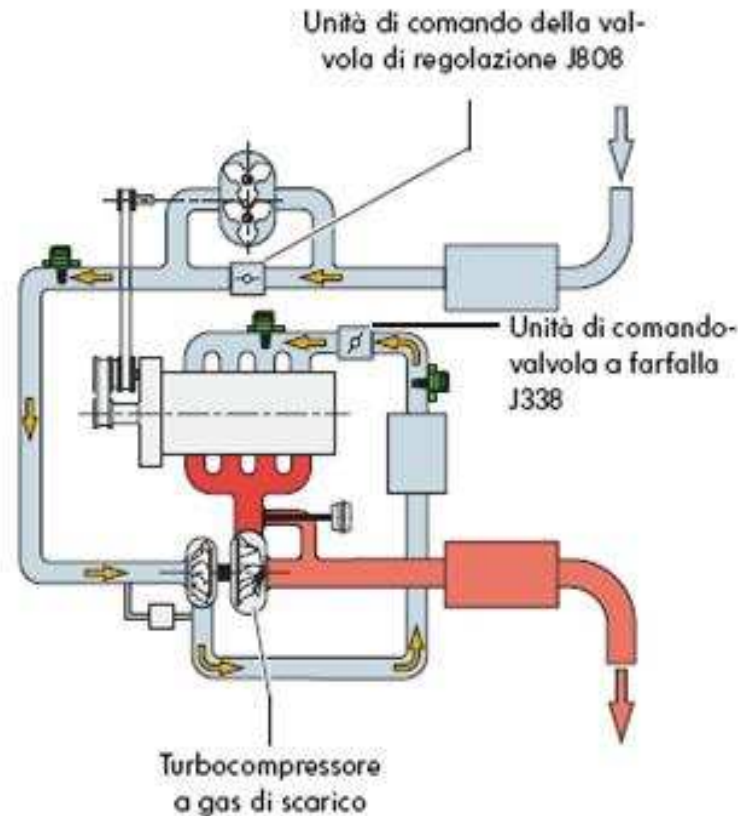


Figura 1.8 Basso carico

- **Funzionamento con compressore e turbocompressore ad alti carichi fino a 2400 rpm**

In questa fase la valvola di regolazione J808 è chiusa ovvero parzialmente aperta per la regolazione della pressione di sovralimentazione. Il compressore viene attivato tramite una frizione magnetica e comandato dalla cinghia del compressore. Il compressore aspira l'aria e la comprime. L'aria esterna compressa viene convogliata dal compressore meccanico al turbocompressore a gas di scarico, dove viene ulteriormente compressa.

La pressione di mandata del compressore volumetrico viene misurata dal sensore di pressione del collettore di aspirazione G583 e regolata dall'unità di comando della valvola di regolazione J808. La pressione di sovralimentazione complessiva viene rilevata dal sensore della pressione di sovralimentazione G31.

La valvola a farfalla è completamente aperta. Nel collettore di aspirazione vi è una pressione massima di 2.5 bar (assoluta).

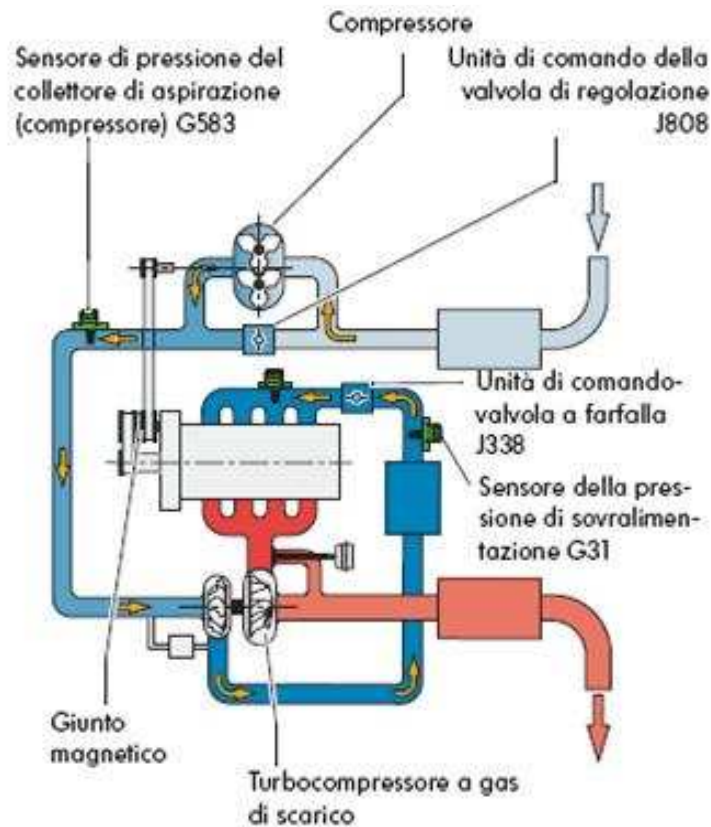


Figura 1.9 Alto Carico fino a 2400rpm

- Funzionamento con turbocompressore a gas di scarico e compressore meccanico, ad alti carichi tra 2400 e 3500 rpm.

In questa fase, ad es. a velocità costante, la pressione di sovralimentazione viene prodotta soltanto dal turbocompressore a gas di scarico. Se il conducente richiede un'accelerazione repentinamente, il turbocompressore è troppo lento per creare rapidamente la necessaria pressione di sovralimentazione: si verificherebbe il cosiddetto "TURBO LAG". Per evitarlo la centralina motore di controllo motore attiva brevemente il compressore meccanico e regola l'unità di comando della valvola di regolazione by-pass dello stesso (J808) in funzione della necessaria pressione di sovralimentazione.

Il compressore meccanico assiste il turbocompressore a gas di scarico nella produzione della necessaria pressione di sovralimentazione.

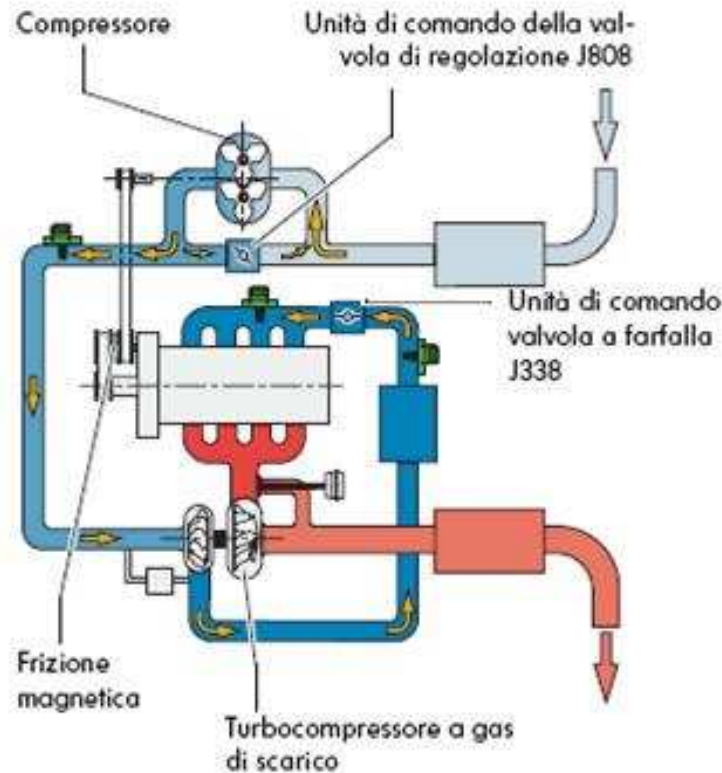


Figura 1.10 Alto carico tra 2400rpm e 3500rpm

- **Funzionamento con turbocompressore a gas di scarico**

A partire da un regime motore di circa 3500 rpm il turbocompressore a gas di scarico è in grado di produrre la necessaria pressione di sovralimentazione in ogni situazione di carico.

La valvola di regolazione (o di by-pass) è completamente aperta e l'aria esterna fluisce direttamente al turbocompressore a gas di scarico. L'energia dei gas di scarico ora è sufficiente in tutte le condizioni a creare la pressione di sovralimentazione con il turbocompressore.

La valvola a farfalla è completamente aperta. Nel collettore di aspirazione vi è una pressione massima di 2 bar (assoluta). La pressione di sovralimentazione del turbocompressore viene misurata con il sensore della pressione di sovralimentazione G31 e regolata tramite la valvola di limitazione pressione di sovralimentazione N75 (WASTE GATE).

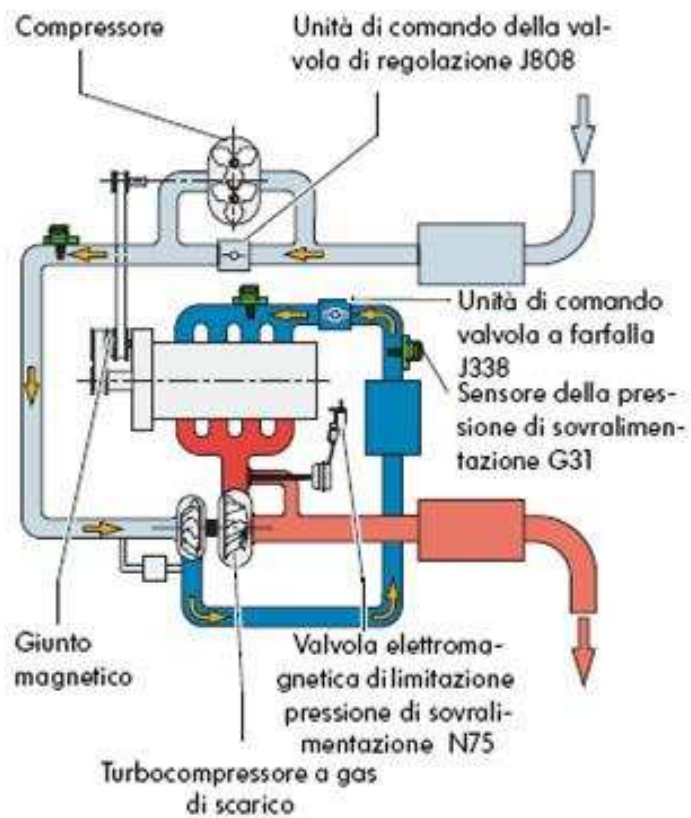


Figura 1.11 Con turbocompressore a gas di scarico

1.9 Compressore

1.9.1 Comando del compressore meccanico



Figura 1.12 Compressore volumetrico

Il compressore viene attivato secondo necessità e comandato da un treno ausiliario dalla pompa del liquido di raffreddamento. Il treno ausiliario viene attivato da un giunto magnetico esente da manutenzione sul modulo della pompa del liquido di raffreddamento.

Dati i rapporti di trasmissione dalla puleggia albero motore fino alla puleggia del compressore, nonché i rapporti di trasmissione interni al compressore, questo ruota cinque volte più veloce rispetto all'albero motore. Il regime massimo del compressore è di 17500 rpm.

1.9.2 Compressore meccanico

Il compressore meccanico è imbullonato a valle del filtro dell'aria sul lato collettore di aspirazione. Data la configurazione dei due rotori, il compressore viene definito a vite. La pressione di sovralimentazione viene regolata da un'unità di comando della valvola di regolazione. La pressione di sovralimentazione massima creata dal compressore è di circa 1.75 bar (assoluta).

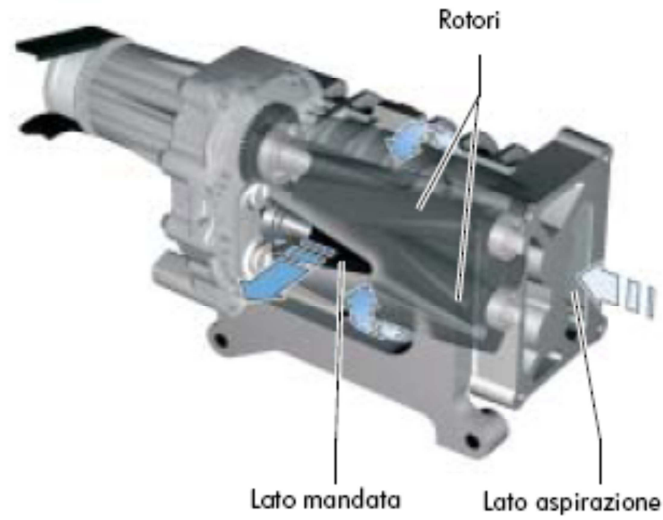


Figura 1.13 Compressore Meccanico

1.9.3 Funzionamento del compressore

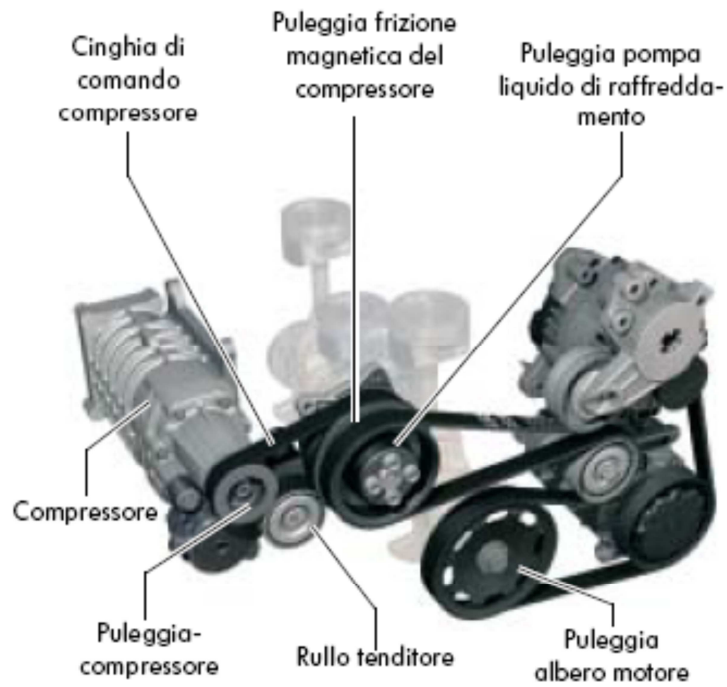


Figura 1.14 Circuito cinghia compressore meccanico

I due rotori del compressore sono configurati in modo tale che, ruotando, sul lato di aspirazione si produce un aumento di volume. Questo determina l'aspirazione dell'aria esterna, che successivamente viene convogliata dai rotori al lato di mandata del compressore. Sul lato di mandata lo spazio tra i due rotori del compressore si rimpicciolisce. L'aria viene quindi convogliata in direzione del turbocompressore a gas di scarico.

1.9.4 Regolazione pressione di sovralimentazione del compressore

La pressione di sovralimentazione viene regolata in funzione della posizione della valvola di regolazione (o di by-pass). Se tale valvola è chiusa, il compressore produce la pressione di sovralimentazione massima a questo regime. L'aria esterna compressa viene pompata verso il turbocompressore a gas di scarico (Figura 1.15, a destra). Se la pressione di sovralimentazione è troppo elevata, la valvola di regolazione viene leggermente aperta. A questo punto una parte dell'aria esterna viene convogliata verso il turbocompressore a gas di scarico e il resto viene convogliato verso il lato di aspirazione del compressore volumetrico attraverso la valvola di regolazione parzialmente aperta (Figura 1.15, a sinistra). La pressione di sovralimentazione scende. In tal modo il lavoro del compressore si riduce e la potenza necessaria per azionarlo scende. La pressione di sovralimentazione viene misurata tramite il sensore di pressione G583, a valle del compressore volumetrico.

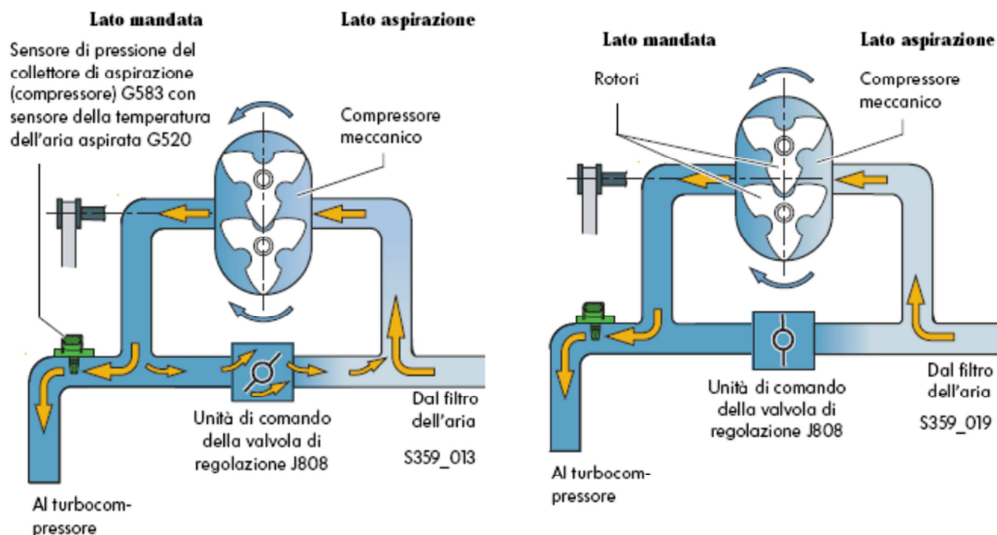


Figura 1.15 Regolazione della pressione di sovralimentazione

1.10 Componenti della sovralimentazione a gas di scarico



Figura 1.16 Turbocompressore a gas di scarico

Il turbocompressore a gas di scarico costituisce un modulo compatto insieme al collettore di scarico. Data l'elevata temperatura dei gas di scarico, entrambe le componenti sono realizzate con un getto d'acciaio particolarmente resistente al calore. Per proteggere i supporti degli alberi dalle elevate temperature, il turbocompressore a gas di scarico è inserito nel circuito di raffreddamento. Una pompa di ricircolo si attiva fino a quindici minuti dopo lo spegnimento del motore per evitare il surriscaldamento del turbocompressore e la formazione di bolle di vapore nell'impianto di raffreddamento.

A fini della lubrificazione i supporti degli alberi sono collegati al circuito dell'olio. Inoltre sul modulo turbocompressore dei gas di scarico si trovano l'elettrovalvola di

ricircolo e la valvola WASTE GATE per la limitazione della pressione di sovralimentazione.

1.10.1 Collettore di scarico

Sui motori a benzina finora la miscela veniva arricchita, in condizioni di pieno carico e/o potenza, a causa delle elevate temperature dei gas di scarico.

Il collettore di scarico del motore 1.4 TSI è progettato per temperature fino a 1050 °C. Questo consente al motore di funzionare con un'elevata pressione di sovralimentazione e con lambda unitario in quasi tutte le zone della mappatura.

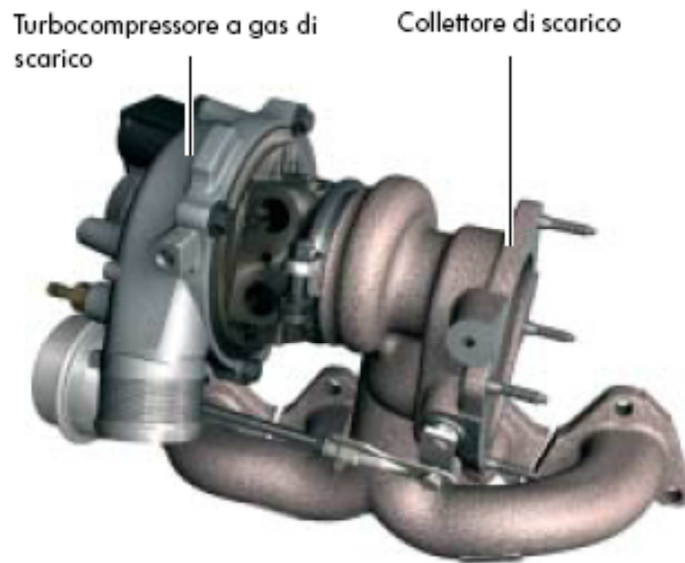


Figura 1.17 Collettore di scarico

1.10.2 Intercooler

Il motore TSI impiega un raffreddamento della sovralimentazione del tipo aria/aria. Questo significa che l'aria di sovralimentazione passa attraverso un radiatore e qui cede il proprio calore alle lamelle di alluminio, le quali a loro volta vengono raffreddate dall'aria ambiente.

Dopo avere oltrepassato il turbocompressore a gas di scarico, l'aria aspirata si trova alta temperatura, soprattutto per effetto del processo di compressione, ma anche dell'elevatissima temperatura del turbocompressore. Di conseguenza la densità dell'aria diminuisce e la quantità di ossigeno che arriverebbe nel cilindro sarebbe minore.

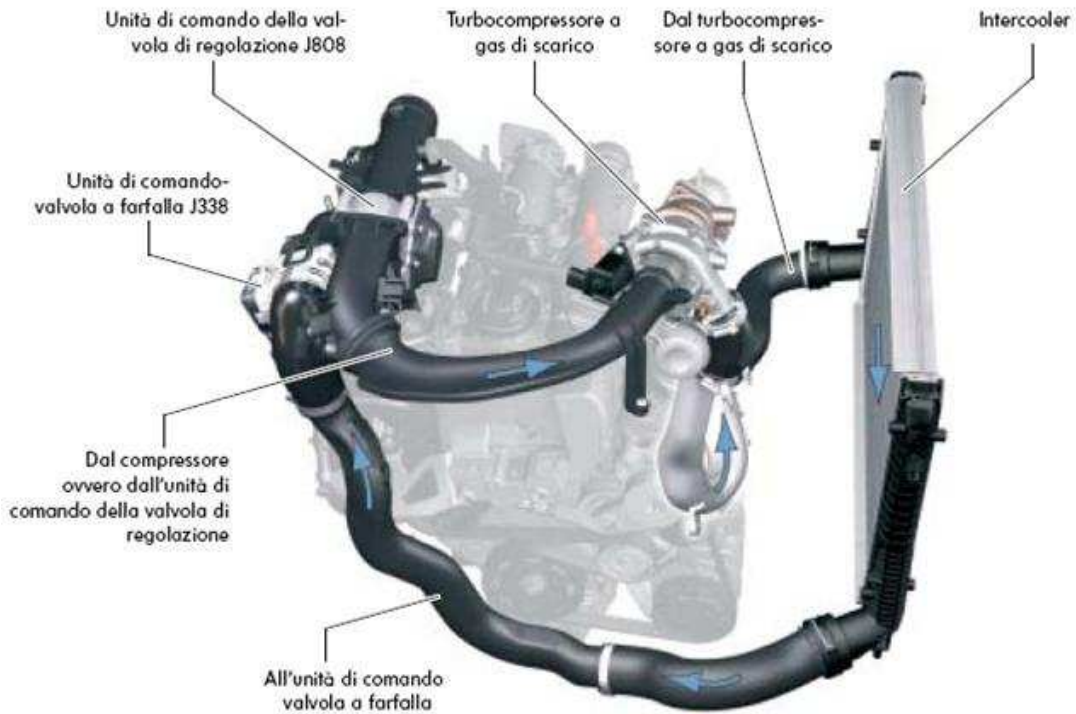


Figura 1.18 Intercooler

Il raffreddamento ad una temperatura di picco comunque superiore a quella ambiente determina l'aumento della densità e consente di apportare una maggiore quantità di ossigeno nei cilindri. Il raffreddamento riduce inoltre la tendenza al battito (detonazione o knock) e la produzione di ossidi di azoto.

1.11 Impianto di raffreddamento

Si tratta di un impianto di raffreddamento a doppio circuito con gestione separata del liquido di raffreddamento e diverse temperature fra blocco cilindri e testata.

Nella testata il liquido di raffreddamento viene convogliato dal lato di scarico a quello di aspirazione per ottenere un livello di temperatura uniforme. Questo tipo di raffreddamento viene denominato a flussi incrociati.

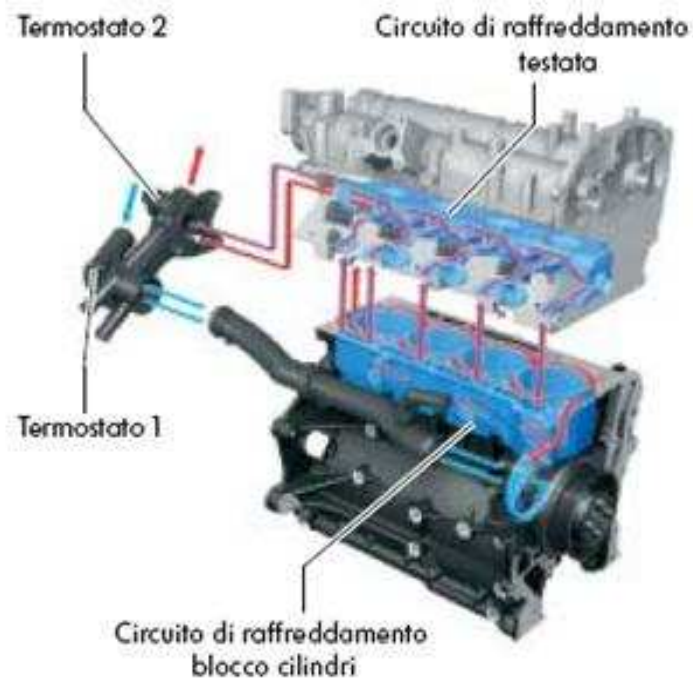


Figura 1.19 Impianto di raffreddamento

L'impianto di raffreddamento è suddiviso in due circuiti nel motore. Circa un terzo del liquido di raffreddamento va ai cilindri e due terzi alle camere di combustione nella testata.

Il doppio circuito presenta i seguenti vantaggi:

- riscaldamento più rapido del blocco cilindri, poiché il liquido di raffreddamento permane nel blocco cilindri fino al raggiungimento dei 95 °C;
- minore attrito nel manovellismo, grazie al superiore livello di temperatura nel blocco cilindri;

- migliore raffreddamento delle camere di combustione grazie alla temperatura minore mantenuta nella testata (80°C). In tal modo si ottiene una migliore carica del cilindro a fronte di un inferiore rischio di battito.

-

Grazie all'elevata portata di liquido di raffreddamento, agli alti regimi si ottiene un'elevata pressione nell'impianto. Il termostato 1 a due stadi, di Figura 1.19, si apre esattamente alla temperatura prevista anche in queste condizioni. Con un termostato a stadio singolo, vi sarebbe un termostato con un piattello grande che dovrebbe aprirsi contro una pressione elevata. Date le forze antagoniste il termostato si aprirebbe tuttavia soltanto a temperature piuttosto alte.

Nel caso del termostato a doppio stadio (termostato 2 in Figura 1.19), quando si raggiunge la temperatura di apertura si apre inizialmente solo un piccolo piattello.

Essendo la superficie inferiore, le forze antagoniste sono minori e il termostato si apre alla temperatura esattamente prevista. Dopo una certa corsa, il piattello piccolo trascina con sé un piattello più grande, creando così la massima sezione di apertura possibile.

1.12 Impianto di scarico

Il post-trattamento dei gas di scarico avviene tramite un catalizzatore trivalente.

Per portare rapidamente il catalizzatore in temperatura, nonostante le perdite di calore dovute alla presenza del turbocompressore a gas di scarico, il tubo di collegamento tra turbocompressore e catalizzatore dispone di un isolamento dei traferri.

La sonda lambda a monte del catalizzatore è del tipo a sbalzo di tensione (HEGO) ed è inserita nella coppella di ammissione del catalizzatore trivalente vicino al motore. Tale disposizione la porta a essere investita in maniera uniforme dai gas di scarico di tutti i cilindri. Contemporaneamente si ottiene un rapido avvio della sonda stessa.

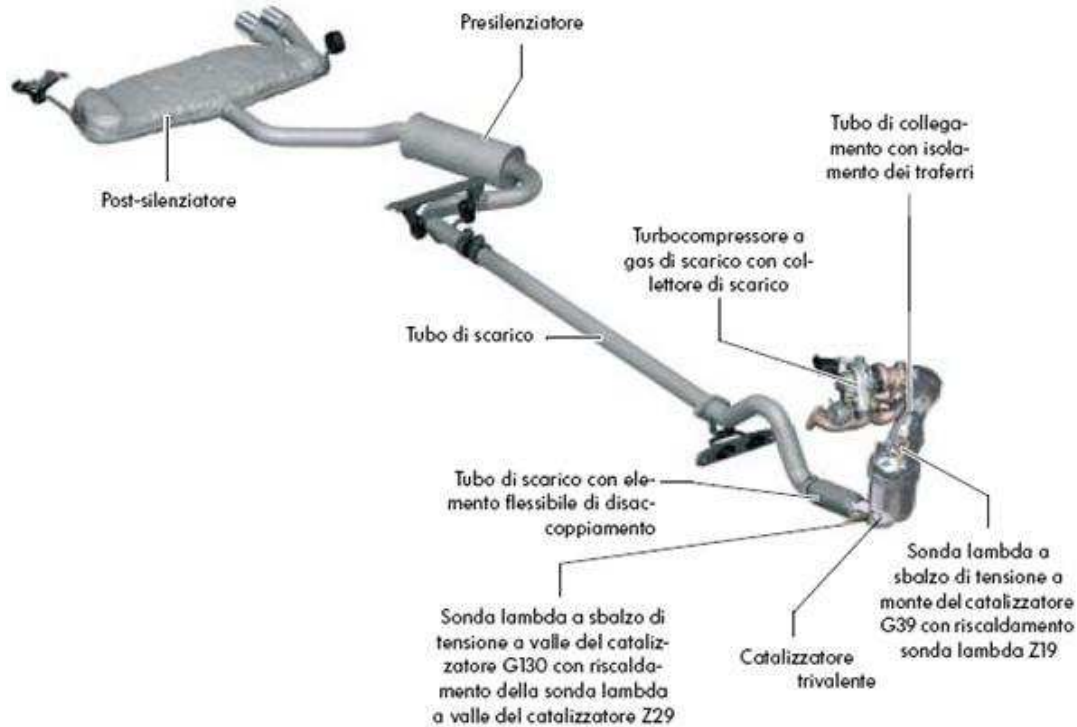


Figura 1.20 Impianto di scarico

1.13 Giunto magnetico del compressore

Il giunto magnetico del compressore, esente da manutenzione, è parte integrante del modulo pompa del liquido di raffreddamento. Esso consente di attivare il compressore, se necessario.

1.13.1 Funzione

Il giunto magnetico viene attivato, se necessario, dalla centralina motore, creando un accoppiamento dinamico tra la puleggia della pompa del liquido di raffreddamento e la puleggia del giunto magnetico del compressore.

1.13.2 Struttura

Il giunto magnetico è costituito da (Figura 1.21):

- una puleggia della pompa del liquido di raffreddamento con un disco di attrito caricato a molle ed imbullonato con l'albero di comando della pompa del liquido di raffreddamento;
- una puleggia del giunto magnetico del compressore alloggiata su cuscinetti a sfere e rivestita con un rivestimento frizione. Essa gira su un cuscinetto a gola profonda a due corone di sfere sul corpo della pompa del liquido di raffreddamento;
- una bobina magnetica solidale con la pompa del liquido di raffreddamento.

1.13.3 Funzionamento

- Giunto magnetico non azionato

La puleggia della pompa del liquido di raffreddamento prende il moto dall'albero motore attraverso la cinghia di comando degli ausiliari. Poiché il giunto magnetico non è azionato, la puleggia del compressore non gira ed il compressore non viene azionato. Tra guarnizione del giunto e disco di attrito è presente la luce "A".

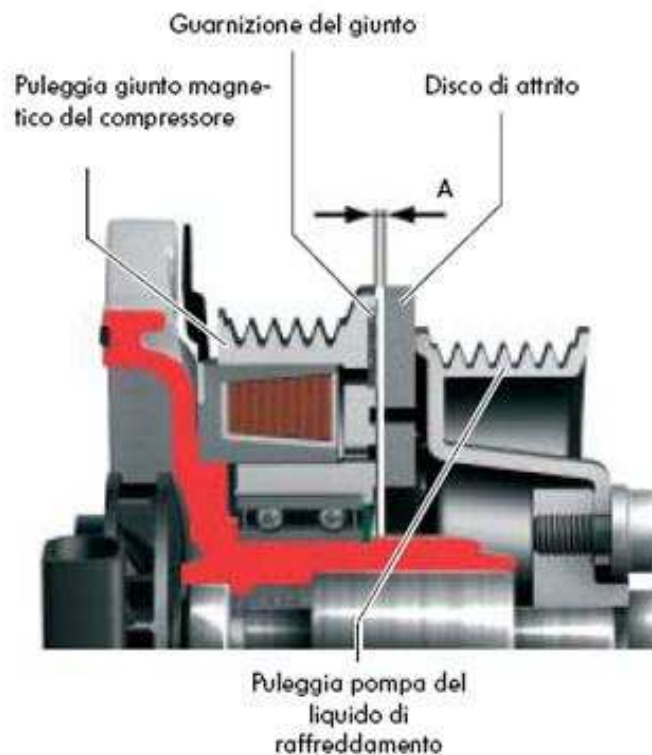


Figura 1.21 Giunto magnetico

- Giunto magnetico azionato

Se è necessario attivare il compressore, la bobina magnetica viene alimentata elettricamente creando il campo magnetico che andrà ad attrarre il disco di attrito verso la guarnizione del giunto, costituendo un accoppiamento dinamico tra puleggia del giunto magnetico del compressore e puleggia della pompa del liquido di raffreddamento (Figura 1.22).

Il compressore meccanico si attiva e rimane in funzione fino a quando non si interrompe il flusso di corrente diretto alla bobina magnetica. Successivamente le molle riportano il disco di attrito sulla puleggia della pompa del liquido di raffreddamento e la puleggia del compressore non gira più.

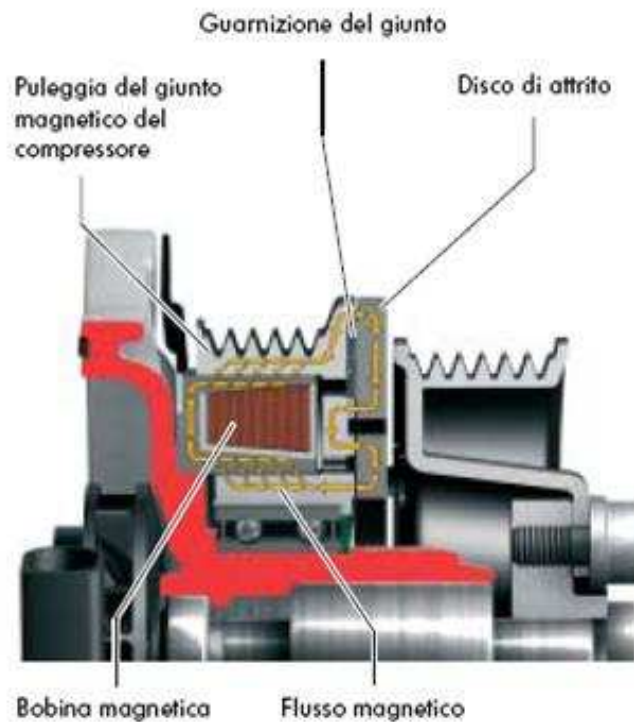


Figura 1.22 Giunto magnetico azionato

1.14 Tumble flap [3]

Nel motore in questione sono presenti 4 flap, uno per ogni condotto di aspirazione, in grado di favorire il moto di tumble all'interno del cilindro.



Figura 1.23 Tumble flap

Il flap viene attivato ai bassi carichi e basse girature, dove la turbolenza dell'aria aspirata dal motore è bassa e non crea una miscelazione ottimale della carica.

Il tumble flap, va a restringere il condotto di aspirazione e guida l'aria verso la parte superiore delle valvole di aspirazione, vedi Figura 1.23 e Figura 1.24.

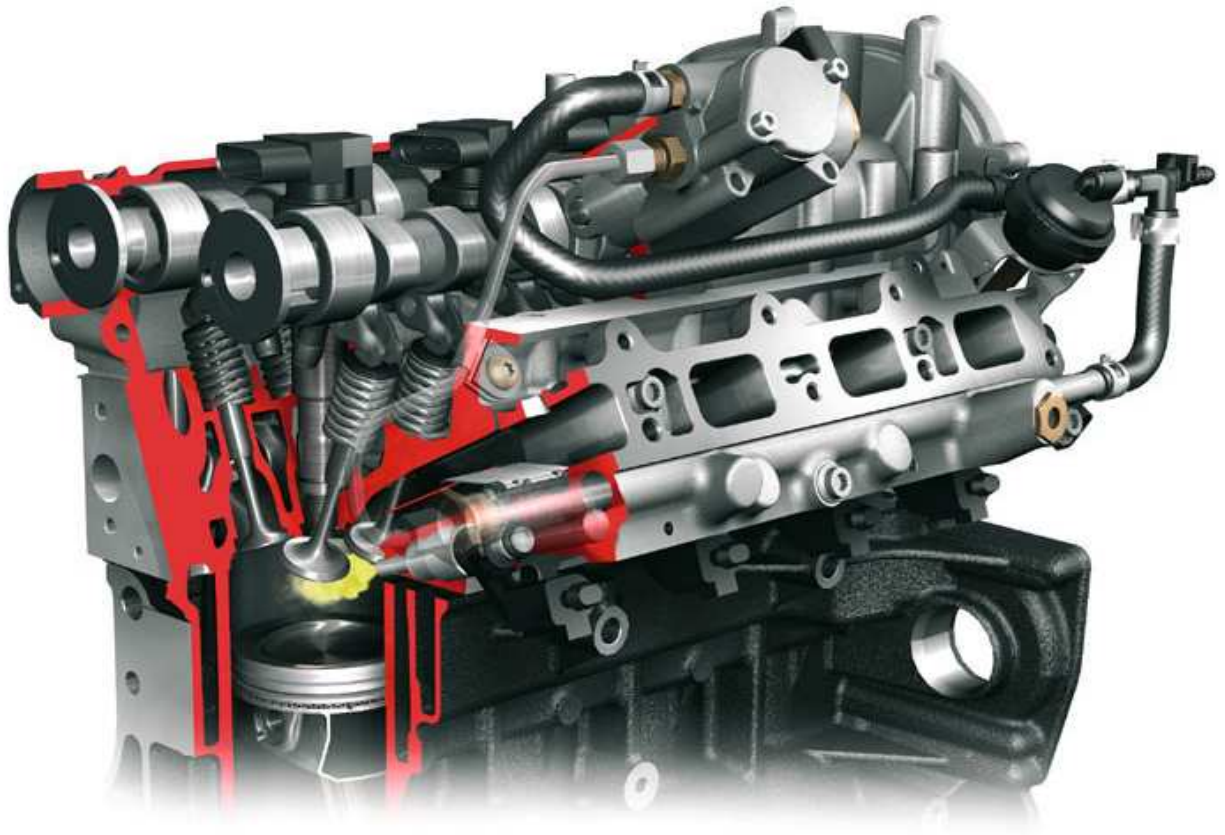


Figura 1.24 Tumble flaps

2 Installazione al banco

2.1 Disposizione

Il motore che è stato descritto nel capitolo precedente è normalmente montato su una Volkswagen Golf serie V.

La messa al banco di un motore permette di studiarne il comportamento come elemento svincolato dal veicolo, e rappresenta una fase fondamentale per lo sviluppo del sistema di controllo, al fine di ottimizzarne le prestazioni, il consumo e le emissioni.

La prima parte di attività di sviluppo e validazione del sistema di controllo si è svolta presso una sede esterna, la seconda presso il laboratorio DIEM della facoltà di Ingegneria Meccanica dell'Università di Bologna e questa tesi riporta una sintesi delle attività realizzate presso il DIEM.

Una volta arrivata la vettura con tutti i suoi componenti, l'allestimento che è stato realizzato è legato all'esigenza di effettuare prove al banco con un sistema di controllo "chiuso" (quello di serie), evitando che il sistema di diagnosi si attivi riconoscendo situazioni anomale e di conseguenza attivando strategie di recovery. In Figura 2.1 si può vedere come nell'installazione precedente si fosse scelto di utilizzare la vettura stessa come appendice del cablaggio elettrico, proprio ai fini di evitare l'attivazione di diagnosi specifiche.



Figura 2.1 Allestimento Argentan

Si è pertanto deciso di utilizzare la stessa soluzione: la vettura è stata posizionata all'esterno del laboratorio e quindi debitamente protetta dalle intemperie con un telo di copertura.



Figura 2.2 Vettura al DIEM

Come si vede dalla Figura 2.2 è stato forato il muro di cemento armato per permettere al cablaggio di arrivare fino alla cella di prova, costituita da sala motore (a sinistra in Figura 2.3) e sala controllo (a destra in Figura 2.3).



Figura 2.3 Sala Motore e Sala Controllo

Il cablaggio parte dunque dalla Golf, passa attraverso la sala controllo e giunge in sala motore ed in particolare alla centralina (cerchiata di verde in Figura 2.4), fissata direttamente sul castelletto motore (vedi il paragrafo 2.4).

La ECU (Engine Control Unit) utilizzata in questa fase, è quella di serie.

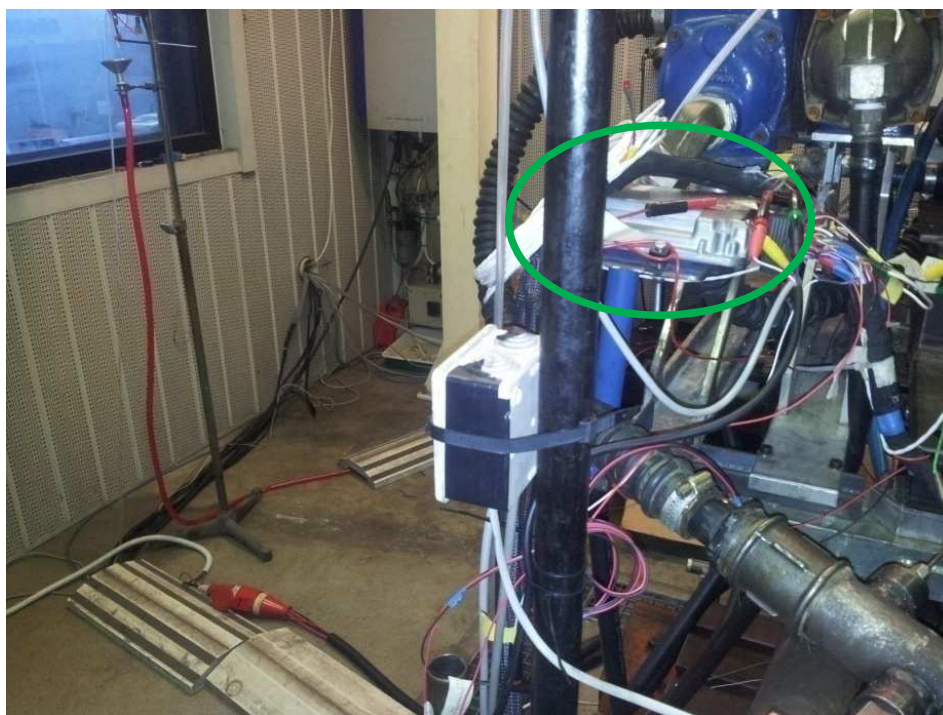


Figura 2.4 Cablaggio e Centralina Motore

2.2 Il freno a correnti parassite

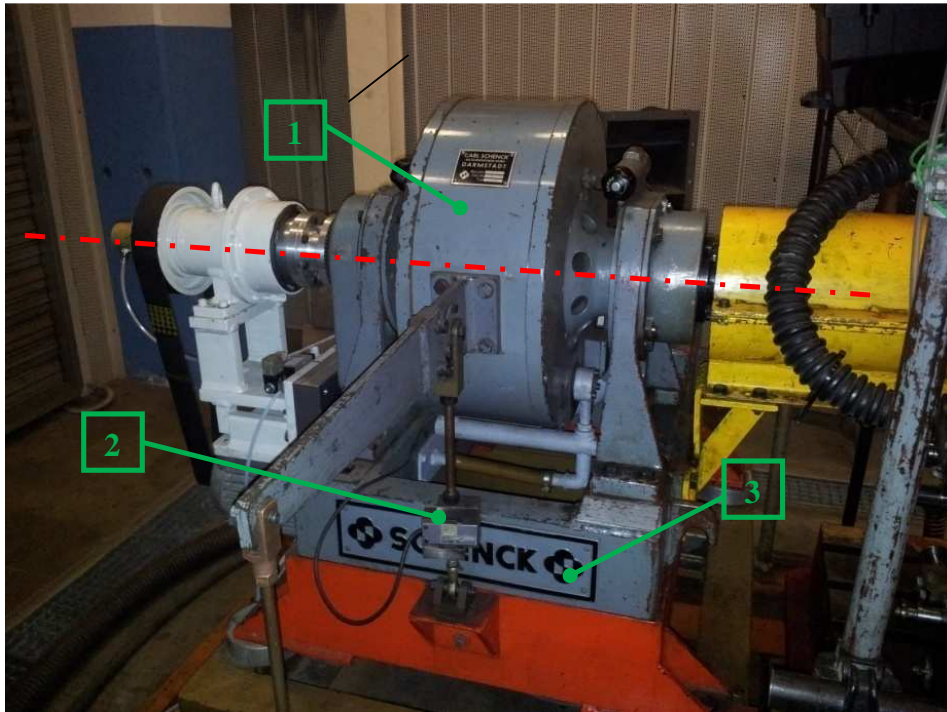


Figura 2.5 Freno Schenck W150

Per testare e sviluppare il sistema di controllo per un motore endotermico (macchina motrice), serve una macchina cuplometrica (macchina operatrice) che permetta di controllare il carico (ed il regime) di funzionamento del M.C.I.. E' stato utilizzato un freno a correnti parassite Schenck W150 (Figura 2.5), che permette di far lavorare il motore in tutti i suoi punti di funzionamento (un punto motore è costituito da una coppia di valori caratteristici, per esempio regime di rotazione-coppia).

Occorre pertanto che le curve caratteristiche della macchina operatrice (in blu Figura 2.6) “comprendano” quelle della macchina motrice (in rosso in Figura 2.6) in modo da poter far funzionare il motore, in condizioni controllate, in tutto il suo campo d'utilizzo.

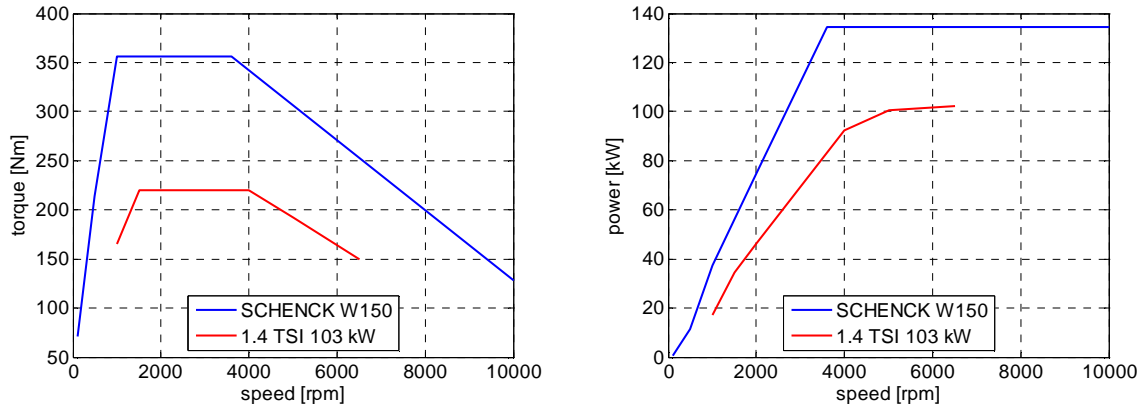


Figura 2.6 Curve caratteristiche freno e motore

Le macchine cuplometriche hanno la carcassa (1 di Figura 2.5) oscillante che ruota attorno all'asse coincidente con quello dell'albero motore (tratteggiato in rosso in Figura 2.5). La rotazione è però impedita da una cella di carico (2 di Figura 2.5) posta tra basamento (fisso, 3 di Figura 2.5) e carcassa (mobile), ad una certa distanza dall'asse di rotazione (braccio b). La cella di carico misura la forza F necessaria ad impedire la rotazione ed, essendo noto e costante il braccio, il momento torcente è univocamente determinato: $C = F \cdot b$. Quindi conosceremo anche la potenza: $P = C \cdot \omega = C \cdot \frac{2\pi n}{60}$, con $\omega \left[\frac{rad}{s} \right]$ la velocità angolare, dove $n \left[\frac{giri}{min} \right]$ sono i giri a cui il freno sta mantenendo il motore.

Il collegamento motore-freno avviene tramite un giunto di tipo doppio "GIUBO" (Figura 2.7), che consente il trasferimento di coppia tra le due macchine ed il recupero di piccoli disallineamenti che necessariamente si presentano durante il funzionamento. Per motivi di sicurezza, il giunto è coperto da una carcassa metallica rimovibile (gialla in Figura 2.7).

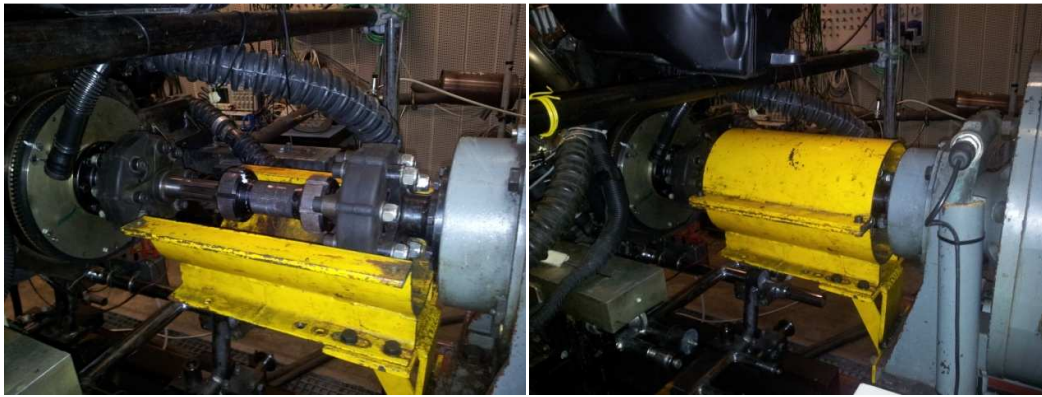


Figura 2.7 Giunto doppio “GIUBO”

2.3 Il gruppo d'avviamento elettropneumatico

Quando un motore viene messo al banco prova, si è soliti eliminare il motorino d'avviamento di serie in modo da non dover installare la batteria e mantenere collegato l'alternatore di serie. A tal proposito si è disposto un alimentatore (nero nell'immagine a sinistra della Figura 2.8) in sala controllo che fornisce la corrente continua alla scatola alimentazioni (a destra in Figura 2.8) nelle vicinanze del motore.



Figura 2.8 Alimentatore, gruppo chiave e scatola alimentazioni

In ingresso alla scatola alimentazioni vi è dunque la corrente continua fornita dall'alimentatore, che si ritroverà poi in uscita diramata per 4 utenze.

I connettori cerchiati in rosso in Figura 2.8 alimentano, solo “sotto chiave” (a giro di chiave avvenuto), le utenze che sono ad essi collegate, quelle in verde sono prese sempre alimentate (anche senza giro di chiave e fungo alzato, ad alimentatore acceso, forniscono

corrente). In particolare si avrà la pompa di bassa pressione e la centralina nel lato “sotto chiave”, tutto il resto nel lato sempre alimentato.

Siccome il cablaggio elettrico parte dalla vettura (vedi paragrafo 2.1), per avviare il motore occorre girare chiave direttamente nella Golf. Per una questione di sicurezza però è stato disposto un secondo blocco chiave (bianco nell’immagine a sinistra di Figura 2.8) tra alimentatore e scatola alimentazioni, costituito da una chiave e un fungo di emergenza disposti in serie. In questo modo schiacciando il fungo verranno a mancare le alimentazioni alle utenze “sotto chiave”.

Come si diceva, manca il motorino d’avviamento: ci si è dunque dotati di un gruppo d’avviamento elettropneumatico (Figura 2.9) in grado di trascinare il motore. Tale dispositivo è realizzato dall’azienda Borghi & Saveri appositamente per questo tipo di freni ed applicazioni.

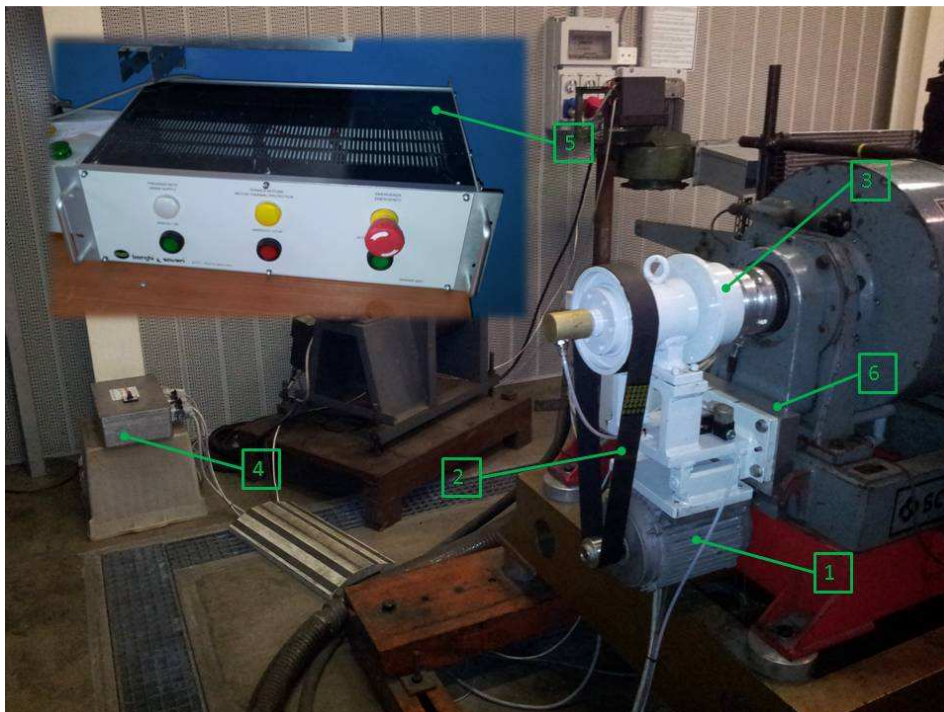


Figura 2.9 Gruppo avviamento Borghi&Saveri GR.AV.EP 200

Il macchinario è costituito da un motore elettrico (1 di Figura 2.9), una cinghia di trasmissione (2 di Figura 2.9), una frizione pneumatica (3 di Figura 2.9), una scatola di potenza (4 di Figura 2.9) e una di controllo (5 di Figura 2.9).

La scatola di potenza è disposta in sala motore, nei pressi del gruppo d'avviamento, mentre la scatola di controllo è in sala di controllo, affianco alla scatola chiave e all'alimentatore (Figura 2.3).

La frizione pneumatica è essenzialmente una camera toroidale di materiale elastico che deve ruotare coassialmente all'albero del rotore del freno. La frizione fa presa su un manicotto o tamburo d'alluminio, il quale deve girare solidalmente col rotore del freno. A tale scopo è stata realizzata una puleggia d'adattamento (Figura 2.10) che collega manicotto e rotore.

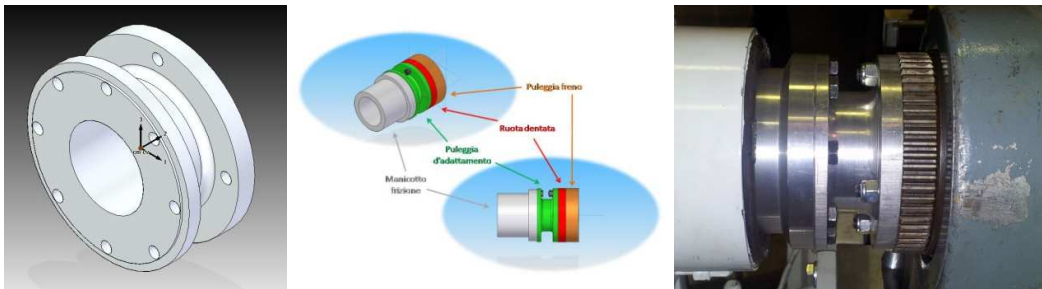


Figura 2.10 Puleggia d'adattamento

Il motore endotermico è collegato per mezzo del giunto al freno, o meglio, al suo rotore e quindi al manicotto. La frizione pneumatica è alimentata con aria compressa tramite il distributore rotante (1 di Figura 2.11), dando un impulso all'elettrovalvola di controllo (2 di Figura 2.11). Occorre alimentare l'elettrovalvola con aria compressa lubrificata alla pressione di 5÷6 atm attraverso un tubo "rilsan" (3 di Figura 2.11) di $\Phi=4\div6$ mm di diametro. Con una pressione di 5.2 atm si ottiene una coppia di 113Nm.

Per la sua particolare forma, questa frizione si disinnesta completamente ed automaticamente appena viene a mancare la pressione dell'aria. In tal modo, tra il tamburo e i settori della frizione, non esiste contatto eliminando ogni resistenza che generi attrito o logorio. A tal proposito abbiamo realizzato una flangia che mantenga il dispositivo nella posizione opportuna (6 di Figura 2.9 e 4 di Figura 2.11).

La velocità di trascinamento è di 440 rpm e consente l'avviamento di motori a benzina da 200÷250 CV e Diesel da 120÷140 CV circa.

Una volta avviato il motore a combustione interna, si diseccita l'elettrovalvola tramite il relè di soglia giri, in modo che venga meno l'accoppiamento e il motore elettrico non venga trascinato ad alta velocità danneggiandosi [4].

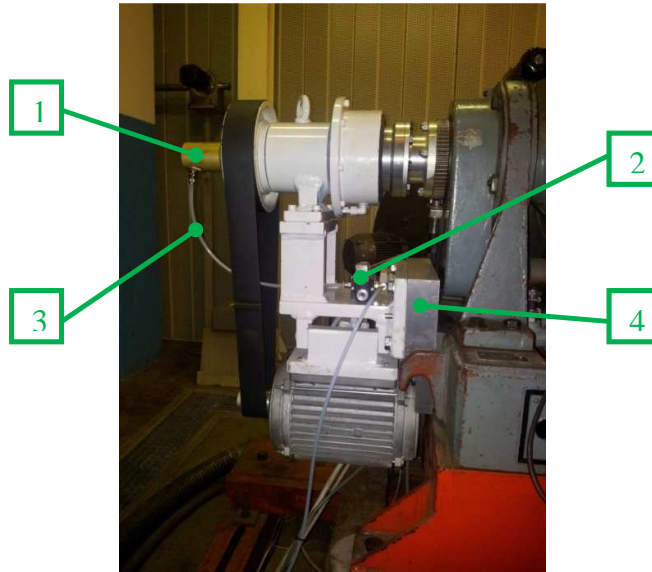


Figura 2.11 Dispositivo elettropneumatico

2.3.1 Avviamento del motore

Per avviare il motore occorre quindi accendere l'alimentatore, girare chiave nella vettura, girarla nel blocco chiave di sicurezza ed alzare il fungo d'emergenza (in questo modo si alimentano le utenze "sotto chiave"). Premendo il pulsante d'avviamento si ha l'immediato comando dell'elettrovalvola e trascorso un tempo x , impostato sul temporizzatore, si ha il comando al contatore del motore elettrico. Se l'albero del freno è in movimento non si ha né il comando all'elettrovalvola né alla bobina del motore elettrico. Questa è una sicurezza che riceve il consenso del relè soglia giri sul cassetto freno (DES2000 di Borghi&Saveri).

2.4 Castelletto motore

Con castelletto motore si indica la struttura atta a sostenere il motore ed i dispositivi ausiliari per la messa al banco. Nella fattispecie si tratta di un carrello d'acciaio dotato di ruote in grado di entrare nelle guide presenti nel banco prova delle celle di Argentan. Il propulsore è arrivato al laboratorio del DIEM così come lo si può vedere in Figura 2.12. Il carrello motore è attrezzato con una flangia per i fluidi che, grazie ad attacchi rapidi, si aggancia all'omologa presente in sala motore, di modo da alimentare le varie utenze con acqua e benzina. Direttamente sul castelletto sono poi disposti due scambiatori acqua-acqua, che fanno le veci del radiatore che di serie è montato sulla vettura. L'allestimento prevede poi una serie di SILENT-BLOCK in grado di smorzare le vibrazioni derivanti dal funzionamento.

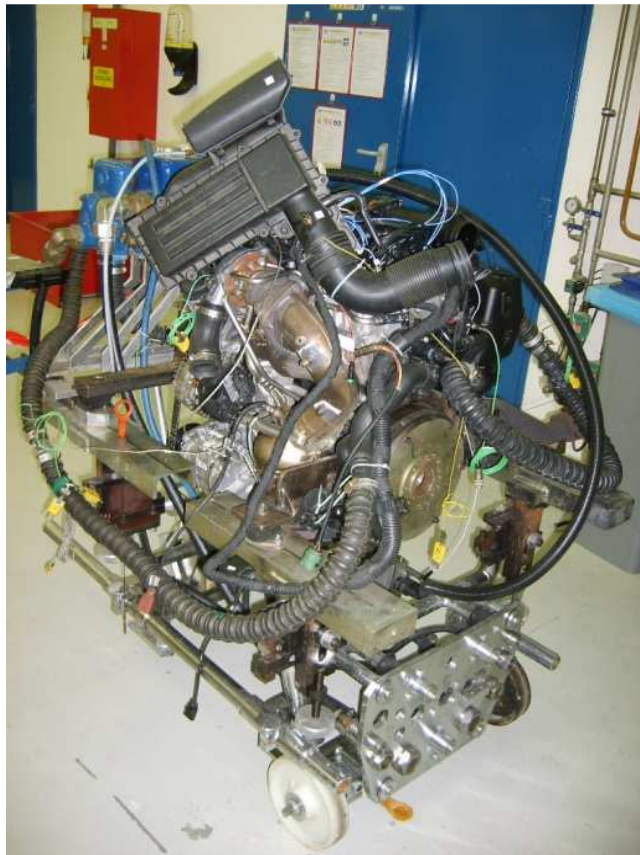


Figura 2.12 Motore TSI sul castelletto

La cella di prova del laboratorio DIEM è attrezzata con un basamento rettificato che presenta delle scanalature longitudinali, alle quale vengono ancorate le staffe per il collegamento della struttura. Il banco poggia su molle regolabili in grado di assorbire le vibrazioni che giungono dal motore in funzione.

Per adattare il castelletto motore arrivato da Argentan al banco prova, si sono innanzitutto rimosso le ruote (non adatte alle guide presenti nel nostro banco) e la flangia fluidi (non abbiamo l'altra metà della flangia fluidi). Quindi è stato necessario realizzare delle traverse (1 di Figura 2.13) che vengono fissate al carrello grazie a 4 viti a brugola M16x50mm. Tali traverse saranno poi ancorate con 8 viti a testa esagonale M12x50mm a 4 blocchetti di alluminio (2 di Figura 2.13) realizzati per far presa all'interno delle scanalature presenti nel banco.

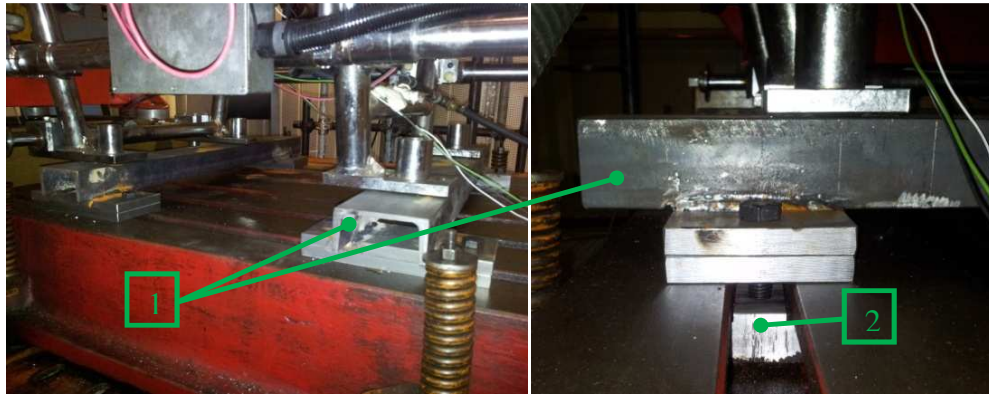


Figura 2.13 Ancoraggio al banco

2.5 Impianti dei liquidi

2.5.1 Circuito acqua

Per quanto riguarda il lato acqua, si sono utilizzati i tubi che sono stati mandati assieme al motore, giuntandoli coi tubi d'adduzione e scarico al pozzo presente nel laboratorio (Figura 2.14).

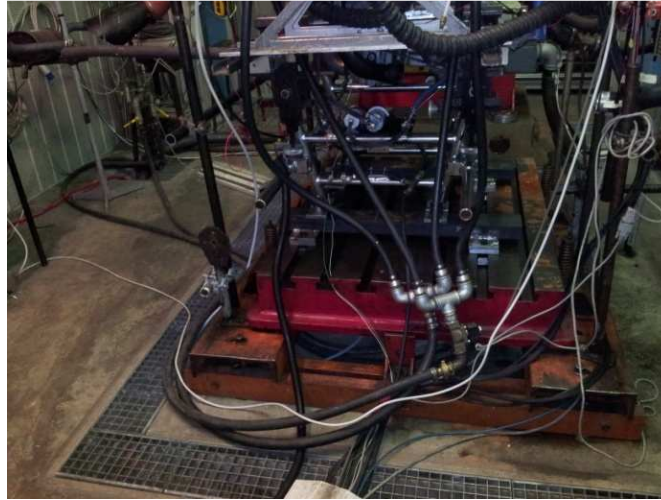


Figura 2.14 Tubi acqua

2.5.2 Circuito benzina

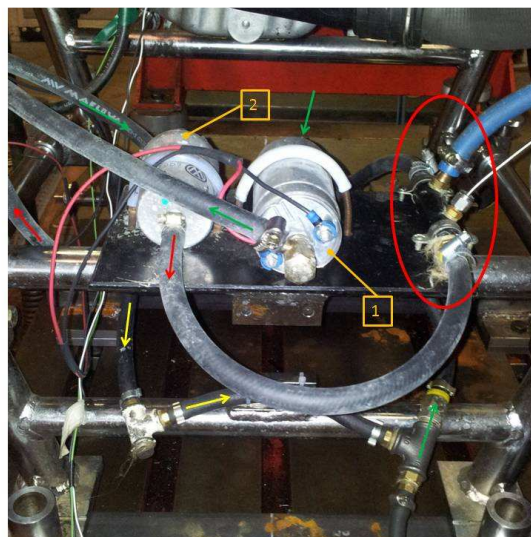


Figura 2.15 Circuito benzina

Il circuito benzina è stato modificando mettendo un tubo “antibenzina” $\Phi=8\text{mm}$ di collegamento tra l’aspirazione della pompa di bassa pressione (1 di Figura 2.15, questa è la pompa montata di serie nel serbatoio della vettura, che i nostri colleghi francesi hanno sistemato nel castelletto motore) e la mandata della bilancia AVL 733S (Figura 2.16).

La bilancia (vedi il paragrafo seguente) preleva stock da 1.8kg di benzina da fusti posti esternamente al laboratorio. Quindi entra in aspirazione (freccia verde scuro in Figura 2.15) della pompa di bassa pressione (1 di Figura 2.15) e poi, dalla mandata di questa (linea verde chiaro in Figura 2.15), arriva al filtro (2 di Figura 2.15). Da questo una parte della benzina va in aspirazione della pompa di alta pressione (freccia rossa in Figura 2.15) e il reflusso (freccie gialla in Figura 2.15) torna in aspirazione della pompa di bassa pressione.

- **Bilancia AVL 733S [4]**



Figura 2.16 Bilancia AVL 733S

La bilancia misura il consumo di combustibile ed è di tipo massico, cioè misura la variazione di massa contenuta in un serbatoio, nell’ambito di un dato intervallo temporale, misurando la variazione di forza peso. In sala è presente il sistema AVL 733S (Figura 2.17) che si avvale di un serbatoio di misura sospeso su un sistema a bilancia con due bracci e

contrappesi fissi. Il dispositivo è dotato di un sistema automatico di lettura del consumo massico, attraverso il rilevamento del moto dei bracci con sensore capacitivo. La misurazione del consumo viene programmata, ed il risultato acquisito, attraverso comunicazione seriale.

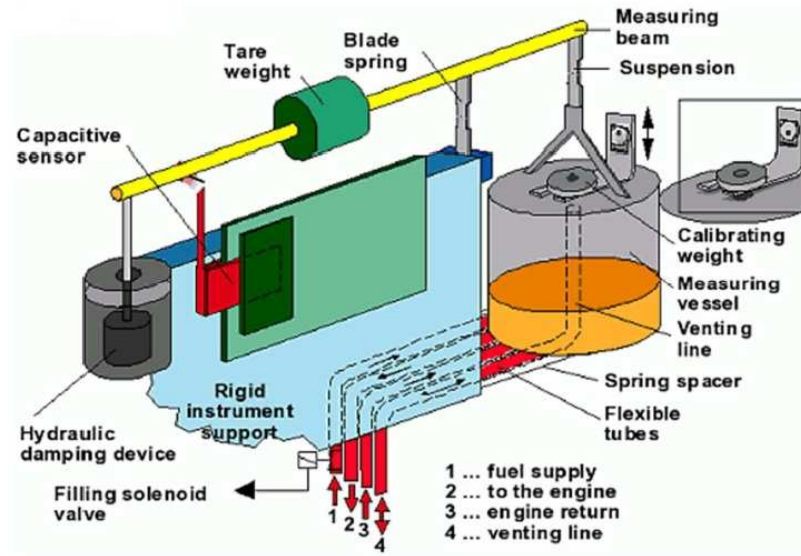


Figura 2.17 Principio di funzionamento bilancia AVL

2.6 Scambiatori

Come anzidetto, per quanto riguarda il lato acqua, si sono utilizzati due scambiatori in serie posti direttamente sul castelletto motore (quelli blu nell'immagine di sinistra di Figura 2.18).

Per il lato aria è stato montato l'intercooler originale, disposto lateralmente al motore affacciato ad un ventilatore.

In sala motore ci sono due ventilatori, uno per l'intercooler (1 di Figura 2.18) ed uno per il raffreddamento generale del motore e dell'impianto di scarico (2 di Figura 2.18). Entrambi sono controllati da remoto tramite due inverter (paragrafo seguente 2.6.1) posizionati direttamente sulla loro carcassa. Per garantire la corretta circolazione d'aria all'interno della sala motore utilizziamo il sistema d'areazione presente nel laboratorio.



Figura 2.18 Scambiatori e ventilatori

2.6.1 Inverter

I ventilatori presenti in sala erano originariamente sprovvisti di inverter e quindi funzionavano a velocità costante. L'utilizzo di tali apparecchi, per simulare il vento di corsa sull'intercooler e sul motore in genere, ha reso necessario la variazione delle frequenze di rotazione dei motori elettrici. Il modello d'inverter utilizzato è il Danfoss MicroDrive VLT FC51 (Figura 2.19). In base alle caratteristiche del motore elettrico, tra la vasta gamma di modelli, è stato scelto il 132F-0007. L'inverter scelto, oltre ad essere molto compatto e quindi facilmente installabile sulla struttura del ventilatore, è caratterizzato da una potenza di 2,2 kW e una corrente massima di assorbimento pari a 9,6 A. L'inverter può lavorare sia in orizzontale che in verticale, l'unico accorgimento che bisogna utilizzare è di lasciare circa 10 centimetri di spazio libero dalla presa d'aria inferiore e dall'uscita aria superiore.

In Appendice B vengono riportate le specifiche tecniche.



Figura 2.19 Danfoss MicroDrive VLT FC51

Per prima cosa l'alimentazione del motore elettrico è stata modificata da 380 V a 220 V agendo sullo schema stella/triangolo.

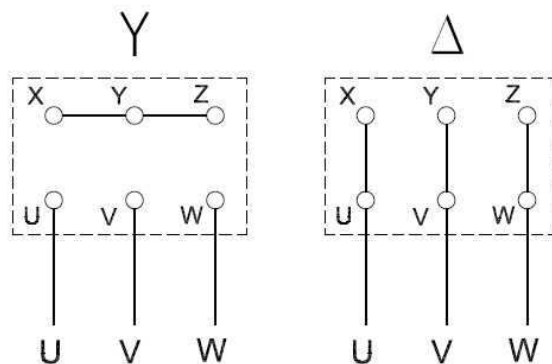


Figura 2.20 Connessioni Stella - Triangolo

Per il collegamento dell'inverter è necessario innanzitutto verificare che la sezione dei cavi di rete/cavi motore non sia superiore a 4/10 [mm²/AWG]. E' opportuno inoltre utilizzare un cavo motore schermato/armato e collegarlo alla parte metallica del motore e alla messa a terra dell'inverter (Figura 2.21). Il cavo motore deve essere mantenuto il più corto possibile per ridurre al minimo il livello dei disturbi e le correnti di dispersione.

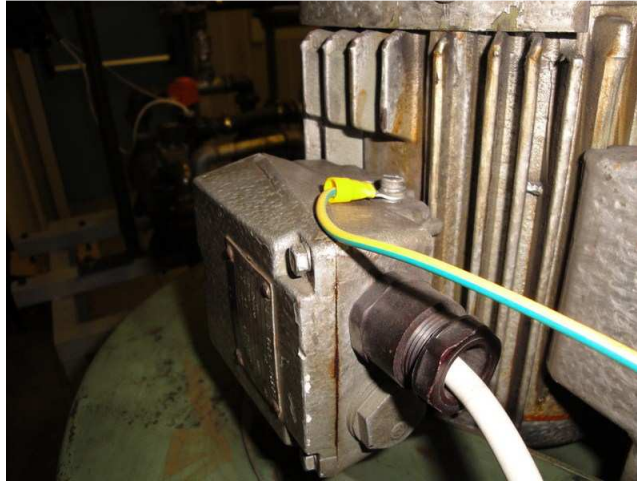


Figura 2.21 Messa a terra

A questo punto, seguendo le istruzioni per l'installazione dell'inverter, sono stati realizzati i collegamenti di rete (Figura 2.22), dal quadro elettrico della sala all'inverter, monofase 220 V) e del motore (Figura 2.23, dall'inverter al motore, trifase 220V). Le operazioni da eseguire sono:

- collegare i conduttori di terra (cavi verde-giallo) al morsetto di terra;
- collegare il motore ai morsetti U,V e W;
- collegare l'alimentazione di rete ai morsetti L1/L e L3/N e stringere.



Figura 2.22 Collegamento di rete

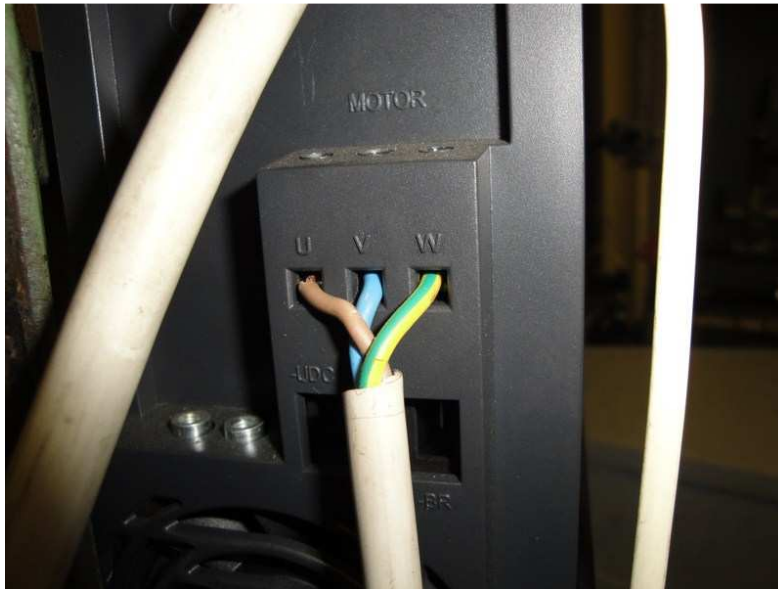


Figura 2.23 Collegamento motore

L'inverter può essere comandato sia manualmente, tramite LCP, che tramite i morsetti di controllo situati sotto il coprimorsetti nella parte anteriore.

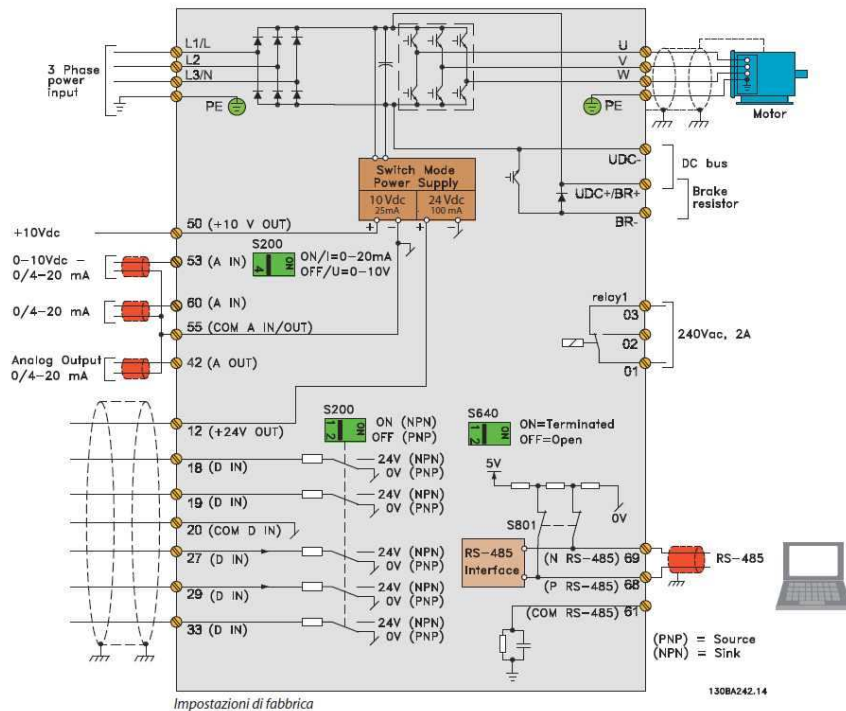


Figura 2.24 Morsetti e connessioni elettriche interne

Se si vuole comandare l’inverter attraverso l’LCP basta, una volta alimentato, premere il tasto [Hand On]. L’inverter parte raggiungendo la frequenza di rotazione memorizzata dall’ultimo avviamento (opzione modificabile). La frequenza massima è data dal rapporto:

$$\frac{\text{Velocità massima motore in rpm}}{60} = \text{Hz}$$

Otteniamo quindi, per il ventilatore presente in sala, una frequenza massima di circa 46 Hz.

Attraverso la pressione del tasto [Menu] è possibile poi spostarsi tra:

- Stato;
- Menu rapido;
- Menu principale.

Le frecce [▲][▼] servono per spostarsi tra i vari parametri e, in modalità “Stato” permettono di modificare, durante il funzionamento, la frequenza di rotazione. All’interno del menu rapido principale è possibile visualizzare moltissimi parametri e le relative impostazioni. In particolare, attraverso il menu rapido, sono state modificate le impostazioni dei tempi della rampe di accelerazione e decelerazione (Quick Menu, Parametri 3-41 e 3-42) così che l’avvio e l’arresto (attraverso il tasto [Off/reset]) siano meno bruschi e pericolosi per il motore. Infine, attraverso il tasto [Auto on] il convertitore di frequenza è controllato tramite morsetti di controllo o comunicazione seriale. L’applicazione di Avviamento (morsetto 18 e terra sul 20 di Figura 2.25) e di un riferimento analogico (morsetto 53 o 60 e terra sul 55 di Figura 2.25) avvia il convertitore di frequenza (ingresso 0-10 V corrispondente a 0-100% in termini di velocità della girante).

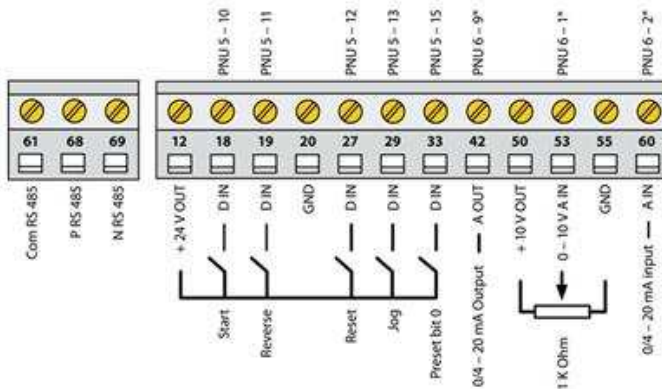


Figura 2.25 Morsetti di controllo

2.7 Cablaggio elettrico

Un componente di primaria importanza per il funzionamento di un motore è il cablaggio elettrico. Il componente principale di questo sistema è ovviamente la centralina motore, anche detta ECU (Engine Control Unit).

Il cablaggio elettrico può essere visto come due matasse di cavi: una ECU → veicolo e l'altra ECU → motore. La prima, a sua volta, può essere schematizzata con cinque diramazioni alle estremità:

1. Connettore centralina lato veicolo;
2. Alimentazione scatola fusibili;
3. Alimentazione e controllo pompa dell'acqua;
4. Sonde Lambda;
5. Sensore olio.

Ciascun ramo a sua volta può avere più derivazioni, tutte comunque sempre numerate e ben riconoscibili (vedi oltre).

È stato necessario allungare la briglia principale di collegamento tra vettura e motore da circa 6m a circa 12m, per poter garantire la connessione alla vettura parcheggiata esternamente.

2.7.1 Centralina motore

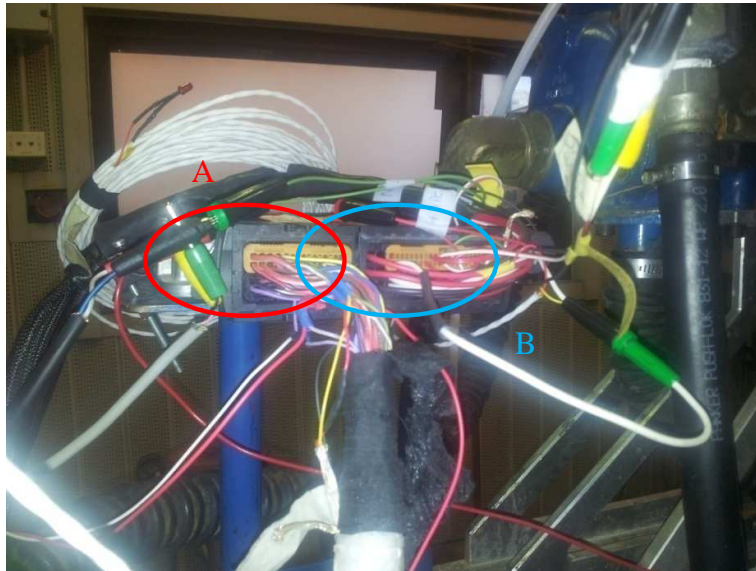


Figura 2.26 Connettori centralina

La centralina motore ha due connettori “maschi”, uno lato motore (A in Figura 2.26) ed uno lato veicolo (B in Figura 2.26), quello che arriva, tramite la briglia, direttamente dalla vettura. Nelle matasse di cavi di ciascun connettore, sono presenti parecchie diramazioni atte ad “entrare” od “uscire” con uno specifico segnale.

- **Connettore centralina lato motore**

Si tratta del connettore “femmina” che va collegato nella rispettiva sede della centralina. Oltre a questo, nella matassa di cavi che gli fanno capo, possiamo evidenziare alcuni “cavi ruba corrente” che ci consentono di acquisire alcuni importanti segnali.

1. Capteur de regime: “Capteur de regime” è la dicitura dell’etichetta che fa capo al cavo del sensore “effetto Hall” per acquisire il segnale di posizione della ruota fonica calettata sull’albero motore;
2. Allumage CYL1 e CYL4: sono i segnali di comando delle bobine di accensione dei cilindri 1 e 4;
3. A27 masse potentiometre volet admission e A59 signal volet admission: si tratta del segnale on/off della posizione delle valvole “tumble flaps”.

- **Connettore centralina lato veicolo**

Questo è l’altro connettore “femmina” che va collegato alla centralina. Anche nella parte di cablaggio alla cui sommità troviamo questo connettore, troviamo alcuni cavi:

1. Compresseur: è un cavo al cui capo è posto un led rosso che indica l'attacco/stacco del compressore volumetrico;
2. Pedale S1 ed S2, pedale masse S1 ed S2: sono i 4 cavi che vengono utilizzati per simulare in ingresso alla centralina i segnali potenziometrici di posizione del pedale dell'acceleratore. Ai cavi fanno capo 4 connettori "maschio": 2 neri per le masse, uno giallo per la pista S1 ed uno verde per la S2.

I potenziometri pedale sono quindi due, in ridondanza, le cui caratteristiche sono riportate in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.:**

CARATTERISTICA PEDALE		
	Pista1	Pista2
0%	700mV	350mV
100%	4000mV	2000mV

Tabella 2.1 Caratteristica pedale

3. Vehicule: questa etichetta la troviamo due volte in altrettanti connettori "femmina", uno verde per la S1 ed uno giallo per la S2. Chiudendo i rispettivi circuiti (connettore maschio S1 con femmina S1 e connettore maschio S2 con femmina S2) si può utilizzare il pedale che fisicamente si trova montato ancora sulla vettura.
4. LINEA CAN (Controlled Area Network): la linea CAN è un protocollo BUS (il bus è un canale che permette a periferiche e componenti del sistema di "dialogare" tra loro) sviluppato nel 1986 in Germania, presso la Robert Bosch GmbH. Il CAN è un bus seriale progettato per reti interne al veicolo; dal punto di vista elettrico adotta una coppia di fili incrociati per la comunicazione ed è stato espressamente progettato per offrire una soluzione affidabile anche in ambienti rumorosi e sottoposti ad interferenze di tipo elettromagnetico.

Nel nostro cablaggio troviamo due spinotti femmina, uno rosso ed uno verde ai quali ci connettiamo con INCA (programma di Etas che ci permette di effettuare diagnosi centralina ed in generale di analizzare la miriade di informazioni che scorrono nella linea CAN).

Peraltro sfruttiamo questo canale per comunicare alla centralina un valore simulato della velocità del veicolo: la ECU, per funzionare, vuol "vedere" che il veicolo sia in movimento e, grazie a questo canale dati, entriamo con un plausibile andamento di velocità, funzione del carico (farfalla) e dei giri motore.

5. +APC: a questo nome fanno capo i due cavi con altrettanti connettori ("maschio" rosso chiamato +APC KEY ON e "femmina" rosso) per la chiave. Lasciando scollegato questo circuito ed

alimentando con +13.5V il connettore “maschio”, ci sostituiamo al giro di chiave. In pratica questo connettore andrà inserito in uno dei connettori “femmina” rossi presenti sulla scatola alimentazioni (vedi Figura 2.8).

2.7.2 Alimentazione scatola fusibili

La scatola fusibili si trova all'interno del cofano motore e vi trovano allocazione tutti i fusibili per la protezione delle utenze elettriche del motore. Alimentiamo tale dispositivo con due cavi di sezione 6 mm^2 direttamente dall'alimentatore in sala di controllo.

2.7.3 Alimentazione e controllo pompa dell'acqua



Figura 2.27 Pompa acqua

La pompa dell'acqua è situata sul ramo “caldo” del circuito di raffreddamento e cioè quello che esce dal motore ed entra nel radiatore (negli scambiatori acqua- acqua in questo caso). Occorre portargli l'alimentazione tramite i cavi a questa dedicati.



Figura 2.28 Connettore controllo pompa acqua

In Figura 2.28 è riportata un'immagine dei cavi che dalla briglia cablaggio elettrico, vanno al connettore per il controllo della pompa dell'acqua. Questo connettore è una diramazione della matassa di cavi che dal motore arrivano alla centralina (connettore lato motore, A in Figura 2.26).

2.7.4 Sonde Lambda

Il GDI è dotato di due sonde Lambda HEGO (Heated Exhaust Gas Oxygen Sensor), a valle ed a monte del catalizzatore. A ciascuna di esse occorre far arrivare i 4 fili che gli competono (i fili ed i connettori sono numerati).

2.7.5 Sensore olio

Il sensore di temperatura dell'olio è situato sul fondo del carter ed occorre portare al suo connettore i tre cavi che giungono dal veicolo.

2.8 Sensori e strumentazione

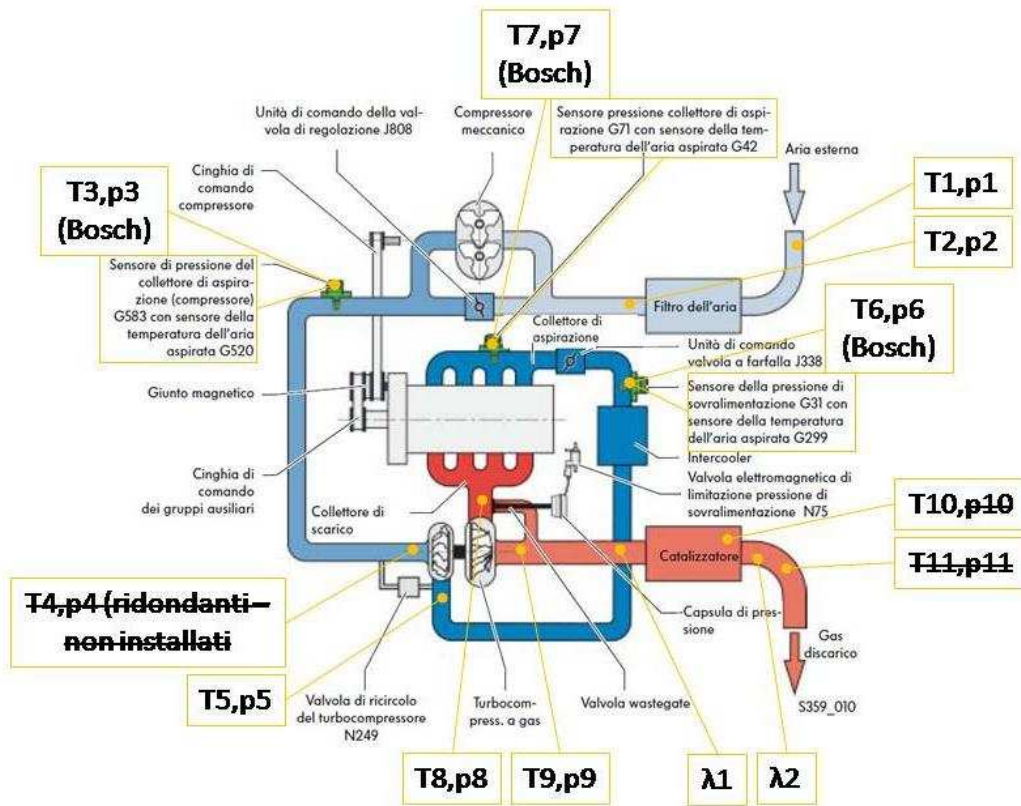


Figura 2.29 Sensori

Il motore è arrivato parzialmente strumentato, alcuni dei sensori che si utilizzano sono quelli montati di serie sulla vettura, per la maggior parte però, sono stati installati al DIEM. Si descriverà l'allestimento seguendo il percorso aria all'interno del motore (Figura 2.29).

In Tabella 2.2 sono elencati i sensori e, sinteticamente, le relative caratteristiche.

La colonna "PREDISP." riporterà un "NO" in caso non sia predisposta la presa per quel sensore. "FORNITO" indica se sia stato fornito o se ne debba essere messo a disposizione uno da parte del DIEM. "Vin" e "Vout" rappresentano le tensioni in ingresso ed uscita; "f" è la frequenza di campionamento: L=LOW e H=HIGH (circa 100khz).

Nella colonna "TIPO" si trova la dicitura "ECU" quando si vuole indicare un sensore di serie della vettura.

	SENSORE	PREDISP.	FORNITO	TIPO	RANGE	INFO	Vin	Vout	f	COND.	NOTE
1	Termocoppia (T1)	NO	NO	K	-200÷1260 °C	Tamb	X	X	L	NO	
2	Sensore di pressione (p1)	NO	NO	DRUCK	0÷5 bar	pamb	12	0.2÷4.7	L	NO	
3	Termocoppia (T2)	NO	NO	K	-200÷1260 °C	Tair=Te _{v_i}	X	X	L	NO	
4	Sensore di pressione (p2)	SI	NO	Honeywell 0-15 psi relativi	0÷1 bar (rel)	Fair=Pe _{v_i}	12	0.5÷4	L	SI	
5	MAF	NO	NO			MAF					NON C'E'
6	Sensore di temperatura (T3)	SI	SI	ECU		Te _{v_o} =Te _{c_i}					
	Sensore di pressione (p3)	SI	SI	ECU		pe _{v_o} =pe _{c_i}					
X	Termocoppia (T4)	X	X	X	X	Te _{w_o} =Te _{w_i}	X	X	X	NO	RIDONDANTE
	Sensore di pressione (p4)	X	X	X	X	pe _{w_o} =pe _{w_i}	X	X	X	NO	RIDONDANTE
7	Termocoppia (T5)	SI	SI	K	-200÷1260 °C	Te _o	X	X	L	NO	
8	Sensore di pressione (p5)	SI	NO	DRUCK	0÷4 bar	pe _o	12	0.2÷4.7	L	NO	VEDI 2 PAG PRIMA
9	Sensore di temperatura (T6)	SI	SI	ECU		Th _i					
	Sensore di pressione (p6)	SI	SI	ECU		ph _i					
	Sensore di temperatura (T7)	SI	SI	ECU		Th _o					
10	Sensore di pressione (p7)	SI	SI	ECU		ph _o					
11	Termocoppia (T8)	SI	SI	K	-200÷1260 °C	Tt _i	X	X	L	NO	
12	Sensore di pressione (p8)	SI	NO	KISTLER 0-5 bar abs con camicia di raffreddamento	0÷5 bar (assoluti) ALTA T	pt _i	220	0÷10	H	SI	
13	Termocoppia (T9)	SI	SI	K	-200÷1260 °C	Tt _o	X	X	L	NO	OK LI DOVE
14	Sensore di pressione (p9)	SI	NO	Honeywell 0-15 psi relativi	0÷1 bar (relativi) ALTA T	pt _o	12	0.5÷4	L	SI	
15	Termocoppia (T10)	SI	SI	K	-200÷1260 °C	Tcat	X	X	L	NO	
16	Sensore di pressione (p10)	SI	NO	Honeywell 0-15 psi relativi	0÷1 bar (relativi) ALTA T	peat	12	0÷5	L	SI	NON IMPORTANTE
17	Termocoppia (T11)	?	?		50-600°C	Tsoa	X	X	L	NO	NON IMPORTANTE
18	Sensore di pressione (p11)	?	?	Honeywell 0-15 psi relativi	0÷1 bar (relativi)	psca	12	0÷5	L	SI	NON IMPORTANTE
19	Sensore di pressione (pvel1)	SI	SI			paep1			H		NON IMPORTANTE
20	Sensore di pressione (pvel2)	SI	SI			paep2			H		NON IMPORTANTE
21	Sensore di pressione (pvel3)	SI	SI			paep3			H		NON IMPORTANTE
22	Sensore di pressione (pvel4)	SI	SI			paep4			H		NON IMPORTANTE
23	Sensore di pressione (p cyl1)	SI	SI			pcyl1			H		
24	Sensore di pressione (p cyl2)	SI	SI			pcyl2			H		
25	Sensore di pressione (p cyl3)	SI	SI			pcyl3			H		
26	Sensore di pressione (p cyl4)	SI	SI			pcyl4			H		
27	Sensore di pressione (p rail)	SI	SI			prail			H	SI	SOSTITUIRE
28	Termocoppia (Tf)	SI	SI	K	-200÷1260 °C	Tf	X	X	L	NO	
29	Termocoppia (Tw1)	SI	SI	K	-200÷1260 °C	Tw ₁	X	X	L	NO	
30	Termocoppia (Two)	SI	SI	K	-200÷1260 °C	Tw _o	X	X	L	NO	
31	Sonda λ (λ1)	SI	SI	ECU		λ1					
32	Sonda λ (λ2)	SI	SI	ECU		λ2					
33	Posizione/Tumble Flaps	SI	SI	ECU							ON/OFF
34	Sensore di pressione (p oil)	SI	NO			poil					Flangia in alto a DX
35	Compressore ON/OFF	NO	SI	ECU							Comp. ON → LED ON
36	Manometro	SI	NO		0÷5 bar	pf	X	X		NO	4.5bar

Tabella 2.2 Caratteristiche sensori

Direttamente sull'airbox si sono ricavate due prese per installare una termocoppia di tipo K (T1 in Figura 2.29) ed un sensore di pressione DRUCK (p1 in Figura 2.29) con campo d'utilizzo 0÷5 bar.

A valle del filtro dell'aria si è quindi installato una seconda termocoppia di tipo K (T2 di Figura 2.29) ed un sensore di pressione Honeywell 0÷15 psi relativi.

Proseguendo il percorso dell'aria si incontrano i sensori T3 e p3 di Figura 2.29, che sono quelli Bosch, montati di serie sulla Golf. Si tratta del sensore di pressione del collettore d'aspirazione (a valle del compressore volumetrico, G583 di Figura 2.30) e del sensore di temperatura dell'aria aspirata (nella stessa sezione, G520 di Figura 2.30).

Sensore di pressione del collettore di aspirazione (compressore) G583 con sensore della temperatura dell'aria aspirata G520

Questo sensore combinato è avvitato dietro al compressore ovvero dietro all'unità di comando della valvola di regolazione. Esso misura in questa zona la pressione e la temperatura dell'aria aspirata.

Utilizzo del segnale

Il controllo della pressione di sovralimentazione del compressore si svolge sulla base dei segnali tramite l'unità di comando della valvola di regolazione. Contemporaneamente il segnale del sensore della temperatura dell'aria aspirata serve a proteggere i componenti da temperature troppo elevate. A partire da una temperatura di 130 °C la potenza del compressore viene limitata.

Conseguenze in caso di perdita del segnale

In caso di avaria al sensore combinato non è più possibile alcun controllo della pressione di sovralimentazione del compressore. Viene disabilitato il funzionamento del compressore meccanico e il turbo



Sensore di pressione del collettore di aspirazione G583 con sensore della temperatura dell'aria aspirata G520 5359_049

compressore a gas di scarico funziona soltanto in base a una mappatura fissa. Le prestazioni del motore ai bassi regimi diminuiscono notevolmente.

Figura 2.30 G583 e G520

Per quanto riguarda la pressione e la temperatura di sovralimentazione (p_5 e T_5) si è installato, a valle del compressore centrifugo ed a monte dell'intercooler, una termocoppia di tipo K ed un sensore di pressione DRUCK 0÷4 bar.

Subito a valle dell'intercooler, a monte della valvola a farfalla, si sfruttano i sensori di pressione di sovralimentazione (G31 di Figura 2.31) e temperatura dell'aria aspirata (G299 di Figura 2.31) Bosch.

Sensore della pressione di sovralimentazione G31 con sensore della temperatura dell'aria aspirata 2 G299

Questo sensore combinato è avvitato di poco a monte dell'unità di comando valvola a farfalla nel tubo di sovralimentazione. Esso misura pressione e temperatura in questa zona.

Utilizzo del segnale

Il segnale del sensore della pressione di sovralimentazione viene utilizzato dalla centralina motore per la regolazione della pressione di sovralimentazione del turbocompressore attraverso la valvola elettromagnetica di limitazione pressione di sovralimentazione. Con il segnale del sensore della temperatura dell'aria aspirata viene calcolato un parametro di correzione per la pressione di sovralimentazione. In tal modo si tiene conto dell'incidenza della temperatura sulla densità dell'aria di sovralimentazione.



Sensore della pressione di sovralimentazione G31 con sensore della temperatura dell'aria aspirata 2 G299 S359_062

Conseguenze in caso di perdita del segnale

In caso di avaria al sensore il turbocompressore funziona soltanto in base a una mappatura fissa. In caso di perdita di ulteriori sensori è possibile che venga disabilitato il compressore.

Figura 2.31 G31 e G299

Anche per la pressione del collettore di aspirazione (G71 di Figura 2.32) e la temperatura in questo tratto (G42 di Figura 2.32) si utilizzano i sensori forniti con la vettura.

Sensore di pressione del collettore di aspirazione G71 con sensore della temperatura dell'aria aspirata G42

Questo sensore combinato è avvitato nel collettore di aspirazione in plastica e misura la pressione e la temperatura nel collettore di aspirazione stesso.

Utilizzo del segnale

Dai segnali e dal regime motore la centralina motore calcola la massa d'aria aspirata.

Conseguenze in caso di perdita del segnale

In caso di perdita del segnale vengono utilizzate come segnale sostitutivo la posizione della valvola a farfalla e la temperatura del sensore della temperatura dell'aria aspirata G299.

Il turbocompressore funziona soltanto secondo una mappatura fissa. Se saltano ulteriori sensori, il com-



Sensore pressione del collettore di aspirazione G71 con sensore temperatura aria aspirata G42 S359_047

pressore può essere disattivato.

Figura 2.32 G71 e G42

Si sono inoltre installati un'altra termocoppia di tipo K a monte della turbina (T8 di Figura 2.29) ed un sensore di pressione KISTLER 0÷5 bar con camicia di raffreddamento (p8 di Figura 2.29), per la rilevazione delle grandezze nel condotto di scarico. Allo stesso modo, a valle della turbina, sono stati posizionati una termocoppia di tipo K (T9 di Figura 2.29) ed un sensore di pressione Honeywell 0÷15 psi relativi (p9 di Figura 2.29).

Infine si è installato una termocoppia di tipo K nel catalizzatore (T10 di Figura 2.29).

Peraltro si può notare dalla Figura 2.29 la presenza di due sonde λ (lambda) di tipo HEGO.

- La sonda lambda e le diverse tipologie [5]

La sonda lambda è un trasduttore della pressione parziale di ossigeno contenuto nei gas di scarico: è in grado di generare un segnale elettrico in funzione della concentrazione di ossigeno nei gas di scarico (viene così chiamata poiché si è soliti indicare con la lettera λ l'eccesso d'aria).

La correlazione tra concentrazione di ossigeno e segnale elettrico dipende dalla tipologia della sonda, si distinguono pertanto tre tipi:

- la EGO (Exhaust Gas Oxygen sensor) è un sensore di tipo isterico: il segnale elettrico generato (uscita) è di tipo a gradino, caratterizzato cioè da una transizione del segnale, in corrispondenza di $\lambda = 1$, tra il valore di tensione corrispondente a miscele grasse, circa pari a 0,9 V, e quello relativo a miscele magre, circa pari a 0,09 V (il valore di tensione generata cambia di un fattore 10);
- la HEGO (Heated Exhaust Gas Oxygen sensor), il cui principio di funzionamento è identico alla EGO con l'unica differenza di essere pre-riscaldata da una resistenza interna;
- la UEGO (Universal Exhaust Gas Oxygen sensor) è di tipo lineare: il segnale elettrico generato (uscita) ha andamento lineare in funzione della concentrazione di ossigeno nei gas di scarico per cui, in base al valore di tensione è possibile risalire al valore effettivo di AFR.

L'adozione di una sonda lambda isterica provoca l'oscillazione di AFR nell'intorno del valore stechiometrico, data l'impossibilità di confrontare istantaneamente la massa di combustibile iniettato con il segnale proveniente dalla sonda lambda, relativo al valore AFR effettivo; con sonde di tipo EGO/HEGO è dunque possibile ottenere una miscela continuamente oscillante attorno al valore stechiometrico (si dovrà agire unicamente sull'entità della correzione della massa di combustibile per ottenere un'ampiezza di oscillazione adeguata al funzionamento del catalizzatore).

La sonda lambda lineare permette invece di centrare il titolo della miscela al valore voluto, che non è necessariamente quello stechiometrico ma può essere qualunque, senza che si verifichino oscillazioni di AFR nell'intorno di tale valore. L'adozione di una sonda di tipo UEGO in un motore dotato di catalizzatore TWC (Tree Way Catalyst) comporta la necessità di indurre l'oscillazione della miscela da parte del sistema di controllo; il vantaggio dell'impiego della sonda lineare risiede nella possibilità di raggiungere un valore qualsiasi del rapporto A/F: ad esempio, quando vi è richiesta di una maggiore prestazione del motore si può pensare di spostare AFR ad un valore grasso.

Per quanto riguarda invece la differenza tra la sonda di tipo EGO e quella di tipo HEGO, questa è legata al fatto che, per poter funzionare, la sonda lambda deve raggiungere temperature prossime ai 300÷400°C: mentre la EGO viene riscaldata dai soli gas di scarico, la HEGO presenta una resistenza elettrica in grado di diminuire il tempo necessario per

raggiungere la temperatura di regime, riducendo il transitorio seguente l'avviamento, in cui la sonda lambda non è in grado di generare il segnale elettrico.

- La termocoppia [6]

La termocoppia è un sensore di temperatura largamente diffuso. In particolare le termocoppie sono ampiamente utilizzate perché economiche, facilmente sostituibili, standardizzate e possono misurare un ampio intervallo di temperature.

Il loro limite più grande è l'accuratezza, infatti errori sistematici minori di un grado Celsius sono difficili da ottenere. Inoltre le termocoppie sono dei dispositivi non lineari, nonostante il loro vasto utilizzo. Un gruppo di termocoppie poste in serie viene detto termopila.

1. Principio di funzionamento

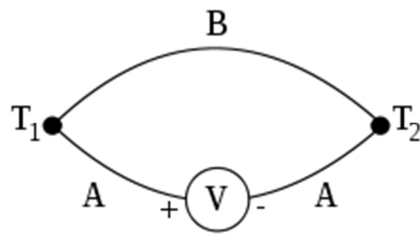


Figura 2.33 Circuito termocoppia

Nel 1821 Thomas Johann Seebeck, un fisico di provenienza estone, scoprì che in un circuito formato da due conduttori di natura differente, sottoposto a un gradiente di temperatura, si instaura una differenza di potenziale. Questo fenomeno, chiamato effetto Seebeck è sfruttato dalle termocoppie.

Il fenomeno non può sussistere in un circuito formato da un solo conduttore omogeneo.

Una termocoppia, quindi, è costituita da una coppia di conduttori elettrici di diverso materiale uniti tra loro in un punto.

Questa giunzione è convenzionalmente chiamata giunto caldo o giunzione calda, ed è il punto nel quale viene applicata la temperatura da misurare.

L'altra estremità, costituita dalle estremità libere dei due conduttori, è convenzionalmente chiamata giunto freddo o giunzione fredda.

Quando esiste una differenza di temperatura tra la zona del giunto caldo e la zona del giunto freddo, si può rilevare una differenza di potenziale elettrico tra le estremità libere della termocoppia in corrispondenza del giunto freddo.

Tale valore di potenziale elettrico è funzione diretta della differenza di temperatura, secondo una legge non lineare (vedi sotto).

Nella pratica, ad esempio negli impianti industriali, la termocoppia è inserita all'interno di una guaina di protezione che penetra all'interno dell'apparecchiatura della quale si vuole misurare la temperatura. Subito all'esterno, i due conduttori sono connessi ad una morsettiera di porcellana contenuta dentro una testina di protezione. Da questo punto, altri due conduttori elettrici di metallo uguali a quelli della termocoppia prolungano il collegamento elettrico fino ad una sala controllo centralizzata, e vengono collegati alla morsettiera di uno strumento indicatore o registratore di temperatura.

In tal modo il giunto freddo si trova fisicamente sottoposto alla temperatura presente su tale morsettiera.

Questa temperatura viene misurata tramite un termistore o una termoresistenza e utilizzata, all'interno dello strumento, per correggere elettricamente il segnale proveniente dalla termocoppia.

In questo modo, qualsiasi sia la temperatura presente in tale zona, è come se il giunto freddo si trovasse alla temperatura di 0 °C. Quest'azione si chiama compensazione della temperatura ambiente ed assicura la massima precisione di misura.

Lo strumento misuratore avrà sulla sua scala o sul suo display l'indicazione direttamente in gradi Celsius (e non in mV), in quanto al suo interno esistono sistemi che tengono conto anche della non linearità del segnale in ingresso.

2. Altri effetti termoelettrici

In realtà altri due effetti, effetto Peltier e effetto Thomson, dovrebbero essere presi in considerazione. Infatti se si lascia fluire corrente in un circuito per termocoppie (anche se questo non è il caso tipico dei dispositivi di misura industriale), i processi di conversione dell'energia termoelettrica provocheranno effetti di riscaldamento o raffreddamento. L'effetto Peltier è concentrato nelle giunzioni, mentre l'effetto Thomson è distribuito lungo i fili. Questi fenomeni innalzano e abbassano le temperature dei fili rispetto ai valori che

avrebbero senza circolazione di corrente. Fortunatamente per i metalli tipicamente usati gli effetti sono sufficientemente piccoli da poter essere trascurati.

3. Relazione tra temperatura e differenza di potenziale

La relazione tra la differenza di temperatura e la differenza di potenziale prodotta non è lineare. Essa può essere approssimata dalla seguente equazione polinomiale: $\Delta T = \sum_{n=0}^N a_n V^n$.

I valori a_n variano in relazione ai materiali utilizzati. A seconda della precisione desiderata, è possibile scegliere N compreso tra 5 e 9.

4. Tipi di termocoppia

Esiste una grande varietà di termocoppie, distinguibili in base ai due conduttori elettrici che compongono la giunzione ed al campo di applicazione (industriale, scientifico, alimentare, medico, ecc.).

5. Tipo K (Chromel (Ni-Cr) (+)/Alumel (Ni-Al) (-))

Sono termocoppie di uso generale, economiche e disponibili in una grande varietà di formati. Il loro intervallo di misura va da -200 °C a 1260 °C. La sensibilità è di circa 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

6. Tipo J (Ferro (+)/Costantana (Cu-Ni) (-))

Il loro intervallo di misura va da -40 °C a 750 °C ed essendo più limitato del tipo K, le rende meno diffuse di queste ultime. Sono utilizzate in vecchi apparati che non funzionano con il tipo K. Le termocoppie tipo J sono caratterizzate da un basso costo ed una notevole sensibilità (51,7 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$), ma non possono essere utilizzate sopra i 760 °C a causa di una transizione magnetica che fa perdere loro la calibrazione.

7. Tipo T (rame (+)/Costantana (Cu-Ni) (-))

Presentano caratteristiche simili alle termocoppie in ferro/costantana (tipo J).

Presentano una sensibilità di 48,2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Utilizzabili nell'intervallo di temperature comprese tra -200 °C e 400 °C.

8. Tipo E (Chromel (+)/Costantana (Cu-Ni (-)))

Hanno una elevata sensibilità ($68 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) che le rende adatte ad applicazioni a bassa temperatura (criogeniche). Sono inoltre amagnetiche.

9. Tipo N (Nicrosil (Ni-Cr-Si) (+)/Nisil (Ni-Si (-)))

L'intervallo di misura utile è compreso tra i 650°C e i 1250°C . La loro stabilità e la resistenza all'ossidazione a caldo le rendono un ottimo sostituto a basso costo delle termocoppie a base di platino (tipi B, R, S) per le misure di alta temperatura.

Progettate per essere una evoluzione del tipo K, sono oggi giorno sempre più popolari.

Le termocoppie B, R, S, sono tutte composte da metalli nobili ed hanno caratteristiche simili. Sono le più stabili fra le termocoppie, ma la loro bassa sensibilità ($10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) ne limita l'uso a misure di alte temperature ($>300^\circ\text{C}$).

10. Tipo B (platino - 30% rodio (+)/platino-6% rodio (-))

Adatte per alte temperature, fino a 1800°C . A causa della particolare relazione tensione-temperatura che le caratterizza, forniscono la stessa differenza di potenziale a 0°C ed a 42°C . Sono perciò inutili al di sotto di 50°C .

11. Tipo R (platino - 13% rodio (+)/platino (-))

Adatte per alte temperature fino a 1600°C .

12. Tipo S (platino - 10% rodio (+)/platino (-))

Adatte per alte temperature fino a 1600°C . Grazie alla loro particolare stabilità, sono utilizzate come standard di calibrazione per il punto di fusione dell'oro ($1064,43^\circ\text{C}$).

Le termocoppie vanno scelte in base al valore di temperatura media da misurare.

Se la temperatura è relativamente bassa si useranno termocoppie dall'elevato coefficiente termoelettrico come ad esempio il tipo J (ferro-costantana).

In questi casi infatti, termocoppie meno sensibili avrebbero un segnale in uscita piuttosto scarso, difficile da trattare in modo preciso.

Per temperature più alte si potranno usare invece ad esempio le termocoppie K (chromel-alumel) o addirittura quelle tipo R (platino-platino/rodio) che però sono molto costose.

Come già detto, la termocoppia viene isolata dal processo tramite una guaina di protezione. La guaina introduce un ritardo nella misura per variazioni rapide di temperatura e di ciò si tiene conto in fase di progettazione.

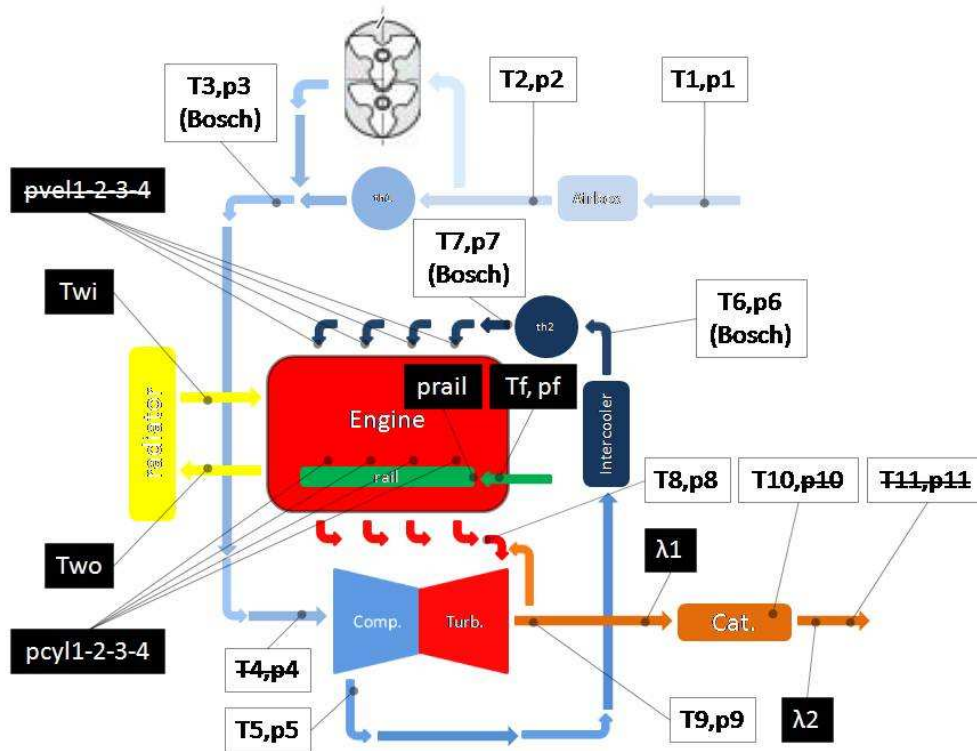


Figura 2.34 Sensoristica

La lista dei sensori installati sul GDI prosegue facendo riferimento alla Figura 2.34. Come si può notare sono state montate due termocoppie per controllare la temperatura dell'acqua: T_{wi} in ingresso (motore) e T_{wo} in uscita (ramo "caldo").

La testata del motore è poi stata debitamente lavorata per accogliere dei sensori di pressione in camera di combustione ($pcy11-2-3-4$). Sono dei Kistler di tipo piezoelettrico. Siamo in grado inoltre di monitorare gli andamenti della pressione e temperatura del combustibile (pf e Tf), termocoppia e manometro rilevano le grandezze direttamente nel ramo di mandata della pompa di bassa pressione (cerchiati di rosso in Figura 2.15). Direttamente sulla cannetta che collega pompa di alta pressione al rail è montato un ulteriore sensore di pressione ($prail$).

- Smoke meter

Lo smoke meter installato è visibile in Figura 2.35, è l'AVL 415S.

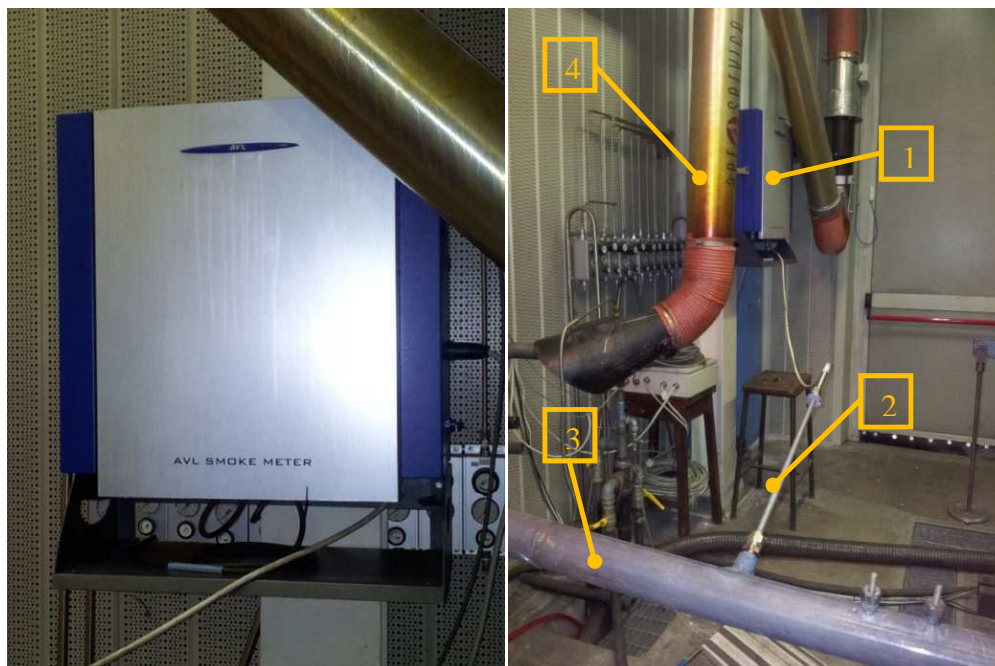


Figura 2.35 Smoke Meter

Lo smoke meter è uno strumento per la misura del “soot” o particolato carbonioso. Il soot è una polvere nera (essenzialmente carbonio incombusto amorfo, più tracce di altri composti) che si può ottenere come sottoprodotto della combustione incompleta di una qualsiasi sostanza organica. L'unità di misura è FSN (Filter Smoke Number) o mg/m^3 (concentrazione).

Lo strumento (1 di Figura 2.35) è stato installato a valle dell'impianto d'aspirazione mobile (4 di Figura 2.35) ed effettua la misura attraverso un'opportuna presa, ricavata nell'impianto di scarico (3 di Figura 2.35), per la “bacchetta” di misura (2 di Figura 2.35).

Tale misura è interessante in quanto ci interessa valutare la differenza dei due sistemi di controllo, quello originale ed il nostro, anche in termini di particolato carbonioso.

Principio di misura [7]

Un campione di gas è preso dalla linea di scarico e fatto passare attraverso un filtro di carta (composto di fibre di cotone). L'annerimento del filtro di carta che ne consegue è quindi misurato con un riflettometro e indica il contenuto di soot nei gas di scarico.

L'annerimento del filtro di carta dipende dalla concentrazione del soot nei gas di scarico e dalla "lunghezza effettiva del filtro" (volume dei gas di scarico relativi all'area del filtro).

Il valore 0 è associato al filtro pulito, l'assoluto annerimento del filtro è invece associato al valore SZ_B 10 (numero di annerimento, in accordo con Bosch), o 100% di annerimento.

Lunghezza effettiva del filtro

Il parametro fondamentale di uno smoke meter è il volume di gas di scarico relativi alla sezione del filtro, la cosiddetta lunghezza effettiva di campionamento.

$$\text{Lunghezza effettiva di campionamento} = \frac{\text{vol.campione} - \text{vol morto} - \text{vol leakage}}{\text{area del filtro}}$$

Il Filter Smoke Number (FSN), è definito dall'ISO con una lunghezza effettiva di 405mm e valori di temperatura e pressione pari a 298K e 1 bar.

In Figura 2.36 vediamo gli elementi principali del gas campione:

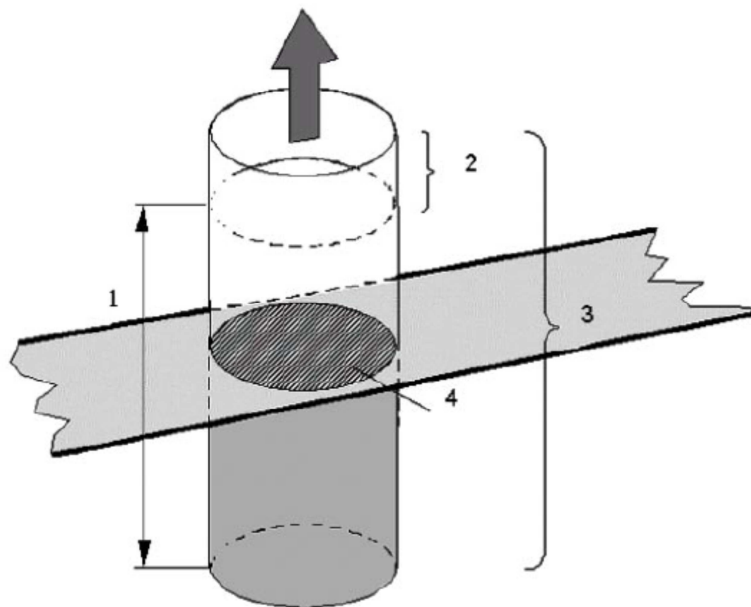


Figura 2.36 Principio di funzionamento Smoke Meter

1. Lunghezza effettiva di campionamento
2. Volume morto
3. Volume di take out
4. Area del filtro

Valutazione ottica

Si adotta la convenzione che il “valore di riflettometro” = 0 indica un campione con assorbimento = 100% ed una riflettività = 0%.

In Europa ed in America (ISO10054) l’annerimento del filtro è relativo, cioè viene comparato al filtro di carta non annerito e definito come Filter Smoke Number (FSN).

Paper Blackening (PB), Blackening Number (SZ e/o SZ_B)

PB indica il grado di annerimento rilevato del filtro, in una scala tra 0 e 10.

Poiché questo valore non dipende solo dalla concentrazione del soot nei gas di scarico, ma anche dalla lunghezza effettiva del filtro, i valori di annerimento grezzi correlati ad una lunghezza di 405mm sono definiti come Bosch Blackening Number (SZ_B).

L’annerimento della carta è determinato dalla riflessione diffusa del filtro di carta annerito.

$$PB = \frac{100 - R_R}{10}$$

$$R_R = \frac{R_P}{R_F} \cdot 100\%$$

R_P = valore del riflettometro del campione

R_F = valore del riflettometro della carta non annerita

R_R = luminosità relativa del campione (fattore di radiazione relativa)

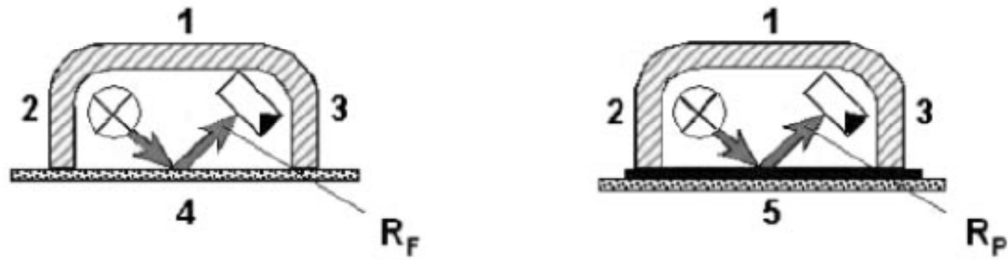


Figura 2.37 Componenti testa del riflettometro e componenti principali di misura dello SM

1. Riflettometro
2. Sorgente di luce
3. Rilevatore di luce
4. Filtro pulito
5. Filtro annerito

Filter Smoke Number secondo ISO 100054

Il “Filter Smoke Number” (FSN), definito per una condizione del gas campione di 298 K (25°C) ed 1 bar, è uguale a PB se la lunghezza effettiva del campione è 405 mm.

L’annerimento del filtro è relativo, ciò significa che è determinato in relazione al filtro di carta non annerito. Per questo motivo, il valore misurato è virtualmente indipendente dalla luminosità del filtro di carta non annerito.

Pollution Level secondo JIS D 8004

$$PL = 1,15 \cdot R_A [\%]$$

La lunghezza effettiva del campione corrispondente è ~380mm

$$R_A = \frac{R_P}{R_S} \cdot 100$$

R_P = valore del riflettometro del campione

R_S = valore del riflettometro del bianco standard (ossido di magnesio ad esempio)

R_A = luminosità assoluta del campione (fattore assoluto di luminosità)

Il valore di annerimento del filtro è assoluto. Per questo il valore misurato di un campione annerito diventa fortemente dipendente dalla lucentezza del filtro non annerito.

Per un confronto, dai valori di SZ_B ed FSN (con una lunghezza effettiva del campione di 405mm) si può trovare un valore percentuale del Pollution Level (PL).

Se vogliamo comparare il valore fornito da uno Smoke Meter (FSN), con uno strumento che fornisce il valore come Pollution Level (PL), il valore FSN deve essere convertito nel modo seguente:

1. Trovare l'”offset” della valutazione ottica assoluta dello strumento da comparare (offset = valore misurato di PL in % per un filtro non annerito)
2. Calcolare PL_{equi} (equivalent pollution level) dello Smoke Meter:

$$PL_{equi}[\%] = FSN \cdot \frac{100 - Offset}{10} + Offset$$

Trovando l'”offset” della valutazione ottica assoluta dello strumento comparativo (valore di misura PL in % del filtro di carta non annerito) si può trovare una relazione tra FSN e PL.

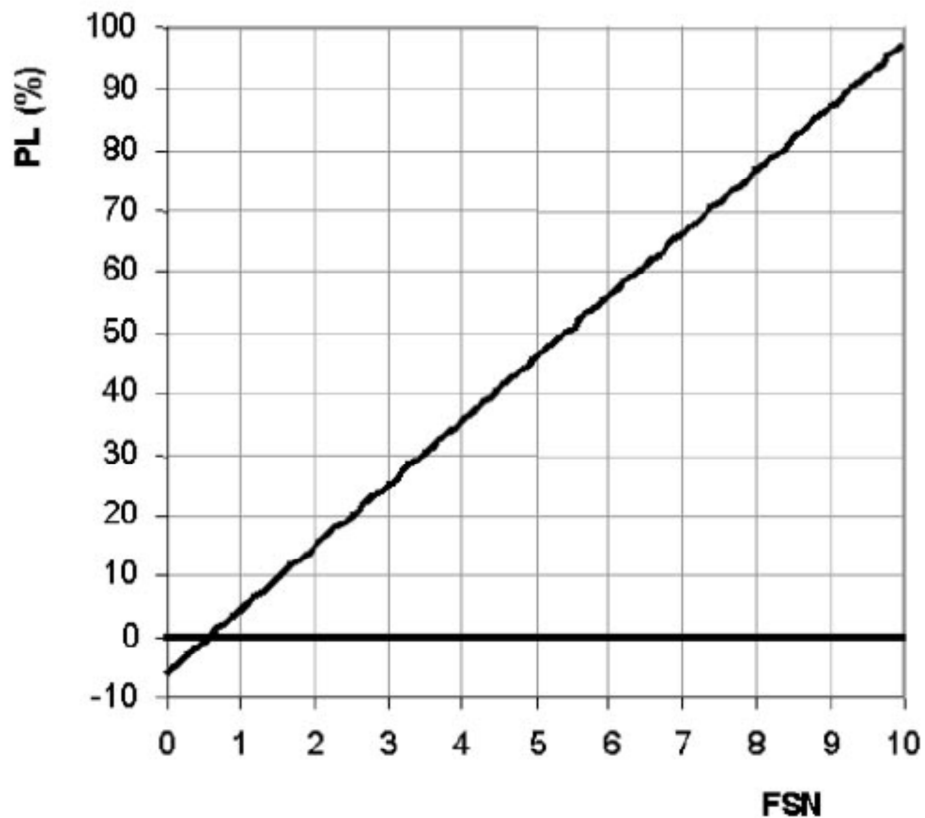


Figura 2.38 FSN e PL con Offset di -6%

3 Punto “zero”

3.1 Primi avviamenti e problematiche di diagnosi *misfire*

Il primo problema che si è dovuto affrontare, è stato quello di riprodurre le condizioni operative con cui il motore si trovava a lavorare ad Argentan: in sostanza si è dovuto fare lo “zero” con la cella della prima parte di attività, in modo da poter raffrontare i risultati e verificare la completa funzionalità del banco e dell’impianto realizzato presso il DIEM.

A valle del completamento del cablaggio, del collegamento meccanico, e dell’alimentazione di fluidi (aria, benzina e acqua), è stata verificata la presenza di anomalie nel sistema di diagnosi on-board. Nonostante la presenza di alcuni segnali di allarme (legati presumibilmente all’assenza di alcuni elementi nel cablaggio – ad esempio la centralina ABS), si è proceduto ad un primo avviamento che ha dato esito positivo.

In Figura 3.1 sono riportati alcuni segnali acquisiti con la connessione via CAN alla ECU, durante un avviamento a caldo ed una parte di funzionamento al minimo.

L’acquisizione dura in tutto circa 720 secondi, cioè 20 minuti. Si osserva in figura che, circa al secondo 180, il motore viene avviato (i.e., trascinato con il gruppo di avviamento e poi, quando la ECU si è sincronizzata, “lanciato” dalle prime combustioni) e la velocità di rotazione presenta un overshoot associato al completamento delle prime combustioni seguito, una volta raggiunto un regime di rotazione sufficientemente elevato, dall’attivazione del controllo del minimo, che ha da subito un target di 750 rpm (si tratta infatti di un avviamento a caldo). Circa al secondo 320 la sonda lambda (HEGO) entra in funzione, ed il controllo in closed-loop viene attivato (e di conseguenza il segnale della sonda – arancione – oscilla tra valore massimo e valore minimo). Il valore target di lambda è però dall’inizio sempre unitario (segnale rosa).



Figura 3.1 Segnali acquisiti durante un regolare avviamento

Le considerazioni che derivano dall'analisi della Figura 3.1 portavano a ritenere che il funzionamento del motore fosse corretto, e si è pertanto proceduto alla realizzazione di un cosiddetto “piano quotato ridotto”, ovvero una sequenza di condizioni di funzionamento (in termini di velocità di rotazione e coppia) effettuate in condizioni stazionarie, in cui misurare una serie di parametri per poterli poi confrontare con gli omologhi misurati nelle stesse condizioni di funzionamento da chi aveva effettuato in precedenza l'attività sperimentale. Una condizione di funzionamento di particolare interesse è chiaramente quella a pieno carico, ovvero punti che appartengono alla curva di coppia (e potenza) massima.

Nell'eseguire il piano quotato ridotto (di cui si parlerà nel dettaglio nel seguito), si è presentato un problema non previsto, in particolare ogni volta in cui si superava un certo livello di carico (coppia).

Come sintetizzato dal prossimo diagramma (Figura 3.2), la situazione che si presentava ogni volta che si prova a salire con il carico motore (pressioni di boost >1100-1150 mbar, test effettuati con rampe lente di carico a vari regimi: 1500, 2000, 2500, 3500 rpm) era la seguente: a causa di un livello di rumorosità apparentemente elevato sul segnale di velocità di rotazione motore (grado di irregolarità LU, utilizzato dalla ECU per valutare l'eventuale presenza di mancate combustioni, o *misfire*), la ECU iniziava a rilevare una serie di apparenti *misfire* (solo apparenti, perché in questa fase i segnali di pressione in camera e l'analisi indicating non mettevano in evidenza nessun problema di combustione) sui vari

cilindri, si portava su un titolo grasso (il lambda obiettivo non cambiava, ma il lambda effettivo segnava grasso... probabilmente quindi in open loop), e rimaneva in queste condizioni per decine di secondi (70-90 secondi indicativamente), continuando a registrare la presenza di *apparenti* misfire. Dopo questa fase, la ECU “spegneva” tipicamente un cilindro (smettendo di attuare iniezione ed accensione), ed impostava il lambda target sul magro (1.4, come per tenere conto del fatto che gli altri tre debbano continuare ad andare circa stechiometrici, a giudicare dagli andamenti della pressione in camera e della pmi, ed il lambda alla confluenza debba tendere a un target magro per tenere conto dello scarico del cilindro spento). La rumorosità di ruota fonica aumenta ancora, ma la ECU sembra aver spento la diagnosi misfire avendo già settato il fault.

Nel dettaglio, e con riferimento alla Figura 3.2:

- **t tra 0 e 15**
 - ci si trova in steady-state, a 2000 rpm e basso carico (20-30 Nm di coppia al freno). Il lambda a monte (segnale in tensione arancione: **usvkjsa**) oscilla tra 0.8 e 0.2 V, confermando il controllo in closed loop intorno a $\lambda = 1$ (vedi anche segnale rosa in basso – **lamsoni_w**, ovvero lambda target). @ t=6 secondi, si comincia una rampa di pedale (segnale **miist** in verde – coppia erogata – sale linearmente), che si ferma quando l’irregolarità di combustione (indicatore di misfire **lutsk_w** – segnale bianco tratteggiato) aumenta significativamente, pochissimo prima di t=15 s.
- **t tra 15 e 95**
 - la ECU rileva la presenza di misfire sui vari cilindri (il segnale **lutsk_w** supera la soglia KFLURB, ed il bit **B_mderk** – segnale nero, nel grafico separato in basso – si porta a true ad ogni combustione apparentemente mancata), memorizzandoli con i contatori **fzabgzyl_w_[x]**, dove “x” indica il cilindro con numerazione zero-based. I contatori crescono in rampa – vedi segnali viola, blu, rosso e verde – e poi vengono riazzzerati ad ogni azzeramento del conteggio di numero di combustioni totali su cui effettuare periodicamente la diagnosi.
- **t tra 95 e 120**
 - a t=95 la centralina probabilmente entra in modalità di recovery. Spegne le attuazioni di un cilindro (il 4 nel caso di figura), e setta l’obiettivo di lambda **lamsoni_w** a 1.4 (forse per tenere stechiometrici gli altri 3), vedi segnale rosa e segnale arancione tratteggiato (tensione sonda monte CAT, **usvkjsa**). L’indicatore di misfire **lutsk_w** continua a oscillare tra valori particolarmente elevati (in particolare se confrontati con quelli prima di t=15, ma in realtà non necessariamente così anormali), fino a quando la richiesta di carico cala (rampa in discesa del segnale verde) e ci si riporta al minimo, per poi spegnere il motore @ t =120. Notare che tra t=105 e t=120 l’indicatore di misfire è molto più elevato che prima di t=15 (stesse condizioni di idle), ma è così perché ora un cilindro è effettivamente spento.

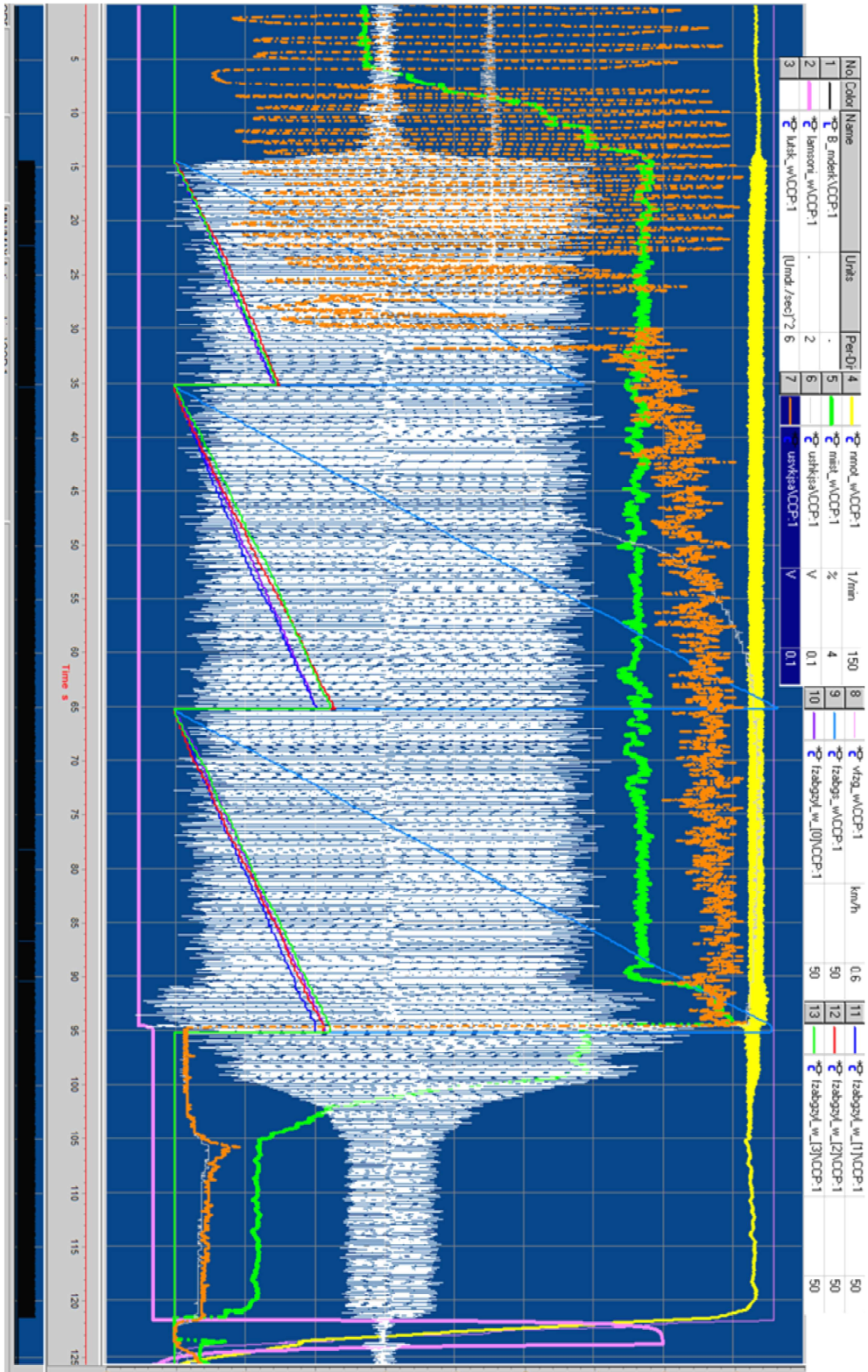


Figura 3.2 Segnali acquisiti durante un funzionamento con diagnosi misfire attiva (misfire apparente, ovvero falso allarme da parte della ECU)

Nel tentativo di comprendere le cause di tale funzionamento anomalo, si sono analizzati i segnali di velocità di rotazione del motore in condizioni di alto e basso carico.

Le motivazioni per cui approfondire l'analisi di questo segnale sono due: gli algoritmi di diagnosi misfire presenti in centralina si basano sull'analisi del segnale di velocità istantanea dell'albero motore, partendo dal presupposto che eventi di mancata combustione si riflettono sulla velocità di rotazione con cali netti, ma localizzati. La coppia indicata produce oscillazioni di velocità tanto più elevate quanto più elevato è il carico, ed era pertanto opportuno verificare a che livelli di oscillazione il banco stava funzionando, sia a basso che ad alto carico.

La Figura 3.4 riporta il confronto fra gli andamenti della velocità di rotazione per due prove, effettuate entrambe a 2000 rpm. In figura sono visualizzati gli andamenti della velocità di rotazione istantanea (misurata prelevando direttamente il segnale in uscita dal sensore a effetto hall affacciato alla ruota fonica, Figura 3.3).



Figura 3.3 Sensore “effetto HALL”

Come detto, si riportano a confronto le due situazioni di basso carico (in alto) e medio carico (in basso), la seconda durante la segnalazione, da parte della ECU, della presenza di misfire (su tutti i cilindri, in maniera apparentemente casuale).

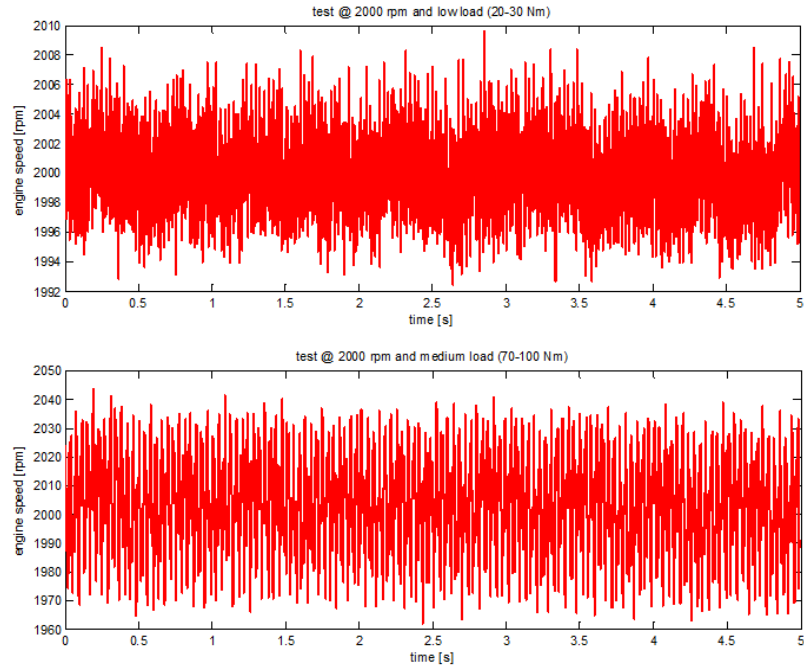


Figura 3.4 Segnali di velocità acquisiti durante test a pari regime e diverso carico

Zoomando sui due segnali (Figura 3.5) si nota che nel primo caso le oscillazioni sono quasi assenti (anche se, pur essendo il segnale particolarmente rumoroso, le quattro oscillazioni a ciclo si riescono ad apprezzare).

Nel caso a medio carico, il segnale di velocità presenta invece le quattro oscillazioni in maniera molto irregolare, tutte molto diverse una dall'altra e con sovrapposta un'altra, più bassa, frequenza.

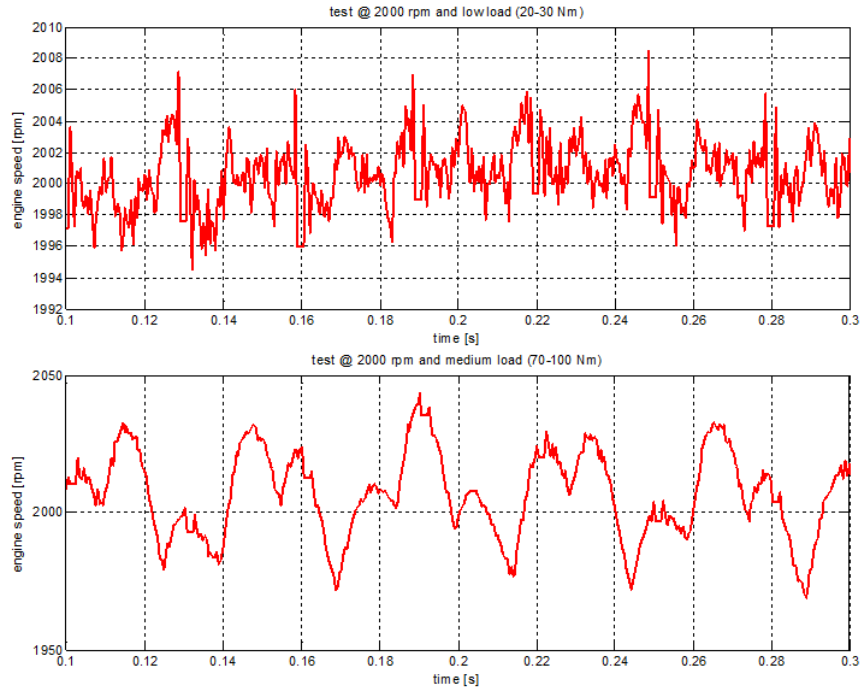


Figura 3.5 Segnali di velocità durante test a pari regime e diverso carico - ZOOM

L'analisi in frequenza (Figura 3.6) ha confermato che nel caso a basso carico (in alto in figura) l'energia è, pur con una certa presenza di rumore di fondo, concentrata all'armonica di combustione (quarta armonica rispetto a quella di ciclo) ed alla sua prima armonica (8).

Nel caso a medio carico (Figura 3.6, in basso), lo spettro del segnale presenta una componente dominante all'armonica 1.5, assolutamente non aspettata. L'energia concentrata a questa frequenza è più elevata di quella di combustione. Normalmente in presenza di misfire l'energia si sposta dall'armonica di combustione all'armonica di ciclo (dalla 4 alla 1 – e non alla 1.5).

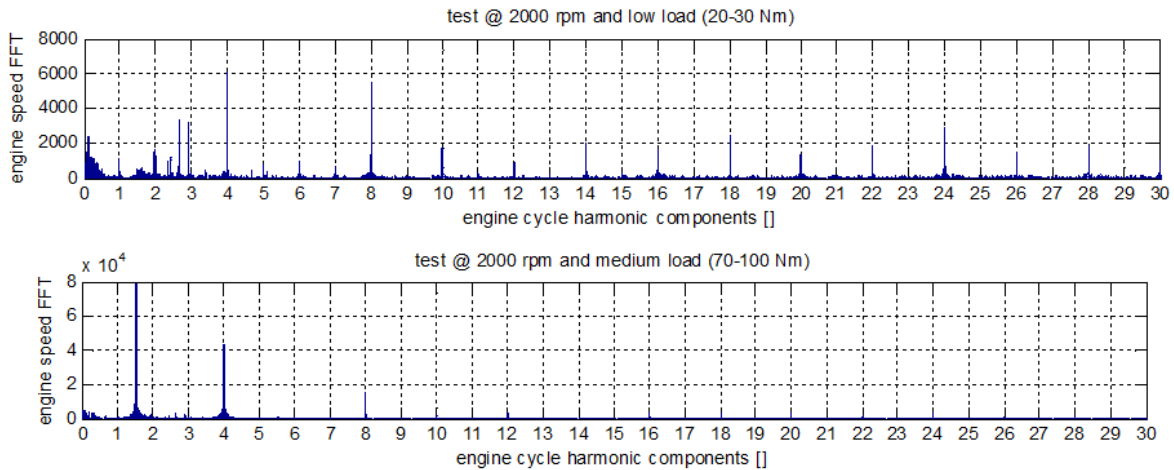


Figura 3.6 Segnali di velocità durante test a pari regime e diverso carico – ANALISI IN FREQUENZA

In sintesi, il problema è legato ai falsi allarmi rilevati dalla ECU all'interno della funzione di diagnosi misfire, a carichi medio-alti.

Si è cercato di capire se il livello di oscillazioni di regime che si manifesta al banco è “anomalo”, verificando tutti gli aspetti meccanici. E' stato quindi verificato il collegamento e l'allineamento motore-freno, riscontrando alcuni aspetti potenzialmente critici e adottando soluzioni specifiche. La Figura 3.7 schematizza le problematiche riscontrate a livello del collegamento meccanico e le soluzioni che sono state individuate, mentre la Figura 3.8 mostra un confronto tra prima e dopo gli interventi correttivi che sono stati adottati (in particolare relativamente alla lavorazione della piastra per centraggio).

- **Viti lunghe:** le viti di collegamento (6 viti a brugola M7x25 + 6 grower $\Phi=8\text{mm}$) flangia-volano risultano troppo lunghe, o meglio, non di una lunghezza tale da assicurare il perfetto serraggio → **sostituite con 6 viti a testa esagonale M7x20 ed eliminate le grower**
- **Centraggio scorretto:** nella flangia è presente si uno spallamento, ma non di diametro opportuno (tale spallamento è di diametro superiore al diametro interno del volano, ma di diametro inferiore a quello esterno): $a < c < b$. Il centraggio è fatto per mezzo di tre spine (in figura sono cerchiati i fori per le stesse) di riferimento → **eliminate le spine e rifatto spallamento $c=a$** (questo garantisce il centraggio!)



- **Fori asolati:** i fori della flangia che permettono il collegamento flangia-volano per mezzo delle viti a brugola di cui sopra e quelli per le spine di riferimento, risultano asolati: non si capisce se sono stati asolati in fase di montaggio o se lo sono diventati a seguito dello scorretto funzionamento (urti contro le viti) → **rifatti nuovi fori sfasati angularmente rispetto agli originali**

Figura 3.7 Analisi delle problematiche riscontrate a livello meccanico

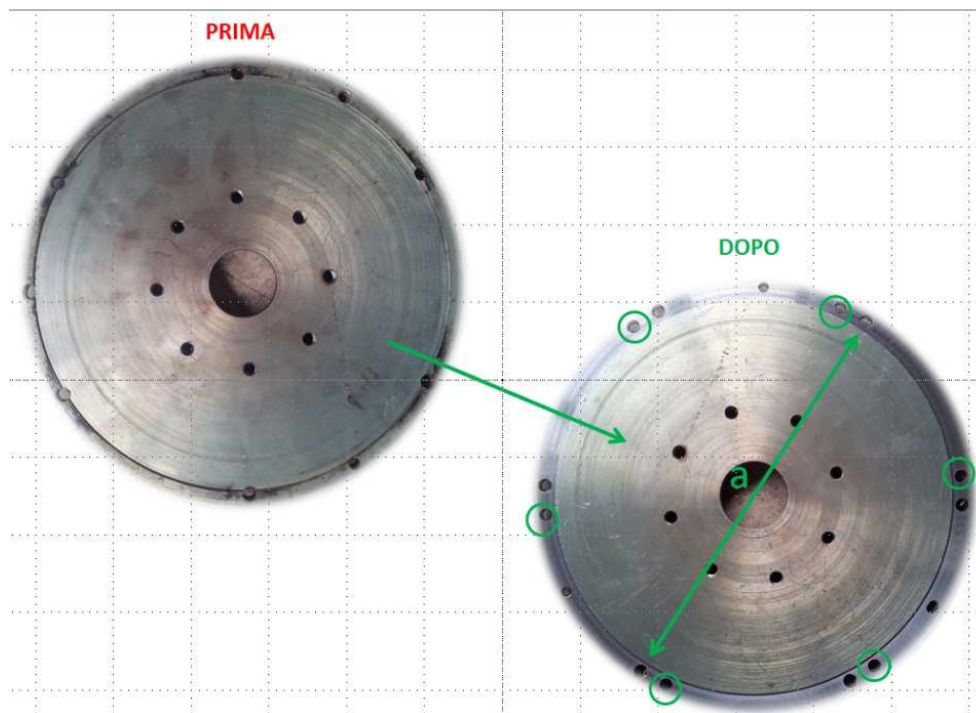


Figura 3.8 Flangia Collegamento motore-freno prima e dopo le lavorazioni correttive

La fase di sperimentazione successiva al ri-allineamento motore-freno continuava però a presentare lo stesso problema, sempre e solo in condizioni di carico medio-alto.

Il problema è stato risolto in data 6 Aprile 2012 agendo sul sistema di controllo del freno. Si è aperto il loop di controllo della corrente sulle bobine del freno, impostando direttamente in catena aperta il valore di corrente (escludendo quindi il controllore PID che prima generava la corrente di eccitazione sulla base dell'errore visto sui giri – tra valore target e valore misurato).

Considerando infatti le valutazioni di cui ai paragrafi precedenti, rimanevano 2 ipotesi fondamentali:

- Le oscillazioni a bassa frequenza viste sul segnale di velocità istantanea erano dovute alla presenza di frequenze di risonanza del collegamento motore-giunto-freno (differente rispetto a quello utilizzato in precedenza);
- Le oscillazioni erano dovute al controller del freno, che faceva oscillare la frequenza di eccitazione delle bobine per garantire il target di giri

Analizzando l'immagine riportata in Figura 3.9, si può osservare che, controllando il freno in catena aperta con un valore COSTANTE di corrente, il funzionamento a 2000 rpm e carico molto elevato è PERFETTAMENTE REGOLARE.

La soluzione a questo punto risultava banale, perché si è trattato di ri-calibrare i guadagni del PID del controller del freno, inserendo valori meno «aggressivi».

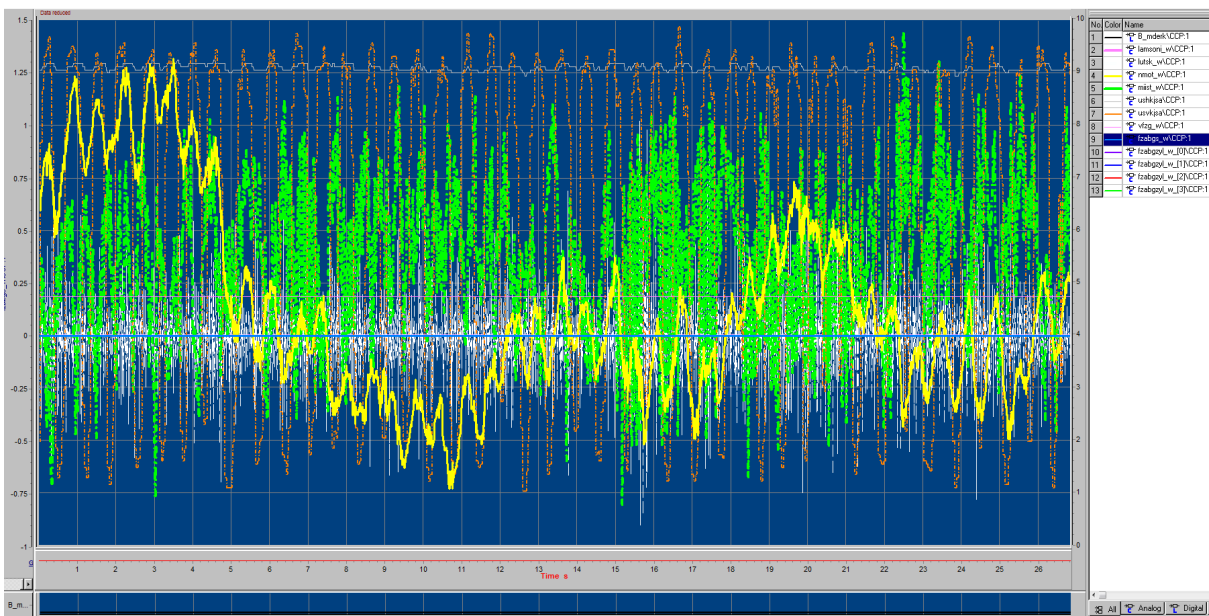


Figura 3.9 Funzionamento regolare a 2000 rpm e 130 Nm (NO MISFIRE)

3.2 Piano Quotato Ridotto: benchmarking

Una volta risolte le problematiche di tipo controllistico (controllore del freno con calibrazioni dei guadagni del PID troppo elevati, in particolare per quanto riguarda la componente proporzionale), si è proceduto ad effettuare una serie di prove in stazionario, per misurare, come detto al paragrafo precedente, le prestazioni del motore in senso lato (dalla coppia e consumo, alle emissioni di particolato come FSN, agli andamenti della pressione in camera, ...) in alcuni punti discreti di funzionamento, e confrontarle con quanto rilevato in una precedente installazione dello stesso motore. In questo senso questa fase dell'attività ha come obiettivo un benchmarking dell'installazione realizzata presso il DIEM, ovvero una valutazione della sua idoneità a supportare la successiva fase di sviluppo di nuovi componenti e di un nuovo sistema di controllo motore.

Il Piano Quotato Ridotto (PQR), in termini di velocità di rotazione (rpm) e coppia misurata al freno (Nm), è riportato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, mentre la Tabella 3.1 riporta il file excel di sintesi del confronto, che verrà illustrato nei prossimi paragrafi.

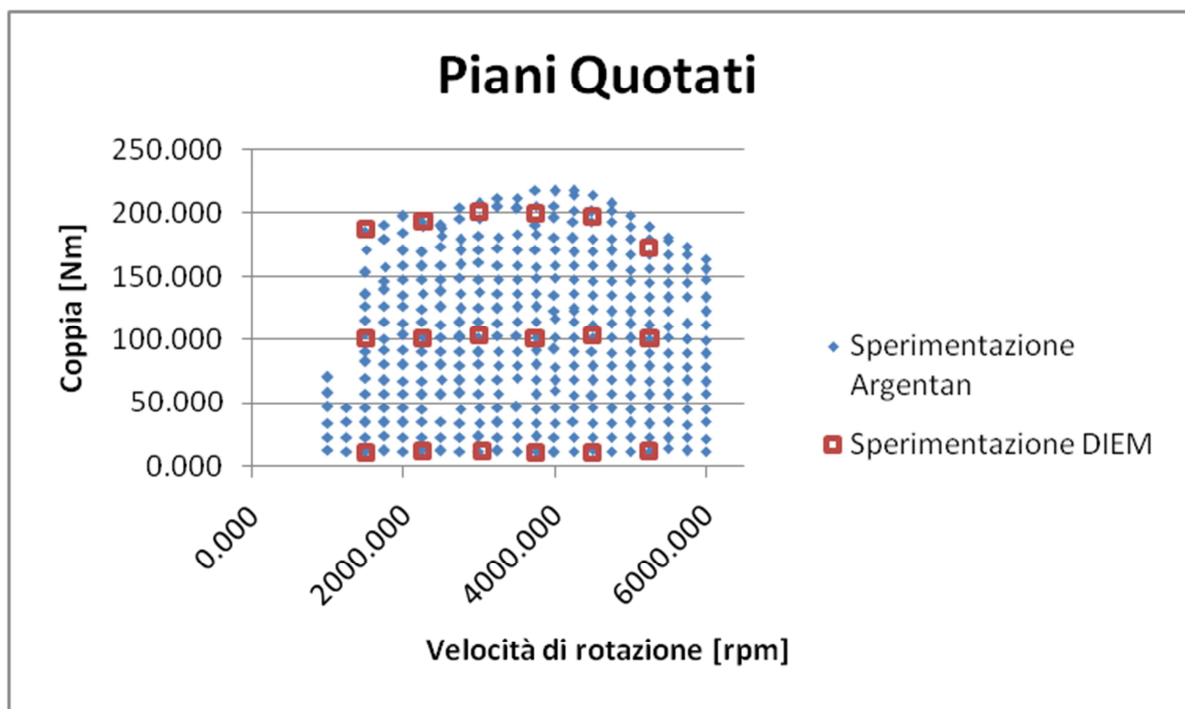


Figura 3.10 Piano Quotato Completo (in blu) e Piano Quotato Ridotto (in rosso)

0.00	0.00	0.00	264.00	268.50	0.00	264.00	268.50	0.00	5.20	5.33	3.80	1.04	0.91	8.03	323.00	310.03	2.63	0.99	0.93	11.02	5.41	7.18	41.14	-15.59	-14.04	0.00	-15.59
0.00	0.00	0.00	269.25	269.24	0.05	269.25	269.23	0.06	20.40	18.82	5.11	0.95	1.00	1.62	1132.00	1093.82	1.99	1.00	0.98	1.09	-8.71	-8.32	0.00	-29.78	-29.23	0.00	-29.77
1.00	1.00	0.00	278.25	278.25	0.00	278.25	278.25	0.00	100.00	99.78	0.10	1.00	1.00	0.00	2172.00	2175.36	0.68	0.99	1.38	10.00	10.00	0.00	-11.04	-10.96	0.00	-11.00	
0.00	0.00	0.00	264.75	276.75	0.00	264.75	276.75	0.00	7.40	7.52	2.58	1.00	1.00	2.12	334.00	345.53	2.71	0.99	0.95	7.49	-2.04	-3.96	0.00	-22.97	-25.12	0.00	-23.04
0.00	0.00	0.00	270.00	270.00	0.00	270.00	270.00	0.00	18.20	18.61	2.98	0.98	1.03	1.74	1061.00	1078.29	1.49	1.00	0.98	2.28	-10.97	-10.04	0.00	-31.98	-30.97	0.00	-31.97
0.00	0.00	0.00	290.25	290.25	0.00	290.25	290.25	0.00	100.00	99.78	0.11	1.00	1.00	0.90	2039.00	2008.65	1.06	0.99	0.99	1.29	9.01	9.26	1.99	-12.09	-11.79	0.00	-11.99
0.00	0.00	0.00	290.25	266.37	0.39	290.25	266.37	0.38	8.90	9.25	4.87	1.00	0.83	2.13	305.00	328.54	3.85	0.98	0.94	10.29	5.88	1.02	355.07	-15.15	-20.28	0.00	-15.12
0.00	0.00	0.00	270.00	270.00	0.00	270.00	270.00	0.00	20.00	21.91	1.88	0.97	0.97	1.96	1016.00	1043.75	1.20	0.99	0.99	0.74	-10.56	-6.94	0.00	-31.50	-30.88	0.00	-31.56
0.00	0.00	0.00	293.73	292.61	0.52	293.73	292.61	0.52	100.00	99.78	0.11	1.00	1.00	0.00	2029.00	1973.59	2.63	0.99	0.99	0.75	5.02	5.05	1.54	-15.75	-16.08	0.00	-15.98
0.00	0.00	0.00	303.75	303.75	0.00	303.75	303.75	0.00	11.00	10.70	4.33	1.00	1.00	1.78	315.00	308.47	3.82	0.98	0.92	11.60	7.08	7.48	47.27	-13.85	-13.79	0.00	-13.92
0.00	0.00	0.00	309.00	308.96	0.18	309.00	308.97	0.18	23.00	23.12	4.26	0.99	0.98	2.24	960.00	965.96	2.93	0.99	0.98	2.64	-2.86	-2.49	0.00	-27.81	-23.46	0.00	-23.85
0.00	0.00	0.00	322.64	322.74	0.11	322.64	322.74	0.11	100.00	99.78	0.10	1.00	1.00	0.00	1941.00	1924.58	0.78	0.99	0.99	1.00	5.00	5.00	0.00	-15.89	-16.01	0.00	-16.00
0.00	0.00	0.00	314.25	314.25	0.00	314.25	314.25	0.00	12.50	12.30	3.69	1.00	1.03	5.36	350.00	349.35	3.78	0.99	0.95	6.99	5.65	6.63	27.48	-15.22	-14.29	0.00	-15.35
0.00	0.00	0.00	319.50	319.48	0.05	319.50	319.48	0.05	25.50	27.10	4.22	0.99	1.04	2.02	975.00	1014.17	3.01	1.00	0.99	1.81	4.83	4.80	6.17	-15.90	-16.25	0.00	-16.17
0.00	0.00	0.00	333.75	333.66	0.23	333.75	333.66	0.23	100.00	99.78	0.10	1.00	1.00	0.00	1853.00	1826.58	1.10	0.99	0.99	1.45	5.00	5.00	0.00	-16.88	-16.02	0.00	-16.00
0.00	0.00	0.00	322.50	322.50	0.00	322.50	322.50	0.00	13.50	13.86	4.71	0.97	1.00	2.01	345.00	372.83	3.99	0.99	0.95	6.10	12.46	11.62	8.12	-8.47	-9.39	0.00	-8.54
0.00	0.00	0.00	328.16	329.93	0.19	328.16	329.94	0.19	26.30	28.94	3.82	1.02	1.02	2.14	927.00	1002.39	2.75	0.99	0.99	1.51	7.43	7.46	0.00	-13.55	-13.55	0.00	-13.57
0.00	0.00	0.00	339.00	338.96	0.07	339.00	338.97	0.07	100.00	99.78	0.09	1.00	1.00	0.00	1591.00	1578.46	0.38	0.98	0.98	2.22	10.56	10.31	0.09	-10.44	-10.69	0.00	-10.44

-13.82	0.00	96.48	96.25	0.20	70.07	7.00	0.72	16.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.46	0.00	0.00	-8.97	-15.70	-22.43	19.30	0.00	0.47	1.00	1.00	0.08	
-29.32	0.00	96.48	96.44	0.18	73.06	7.16	0.87	66.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.42	0.00	0.00	-8.95	-15.66	-22.37	20.50	29.82	0.33	1.00	0.99	0.04
-11.00	0.00	11.69	9.51	9.94	79.99	8.01	2.06	135.09	136.65	0.54	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	12.77	13.80	1.67	-1.68	-7.23	-12.78	22.40	33.47	0.09	0.91	0.95	0.03
-24.96	0.00	96.41	96.67	0.20	78.41	7.92	0.67	24.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.48	0.00	0.00	-8.99	-15.73	-22.47	24.50	0.00	0.43	1.00	1.00	0.07
-31.04	0.00	96.45	96.53	0.13	93.48	9.44	0.65	93.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.17	0.00	0.00	-8.78	-15.37	-21.95	23.00	0.00	1.26	1.00	0.99	0.06
-11.74	0.00	96.48	96.52	0.12	110.15	11.02	0.73	190.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.35	0.00	0.00	-8.90	-15.58	-22.25	24.30	27.20	0.24	0.90	0.96	0.12
-19.98	0.00	96.48	96.81	0.15	79.10	8.00	1.44	31.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.34	0.00	0.00	-8.89	-15.56	-22.23	21.10	32.95	0.17	1.00	0.98	0.04
-30.94	0.00	96.48	96.24	0.21	99.07	9.98	0.56	123.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.78	0.00	0.00	-8.52	-14.91	-21.30	22.10	29.73	0.23	1.00	0.98	0.08
-15.95	0.00	96.48	96.42	0.16	129.65	12.99	0.64	258.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.25	0.00	0.00	-8.83	-15.46	-22.08	24.20	27.20	0.26	0.89	0.96	0.06
-13.52	0.00	96.48	96.39	0.27	93.76	9.37	0.99	42.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.26	0.00	0.00	-8.84	-15.47	-22.10	24.50	31.29	0.22	1.00	0.99	0.05
-23.49	0.00	96.48	96.42	0.18	113.91	11.71	1.69	157.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.85	0.00	0.00	-8.57	-14.99	-21.42	33.40	31.43	0.51	1.00	0.98	0.18
-16.00	0.00	96.48	96.39	0.17	129.63	13.00	0.83	327.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.16	0.00	0.00	-8.77	-15.35	-21.93	24.80	28.29	0.10	0.85	0.00	5.73
-14.37	0.00	96.29	96.28	0.20	99.53	9.96	0.89	58.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.10	0.00	0.00	-8.73	-15.28	-21.83	25.30	31.42	0.73	1.00	0.99	0.05
-16.20	0.00	96.41	96.46	0.10	122.03	12.96	1.92	193.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.89	0.00	0.00	-8.59	-15.04	-21.48	24.30	34.00	0.42	1.00	0.98	0.11
-16.00	0.00	96.63	96.37	0.19	130.24	13.00	0.81	369.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.95	0.00	0.00	-8.63	-15.11	-21.58	25.50	27.96	0.08	0.90	0.86	0.08
-9.38	0.00	96.52	96.59	0.18	102.10	10.10	0.83	68.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.91	0.00	0.00	-8.61	-15.06	-21.52	22.80	33.28	0.19	1.00	0.99	0.05
-13.54	0.00	96.41	96.48	0.08	121.57	12.79	1.67	220.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.94	0.00	0.00	-8.63	-15.10	-21.57	23.50	33.80	0.51	0.99	0.98	0.12
-10.69	0.00	96.41	96.45	0.12	130.11	13.00	0.93	380.51	380.43	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.82	13.59	2.07	-1.25	-6.63	-12.02	25.00	34.77	0.61	0.92	0.82	0.09

1011.00	1.04	0.52	977.58	0.01	11.32	1012.24	1.00	0.35	1020.91	0.98	2.15	1037.00	0.02	4.26	1010.90	0.99	0.74	976.67	0.01	22.87	1218.82	1.20	0.84	1211.38	1.21	20.40	1073.90	0.05	2.71	
1010.70	1.04	0.40	974.39	0.00	124.08	2183.87	2.18	1.46	1773.45	1.70	31.85	1165.70	0.07	9.30	12.80	29.12	0.03	95.00	33.62	0.09	924.00	724.14	2.03	834.00	337.44	0.93	10.33	1055.00	0.12	1.12
1003.90	1.04	0.55	970.78	0.01	10.80	1016.88	1.01	0.39	1045.35	1.01	3.08	1037.90	0.02	3.00	15.80	27.09	0.03	-100.00	27.09	0.03	57.00	28.56	0.27	800.00	438.49	0.34	752.00	268.97	0.39	1.72
1003.80	1.03	0.42	969.33	0.00	25.54	1325.41	1.31	0.59	1304.79	1.34	19.35	1086.80	0.07	2.95	15.30	27.11	0.04	-100.00	27.11	0.04	41.00	30.67	0.09	718.00	673.92	1.44	733.00	328.34	2.17	6.31
1003.70	1.00	0.47	965.05	0.00	698.50	2062.62	2.01	2.84	2030.40	2.03	27.22	1231.70	0.14	5.98	15.90	26.31	0.03	-100.00	26.31	0.03	96.00	27.56	0.24	992.00	853.56	1.06	891.00	423.47	1.52	14.55
1003.80	0.97	0.34	968.09	0.00	28.23	1356.35	1.29	0.20	1436.92	1.31	2.52	1120.80	0.12	0.72	15.00	26.95	0.05	15.00	26.95	0.05	43.00	29.92	0.21	764.00	771.84	0.19	772.00	506.73	0.36	8.28
1004.00	1.00	0.45	960.44	-0.01	90.65	2064.04	1.98	3.09	2292.79	1.81	23.92	1364.00	0.20	9.47	13.70	26.13	0.04	95.00	27.47	0.25	1026.00	900.46	1.71	931.00	429.68	2.45	20.09	1893.00	0.67	1.10
1004.20	0.97	0.84	970.55	0.01	7.90	1047.62	1.																							

3.3 Confronto delle prestazioni

Si procederà di seguito ad un'analisi comparativa delle prestazioni del motore al banco di Argentan ed al banco DIEM. Si sono presi in esame diverse grandezze caratteristiche, tutte nella condizione di pieno carico e quindi con farfalla aperta al 100%.

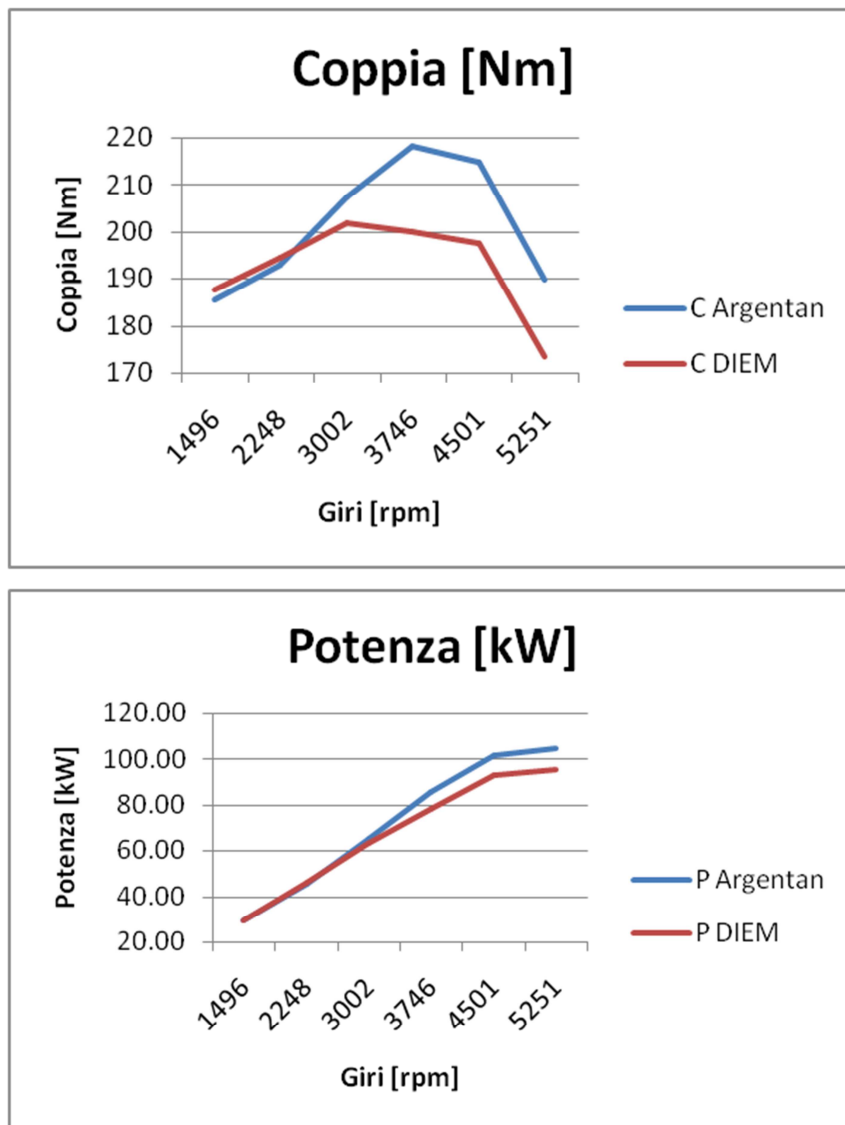


Figura 3.11 Coppia e Potenza

In Figura 3.11 si riportano la coppia e la potenza del motore, in blu le grandezze rilevate ad Argentan ed in rosso quelle al DIEM. Si evidenzia in modo netto che la coppia rilevata presso il laboratorio del DIEM è inferiore a quella rilevata dai nostri

collegli francesi. La prima osservazione che va fatta è che il sistema adottato per il sistema intercooler, non era perfettamente a tenuta. Pertanto, l'interrefrigerazione cercata e quindi il grado di sovralimentazione, non erano paragonabili. Si è sistemato l'impianto ovviando al problema.

In secondo luogo occorre segnalare il divario delle condizioni ambientali tra le due prove: a tal proposito basta osservare i valori di temperatura e pressione ambiente riportati nel piano quotato nei due diversi casi.

Per "normalizzare" le condizioni di prova e quindi poter raffrontare i diversi risultati, si introduce come da normativa un fattore correttivo definito come segue (ISO 3046/1):

$$C.F. = \left(\frac{p_r - \phi_r p_{sr}}{p_y - \phi_y p_{sy}} \right)^{1.2} \left(\frac{T_y}{T_r} \right)^{0.6}$$

Questo coefficiente permette di "paragonare" i valori di coppia e potenza ottenuti con condizioni ambientali sostanzialmente differenti; si riportano di seguito due slide in riferimento alla normativa [8].

Normativa di riferimento europea: misura di potenza

ISO 3046/1 :2002 + ISO 15550

Motori alternativi a combustione interna. Prestazioni. Metodi di correzione dei risultati.

7.3 Connection factor α_a for naturally aspirated and pressure-charged spark-ignition engines (with or without charge air cooling)
The correction factor α_a shall be as calculated from the following equation:

for spark-ignition engines:

$$P_r = \alpha_a \times P_y$$

or, for compression-ignition (diesel) engines:

$$P_r = \alpha_c \times P_y$$

$$\alpha_a = \left(\frac{p_r - \phi_r p_{sr}}{p_y - \phi_y p_{sy}} \right)^{1.2} \left(\frac{T_y}{T_r} \right)^{0.6} \quad 0,96 \leq \alpha_a \leq 1,06$$

5 Standard reference conditions
For the purpose of determining the power and fuel consumption of an engine, the following standard reference conditions shall be used:
-Total barometric pressure: $p_r = 100 \text{ kPa}$;
-Air temperature: $T_r = 298 \text{ K}$ ($t_r = 25 \text{ °C}$);
-Relative humidity: $\phi_r = 30 \%$;
-Charge air coolant temperature: $T_{cr} = 298 \text{ K}$ ($t_{cr} = 25 \text{ °C}$)

NOTE: A relative humidity of 30 % at a temperature of 298 K corresponds to a water pressure of 1 kPa. The corresponding dry barometric pressure is 99 kPa.

7.2 Test atmospheric conditions
The atmospheric conditions during the test shall be within the ranges given below.
a) Temperature, T_y
- for spark-ignition engines : $288 \text{ K} \leq T_y \leq 308 \text{ K}$
- for compression-ignition engines: $283 \text{ K} \leq T_y \leq 313 \text{ K}$
b) Dry Pressure, $p_d = p_y - \phi_y p_{sy}$
- for all engines : $90 \text{ kPa} \leq p_d \leq 110 \text{ kPa}$

13.2 Calorific value of fuels
13.2.1 Liquid-fuel engines
Where a distillate type of fuel is specified, any declared specific fuel consumption of a liquid-fuel engine given in mass units shall be related to a lower calorific value of 42 700 kJ/kg.
Where any other type of fuel is specified, the declared specific fuel consumption shall either be expressed in energy units, or both the specific fuel consumption in mass units and the associated lower calorific value shall be stated.
13.2.2 Gas engines
Any declared specific fuel consumption of a gas engine shall be related to a stated lower calorific value of the gas. The type of gas shall be declared.

**Normativa di riferimento europea: misura di potenza
ISO 3046/1, Annex B**

**Motori alternativi a c.i. Prestazioni.
Valori della pressione parziale di vapore**

Table B.1 — Water vapour pressure values

T _s °C	Water vapour pressure (p _{v,psa}), kPa								
	Relative humidity (φ _r), %								
	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
-10	0.30	0.27	0.24	0.21	0.18	0.15	0.12	0.09	0.06
-9	0.30	0.29	0.26	0.23	0.20	0.16	0.13	0.10	0.07
-8	0.35	0.32	0.28	0.25	0.21	0.18	0.14	0.11	0.07
-7	0.38	0.34	0.30	0.27	0.23	0.19	0.15	0.11	0.08
-6	0.41	0.36	0.32	0.28	0.24	0.20	0.16	0.12	0.08
-5	0.43	0.39	0.35	0.30	0.26	0.22	0.17	0.13	0.09
-4	0.46	0.41	0.37	0.32	0.28	0.23	0.18	0.14	0.09
-3	0.49	0.44	0.39	0.34	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
-2	0.53	0.47	0.42	0.37	0.32	0.26	0.21	0.16	0.10
-1	0.50	0.50	0.45	0.39	0.34	0.28	0.22	0.17	0.11
0	0.60	0.54	0.48	0.42	0.36	0.30	0.24	0.18	0.12
1	0.60	0.58	0.51	0.45	0.39	0.32	0.26	0.19	0.13
2	0.69	0.62	0.55	0.48	0.41	0.34	0.28	0.21	0.14
3	0.74	0.66	0.59	0.52	0.44	0.37	0.30	0.22	0.15
4	0.79	0.71	0.63	0.55	0.47	0.40	0.32	0.24	0.16
5	0.85	0.76	0.68	0.59	0.51	0.42	0.34	0.25	0.17
6	0.91	0.82	0.73	0.64	0.55	0.46	0.36	0.27	0.18
7	0.98	0.88	0.78	0.68	0.59	0.49	0.39	0.29	0.20
8	1.05	0.94	0.84	0.73	0.63	0.52	0.42	0.31	0.21
9	1.12	1.01	0.90	0.78	0.67	0.56	0.45	0.34	0.22
10	1.20	1.08	0.96	0.84	0.72	0.60	0.48	0.36	0.24
11	1.28	1.16	1.03	0.90	0.77	0.64	0.51	0.39	0.26
12	1.37	1.24	1.10	0.96	0.82	0.69	0.55	0.41	0.27
13	1.47	1.32	1.17	1.03	0.88	0.73	0.59	0.44	0.29
14	1.57	1.41	1.25	1.10	0.94	0.78	0.63	0.47	0.31
15	1.67	1.51	1.34	1.17	1.00	0.84	0.67	0.50	0.33

$$\alpha_a = \left(\frac{p_r - \phi_r p_{sr}}{p_y - \phi_y p_{sy}} \right)^{1.2} \left(\frac{T_y}{T_r} \right)^{0.6}$$

Table B.1 (continued)

T _s °C	Water vapour pressure (p _{v,psa}), kPa								
	Relative humidity (φ _r), %								
	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
16	1.79	1.61	1.43	1.25	1.07	0.89	0.71	0.54	0.38
17	1.90	1.71	1.52	1.33	1.14	0.95	0.76	0.57	0.38
18	2.03	1.83	1.62	1.42	1.22	1.01	0.81	0.61	0.41
19	2.16	1.94	1.73	1.51	1.30	1.08	0.86	0.65	0.43
20	2.30	2.07	1.84	1.61	1.38	1.15	0.92	0.69	0.46
21	2.45	2.20	1.96	1.71	1.47	1.22	0.96	0.73	0.49
22	2.60	2.34	2.08	1.82	1.56	1.30	1.04	0.78	0.52
23	2.77	2.49	2.21	1.94	1.66	1.38	1.11	0.83	0.55
24	2.94	2.65	2.35	2.06	1.76	1.47	1.16	0.88	0.59
25	3.12	2.81	2.50	2.19	1.87	1.56	1.25	0.94	0.62
26	3.32	2.98	2.65	2.32	1.99	1.66	1.33	0.99	0.66
27	3.52	3.17	2.82	2.46	2.11	1.76	1.41	1.06	0.70
28	3.73	3.36	2.99	2.61	2.24	1.87	1.49	1.12	0.75
29	3.96	3.56	3.17	2.77	2.38	1.98	1.58	1.19	0.79
30	4.20	3.78	3.36	2.94	2.52	2.10	1.68	1.26	0.84
31	4.45	4.01	3.56	3.12	2.67	2.23	1.78	1.34	0.89
32	4.72	4.25	3.78	3.30	2.83	2.36	1.89	1.42	0.94
33	5.00	4.50	4.00	3.50	3.00	2.50	2.00	1.50	1.00
34	5.29	4.76	4.24	3.71	3.18	2.65	2.12	1.59	1.06
35	5.60	5.04	4.48	3.92	3.36	2.80	2.24	1.68	1.12
36	5.93	5.34	4.74	4.15	3.56	2.97	2.37	1.78	1.19
37	6.27	5.64	5.02	4.39	3.76	3.14	2.51	1.88	1.25
38	6.63	5.97	5.30	4.64	3.98	3.32	2.65	1.99	1.33
39	7.01	6.31	5.61	4.90	4.20	3.50	2.80	2.10	1.40
40	7.40	6.66	5.92	5.18	4.44	3.70	2.96	2.22	1.46
41	7.81	7.03	6.25	5.47	4.69	3.91	3.12	2.34	1.56
42	8.24	7.42	6.59	5.77	4.94	4.12	3.30	2.47	1.65
43	8.69	7.82	6.95	6.06	5.21	4.34	3.47	2.61	1.74
44	9.15	8.24	7.32	6.41	5.49	4.58	3.66	2.75	1.83
45	9.63	8.67	7.71	6.74	5.78	4.82	3.85	2.89	1.93
46	10.13	9.12	8.11	7.09	6.08	5.07	4.05	3.04	2.03
47	10.65	9.58	8.52	7.45	6.39	5.33	4.26	3.20	2.13
48	11.18	10.07	8.95	7.83	6.71	5.59	4.47	3.36	2.24
49	11.73	10.56	9.39	8.21	7.04	5.87	4.69	3.52	2.35
50	12.30	11.07	9.84	8.61	7.38	6.15	4.92	3.69	2.46

Figura 3.12 Normativa per CF

La prima immagine di Figura 3.12 riporta i valori di riferimento che vanno inseriti a numeratore, mentre a denominatore inseriremo i valori da “normalizzare”.

La seconda immagine di Figura 3.12 permette di calcolare i valori della pressione parziale di vapore data l’umidità relativa (nel nostro caso assumiamo φ_r = 0.5, non avendo misurato tale parametro durante le prove) e la temperatura.

rpm	py (mbar)	py (kPa)	Ty (°C)	Φy*psr	CF
1503	1012.17	101.22	29	1.98	1.00572473
2255	994.47	99.45	26	1.66	1.01592713
2996	994.29	99.43	26	1.66	1.01786457
3741	996.07	99.61	29	1.98	1.02445614
4494	994.61	99.46	29	1.98	1.02643834
5243	1011.29	101.13	31	2.23	1.01381216

Tabella 3.2 Calcolo del CF – prove DIEM

In Tabella 3.2 è riportata la maschera di Excel utilizzata per il calcolo del CF dove possiamo evidenziare la pressione ambiente nella terza colonna (in kPa), la temperatura ambiente nella quarta ed il prodotto tra umidità relativa (φ_r = 0.5) e la

pressione di vapor saturo ricavabile dalla tabella visibile nella seconda immagine di Figura 3.12.

Moltiplicando quindi questo fattore correttivo per la coppia e la potenza, si ottiene la coppia e la potenza ISO e cioè normalizzate alle condizioni standard di normativa. Da notare che i valori ISO delle grandezze di Argentan sono presenti nel piano quotato fornito.

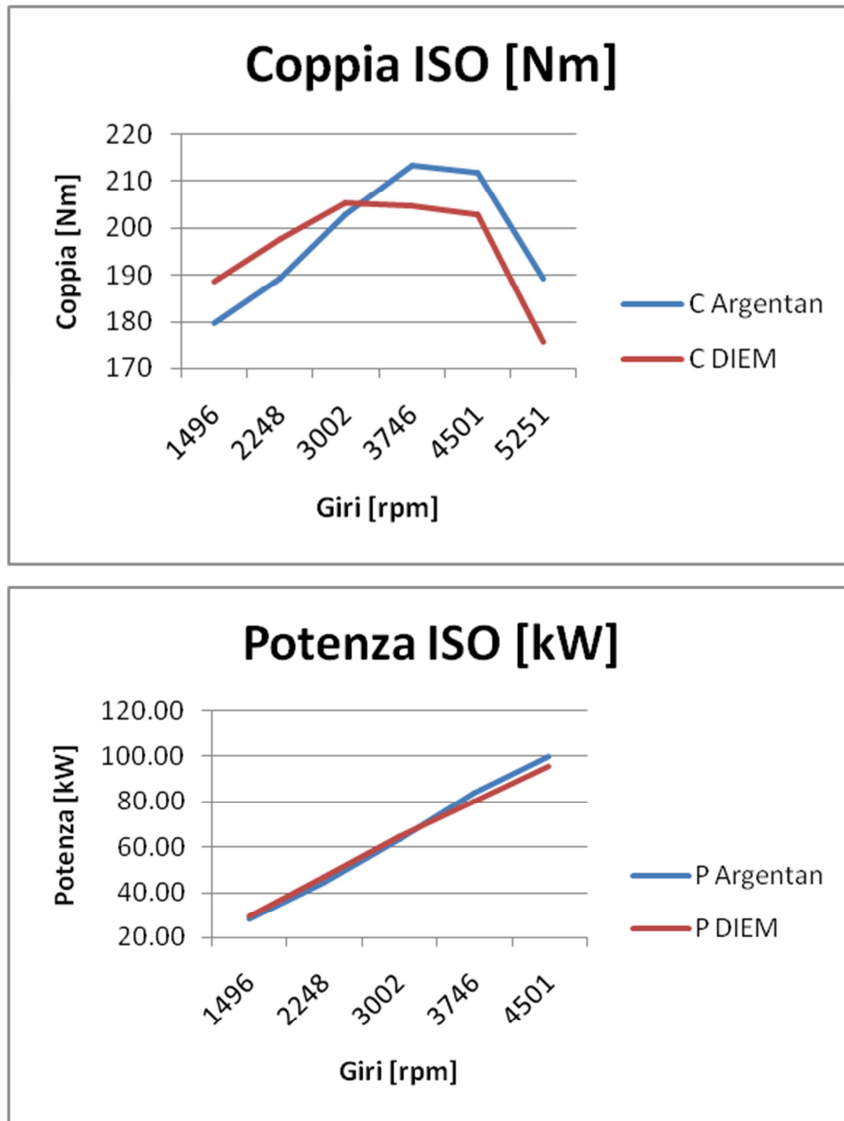


Figura 3.13 Coppia e Potenza ISO

Nella Figura 3.13 sono riportate la coppia e la potenza corrette ed immediatamente si nota una maggior uniformità dei dati, con andamenti ancora non coincidenti, ma comunque più omogenei e meno differenti rispetto al precedente

caso. Da notare che nel piano quotato di Argentan non era presente il valore di potenza corretta alla massima giratura e quindi, per uniformità, non si è riportato neanche il valore DIEM.

Restano comunque delle incongruenze che si proveranno a motivare nel seguito. Innanzitutto non si potrà mai avere una specularità perfetta tra i risultati in quanto le disposizioni nei banchi prova e gli allestimenti fatti sono molto differenti.

Un primo divario che incide sulle prestazioni motore è visibile in Figura 3.14 dove viene evidenziato la differenza di anticipo adottato dalla ECU. Man mano che i giri salgono si vede aumentare il divario tra i due casi ed in particolare si notano anticipi sostanzialmente più ritardati nel caso del DIEM.

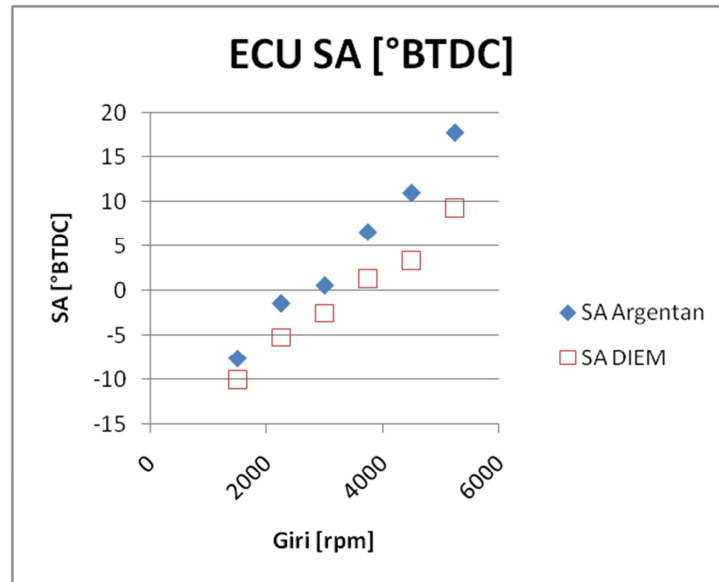


Figura 3.14 Anticipo

Il fatto che il sistema adotti tali anticipi, deriva dalle diverse condizioni ambientali che ritroviamo al DIEM piuttosto che ad Argentan. Una temperatura ambiente sostanzialmente maggiore (Tabella 3.1 Tabella di sintesi per il confronto su Piano Quotato Ridotto delle prestazioni nelle due diverse installazioni) porta ad un aumento della tendenza alla detonazione e quindi all'adozione, da parte della ECU, di anticipi più ritardati.

Com'è noto, esiste una correlazione diretta tra anticipo e coppia ed in particolare, anticipi più ritardati portano ad erogare minor valori di coppia in quanto si ha minor efficienza di combustione. Un altro effetto degli anticipi più ritardati è l'aumento di temperatura allo scarico visibile in Figura 3.15.

Questa condizione, unita a tempi di "acquisizione" elevati, porta inesorabilmente ad operare in condizioni più gravose. In Figura 3.16 vengono confrontati i tempi di permanenza in ciascun punto motore ad Argentan ed al DIEM (nel nostro caso abbiamo ritenuto di permanere per almeno 10 secondi nella maggioranza dei punti motore per ottenere valutazioni più accurate del consumo di combustibile).

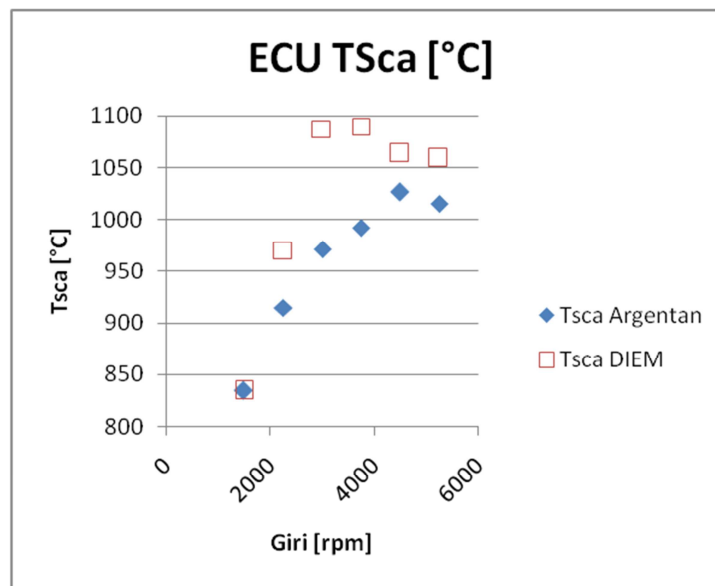


Figura 3.15 Temperature scarico

TempoMisuraArgentan [s]'	TempoMisuraDIEM [s]'
5	5
5	10
5	10
5	10
5	10
5	10

Figura 3.16 Tempi di permanenza

Si nota come le condizioni di prova che i sono riprodotte al DIEM siano sostanzialmente più onerose per il motore, avendo adottato un tempo di “permanenza sul punto motore” doppio rispetto il caso francese.

Tempi di permanenza maggiori ed anticipi più ritardati portano dunque a temperature d’esercizio maggiori ed il sistema di controllo entra in modalità “protezione componenti” ad alti giri (ecco perché vediamo persistere alte temperature di scarico a medi giri), ed attua delle particolari strategie al fine di abbassare le temperature appunto.

Come prima cosa il sistema di controllo motore “ingrassa” ($\lambda \ll 1$) la miscela (vedi oltre).

Esempio di obiettivi della calibrazione λ target : motivazioni

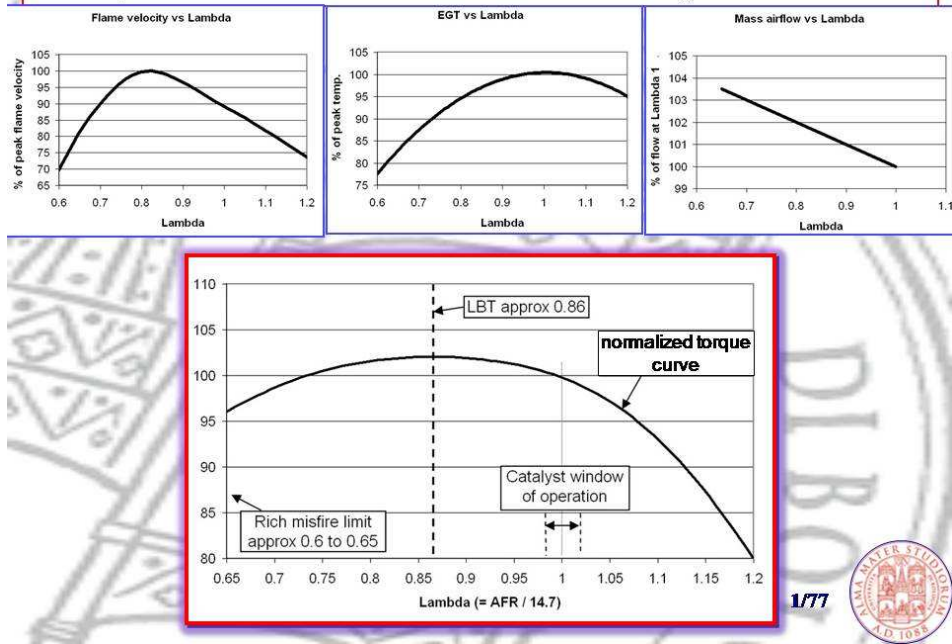


Figura 3.17 Lambda – Tsca

Come si può vedere dalla Figura 3.17 ingrassare la miscela piuttosto che smagrirla, ha un beneficio maggiore in termini di raffreddamento dello scarico, in quanto permette di allontanarsi maggiormente dal rischio di detonazione. Si sfrutta infatti il calore latente di vaporizzazione del combustibile per abbassare le temperature di combustione e quindi quelle dei sistemi a contatti coi fumi caldi.

Come si è detto si abbassa il valore del lambda, definito dalla relazione:

$$\lambda = \frac{(A/F)}{(A/F)_{stochiometrico}}$$

Di seguito nella Figura 3.18 sono riportati gli andamenti dei lambda target nelle due diverse situazioni di funzionamento:

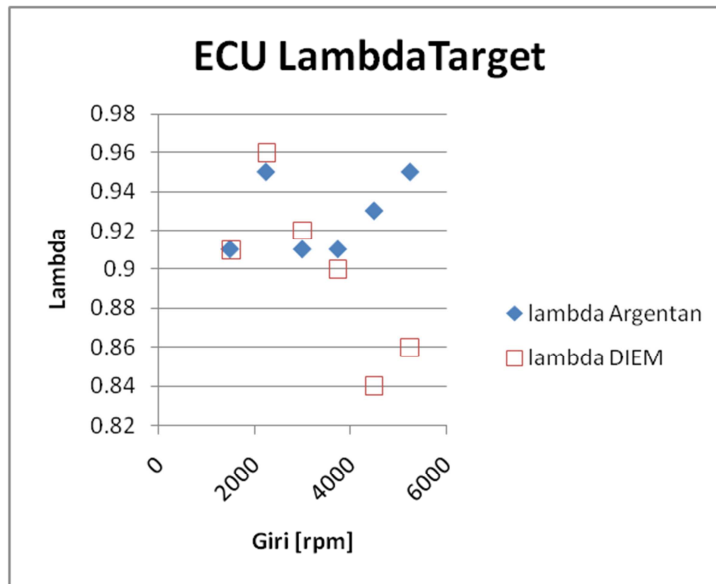


Figura 3.18 Lambda target

Si può evidenziare come, agli alti giri soprattutto (di qui il minor divario delle temperature allo scarico agli alti giri piuttosto che ai medi), il target del sistema di controllo del motore montato al DIEM, punta verso valori di lambda minori (quantità di benzina in esubero rispetto la quantità stechiometrica) e questo comporta una diminuzione delle temperature allo scarico, ma anche una diminuzione delle prestazioni quantificabili in termini di coppia e potenza.

Di seguito si riportano una serie di grafici relativi ad altre importanti grandezze che influenzano la prestazione del motore.

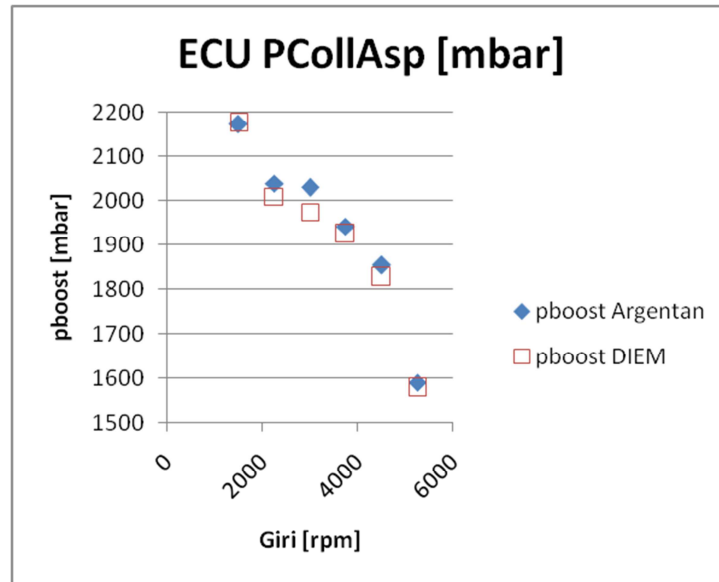


Figura 3.19 Pressione di sovralimentazione

La Figura 3.19 mostra una pressione di sovralimentazione DIEM minore di quella Argentan soprattutto ai medi giri. Questo fatto, come prima menzionato, è probabilmente dovuto alle non perfette tenute che si hanno nel manicotto a valle dell'intercooler.

In Figura 3.20 le differenze tra i tempi iniezione.

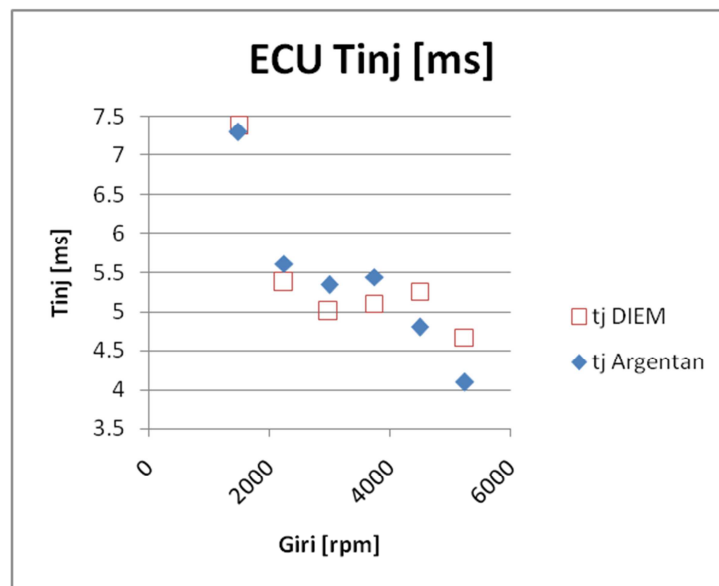


Figura 3.20 Tempo iniezione

Di seguito, in Figura 3.21 vengono riportate le differenze che si osservano per quanto riguarda la posizione del sistema VVT (Variable Valve Timing) comandato dal variatore di fase posto in aspirazione.

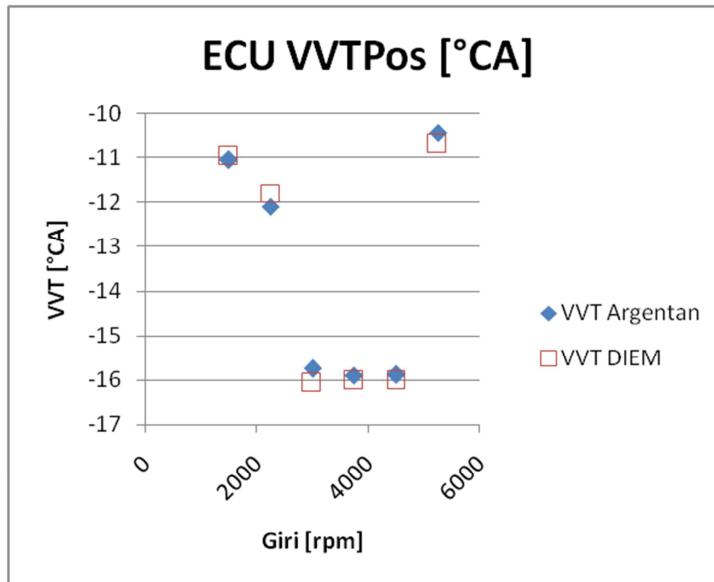


Figura 3.21 Posizione VVT

In Figura 3.22 l'andamento delle pressioni rilevate nel rail.

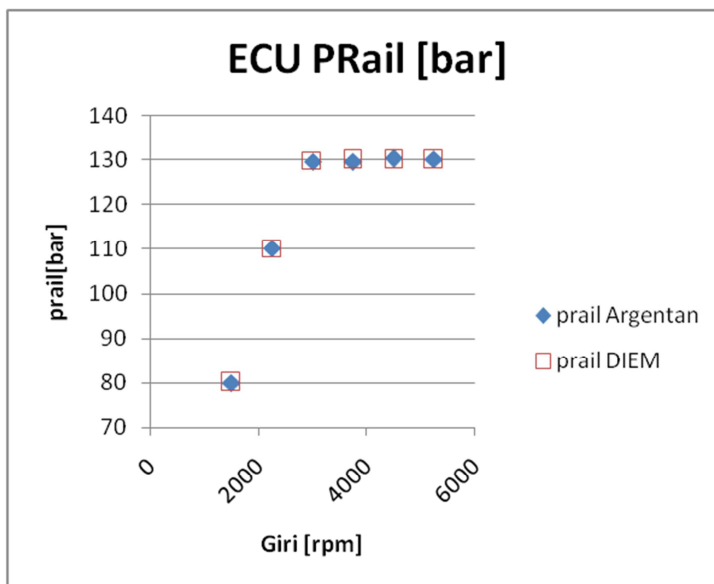


Figura 3.22 Pressione rail

Solo per completezza c'è da segnalare che le attivazioni del compressore volumetrico sono le stesse per i casi Argentan e DIEM.

Infine riporto in Figura 3.23 le acquisizioni del FSN.

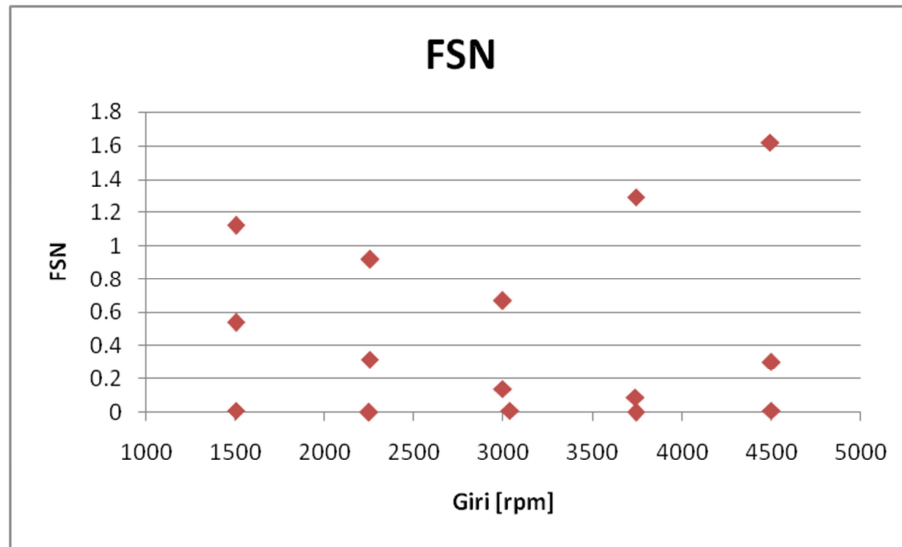


Figura 3.23 FSN

3.4 TestIT ed HeatIT [9]

Le acquisizioni che sono state analizzate nel primo paragrafo di questo capitolo sono state fatte direttamente prelevando gli andamenti nel tempo delle grandezze acquisite dalla ECU.

In affiancamento agli strumenti che permettono tali operazioni, durante la sperimentazione in sala controllo, sono disponibili altri due sistemi di controllo ed acquisizione dati: TestIT ed HeatIT.

TestIT (Test bench Interface Tool) è un software sviluppato da AlmaAutomotive per i segnali relativi al banco ed al suo controllo. Tale interfaccia è totalmente personalizzabile e uno screenshot è stato riportato in Figura 3.24.

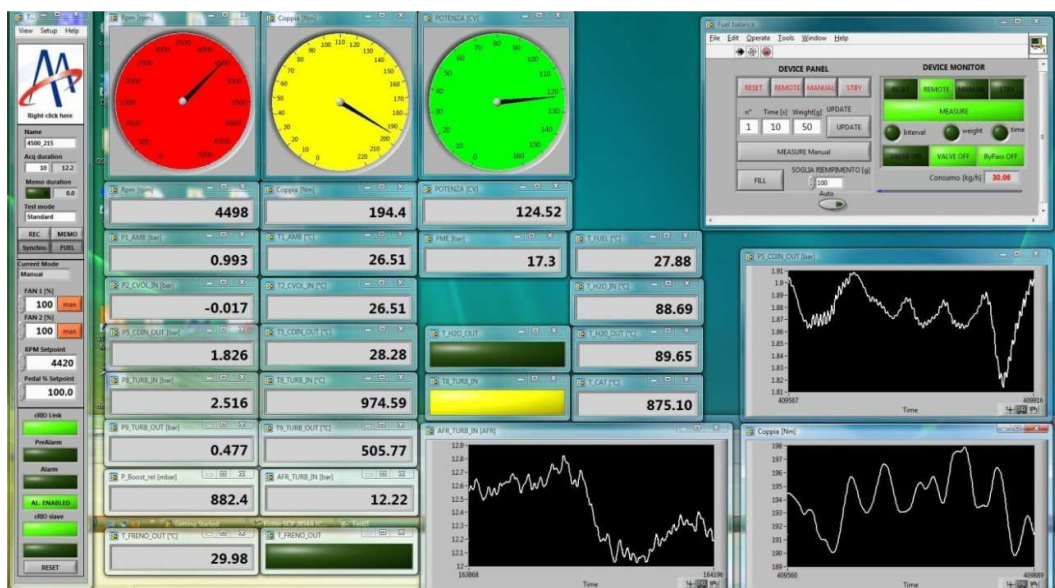


Figura 3.24 TestIT

Unitamente a TestIT si è utilizzato HeatIT per i segnali indicating, quali tutte le grandezze relative alla combustione (IMEP, IMEPH, IMEPL, MFB50, MAPO,...).

Di seguito una screenprint del sistema in uso:

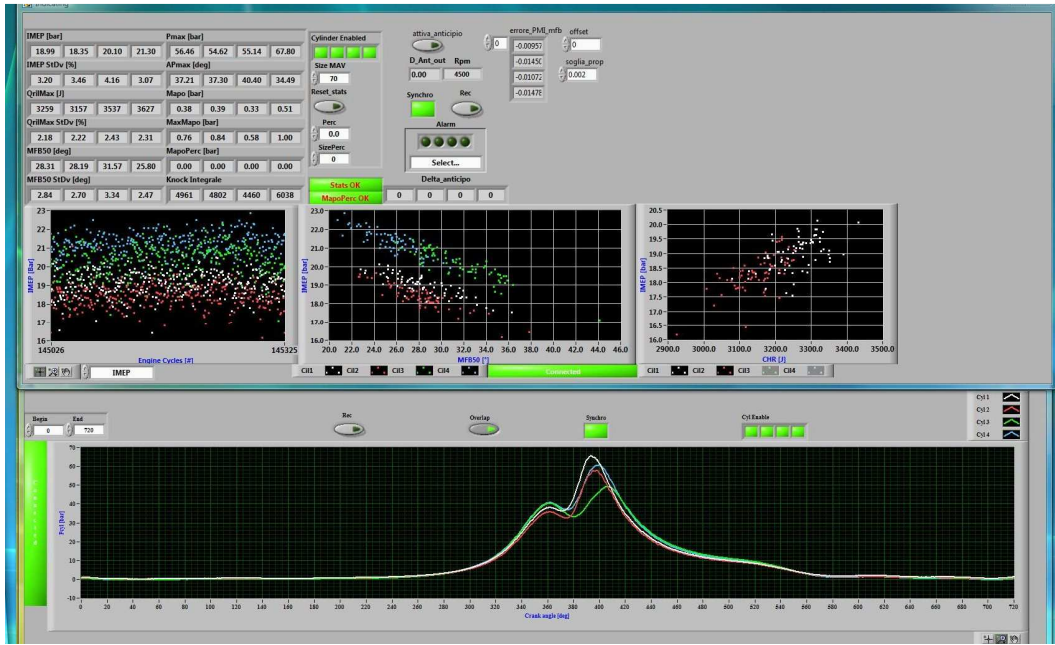


Figura 3.25 HeatIT

Conclusioni

Questo lavoro di tesi aveva come obiettivo primario l'installazione al banco del motore 1.4 TSI arrivato assieme alla vettura su cui originariamente era montato. Visto che la prima parte dell'analisi del sistema di controllo era stata fatta presso Argentan, uno dei più importanti punti da curare era il punto zero con il banco della prima parte di studio: l'obiettivo era la replica delle condizioni ed il funzionamento che il motore aveva in Francia.

Si è installato ed adattato il gruppo di avviamento che ha permesso di operare anche senza il motorino di avviamento presente in origine sul motore.

La sala motore ed il propulsore sono stati strumentati onde analizzare in maniera precisa ed accurata ogni punto di funzionamento.

Ci si è dotati di sistema di misura del particolato onde rilevare le quantità di soot emesse da questo motore con il sistema di controllo originale, per poi raffrontarle con quelle che emetterà una volta sviluppato il sistema di controllo custom.

Si sono quindi superati i problemi iniziali d'instabilità del sistema di controllo introducendo dei diversi guadagni del PID di controllo del freno.

Infine l'ultimo capitolo di questo lavoro evidenzia come, a seguito di opportune considerazioni, si siano potute confrontare le due diverse fasi e concluderne che l'allestimento fatto riproduce fedelmente le condizioni operative con cui il propulsore si trovava a lavorare ad Argentan.

Si sono pertanto raggiunti gli obiettivi prefissati, fondando le basi per la realizzazione di un nuovo sistema di controllo, sicuri di poterlo criticamente confrontare con quello presente di serie sulla vettura.

Appendice A

Vengono di seguito riportate le caratteristiche tecniche del gruppo d'avviamento elettropneumatico Borghi & Saveri.

DATI TECNICI DEL MOTORE ELETTRICO 3 kW (4 CV)

Motore tipo	: S 100 BS4
Potenza	: 3 kW (4 CV)
Coppia nominale	: 23,6 Nm.
Coppia di spunto	: 97,3 Nm.
Tensione trifase	: 230/400 Volt.
Corrente	: 23 / 14 A.
Velocità nominale	: 1400 g/1' circa
Raffreddamento	: non ventilato intermittente

Funzionamento di lavoro :

se al 100% della coppia massima : 1minuto (servizio S3).

se al 50% della coppia massima : 3 minuti (servizio S3).

Questo motore elettrico e' in esecuzione chiusa e non ventilata esclusivamente per servizio intermittente.

Il gruppo avviamento non puo' mai essere usato per fare dei rodaggi motori termici trascinati.

Nel Vostro quadro di comando del motore trifase e' obbligatorio mettere un dispositivo M.T. automatico differenziale 0,03A.

CARATTERISTICHE D'AVVIAMENTO DEL GRAVEP2001 (4402-282-C)

Velocità	: 440 g/1'
Coppia max d'avviamento:	113 Nm.
Senso di rotazione orario:	predisposto per l'avviamento di motori che ruotano in senso orario. Per motori che ruotano in senso antiorario, occorre invertire due fasi della 380 V e ruotare di 180° il gruppo puleggia completo di ruota libera.
Peso:	85 Kg

CONSOLLE DI COMANDO RACK 19"3U

Nella consolle di comando Rack 19" 3U sono presenti tutti i comandi necessari per il funzionamento:

- Visualizzazione presenza rete nella cassetta di potenza.
- Visualizzazione intervento termica del motore elettrico.
- Fungo d'emergenza per stop rapido del GRAVEP2001.
- Pulsanti di marcia/arresto luminosi per abilitare la cassetta di potenza GRAVEP2001
- Pulsante d'avviamento.

ALIMENTAZIONE

Tensione : 380 V tre fasi + terra
50-60 Hz

Assorbimento : massimo 3,5 kW con motore 3 kW

Le norme di sicurezza impongono il collegamento a terra di tutte le apparecchiature elettriche.

Fusibili : F1= 3 x 16 A con motore 3 kW
F2 = 2 A primario
F3 = 3,5 A secondario

Temperatura : 0 + 50 °C

Umidità : 90% secondo DIN 40040

Protezione : IP 65

DIMENSIONI E PESI

CASSETTA DI POTENZA GRAVEP2001 k72

Larghezza	: 200 mm.
Altezza	: 450 mm.
Profondità	: 150 mm.
Peso	: 8 Kg.

N.B. Per il fissaggio vi sono staffe esterne, con 4 fori di \varnothing 8,5 mm, interasse 450x160 mm.

CONSOLLE DI COMANDO RACK 19" 3U

Larghezza	: 483 mm. (19")
Altezza	: 140 mm. (3U)
Profondità	: 380 mm.
Peso	: 2,8 Kg.

N.B. per eventuale montaggio ad incasso prevedere un foro di 445 x 140 mm.

Appendice B

Vengono riportate di seguito le specifiche tecniche del convertitore di frequenza Danfoss VLT Micro Drive FC 51.

Alimentazione di rete (L1, L2, L3)	
Tensione di alimentazione	1 x 200–240 V ± 10%, 3 x 200–240 V ± 10% 3 x 380–480 V ± 10%
Frequenza	50/60 Hz
Fattore di Potenza (cos φ) vicino all'unità	(> 0,98)
Commutazioni in ingresso L1, L2, L3	1 – 2 volte/min.

Valori in uscita (U, V, W)	
Tensione di uscita	0 – 100% tensione di alimentazione
Frequenza di uscita	0 – 200 Hz (modalità VCC+) 0 – 400 Hz (modalità U/f)
Commutazione in uscita	Illimitate
Tempi di rampa	0,05 – 3600 sec.

Ingressi digitali	
Ingressi digitali programmabili	5
Logica	PNP o NPN
Livello di tensione	0–24 V
Massima tensione in ingresso	28 V DC
Resistenza ingresso, Ri	Approx. 4 kΩ

Ingressi ad impulsi	
Ingressi impulsi programmabili	1
Livello tensione	0 – 24 V DC (PNP logica positiva)
Precisione (0,1 – 110 Hz)	Max. err.: 0.1% del fondo scala
Frequenza	20 – 5000 Hz

Ingressi analogici	
Ingressi analogici	2
Tipo	1 in corrente/ 1 in corrente o tensione
Livello di tensione	0 – 10 V (scalabili)
Livello di corrente	0/4 – 20 mA (scalabili)

Uscite analogiche	
Uscite analogiche programmabili	1
Livello di corrente	0/4 – 20 mA
Carico massimo uscita analogica	500 Ω
Precisione uscita analogica	Max. err.: 1% del fondo scala

Scheda di controllo	
Tensione di uscita	10,5 \pm 0,5 V, 24 \pm 0,5 V
Carico massimo (10 V)	25 mA
Carico massimo (24 V)	100 mA

Relè	
Uscite relè programmabili	1
Carico massimo	240 V AC, 2 A

Comunicazione Bus di Campo	
FC Protocol, Modbus RTU	

Lunghezza cavi motore	
Massima lunghezza cavi schermati	15 m
Massima lunghezza cavi non schermati	50 m

Ambiente esterno	
Grado di protezione	IP 20
Resistenza alle vibrazioni	0,7 g
Max. Umidità relativa	5% – 95% (IEC721-3-3; classe 3K3 (senza condensa) durante il funzionamento)
Ambienti aggressivi	(IEC 721-3-3) rivestimento classe 3C3
Temperatura ambiente	Max. 50° C
Temperatura media nelle 24 ore	Max. 40° C

Certificazioni	
CE, C-tick, UL	

Bibliografia e riferimenti

[1] Bianchi, G. M. (2008). *Appunti del Corso di "Fluidodinamica dei Motori a Combustione Interna LS"*. Bologna.

[2] Minelli, G. (1984). *Motori endotermici alternativi*. Ed. Pitagora

[3] Vicchi, F.M. (2012). Sviluppo di metodologie per la precalibrazione di motori benzina ad iniezione diretta su modelli monodimensionali. Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica - Facoltà di Ingegneria. Bologna.

[4] Borghi&Saveri (2011). *Manuale d'istruzione GR.AV.EP 200*. Pieve di Cento (BO)

[5] Mancini, G. (2009). *Realizzazione del Sistema di Controllo Motore di una Vettura Formula SAE*. Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica - Facoltà di Ingegneria. Bologna.

[6] Wikipedia

[7] Vigna, F. (2012). *Studio, sviluppo e verifica sperimentale di sistemi per l'analisi della combustione e la misura delle emissioni inquinanti di un motore Diesel multijet*. Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica - Facoltà di Ingegneria. Bologna.

[8] Cavina, N. (2010). Appunti del corso "Laboratorio di sperimentazione sui motori a combustione interna M". Bologna.

