



**ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**ANALISI DELLE SOLUZIONI PER LA
VARIAZIONE DI FASE E ALZATA VALVOLE IN
MOTORI ENDOTERMICI**

TESI DI LAUREA IN MACCHINE

Relatore

Prof. Enrico Corti

Candidato:

Luca Perini

Anno Accademico 2025-2026

Sommario

Capitolo 1. Motore endotermico e distribuzione tradizionale	4
1.1 Motore a quattro tempi ciclo Otto.....	4
1.2 Componenti della distribuzione	9
1.3 Diagramma della distribuzione.....	12
1.4 Limiti della fasatura fissa	14
Capitolo 2. Nascita della fasatura variabile	17
2.1 Motivazioni e sviluppo	17
2.2 I primi brevetti	17
2.3 L'Alfa Romeo	19
Capitolo 3. Analisi dei principali sistemi di variazione della distribuzione	22
3.1 VTEC – Honda	22
3.2 VANOS – BMW	27
3.2.1 Singolo VANOS.....	27
3.2.2 Doppio VANOS.....	28
3.3 MIVEC – Mitsubishi.....	31
3.3.1 MIVEC MD	31
3.3.2 MIVEC TURBO	31
3.4 Valvelift System – Audi.....	35
3.5 Camtronic – Mercedes Benz	38
3.5.1 Profilo zero.....	39
3.5.2 Perdite di pompaggio	40
3.6 MultiAir – Fiat Powertrain Technologies	43
3.6.1 Principio di funzionamento	44
3.6.2 Full Lift.....	46
3.6.3 Early Intake Valve Closing.....	47
3.6.4 Late Intake Valve Opening	49
3.6.5 Multi Lift	50
3.7 FreeValve – Sistema Camless.....	52
Capitolo 4. Conclusioni	57
4.1 Confronto tecnico e funzionale	57
4.2 Considerazioni finali	58
4.3 Possibili sviluppi futuri	59
Bibliografia	61
Ringraziamenti.....	62

ABSTRACT

Lo scopo di questa tesi è quello di analizzare l'evoluzione dei sistemi di variazione di fase e alzata delle valvole nei motori endotermici mettendo in evidenza i principi di funzionamento, le motivazioni che ne hanno richiesto lo sviluppo e i benefici ottenuti in termini di prestazioni, rendimento ed emissioni.

Nella prima parte viene introdotto il funzionamento di un motore a combustione interna a quattro tempi ciclo Otto e del rispettivo sistema di distribuzione tradizionale con particolare attenzione ai limiti della fasatura fissa e al compromesso esistente tra coppia ai bassi regimi, prestazioni agli alti regimi, consumi ed emissioni.

Successivamente viene analizzata la nascita della fasatura variabile, il primo impiego su una vettura di serie, fino alle soluzioni più moderne. In particolare, vengono approfonditi alcuni dei sistemi più diffusi, conosciuti o iconici, tra cui VTEC, VANOS, MIVEC, Valvelift, Camtronic, MultiAir e il sistema camless FreeValve.

Infine, vengono confrontati i sistemi analizzati mettendo in evidenza l'evoluzione tecnologica, benefici, limiti, complessità e le possibili prospettive future nel mondo automotive.

Capitolo 1. Motore endotermico e distribuzione tradizionale

1.1 Motore a quattro tempi ciclo Otto

Il motore endotermico rappresenta una delle invenzioni più importanti e rivoluzionarie della storia dell'ingegneria moderna. Grazie alla capacità di trasformare l'energia chimica contenuta in un combustibile in energia meccanica, esso ha contribuito in maniera determinante allo sviluppo industriale, economico e tecnologico della società moderna, trovando applicazione in numerosi settori quali automotive, trasporto navale, aeronautico, agricolo e industriale.

La nascita del motore a combustione interna risale alla seconda metà del XIX secolo, periodo caratterizzato da una enorme crescita industriale e dalla necessità di sviluppare sistemi di propulsione più efficienti e compatti rispetto alle macchine a vapore. Tra i principali protagonisti dello sviluppo dei motori endotermici vi furono Eugenio Barsanti e Felice Matteucci che nel 1853 progettaron e brevettaron il primo motore a scoppio[1], ne perfezionò l'invenzione Nikolaus August Otto nel 1876, ideatore del ciclo termodinamico a quattro tempi da cui prende il nome che diventerà lo standard per tutti i veicoli a benzina, in seguito Rudolf Diesel che sviluppò il motore ad accensione per compressione che porta ancora oggi il suo nome[1].

Nel corso del tempo il motore endotermico ha subito un'evoluzione continua, sia dal punto di vista meccanico che termodinamico. L'aumento delle prestazioni, la riduzione dei consumi e delle emissioni inquinanti, l'aumento di affidabilità, hanno contribuito a rendere questa tecnologia la soluzione dominante nel settore dei trasporti per oltre un secolo.

Il principio di funzionamento del motore endotermico si basa sulla combustione di una miscela aria-combustibile compressa all'interno di una apposita camera, l'energia generata produce un aumento di pressione dei gas che agiscono sul pistone trasformando così l'energia chimica del combustibile in lavoro meccanico disponibile all'albero motore.

Tra le varie tipologie di motori endotermici, il motore a quattro tempi ciclo Otto rappresenta una delle configurazioni più diffuse nel settore automobilistico, grazie al buon compromesso tra prestazioni, rendimento, affidabilità e semplicità costruttiva. Il ciclo completo si sviluppa in quattro fasi distinte: aspirazione, compressione, combustione-espansione, ed infine scarico.

Durante la fase di aspirazione viene aperta la rispettiva valvola che permette l'ingresso della sola aria se il motore è a iniezione diretta, o della miscela aria-combustibile se è

ad iniezione indiretta, il pistone scende dal punto morto superiore (PMS) al punto morto inferiore (PMI) liberando il volume del cilindro per far posto alla miscela.

Nella fase di compressione entrambe le valvole risultano chiuse, il pistone inverte il moto e risale fino al PMS comprimendo la miscela all'interno della camera di combustione aumentandone la pressione e la temperatura.

Successivamente avviene la combustione della miscela tramite l'innesco di una candela, l'elevata pressione rilasciata dalla miscela spinge con forza il pistone nuovamente verso il PMI producendo lavoro meccanico sull'albero motore, aumentando il volume del cilindro. Questa fase è l'unica che genera lavoro utile all'interno del ciclo, prende il nome di combustione ed espansione.

Infine, durante la fase di scarico il pistone risale nuovamente verso il PMS con la valvola di scarico aperta che permette l'espulsione dei gas combusti nell'ambiente esterno, liberando l'interno del cilindro preparando il motore alla successiva fase di aspirazione.



Figura 1: Rappresentazione grafica delle fasi del ciclo Otto. [1]

Le quattro fasi precedentemente descritte sono rappresentate schematicamente in Figura 1, nella quale è possibile osservare il movimento del pistone, l'apertura e la chiusura delle valvole e il percorso dei flussi all'interno del cilindro durante il ciclo operativo.

Dal punto di vista termodinamico, il ciclo Otto ideale può essere rappresentato tramite il diagramma di pressione-volume (P-V), mostrato in Figura 2. In questo diagramma è possibile osservare l'andamento della pressione all'interno del cilindro in funzione del volume durante le diverse fasi del ciclo.

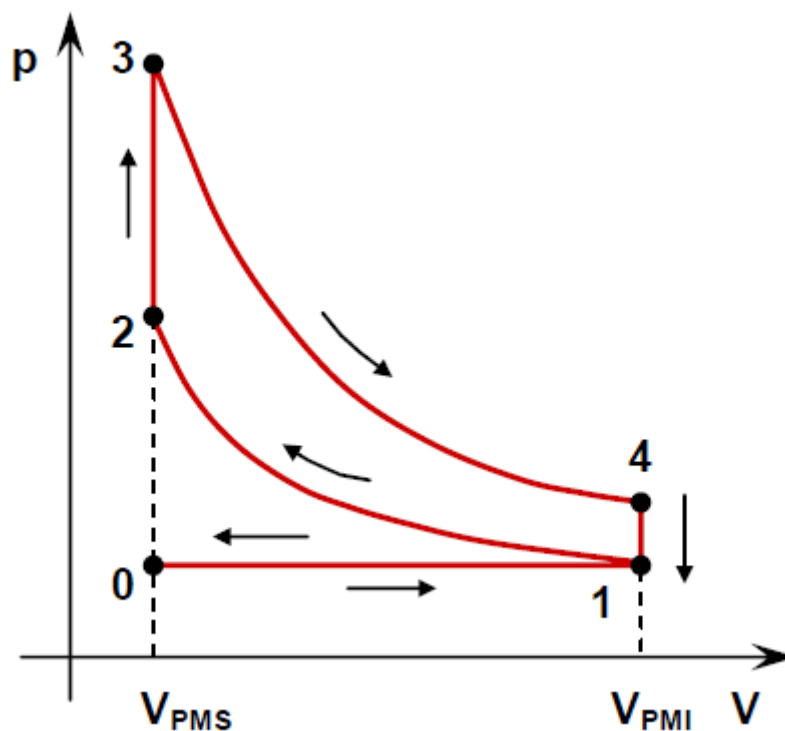


Figura 2: Diagramma pressione-volume ideale del ciclo Otto, detto anche diagramma di indicatore o di Watt. [1]

Dal punto di vista teorico il rendimento del ciclo Otto dipende principalmente dal rapporto di compressione del motore, ossia il rapporto tra il volume totale del cilindro e il volume della sola camera di scoppio, in particolare del rapporto tra i volumi a PMI e PMS. Esso costituisce uno dei parametri fondamentali nella progettazione di un motore endotermico, influenzandone direttamente il rendimento, prestazioni ed efficienza. Il rapporto di compressione può essere espresso tramite la seguente relazione:

$$r_c = \frac{V_0 + V_c}{V_0}$$

Mentre il rendimento termico ideale del ciclo Otto può essere espresso mediante la seguente relazione[1]:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}}$$

Dove η_t rappresenta il rendimento termico ideale del ciclo Otto, r_c il rapporto di compressione e γ il coefficiente politropico del fluido, ossia rappresenta il rapporto tra i calori specifici del gas a pressione costante e a volume costante, $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, nel caso dell'aria il coefficiente assume generalmente un valore $\gamma \approx 1.4$.

Dalla relazione è possibile osservare come all'aumentare del rapporto di compressione aumenti anche il rendimento teorico del motore. Nella pratica, tuttavia, il rendimento reale risulta inferiore rispetto a quello ideale a causa delle perdite meccaniche, termiche e fluidodinamiche presenti durante il funzionamento del motore. In linea generale un motore aspirato raggiunge rapporti di compressione compresi tra 9:1 e 14:1, mentre nei sovralimentati i valori risultano generalmente inferiori, compresi tra 8:1 e 11:1 al fine di limitare il rischio di detonazione dovuto alle maggiori pressioni e temperature in camera di combustione. Nei motori da competizione grazie all'impiego di carburanti specifici, materiali avanzati e tecnologie più evolute e costose è possibile raggiungere rapporti di compressioni significativamente più elevati a totale beneficio delle prestazioni.

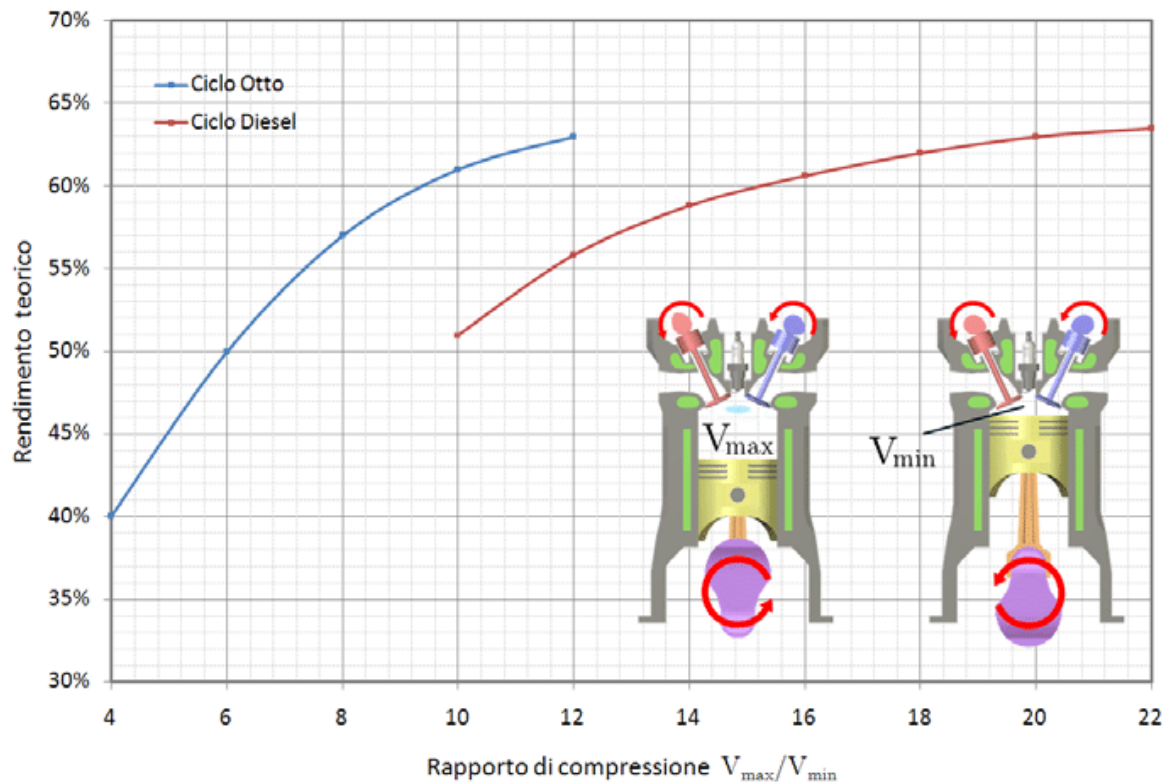


Figura 3: Il confronto tra il rendimento teorico del ciclo Otto e ciclo Diesel in funzione del rapporto di compressione. All'aumentare del rapporto di compressione cresce il rendimento teorico, i motori Diesel operano generalmente con rapporti di compressione più elevati rispetto ai motori ad accensione comandata. [1]

Per garantire il corretto svolgimento delle quattro fasi del ciclo è fondamentale il sistema di distribuzione, responsabile dell'apertura e della chiusura delle valvole di aspirazione e scarico in perfetta sincronizzazione con il movimento del pistone e dell'albero motore.

Il sistema di distribuzione influenza direttamente il riempimento del cilindro, l'evacuazione dei gas combusti, il rendimento volumetrico e di conseguenza le prestazioni e l'efficienza complessiva del motore. Per questo motivo la progettazione della distribuzione rappresenta uno degli aspetti più importanti nello sviluppo di un motore endotermico.

1.2 Componenti della distribuzione

La distribuzione è l'insieme dei componenti meccanici responsabili del controllo dell'apertura e della chiusura delle valvole di aspirazione e scarico. Il corretto funzionamento di questo sistema è fondamentale per garantire il regolare svolgimento del ciclo operativo ottimizzando il riempimento del cilindro e l'espulsione dei gas combusti massimizzando il rendimento e la coppia prodotta dal motore.

Nei moderni motori automobilistici la distribuzione è generalmente comandata da uno o più alberi a camme sincronizzati con l'albero motore mediante cinghia dentata, catena oppure più raramente cascata di ingranaggi, ogni sistema presenta vantaggi e svantaggi in termini di affidabilità, rumorosità, costi di produzione e manutenzione.

La cinghia dentata rappresenta una soluzione molto diffusa grazie al basso costo, alla ridotta rumorosità e alla leggerezza. Richiede però una manutenzione periodica con sostituzione programmata poiché l'usura può causarne il cedimento con possibili gravi danni al motore.

La distribuzione a catena offre generalmente una maggior affidabilità e durata nel tempo, riducendo la necessità di sostituzione se prestata la giusta attenzione al lubrificante. Di contro presenta una maggiore rumorosità, costi più elevati e maggiori attriti rispetto alla cinghia dentata.

La cascata di ingranaggi viene usata quasi esclusivamente in applicazioni industriali o su motori ad altissime prestazioni, grazie alla grande precisione e affidabilità del sistema. Tuttavia, essa comporta costi elevati, maggior peso e una rumorosità piuttosto elevata rispetto ai sistemi tradizionali.

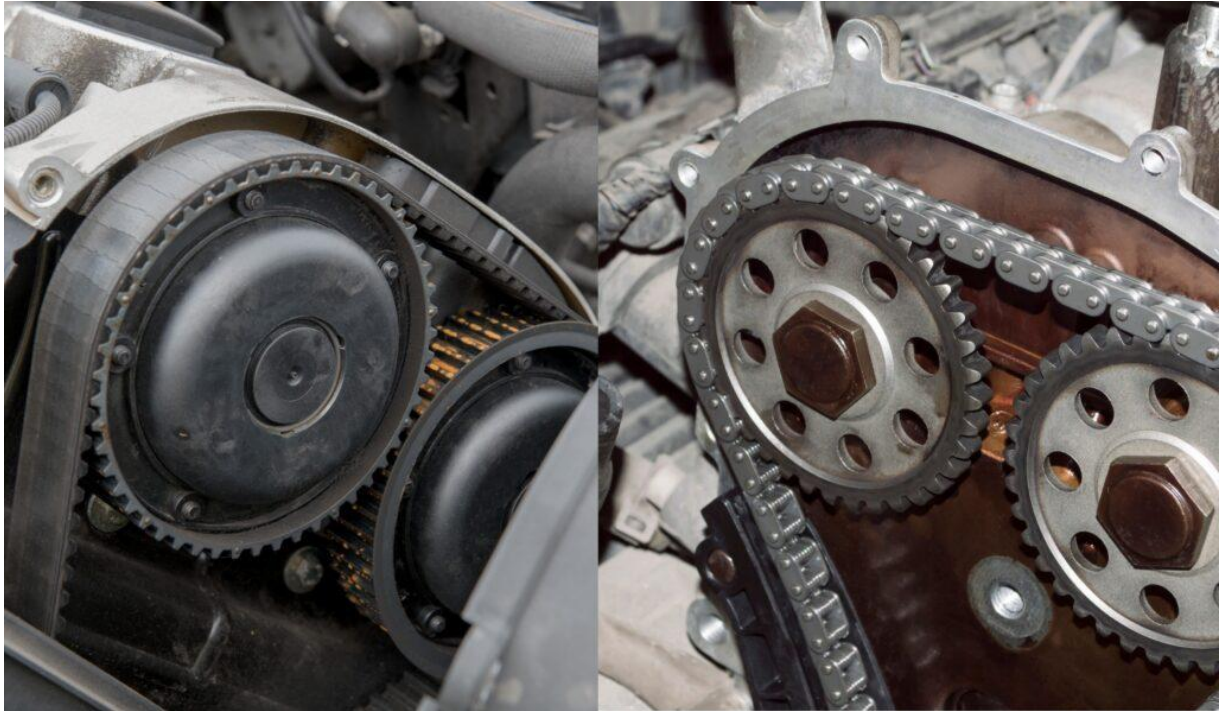


Figura 4: Confronto tra due sistemi di trasmissione della distribuzione. A sinistra è mostrata una distribuzione comandata tramite cinghia dentata, mentre a destra una distribuzione tramite catena.
[2]

L'albero a camme rappresenta uno degli elementi fondamentali del sistema di distribuzione. Esso è costituito da un albero sul quale sono ricavate camme opportunamente sagomate in grado di comandare l'apertura e la chiusura delle valvole secondo una precisa legge cinematica.

Durante la rotazione dell'albero a camme, il profilo della camma trasmette il moto alle valvole tramite punterie, bilancieri oppure sistemi diretti, vincendo la forza esercitata dalle molle valvole. Terminata l'azione della camma, la molla richiama le valvole nella posizione di chiusura garantendo la tenuta della camera di combustione.

La geometria del profilo della camma influenza direttamente parametri fondamentali quali alzata della valvola, durata di apertura e chiusura e istanti di apertura e chiusura rispetto alla posizione del pistone. Tali parametri determinano in maniera significativa il comportamento del motore a diversi regimi di rotazione.

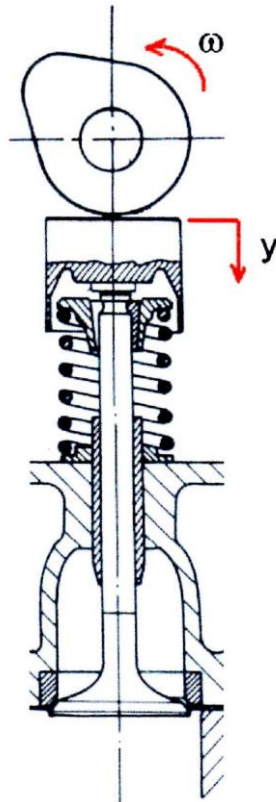


Figura 5: Vista in sezione del sistema camma-valvola con richiamo tramite molla. La rotazione della camma determina l'apertura della valvola secondo una precisa legge di alzata. [2]

L'apertura della valvola dipende direttamente dalla geometria del profilo della camma. Durante la rotazione dell'albero a camme, la parte eccentrica della camma esercita una forza sulla punteria provocando l'abbassamento della valvola e comprimendo la relativa molla di richiamo[2].

L'entità dello spostamento della valvola prende il nome di alzata valvola e rappresenta uno dei principali parametri della distribuzione, un'elevata alzata consente generalmente un miglior riempimento del cilindro agli alti regimi, aumentando la portata d'aria aspirata dal motore.

Oltre all'alzata un altro parametro fondamentale è rappresentato dalla durata di apertura della valvola, ossia l'intervallo angolare durante il quale la valvola rimane aperta rispetto alla rotazione dell'albero motore. Anche questo parametro influenza in maniera significativa le prestazioni e il comportamento del motore a diversi regimi di rotazione.

La scelta di alzata e durata della valvola rappresenta quindi un compromesso progettuale tra reattività ai bassi regimi, potenza agli alti regimi, consumi ed emissioni.



Figura 6: Sistema di distribuzione bialbero DOHC (Double Overhead Camshaft) con doppio albero a camme in testa dedicato al comando delle valvole di aspirazione e scarico. [2]

Nei moderni motori automobilistici vengono frequentemente utilizzate configurazioni con doppio albero a camme in testa, indicate con la sigla DOHC. In questa configurazione un albero a camme è dedicato al comando delle valvole di aspirazione mentre il secondo controlla le valvole di scarico.

Questa soluzione consente una gestione più precisa delle valvole e permette l'utilizzo di configurazioni multivalvole, migliorando il riempimento del cilindro e l'evacuazione dei gas combusti.

1.3 Diagramma della distribuzione

Il funzionamento della distribuzione può essere rappresentato tramite il diagramma della distribuzione, nel quale vengono indicati gli istanti di apertura e chiusura delle valvole rispetto alla posizione dell'albero motore.

In un motore reale le valvole non vengono aperte e chiuse esattamente in corrispondenza dei punti morti del pistone, a causa dell'inerzia dei gas e dei tempi necessari per il riempimento e lo svuotamento del cilindro le aperture e le chiusure delle valvole vengono anticipate o ritardate rispetto al ciclo teorico ideale.

Nel Diagramma polare della distribuzione è possibile osservare come gli istanti di apertura e chiusura delle valvole risultino anticipati o ritardati rispetto ai punti morti del pistone, questo comportamento consente di sfruttare l'inerzia dei flussi gassosi migliorando il riempimento del cilindro e l'evacuazione dei gas combusti.

L'anticipo di apertura della valvola di aspirazione permette di iniziare il riempimento del cilindro prima dell'inizio della fase di aspirazione, mentre il ritardo di chiusura

consente di sfruttare la velocità del flusso d'aria anche dopo il raggiungimento del punto morto inferiore.

Analogamente, l'anticipo di apertura della valvola di scarico favorisce la riduzione della pressione residua all'interno del cilindro durante la fase finale dell'espansione, mentre il ritardo di chiusura migliora l'evacuazione dei gas combusti

L'intervallo durante il quale le valvole di aspirazione e scarico risultano contemporaneamente aperte prende il nome di incrocio valvole, questo parametro influenza in maniera significativa il comportamento del motore ai diversi regimi di rotazione, il rendimento volumetrico e l'evacuazione dei gas combusti.



Figura 7: Diagramma polare della distribuzione in un motore a quattro tempi. Nel diagramma sono rappresentati gli istanti di apertura e chiusura delle valvole rispetto alla rotazione dell'albero motore. [1]

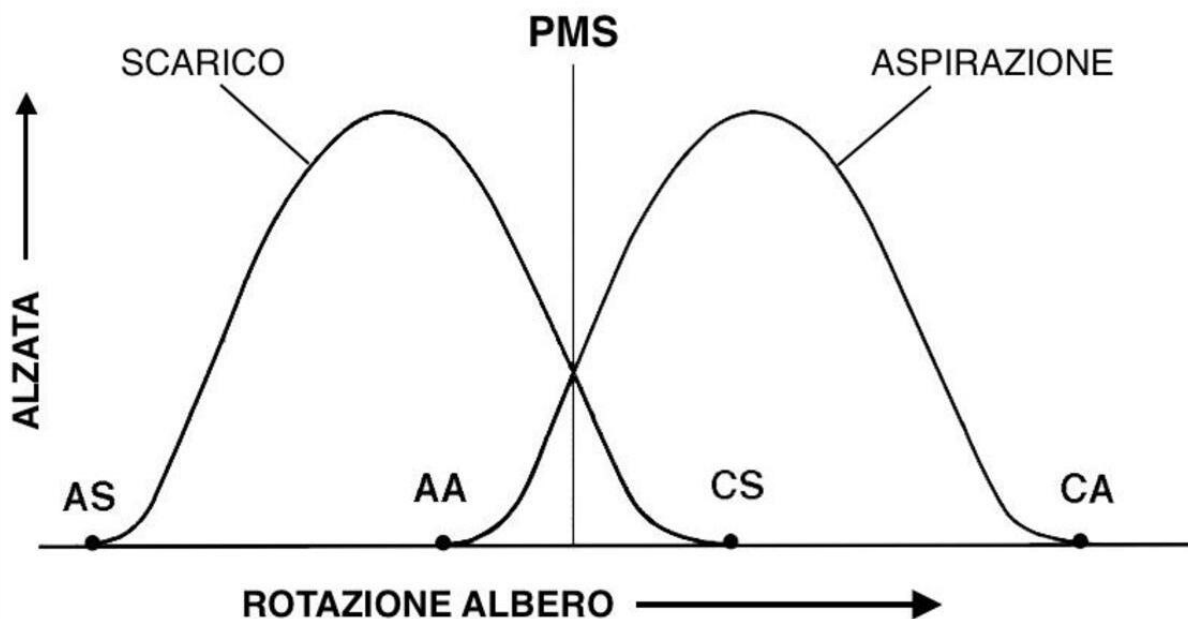


Figura 8: Diagramma di alzata delle valvole di aspirazione e scarico in funzione della rotazione dell'albero motore. Nel diagramma sono evidenziati gli istanti di apertura e chiusura delle valvole e la zona di incrocio in prossimità di PMS. [2]

Nel diagramma di alzata è possibile osservare l'andamento dell'apertura delle valvole di aspirazione e scarico in funzione della posizione dell'albero motore. I punti indicati con AA (apertura aspirazione) e CA (chiusura aspirazione) rappresentano rispettivamente l'anticipo di apertura e il ritardo di chiusura della valvola di aspirazione, mentre AS e CS indicano analogamente l'apertura e la chiusura dello scarico.

In prossimità del punto morto superiore si nota facilmente la zona di incrocio valvole, ossia la zona dove entrambe le valvole sono aperte, consente di sfruttare l'inerzia dei flussi gassosi per migliorare il riempimento e l'evacuazione dei gas nel cilindro.

1.4 Limiti della fasatura fissa

Nei motori tradizionali la fasatura della distribuzione viene definita in fase di progettazione attraverso la geometria delle camme e rimane invariata durante il funzionamento del motore. Questa soluzione comporta inevitabilmente un compromesso progettuale, poiché le condizioni fluidodinamiche all'interno del cilindro cambiano sensibilmente al variare del regime di rotazione e del carico del motore.

Una distribuzione ottimizzata per il funzionamento ai bassi regimi non risulta ideale agli alti regimi e viceversa, di conseguenza il progettista deve scegliere una configurazione della distribuzione capace di garantire il miglior compromesso

possibile tra coppia motrice, potenza massima, consumi, regolarità di funzionamento ed emissioni inquinanti.

Ad un regime di giri basso la velocità dei flussi gassosi risulta relativamente ridotta, un eccessivo incrocio valvole oppure una durata di apertura troppo elevata possono causare fenomeni di reflusso della miscela aspirata, peggiorando il riempimento del cilindro con impatti negativi su coppia e regolarità di utilizzo.

Al contrario a rotazioni elevate il tempo disponibile per il riempimento diminuisce notevolmente, in queste condizioni risultano vantaggiosi maggiori anticipi, ritardi ed alzate delle valvole così da sfruttare l'inerzia dei flussi gassosi e migliorare il rendimento volumetrico del motore.

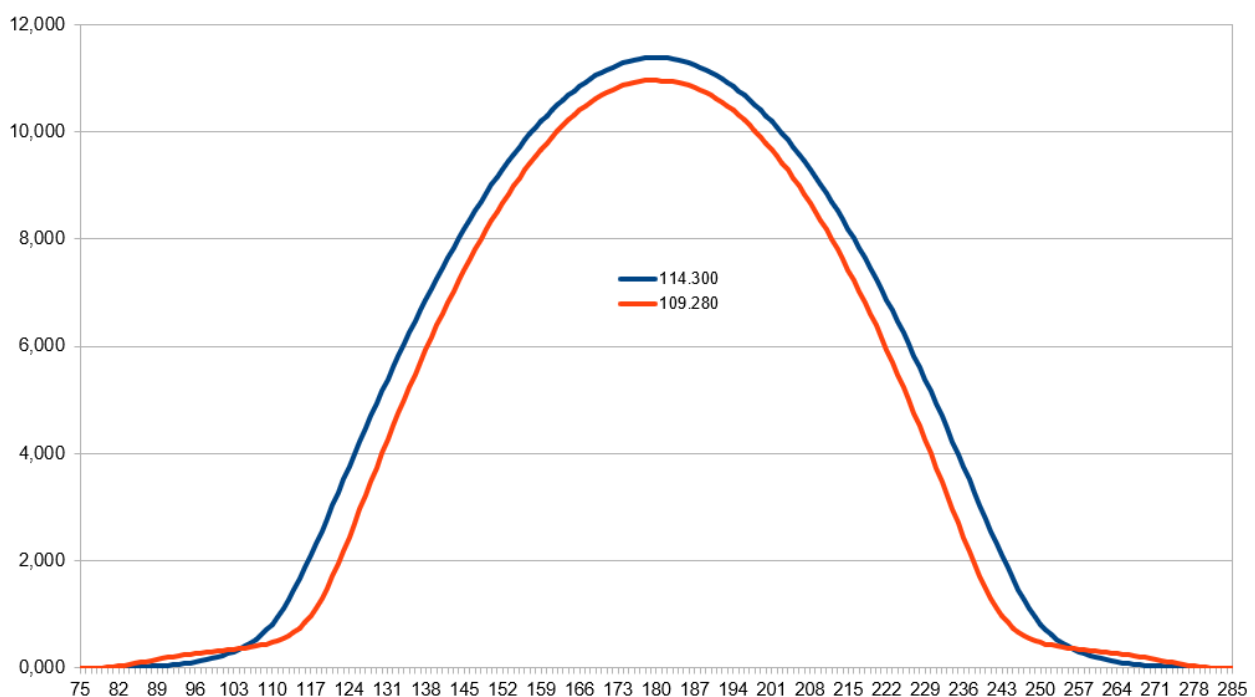


Figura 9: Comparazione albero a camme, profilo corsa e profilo stradale.[3]

Il grafico fornito da Colombo & Bariani [3], ditta specializzata nella progettazione e produzione di alberi a camme stradali e da corsa di ogni tipo, evidenzia la differenza tra due profili, la curva arancione è il profilo stradale con un'alzata pari a 10,928mm e quella blu con profilo da corsa ed un'alzata pari a 11,43mm.

Si osserva come il profilo sportivo presenti una maggiore alzata e una maggior durata di apertura della valvola. Inoltre, l'apertura avviene con un leggero anticipo e la chiusura con un maggior ritardo rispetto al profilo stradale. Tali caratteristiche consentono di migliorare il riempimento del cilindro agli elevati regimi di rotazione, incrementando il rendimento volumetrico e le prestazioni del motore, al contrario, il profilo stradale privilegia le regolarità di funzionamento ai bassi regimi, riducendo le sollecitazioni meccaniche e migliorando affidabilità e comfort di utilizzo.

Anche sostituendo un albero a camme non è comunque possibile variarne eccessivamente le geometrie, poiché un profilo troppo spinto potrebbe compromettere il corretto funzionamento del motore ai bassi regimi fino a rendere addirittura difficoltoso il mantenimento del minimo.

Per superare i limiti imposti dalla distribuzione a fasatura fissa nel corso degli anni sono stati sviluppati sistemi in grado di modificare gli istanti di apertura e chiusura delle valvole, variarne l'alzata o addirittura cambiarne completamente il profilo della camma durante il funzionamento del motore. Queste soluzioni hanno permesso di migliorare il comportamento del motore ai diversi regimi di rotazione, aumentando prestazioni, elasticità ed efficienza.

Capitolo 2. Nascita della fasatura variabile

2.1 Motivazioni e sviluppo

Come descritto nel capitolo precedente, la distribuzione tradizionale a fasatura fissa rappresenta inevitabilmente un compromesso progettuale tra funzionamento ai bassi regimi, prestazioni alle alte rotazioni, consumi ed emissioni. Con l'aumentare del regime di rotazione cambiano infatti le velocità dei flussi, i tempi di riempimento del cilindro e il comportamento fluidodinamico dei gas.

Nei motori progettati per privilegiare la coppia ai bassi regimi vengono generalmente adottate fasature più contenute, con ridotti anticipi e ritardi delle valvole. Questa soluzione garantisce una buona regolarità di funzionamento, un ottimo spunto in città, consumi contenuti ma limita il rendimento volumetrico e le prestazioni agli alti.

Al contrario, motori progettati per ottenere elevate prestazioni agli alti regimi richiedono generalmente maggiore alzata valvole, tempi di apertura più lunghi e un incrocio valvole più accentuato, così da favorire il riempimento del cilindro sfruttando l'inerzia dei flussi gassosi. Tuttavia, queste soluzioni possono penalizzare il funzionamento ai bassi regimi, rendendo il motore fiacco, aumentando i consumi, irregolarità di funzionamento ed emissioni.

La necessità di superare questi limiti ha portato allo sviluppo dei primi sistemi di fasatura variabile, in grado di modificare gli istanti di apertura e chiusura delle valvole a seconda dei regimi del motore.

2.2 I primi brevetti

I primi studi relativi alla variazione della distribuzione risalgono ai primi decenni del XX secolo, quando gli ingegneri iniziarono a comprendere come una fasatura fissa rappresentasse inevitabilmente un compromesso tra funzionamento ai bassi ed elevati regimi di rotazione.

Già nei primi anni del Novecento vennero depositati infatti alcuni brevetti[4] relativi a sistemi di variazione della fase e della durata delle valvole. Le prime soluzioni erano prevalentemente di tipo meccanico e risultavano spesso particolarmente complesse, ingombranti e difficili da applicare ai motori automobilistici dell'epoca.

Successivamente diverse case automobilistiche iniziarono a sperimentare i sistemi di distribuzione variabile, soprattutto come spesso accade in ambito sportivo e sperimentale. Tuttavia, a causa delle limitazioni tecnologiche dell'epoca tali sistemi rimasero per molti anni solo dei prototipi o applicazioni sperimentali.

Solamente tra gli anni '70 e 80' grazie allo sviluppo di sistemi idraulici più compatti, affidabili ed economicamente sostenibili la fasatura variabile iniziò a trovare concreta applicazione nei motori automobilistici.

No. 767,794.

A. P. BRUSH.

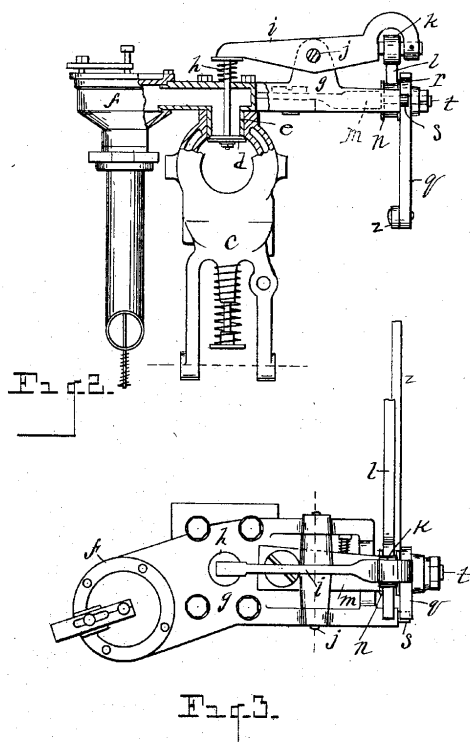
PATENTED AUG. 16, 1904. No. 767,794.

INLET VALVE GEAR FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES.

APPLICATION FILED AUG. 3, 1903.

NO MODEL.

3 SHEETS-SHEET 2. NO MODEL.



WITNESSES:
O. B. Barzinger,
M. L. Simmons

Alanson P. Brush, INVENTOR.
BY
Newell S. Wright, ATTORNEY.

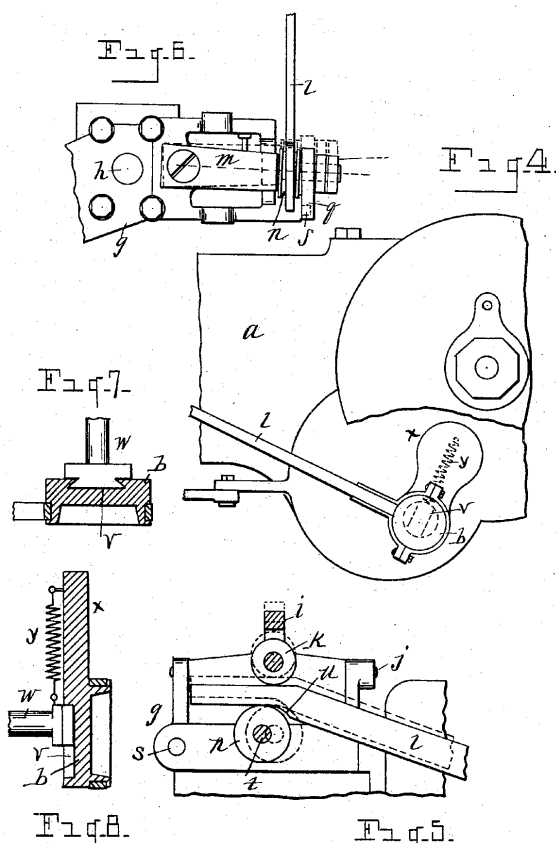
PATENTED AUG. 16, 1904.

A. P. BRUSH.

INLET VALVE GEAR FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES.

APPLICATION FILED AUG. 3, 1903.

3 SHEETS-SHEET 3.



WITNESSES:
O. B. Barzinger,
M. L. Simmons

Alanson P. Brush, INVENTOR.
BY
Newell S. Wright, ATTORNEY.

Figura 10 e 11: Uno dei primissimi brevetti depositati, 16 agosto 1904 da Alanson Patridge Brush, montò precedentemente questo sistema in una Cadillac Runabout and Tonneau. [4]

Nel 1972 la prima casa automobilistica a depositare il brevetto in merito è la FIAT. In particolare, Giovanni Torazza[5], il sistema era idraulico e sfruttava la variazione di pressione per variare il fulcro della camma, ciò permetteva anche una variazione di alzata.

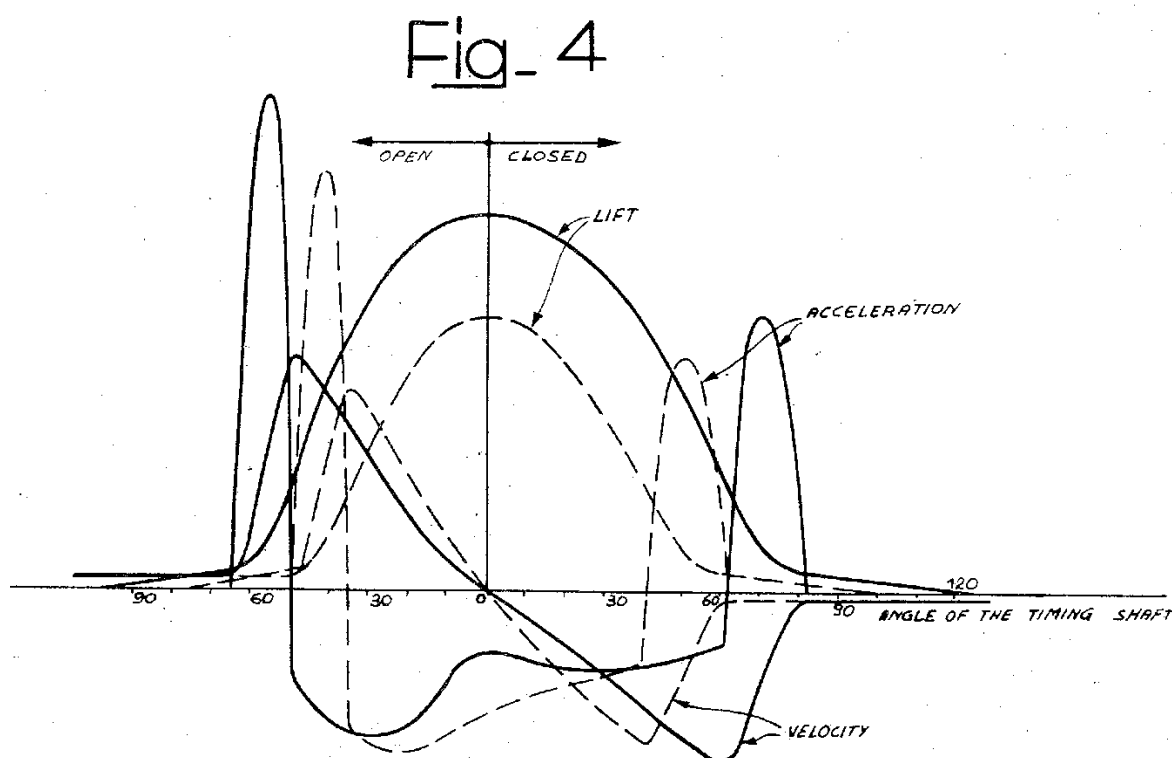


Figura 12: Estratto di uno dei brevetti sviluppati da Torazza relativo allo studio delle leggi di alzata. Nel grafico sono rappresentati l'andamento dell'alzata, della velocità e dell'accelerazione della valvola nelle diverse condizioni di esercizio. [5]

2.3 L'Alfa Romeo

La prima concreta applicazione automobilistica di un sistema di fasatura variabile su un motore di grande serie viene attribuita ad Alfa Romeo, che nel 1980 introdusse un variatore di fase sul motore bialbero montato sull'Alfa Romeo Spider.

L'obiettivo principale del sistema era quello di migliorare l'elasticità, coppia motrice e regolarità di funzionamento a regimi bassi, mantenendo al tempo stesso le elevate prestazioni agli alti regimi tipiche del bialbero Alfa Romeo.

Il sistema agiva esclusivamente sulla fase dell'albero a camme di aspirazione modificando gli istanti di apertura e chiusura delle valvole tramite un attuatore idraulico alimentato dalla pressione dell'olio motore, quando quest'ultimo sale di giri aumenta la pressione dell'olio che spinge in un'apposita parete che fa muovere l'albero lungo una dentatura elicoidale sfasandolo di 20°, al calare del regime una molla permette il ritorno alla posizione di riposo appena la pressione dell'olio cala.

Rispetto alle soluzioni moderne il variatore di fase Alfa Romeo risultava relativamente semplice, poiché funzionava secondo una logica ON/Off e non consentiva una regolazione continua della fase, nonostante ciò, rappresentò un'importantissima innovazione tecnologica, dimostrando per la prima volta l'efficacia della fasatura variabile su un'automobile di serie.

L'introduzione del variatore consentì di ottenere un miglioramento della coppia ai bassi regimi, una maggior elasticità del motore e una riduzione dei consumi ed emissioni, senza perdere il carattere sportivo di Alfa Romeo grazie ad un aumento agli alti regimi dell'incrocio dovuto alla rotazione di 20° dell'albero a camme per sfruttare l'inerzia dei gas in aspirazione.

Il sistema Alfa Romeo rappresentò un punto di svolta nello sviluppo dei moderni sistemi di fasatura variabile, aprendo la strada alle successive soluzioni tecnologiche sviluppate dalle principali case automobilistiche nel corso degli anni.

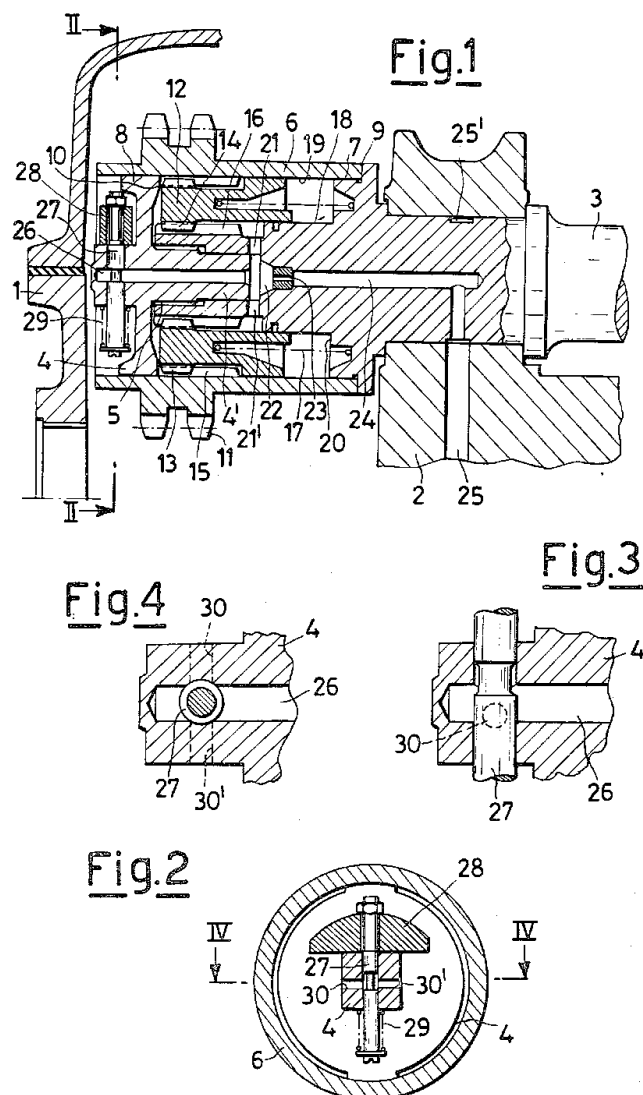


Figura 13: Il brevetto depositato da Giampaolo Garcea nel 1980 [6].

L'introduzione del variatore di fase Alfa Romeo rappresentò un importante punto di svolta nello sviluppo dei sistemi di distribuzione variabile, dimostrando concretamente i vantaggi ottenibili modificando il comportamento della distribuzione in funzione delle condizioni operative del motore.

Negli anni successivi numerose case automobilistiche iniziarono quindi a sviluppare sistemi sempre più evoluti, capaci non soltanto di variare la fase della distribuzione, ma anche l'alzata e la durata di apertura delle valvole, con l'obiettivo di migliorare ulteriormente prestazioni, rendimento ed emissioni.

Capitolo 3. Analisi dei principali sistemi di variazione della distribuzione

Nel presente capitolo verranno analizzati alcuni dei principali sistemi di distribuzione variabile sviluppati nel settore automotive, evidenziandone funzionamento, caratteristiche tecniche, vantaggi e limiti.

3.1 VTEC – Honda

Tra i sistemi di distribuzione variabile più conosciuti e rappresentativi nel panorama automobilistico vi è il sistema VTEC (Variable Valve Timing and Lift Electronic Control) sviluppato da Honda a fine anni '80[7].

Il sistema venne introdotto per la prima volta nel 1989 sul motore B16A, un quattro cilindri bialbero ad alte prestazioni destinato principalmente a vetture sportive compatte della casa giapponese. L'obiettivo del progetto era quello di ottenere un motore capace di garantire buona regolarità di funzionamento e consumi contenuti ai bassi regimi, mantenendo al tempo stesso elevate prestazioni agli alti regimi di rotazione.

A differenza dei primi sistemi di variazione della sola fase della distribuzione, il VTEC introdusse una soluzione in grado di modificare anche alzata e durata di apertura delle valvole basandosi sull'utilizzo di più profili di camma per comandare le stesse valvole. In condizioni di basso regime il motore utilizza un profilo di camma caratterizzato da ridotta alzata e minore durata di apertura, privilegiando regolarità di funzionamento, consumi contenuti e buona coppia ai bassi regimi.

All'aumentare del regime di rotazione, una centralina elettronica comanda l'attivazione di un circuito idraulico che, sfruttando la pressione dell'olio motore aziona un perno di bloccaggio collegando tra loro i bilancieri del sistema. In questo modo il comando delle valvole viene affidato ad una terza camma centrale caratterizzata da maggior alzata e maggior durata di apertura.

Il passaggio da un profilo all'altro avviene in corrispondenza di un determinato regime di rotazione, generalmente compreso tra 5000 e 6000 giri/min, variabile in funzione del motore e della sua calibrazione. Una volta attivato il sistema, le valvole seguono il profilo della camma ad alte prestazioni, consentendo un miglior riempimento del cilindro e un significativo incremento della potenza agli alti regimi.

Grazie a questa soluzione Honda riuscì a realizzare motori capaci di combinare caratteristiche normalmente contrapposte: buona guidabilità nell'utilizzo quotidiano e prestazioni elevate ad alti regimi di rotazione.

Honda VTEC System

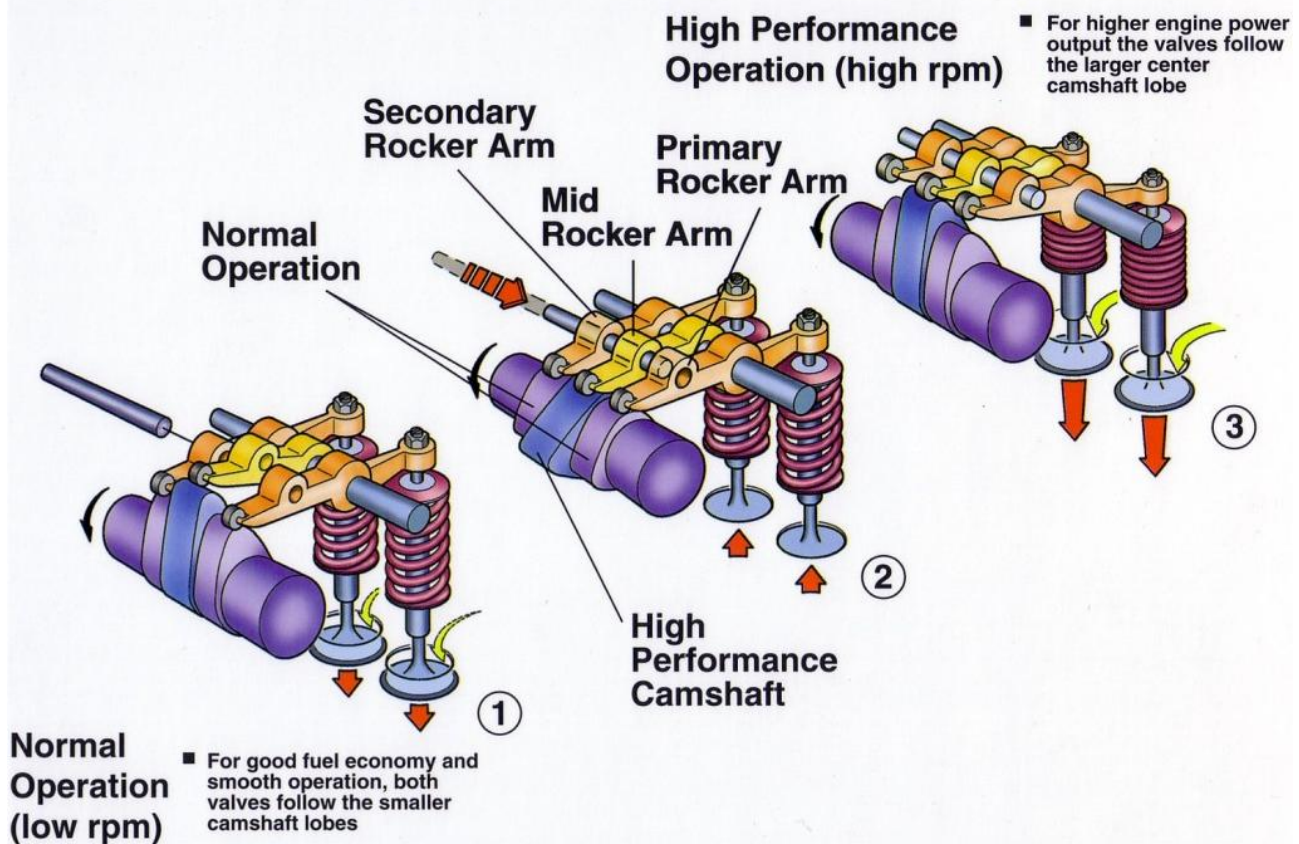


Figura 14: Schema di funzionamento del sistema VTEC Honda. Si notano le camme a bassa alzata, quella ad alzata elevata e il perno di accoppiamento. [7]

Uno dei principali punti di forza del sistema VTEC risiede nella sua semplicità costruttiva e nell'elevata affidabilità. Nonostante l'introduzione di componenti aggiuntivi rispetto ad una distribuzione tradizionale, il sistema mantiene una struttura meccanica relativamente semplice, basata principalmente su bilancieri, camme supplementari e attuazione idraulica tramite pressione dell'olio motore. Tale soluzione ha contribuito alla diffusione del sistema Honda, dimostrando elevata affidabilità anche dopo percorrenze molto elevate, difatti questo sistema rappresenta ancora oggi una delle soluzioni più iconiche nel campo della distribuzione variabile. Pur essendosi evoluto nelle successive versioni I-VTEC e VTEC Turbo, il principio di modificare l'alzata e la durata di apertura delle valvole continua ad essere utilizzato sui moderni propulsori della casa giapponese.

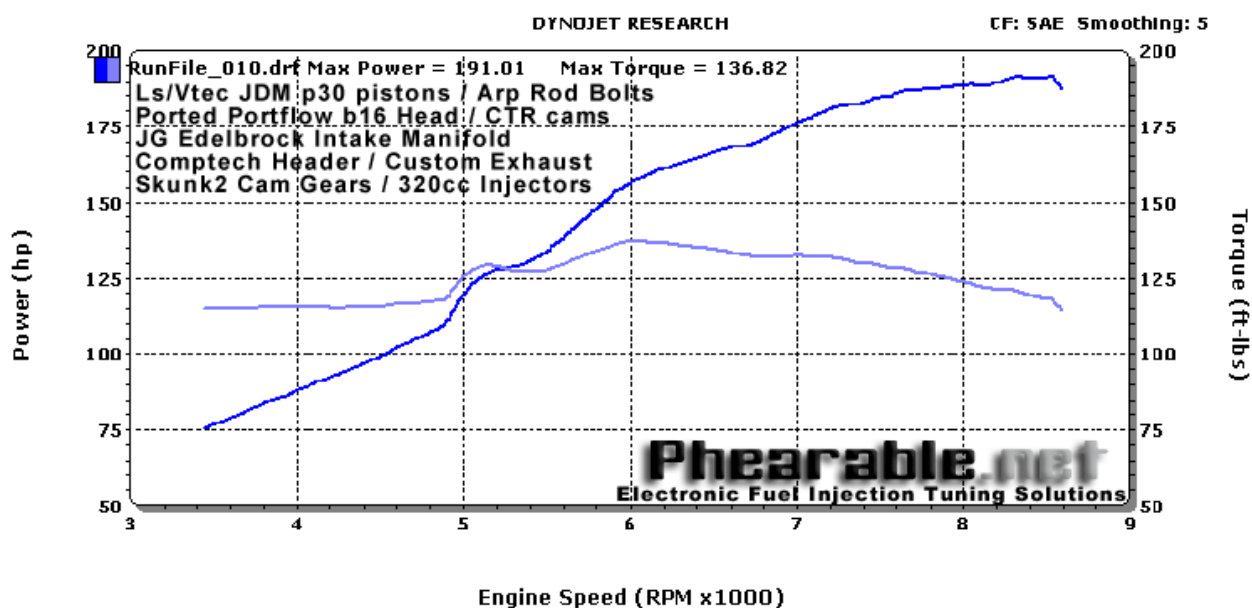


Figura 15: Grafico ottenuto al banco prova di un motore equipaggiato con tecnologia VTEC. [7]

È possibile osservare come in corrispondenza di un determinato regime di rotazione la curva di coppia e potenza presenti una variazione di andamento dovuta all'attivazione del sistema.

Ai bassi regimi il motore utilizza il profilo di camma ad alzata e durata ridotte, privilegiando regolarità di funzionamento ed efficienza. Superata la soglia di intervento del VTEC, le valvole vengono comandate dal profilo ad alte prestazioni, caratterizzato da maggiore alzata e maggiore durata di apertura.

L'incremento volumetrico ottenuto agli alti regimi consente al motore di mantenere una crescita significativa della potenza fino a regimi di rotazione particolarmente elevati, caratteristica che ha reso i motori Honda VTEC famosi per la loro elevata potenza specifica. Questa tecnologia però presenta anche alcuni difetti, il cambiamento repentino di comportamento della coppia è molto brusco e fastidioso nell'utilizzo quotidiano, inoltre non ha un sistema di regolazione continua ma è di fatto un sistema ON/OFF, per gli appassionati storici questo non solo non è visto come un difetto, bensì come un pregio riconoscendo l'iconico "urlo" dal terminale di scarico non appena entra in funzione la tecnologia Honda.

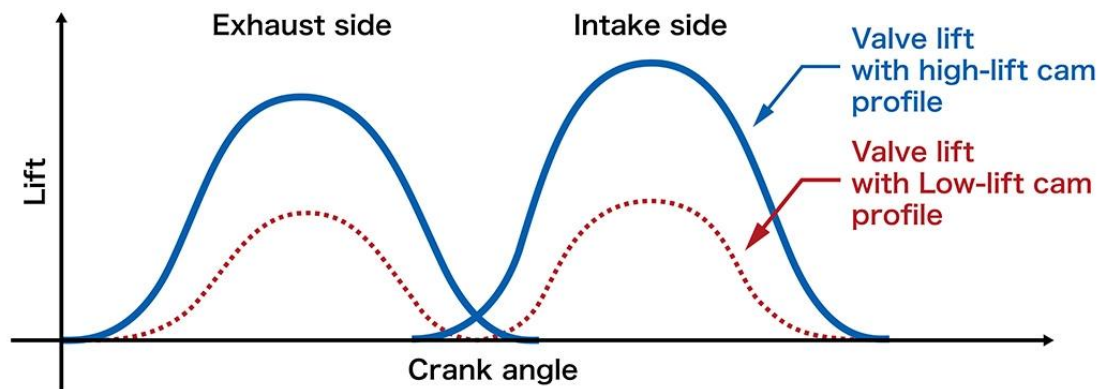


Figura 16: Comparazione tra le camme di bassa alzata (low lift) e quelle di elevata alzata (High lift) che godono anche di durate superiori. [7]

Come mostra la Figura 16, l'utilizzo di una camma caratterizzata da maggiore alzata e maggiore durata di apertura consente di incrementare la quantità di aria introdotta all'interno del cilindro durante la fase di aspirazione, aumentando la fase di incrocio valvole è possibile sfruttare con maggior efficacia i fenomeni fluidodinamici che si instaurano nei condotti di aspirazione e scarico, in particolare l'inerzia e l'effetto risucchio generato dai gas di scarico in uscita favoriscono il riempimento del cilindro, migliorando il rendimento volumetrico soprattutto ai regimi più elevati. In alcuni motori ed in alcuni casi è possibile raggiungere un rendimento volumetrico superiore all'1 grazie a questo fenomeno, ossia la massa d'aria entrante nel cilindro è maggiore della massa teorica.

$$\eta_v = \frac{m_a}{m_{a,teorica}}$$

Dove:

η_v rappresenta il rendimento volumetrico

m_a è la massa di aria effettivamente aspirata dal motore

$m_{a,teorica}$ è la massa d'aria teoricamente aspirabile dal cilindro

Il sistema VTEC va a sfruttare proprio il rendimento volumetrico ottenendo indirettamente una maggior potenza grazie alla possibilità di riempire maggiormente il cilindro, inoltre un profilo di camma che consente al motore di raggiungere regimi più

elevati mantenendo alta la coppia, significa raggiungere una potenza maggiore, poiché la potenza è legata alla coppia e alla velocità angolare secondo la relazione:

$$P = C \cdot \omega$$

Dove P indica la potenza, C la coppia motrice e ω la velocità angolare dell'albero motore, un aumento del regime di rotazione mantenendo elevati valori di coppia consente un significativo incremento della potenza erogata.

Il sistema VTEC rappresentò una delle innovazioni più significative nel campo della distribuzione variabile, dimostrando come fosse possibile migliorare il rendimento volumetrico del motore e ottenere elevate potenze specifiche senza compromettere eccessivamente guidabilità e affidabilità. Grazie alla variazione dell'alzata e della durata di apertura delle valvole, Honda riuscì a realizzare motori capaci di esprimere prestazioni particolarmente elevate agli alti regimi di rotazione mantenendo al contempo un comportamento adeguato nell'utilizzo quotidiano.

Nonostante i numerosi vantaggi, il funzionamento basato sul passaggio tra due distinti profili di camma non consentiva una regolazione continua della distribuzione. Per questo motivo, negli anni successivi altre case automobilistiche svilupparono soluzioni differenti volte ad ottimizzare il comportamento del motore in un intervallo più ampio di condizioni operative.

Tra queste assume particolare importanza il sistema VANOS sviluppato da BMW, basato sulla variazione della fase degli alberi a camme piuttosto che sull'utilizzo di differenti profili di camma.

3.2 VANOS – BMW

Mentre Honda perseguì la strada della variazione sia dell'alzata che della durata di apertura delle valvole, BMW sviluppò una soluzione basata sulla variazione della fase della distribuzione. Il sistema, denominato VANOS (VARIabile NOckenwellen Steuerung)[8], venne introdotto nel 1992 sul motore M50 ed ebbe il compito di ottimizzare gli istanti di apertura e chiusura delle valvole in funzione delle condizioni operative del motore.

A differenza del sistema VTEC trattato nel capitolo precedente, il VANOS non modifica il profilo delle camme né l'alzata delle valvole, ma interviene sulla posizione angolare dell'albero a camme rispetto all'albero motore. Attraverso un attuatore idraulico alimentato dalla pressione dell'olio motore il sistema è in grado di anticipare o ritardare la fase della distribuzione modificando gli istanti di apertura e chiusura delle valvole.

La prima versione viene rinominata successivamente Single Vanos poiché agiva esclusivamente sull'albero a camme di aspirazione. L'obiettivo era quello di migliorare la coppia ai bassi e medi regimi mantenendo elevate prestazioni agli alti regimi di rotazione. Successivamente BMW sviluppò il sistema Double Vanos, capace di intervenire sia sull'albero a camme di aspirazione sia su quello di scarico, aumentando ulteriormente le possibilità di ottimizzazione del funzionamento del motore.

3.2.1 Singolo VANOS

Il sistema VANOS singolo agisce esclusivamente sull'albero a camme di aspirazione mediante un attuatore idraulico controllato dalla centralina motore. Variando la posizione angolare dell'albero a camme rispetto all'albero motore, il sistema è in grado di anticipare o ritardare gli istanti di apertura e chiusura delle valvole di aspirazione in funzione del regime di rotazione e del carico del motore.

Ai bassi regimi l'apertura di aspirazione viene ritardata, ad un range medio fino a circa 5000 rpm la valvola subisce un deciso anticipo nell'apertura rispetto a prima, in modo da consentire un miglior riempimento del cilindro e garantire una buona dose di coppia motrice, in modo da contenere i consumi. Sopra i 5000 rpm la valvola di aspirazione ritorna nella sua fasatura precedente, cioè con apertura ritardata consentendo di sfruttare l'inerzia dei gas e ottimizzando la potenza che raggiunge i massimi livelli.



Figura 17: Nell'asse a camme di destra (aspirazione) è possibile notare il VANOS singolo. [8]

3.2.2 Doppio VANOS

Nel 1995 BMW ha sviluppato un'evoluzione del sistema VANOS introducendo un secondo variatore dedicato all'asse a camme di scarico. Questa non è l'unica differenza con il precedente modello, infatti il VANOS tradizionale variava la fasatura in 3 distinti regimi, invece il doppio VANOS effettua una regolazione continua dell'inclinazione dei due alberi a camme, sempre a seconda del numero di giri e della posizione dell'acceleratore. Ciò comporta una flessibilità decisamente maggiore che permette di avere un rendimento più costante con un utilizzo lineare evitando manovre meccaniche brusche. I motori tradizionali utilizzavano direttamente la pressione dell'olio motore, circa 4-6 bar, mentre i motori più sportivi delle versioni "M" erano dotati di una pompa radiale a pistoncini che aumenta la pressione a circa 80 bar, aumentando notevolmente la velocità di risposta del sistema e di conseguenza la prontezza del motore.

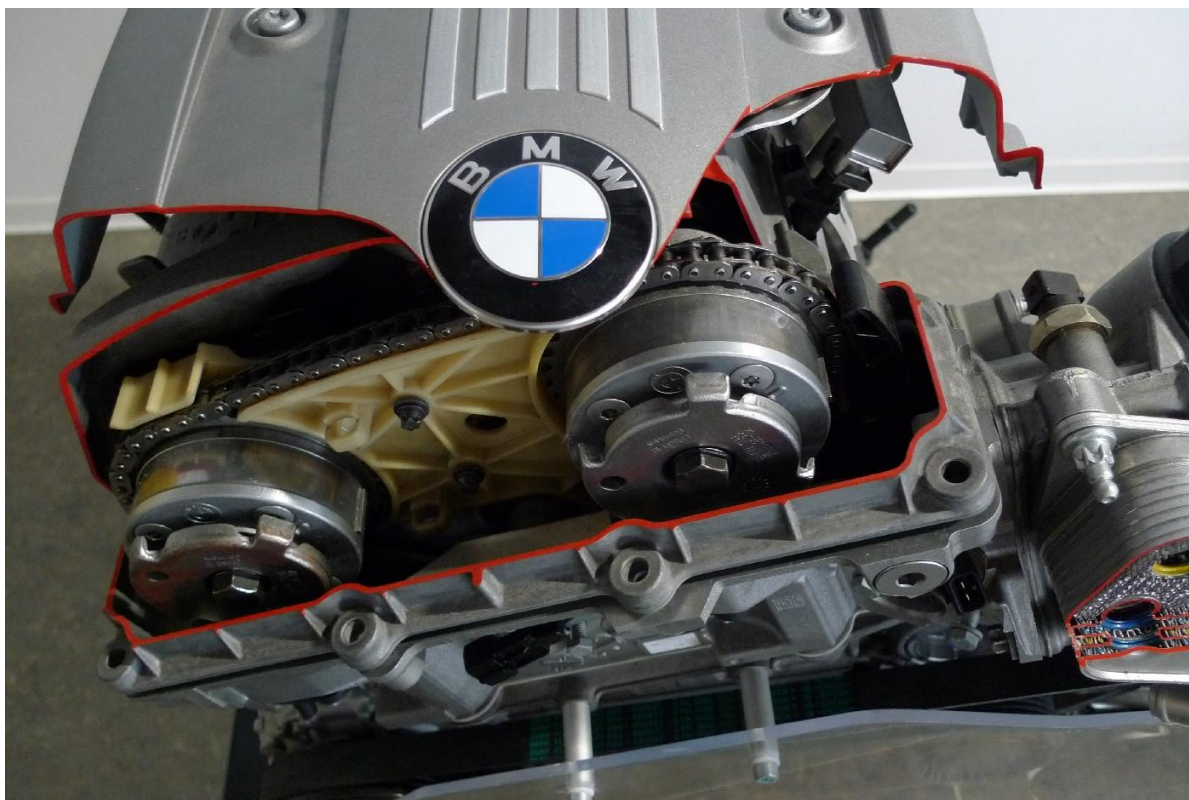


Figura 18: Motore BMW con configurazione a Doppio VANOS, la variazione è eseguita sia sullo scarico che sull'aspirazione. [8]

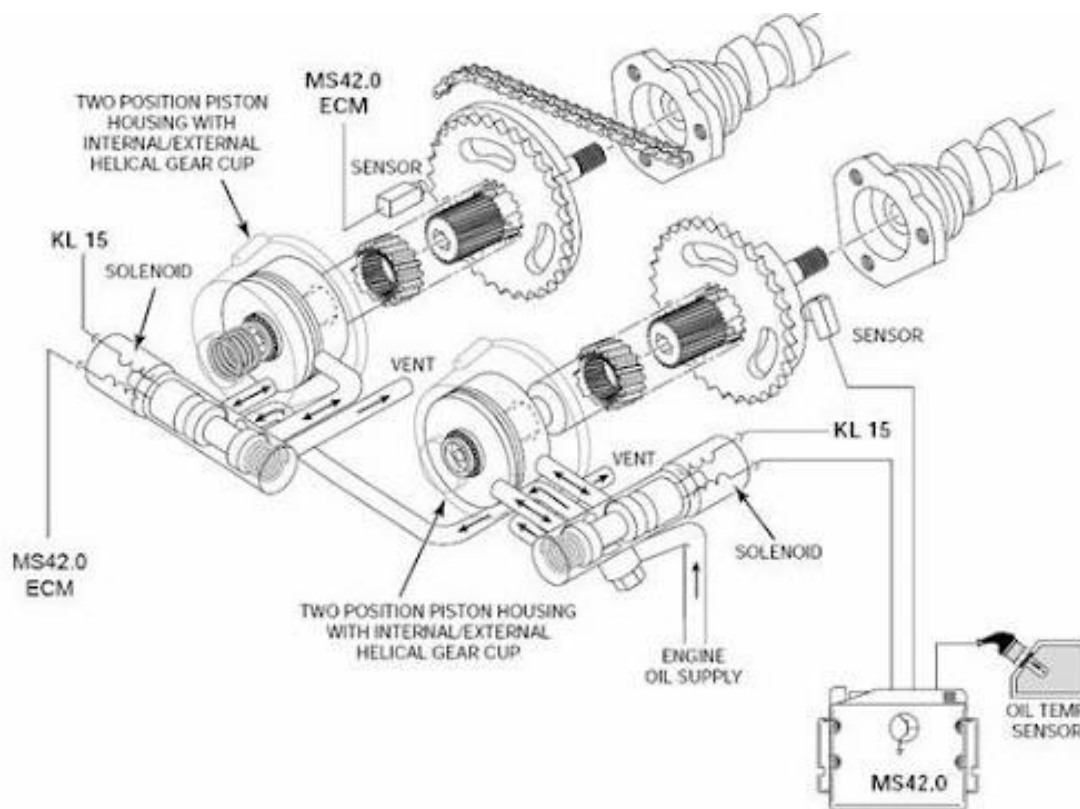


Figura 19: Schema di funzionamento del doppio VANOS. [8]

Come mostrato in Figura 19, il sistema doppio VANOS sfrutta la pressione dell'olio motore per modificare la posizione angolare degli alberi a camme rispetto alle ruote dentate di comando collegato con l'albero a gomiti. La centralina elettronica controlla appositi solenoidi che indirizzano l'olio all'interno degli attuatori idraulici.

L'olio motore viene inviato all'interno dell'attuatore, la pressione idraulica genera lo spostamento assiale del gruppo che grazie alla presenza di scanalature elicoidali compie anche una rotazione relativa dell'albero a camme rispetto alla ruota dentata della distribuzione, in questo modo è possibile anticipare o ritardare la fase della distribuzione.

La regolazione avviene in maniera continua durante il funzionamento del motore e permette di adattare gli istanti di apertura e chiusura delle valvole alle diverse condizioni operative. Il ritorno alla posizione di riposo è garantito dalla pressione dell'olio e dalla presenza di una molla di richiamo all'interno del sistema.

3.3 MIVEC – Mitsubishi

Il sistema MIVEC (Mitsubishi Innovative Valve timing Electronic Control)[9] rappresenta la tecnologia di distribuzione variabile sviluppata da Mitsubishi con l'obiettivo di migliorare il comportamento del motore ai diversi regimi di rotazione, incrementando prestazioni, rendimento ed efficienza.

Il sistema MIVEC venne introdotto nel 1992 sui primi motori aspirati ad elevate prestazioni della serie 4G92 DOHC da 1,6 litri. Nella sua configurazione originaria il sistema era progettato per modificare l'alzata e la durata di apertura delle valvole mediante l'impiego di differenti profili di camma, seguendo una filosofia di funzionamento simile a quella del sistema VTEC sviluppato da Honda, ossia con una seconda camma dedicata agli alti regimi.

3.3.1 MIVEC MD

Una delle evoluzioni più interessanti della tecnologia Mitsubishi fu il sistema MIVEC-MD (Modulated Displacement), introdotto nel 1993. Tale soluzione combinava il controllo variabile della distribuzione con la disattivazione di due cilindri durante il funzionamento a basso carico.

In condizioni di marcia a velocità costante, al minimo o durante le fasi di rilascio, il sistema manteneva chiuse le valvole di aspirazione e di scarico dei cilindri 1 e 4, interrompendone contemporaneamente l'alimentazione del combustibile. In questo modo il motore funzionava temporaneamente come un bicilindrico riducendone le perdite di pompaggio e di conseguenza il consumo di combustibile.

Grazie a questo sistema Mitsubishi dichiarò un miglioramento dei consumi tra il 10% ed il 20% rispetto ai propulsori convenzionali. Quando il conducente richiedeva maggiore potenza, il sistema riattivava automaticamente tutti e quattro i cilindri in maniera pressochè impercettibile ripristinando le ordinarie prestazioni del motore.

3.3.2 MIVEC TURBO

Una delle applicazioni più significative del sistema MIVEC in ambito sportivo è sicuramente rappresentata dal motore 4G63 della Mitsubishi Lancer Evolution IX, presentata nel 2005. Tale propulsore costituisce l'evoluzione diretta del celebre quattro cilindri turbocompresso montato sulla precedente Lancer Evolution VIII, rispetto alla quale mantiene inalterate le principali caratteristiche costruttive, introducendo tuttavia il sistema MIVEC sull'albero di aspirazione.

L'adozione della fasatura variabile consentì di migliorare l'erogazione della coppia ai bassi e medi regimi rendendo il motore più elastico e pronto nella risposta dell'acceleratore, infatti questo sistema non apportò cambiamenti alla potenza che rimase la medesima del modello precedente, piuttosto venne studiato per ridurre al minimo i tempi di caricamento del turbocompressore riducendo il famigerato "turbo lag" consentendo ad una vettura dal carattere sportivo come la Lancer Evolution di godere di un'accelerazione elevatissima sin dai bassi regimi, tali caratteristiche risultavano particolarmente vantaggiose nelle competizioni rallistiche, dove la disponibilità di coppia ai bassi e medi regimi e la rapidità di risposta del propulsore rivestono un ruolo determinante nell'uscita dalle curve e nelle continue variazioni di carico tipiche delle prove speciali.

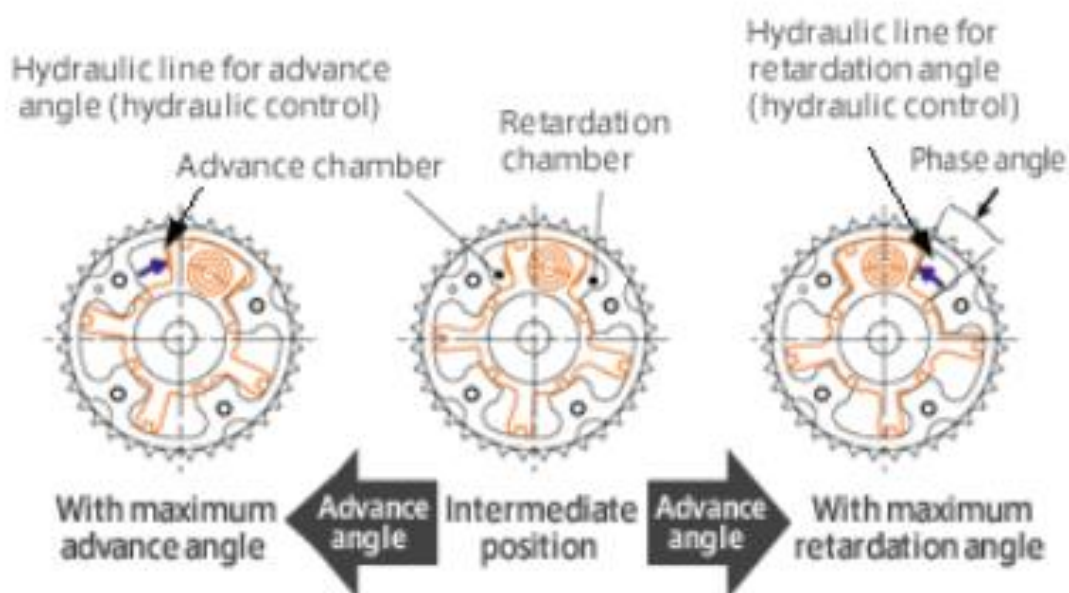


Figura 20: Principio di funzionamento del variatore MIVEC. Variando la pressione dell'olio nelle due camere dell'attuatore idraulico è possibile anticipare o ritardare continuamente la posizione angolare dell'albero a camme rispetto alla ruota dentata della distribuzione. [9]

■ Diagram of continuously variable valve timing control

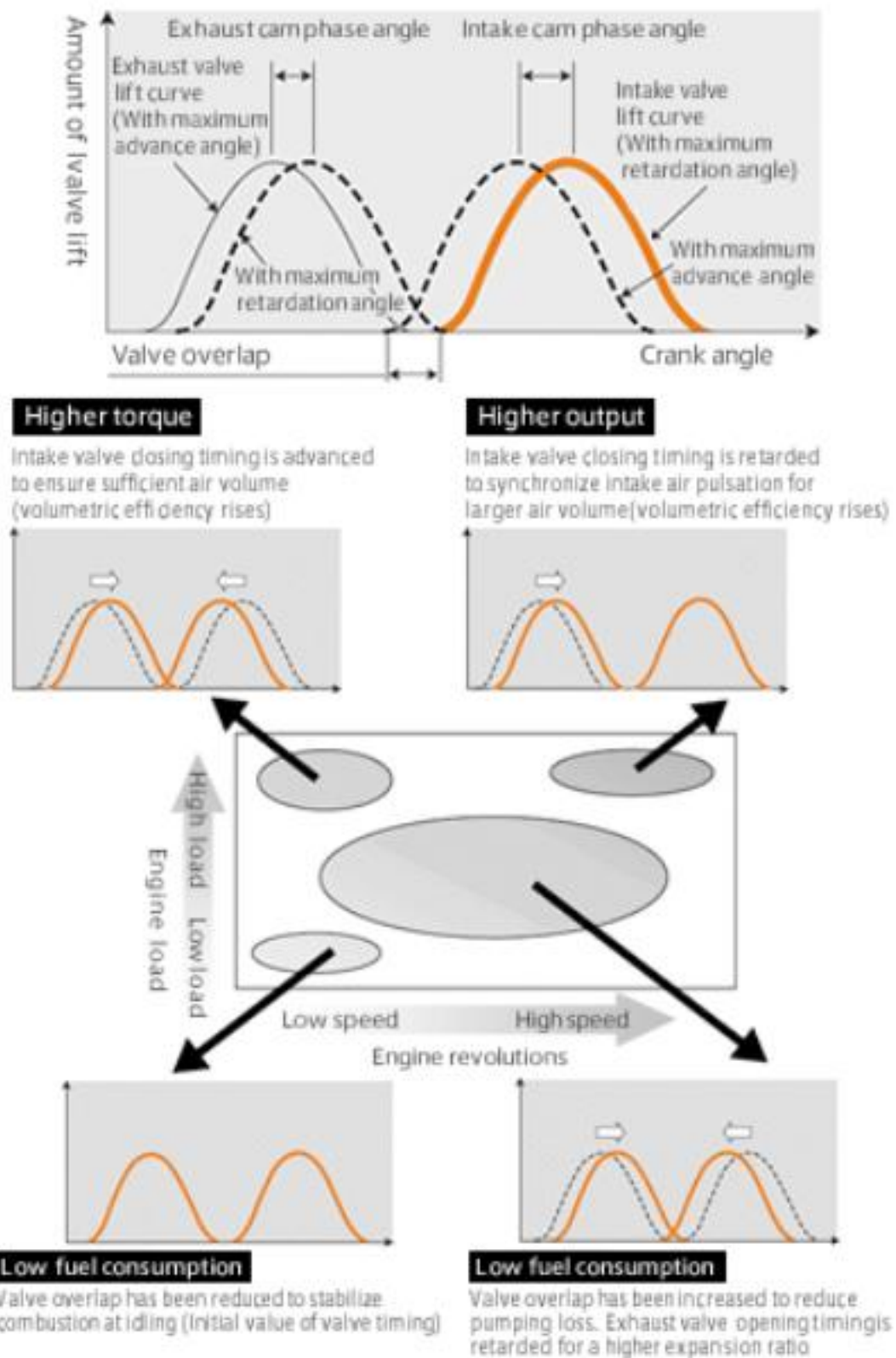


Figura 21: Effetti della variazione continua di fase della distribuzione ottenuti mediante il sistema MIVEC. [9]

Nel corso degli anni Mitsubishi ha continuato a sviluppare la tecnologia MIVEC, estendendone l'impiego a numerosi propulsori sia aspirati sia sovralimentati. Le versioni più moderne non sono più orientate esclusivamente all'incremento delle prestazioni, ma perseguono anche l'obiettivo di ridurre consumi, emissioni inquinanti e perdite di pompaggio, nel rispetto delle sempre più severe normative ambientali.

Come illustrato in Figura 21, il sistema varia continuamente la fase degli alberi a camme in funzione del regime di rotazione, del carico motore e della richiesta del conducente. La centralina elettronica controlla elettrovalvole idrauliche che regolano la pressione dell'olio all'interno dell'attuatore, modificando la posizione angolare degli alberi a camme rispetto all'albero motore.

Ai bassi regimi e ai carichi parziali viene generalmente ridotto l'incrocio delle valvole per migliorare la stabilità della combustione e diminuire le perdite di pompaggio, ottenendo una riduzione dei consumi di combustibile. Ai regimi intermedi la fase viene anticipata per incrementare la coppia motrice e migliorare il riempimento del cilindro. Agli elevati regimi, invece, la distribuzione viene regolata in modo da aumentare il rendimento volumetrico e consentire al motore di sviluppare la massima potenza disponibile.

L'evoluzione del sistema MIVEC dimostra come la distribuzione variabile sia divenuta uno strumento fondamentale non solo per migliorare le prestazioni dei motori endotermici, ma anche per incrementarne l'efficienza energetica e ridurre l'impatto ambientale.

3.4 Valvelift System – Audi

Nel 2007 Audi introdusse il sistema Audi Valvelift System[10], una tecnologia di distribuzione variabile sviluppata con l'obiettivo di migliorare prestazioni, consumi ed emissioni senza incrementare eccessivamente la complessità costruttiva del motore.

A differenza dei sistemi VANOS e MIVEC che modificano continuamente la fase degli alberi a camme, e del sistema VTEC, che seleziona differenti profili di camma mediante bilancieri, l'Audi Valvelift System varia l'alzata e la durata di apertura delle valvole attraverso lo spostamento assiale delle camme, selezionando il profilo desiderato.

La prima applicazione del sistema AVS avvenne sul motore 3.2 FSI V6 per essere poi estesa ai propulsori 2.8 FSI e, nelle versioni successive anche ai 1.8 e 2.0 TFSI. L'obiettivo principale era quello di ottimizzare il riempimento del cilindro nelle diverse condizioni di funzionamento del motore migliorando l'erogazione della coppia ai bassi per uno spunto brillante, incrementando l'efficienza complessiva del propulsore.

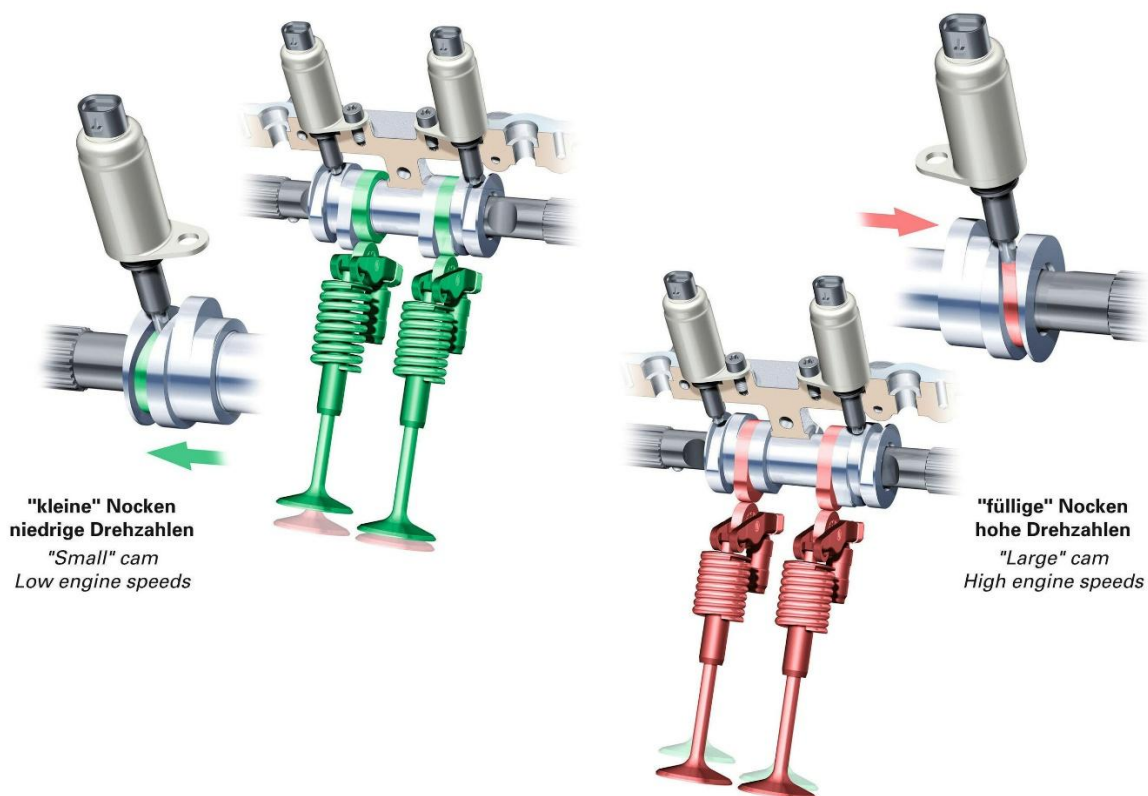


Figura 22: Mostra il funzionamento del sistema AVS, in verde è in funzione il profilo utile ai bassi regimi, nella parte in rosso invece si nota il profilo dedicato agli alti regimi di rotazione. [10]

Come illustrato in Figura 22, il sistema Audi Valvelift System utilizza elementi portacamma montati direttamente sull'albero a camme, ciascuno dotato di due differenti profili caratterizzati da diversa alzata e durata di apertura.

Il passaggio da un profilo all'altro avviene mediante uno spostamento assiale dell'elemento portacamma. La centralina elettronica (ECU) aziona un attuatore elettromagnetico che comanda un perno di bloccaggio. Quest'ultimo si inserisce in una scanalatura ricavata sull'elemento portacamma e, sfruttando apposite gole elicoidali, ne provoca la traslazione lungo l'asse di rotazione dell'albero a camme.

Durante il funzionamento ai bassi regimi viene selezionato il profilo caratterizzato da minore alzata e minore durata di apertura delle valvole. Questa configurazione consente di migliorare la regolarità di funzionamento, ridurre i consumi di combustibile e contenere così le emissioni inquinanti.

Quando il regime di rotazione o il carico motore aumentano, la centralina comanda l'attuatore che porterà in posizione di lavoro il profilo ad elevata alzata. Tale configurazione aumenta la sezione di passaggio dei gas e la durata di apertura delle valvole, migliorando il riempimento del cilindro e consentendo al motore di sviluppare una maggiore coppia e una potenza superiore agli elevati regimi di rotazione.

Rispetto ai sistemi basati esclusivamente sulla variazione della fase della distribuzione, l'Audi Valvelift System interviene direttamente sull'alzata e sulla durata di apertura delle valvole, permettendo di adattare il diagramma della distribuzione alle diverse condizioni di funzionamento del motore con una soluzione meccanicamente semplice, compatta ed affidabile, infatti al contrario di tutti gli altri sistemi, questo non utilizza l'olio con tubazioni particolari, complesse ed ingombranti, bensì soltanto dei profili che scorrono sull'asse a camme e un attuatore comandato tramite semplice segnale elettrico, questo è un punto molto forte a favore del sistema sviluppato dalla casa tedesca che oltre a portare semplicità di progettazione e costruzione, trascina con sé anche affidabilità, ed un costo piuttosto ridotto rispetto alla concorrenza con un sistema tanto semplice quanto funzionale.

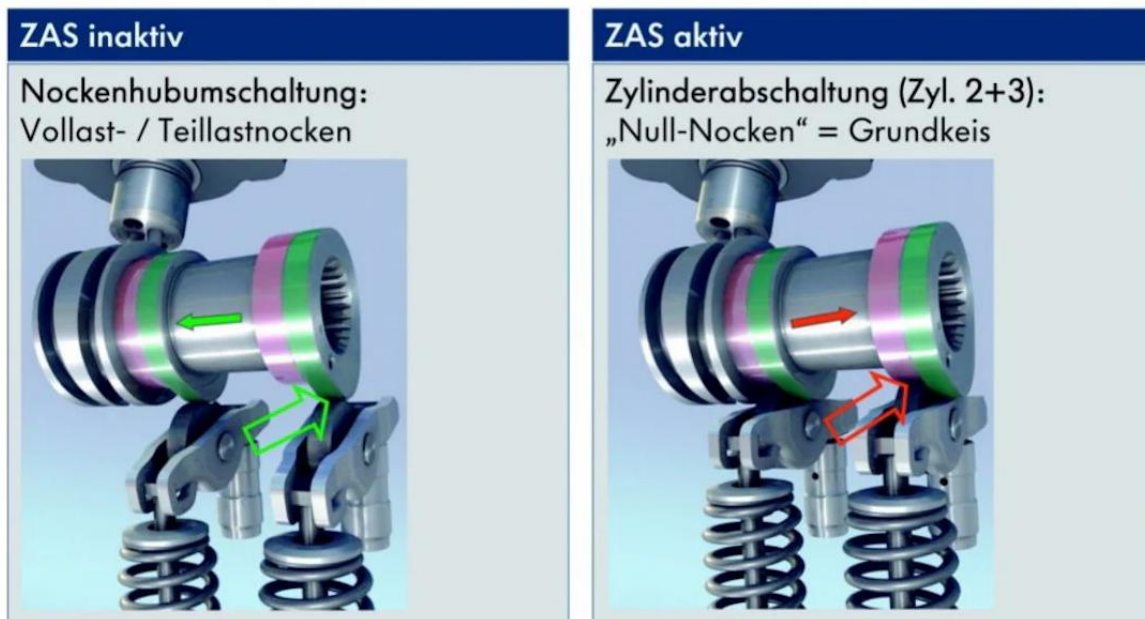


Figura 23: Funzionamento del sistema AVS [10]

Nella Figura 23 è possibile notare molto bene il profilo dentato interno della camma che consente la traslazione assiale e allo stesso tempo un'ottima trasmissione del moto garantendo assoluta precisione, caratteristica fondamentale per un sistema di distribuzione.

Il sistema AVS dispone soltanto di un numero limitato di profili di camma selezionabili e non permette una variazione continua dell'alzata come avverrà con i sistemi futuri, e neanche della fase, come già abbiamo visto con VANOS o MIVEC.

L'Audi Valvelift System rappresenta dunque una soluzione intermedia tra i sistemi a semplice variazione di fase e quelli a controllo completamente variabile delle valvole, costituendo un importante passo nell'evoluzione delle moderne tecnologie di distribuzione soprattutto per la sua semplicità e affidabilità in rapporto al suo costo di impiego.

3.5 Camtronic – Mercedes Benz

Il sistema Camtronic[11] rappresenta la soluzione sviluppata da Mercedes Benz per il controllo variabile della distribuzione con l'obiettivo di migliorare l'efficienza del motore nelle diverse condizioni di funzionamento, riducendo consumi ed emissioni senza compromettere le prestazioni.

Rispetto ai sistemi precedentemente analizzati, il Camtronic introduce una soluzione particolarmente interessante poiché combina più strategie di regolazione. Da un lato il motore può essere dotato di variazione continua della fase degli alberi a camme, secondo un principio analogo a quello del VANOS di BMW, dall'altro lato il sistema permette di selezionare differenti profili di camma, modificando quindi l'alzata e la durata di apertura delle valvole mediante la selezione di differenti profili di camma, secondo un principio di funzionamento analogo a quello dell'Audi Valvelift System.

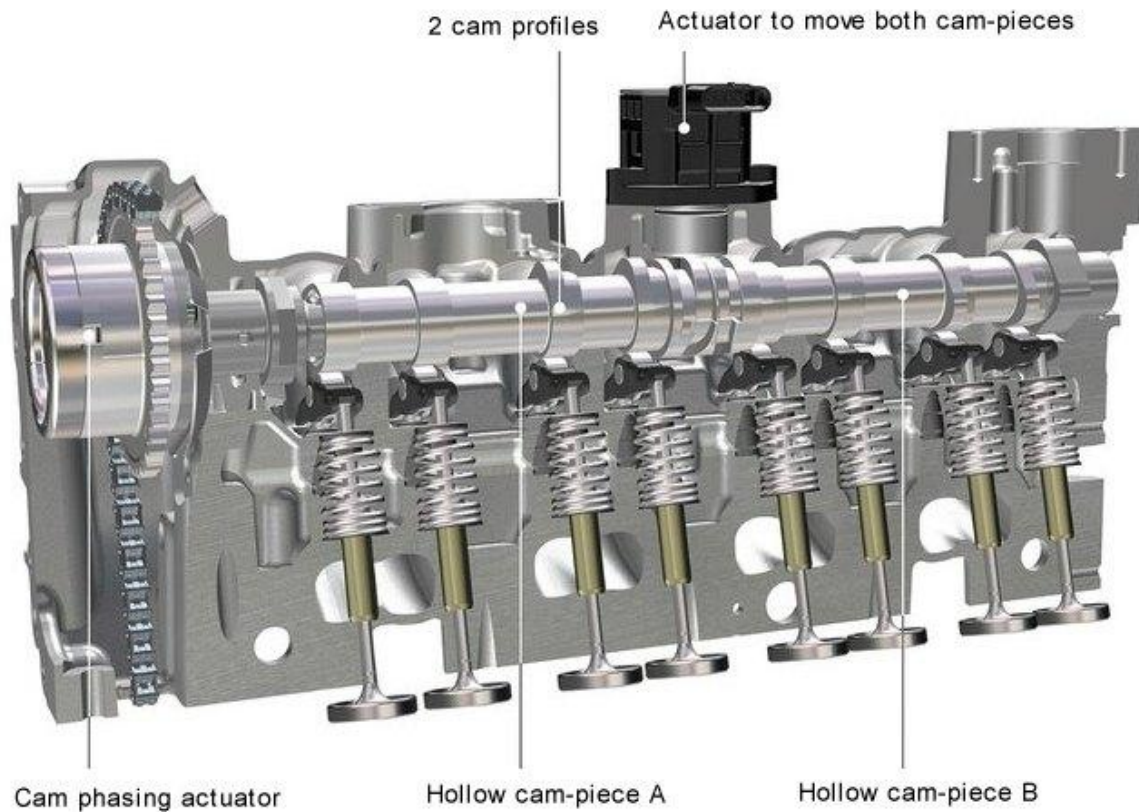


Figura 24: Schema del sistema Camtronic. [11]

La Figura 24 mostra l'architettura del sistema Camtronic sviluppato da Mercedes Benz. Sul lato della distribuzione è possibile osservare il variatore di fase idraulico, responsabile della regolazione continua della posizione angolare dell'albero a camme rispetto all'albero motore, secondo un principio di funzionamento simile a quello del sistema doppio VANOS di BMW precedentemente descritto.

Nella parte superiore invece sposterà dal coperchio punterie l'attuatore elettromeccanico che seleziona la camma desiderata tramite comando elettrico, un pistoncino si inserirà in apposite gole elicoidali provocando lo spostamento assiale.

La combinazione della variazione continua della fase con la selezione di differenti profili di camma consente di ampliare sensibilmente il campo di regolazione della distribuzione. Il motore può così adattare il diagramma di apertura delle valvole alle diverse condizioni di funzionamento, migliorando contemporaneamente coppia ai bassi regimi, potenza, rendimento ed efficienza complessiva.

3.5.1 Profilo zero

L'innovazione più significativa introdotta da Mercedes è tuttavia rappresentata dal profilo di camma ad alzata nulla, in tale configurazione la valvola rimane completamente chiusa durante l'intero ciclo del motore rendendo possibile la disattivazione selettiva dei cilindri.

Questo sistema è stato impiegato soprattutto nei motori V8 consentendo così di mantenere chiuse le valvole di determinati cilindri per spegnerli durante la marcia quando si è a basso carico e costante, ovviamente ciò comporta l'interruzione dell'iniezione di carburante e dell'innesco della candela da parte della centralina.

La transizione tra il funzionamento a otto e quattro cilindri è resa praticamente impercettibile grazie all'impiego di un volano bimassa e di una specifica gestione elettronica del motore. Il mantenimento delle valvole completamente chiuse nei cilindri disattivati consente inoltre di ridurre significativamente le perdite di pompaggio, poiché la massa di aria rimane intrappolata all'interno del cilindro venendo semplicemente compressa ed espansa, senza richiamare continuamente aria fresca dal collettore di aspirazione.

L'interruzione dell'iniezione del combustibile e dell'accensione contribuisce inoltre a mantenere più stabile la temperatura dei sistemi di post-trattamento dei gas di scarico, migliorandone l'efficienza e consentendo un'ulteriore riduzione dei consumi e delle emissioni durante il funzionamento a carico parziale.

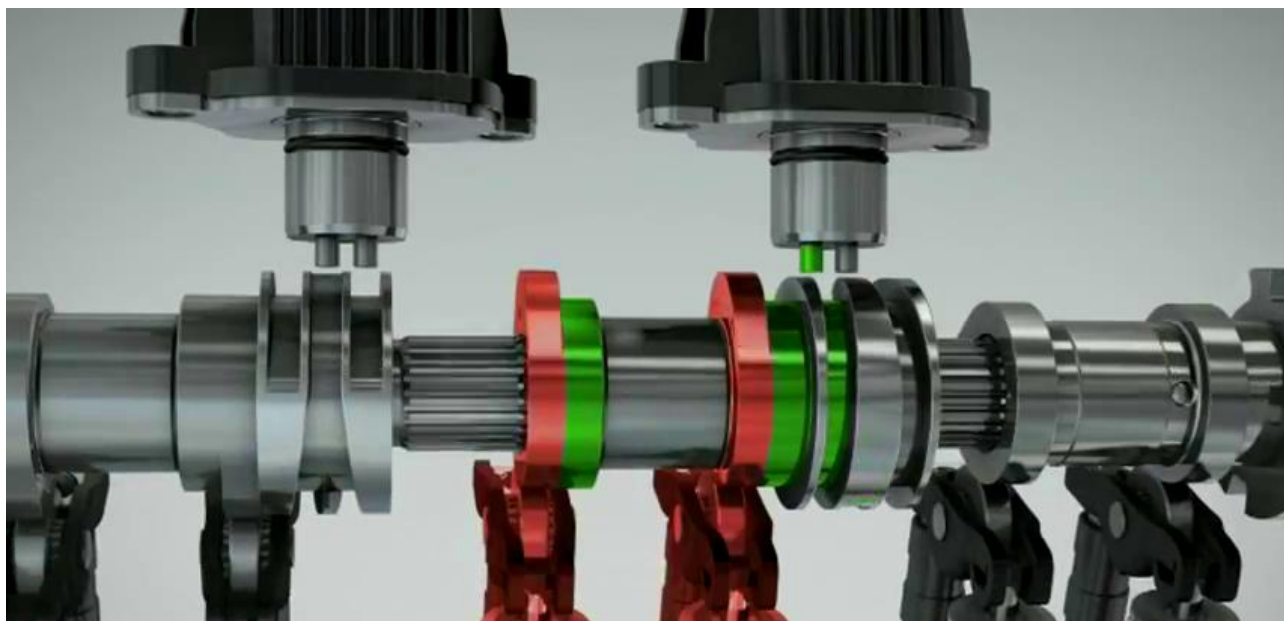


Figura 25: In rosso è evidenziato il profilo di camma standard, in verde il profilo “zero lift” che consente la disattivazione dei cilindri. [11]

3.5.2 Perdite di pompaggio

Uno dei principali vantaggi della disattivazione dei cilindri è la significativa riduzione delle perdite di pompaggio, che rappresentano una delle principali cause di inefficienza dei motori ad accensione comandata durante il funzionamento a carico parziale.

In tali condizioni la potenza richiesta dal veicolo è limitata e la farfalla risulta solo parzialmente aperta, il motore deve quindi aspirare aria attraverso una sezione ridotta, generando una depressione nel collettore di aspirazione. Durante la corsa di aspirazione il pistone deve vincere tale depressione compiendo lavoro negativo che non contribuisce alla produzione di potenza utile e che viene definito perdita di pompaggio.

La disattivazione di parte dei cilindri consente di mantenere la medesima potenza erogata utilizzando un numero inferiore di cilindri attivi. Di conseguenza, per ottenere la stessa coppia richiesta dal conducente, la farfalla può essere mantenuta maggiormente aperta, riducendo la depressione nel collettore di aspirazione e il lavoro necessario per aspirare la carica fresca. I cilindri disattivati, mantenendo entrambe le valvole completamente chiuse, intrappolano al loro interno una massa d'aria che viene alternativamente compressa ed espansa comportandosi come una molla pneumatica limitando ulteriormente le perdite.

L'adozione della disattivazione dei cilindri consente generalmente una riduzione del consumo di combustibile compresa tra il 5% e il 12%, a seconda del propulsore e delle condizioni di utilizzo. Nei percorsi autostradali o durante la marcia a velocità costante, dove il motore opera prevalentemente a carico parziale, i benefici risultano particolarmente evidenti. Oltre al miglioramento del rendimento, la riduzione delle

perdite di pompaggio contribuisce anche ad abbassare le emissioni di inquinanti e clima alteranti nell'atmosfera rendendo questa tecnologia una delle soluzioni più efficaci per incrementare l'efficienza dei motori a benzina di elevata cilindrata.

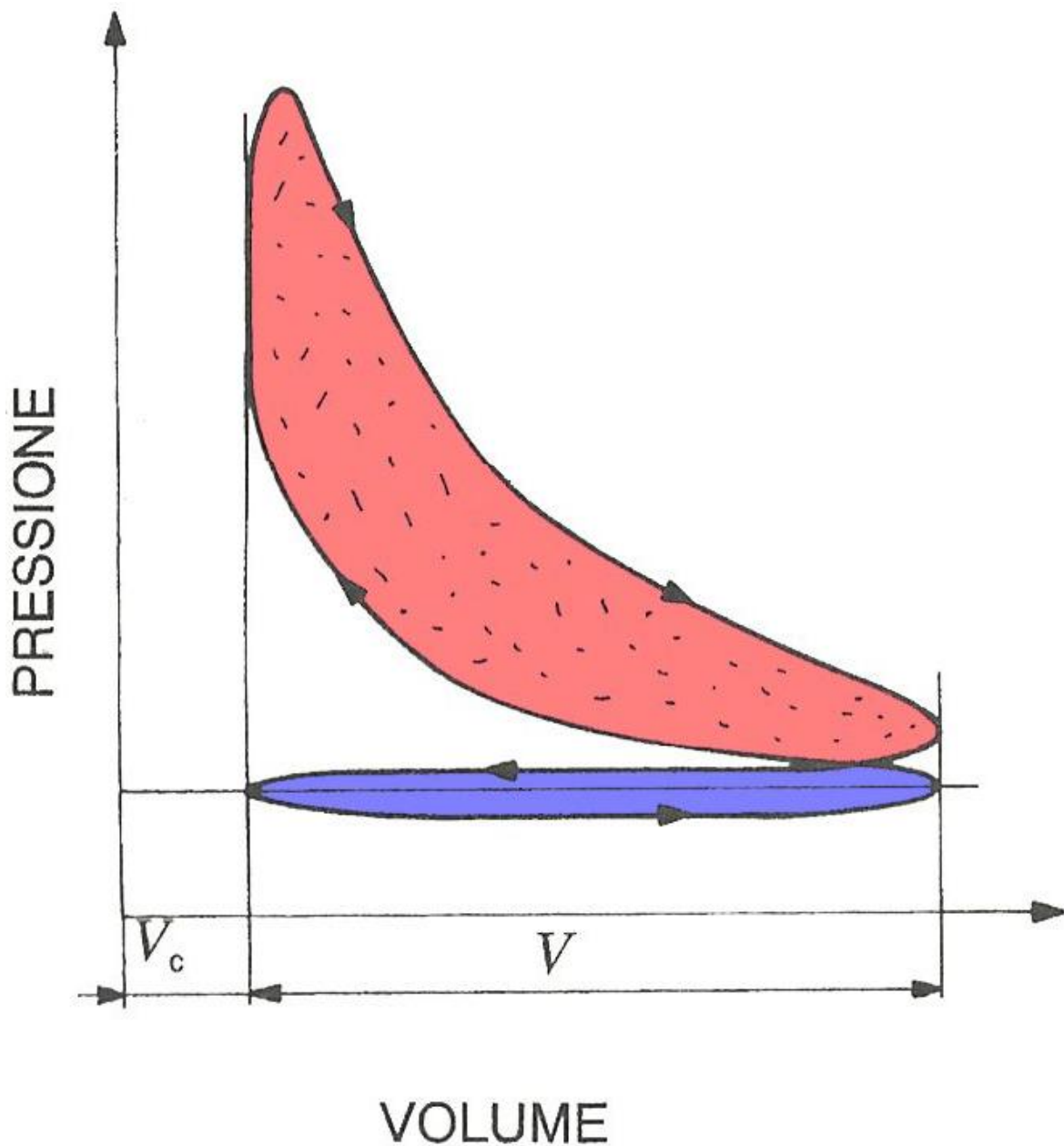


Figura 26: Diagramma pressione – volume di un ciclo Otto reale. [1]

La Figura 26 mostra chiaramente l'area di pompaggio, ossia quella in blu, che produce lavoro negativo avendo direzione antioraria.

È possibile calcolare le perdite di pompaggio tramite la seguente formulazione:

$$P_{pomp} = V_d \cdot PMEP \cdot \frac{n}{120}$$

Dove:

V_d rappresenta la cilindrata

$PMEP$ è la Pressione Media Effettiva di Pompaggio

n è il numero di giri al minuto del motore

È possibile calcolare la $PMEP$ nel modo seguente:

$$PMEP = \frac{1}{V_d} \oint_{asp+scarico} p dV$$

È evidente che le perdite di pompaggio siano direttamente proporzionali alla cilindrata del motore, alla $PMEP$ e al regime di rotazione.

Dunque al salire del numero di giri l'area di pompaggio aumenta causando perdite maggiori. Un modo per ridurre queste perdite è quello di eliminare la valvola a farfalla sostituendola con altri sistemi meno impattanti.

3.6 MultiAir – Fiat Powertrain Technologies

Dopo lo sviluppo dei sistemi di variazione della fase e dell'alzata delle valvole viste sin ora, il passo successivo nell'evoluzione della distribuzione variabile fu rappresentato dal sistema MultiAir[12], brevettato da FIAT nel 2002 e presentato ufficialmente nel 2009.

A differenza dei sistemi analizzati nei capitoli precedenti, nei quali il comando delle valvole rimane sempre affidato ad un collegamento meccanico tra l'albero a camme e la valvola, il MultiAir introduce un principio completamente differente ed innovativo. Il moto generato dalla camma non viene infatti trasmesso direttamente alla valvola di aspirazione, bensì attraverso un circuito elettroidraulico controllato da una centralina elettronica.

Questa soluzione consente di gestire in maniera completamente indipendente l'istante di apertura, l'istante di chiusura, l'alzata e perfino il numero di aperture della valvola durante uno stesso ciclo motore. Viene così eliminato il compromesso imposto dalla geometria dell'albero a camme, permettendo di adattare continuamente la distribuzione alle condizioni di funzionamento del propulsore.

L'obiettivo del sistema MultiAir non è esclusivamente quello di incrementare le prestazioni, ma soprattutto quello di migliorare il rendimento del motore riducendo le perdite di pompaggio, diminuendo il consumo di combustibile e contenendo le emissioni inquinanti, senza ricorrere ad una tradizionale regolazione della portata d'aria mediante la valvola a farfalla che viene infatti utilizzata solo per l'avviamento a freddo o per altri casi particolari.

3.6.1 Principio di funzionamento

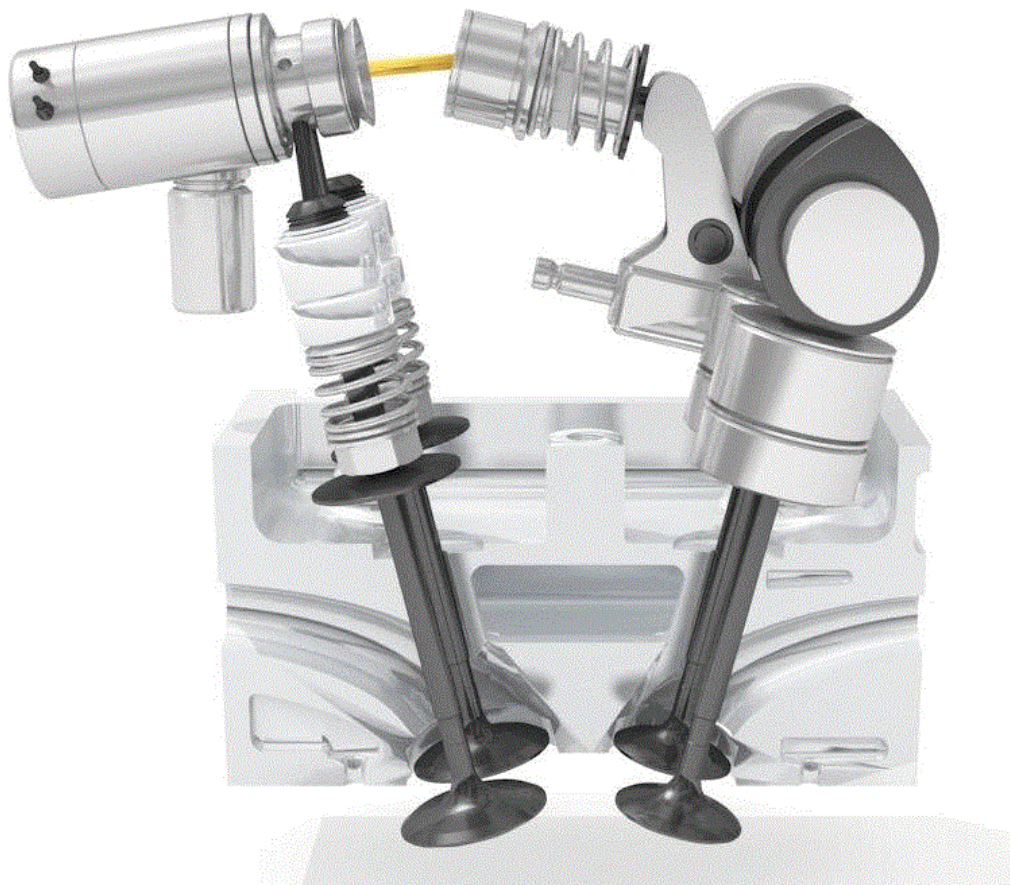


Figura 27: Illustrazione del sistema MultiAir. [12]

Come illustrato in Figura 27, il sistema MultiAir mantiene un comando meccanico convenzionale per le valvole di scarico, mentre introduce un innovativo sistema di attuazione elettroidraulica per il controllo delle valvole di aspirazione.

L'albero a camme presente sul lato scarico ha anche le camme dedicate all'aspirazione che lavorano in contatto con un rullo che a sua volta preme su un pistoncino idraulico mettendo in pressione una camera riempita d'olio, tale camera è collegata direttamente ad un secondo pistoncino solidale alla valvola di aspirazione. In condizioni normali, essendo l'olio praticamente incompressibile, il moto imposto dalla camma viene trasmesso integralmente alla valvola, che segue fedelmente il profilo dell'albero a camme.

Tra i due pistoncini è tuttavia inserita un'elettrovalvola controllata dalla centralina elettronica del motore. Quando tale elettrovalvola rimane chiusa il circuito idraulico si comporta come un normale collegamento rigido e la valvola di aspirazione riproduce esattamente il profilo della camma, come se fosse un classico motore con tecnologia

DOHC. Quando invece l'elettrovalvola viene aperta, parte dell'olio viene scaricata in un'apposita camera di accumulo, interrompendo il collegamento idraulico tra la camma e la valvola. Quest'ultima può quindi chiudersi anticipatamente oppure aprirsi con un'alzata ridotta, a seconda dell'istante in cui la centralina comanda l'apertura e la successiva chiusura dell'elettrovalvola.

Il controllo elettronico della pressione nel circuito idraulico permette quindi di modificare in modo completamente libero ed indipendente il diagramma di distribuzione, senza la necessità di impiegare alberi a camme con differenti profili o complessi sistemi meccanici di variazione dell'alzata.

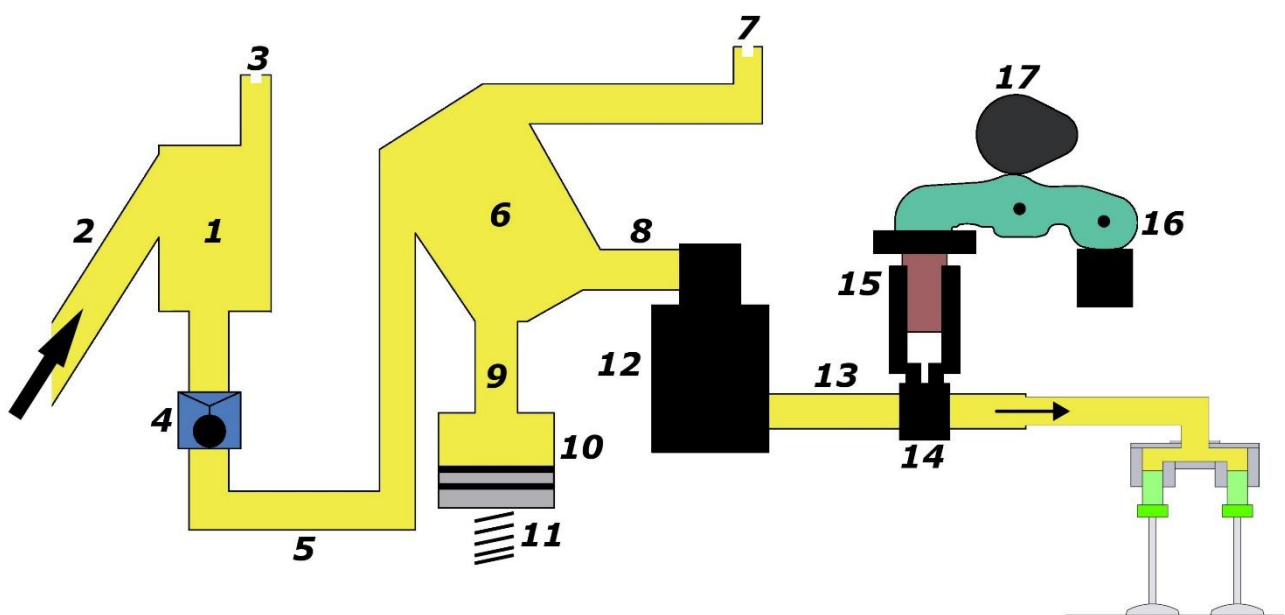


Figura 28: Schema del sistema MultiAir. Adattato da [12]

La Figura 28 mostra lo schema di principio del sistema MultiAir, evidenziando tutti i principali componenti che costituiscono il circuito elettroidraulico di comando della valvola di aspirazione.

L'olio motore, prelevato dal circuito di lubrificazione, raggiunge l'accumulatore primario (1) attraverso il canale di alimentazione (2). Dopo aver attraversato la valvola di non ritorno (4), il fluido viene convogliato nel circuito principale (5), alimentando l'accumulatore secondario (6), che ha il compito di mantenere costante la pressione dell'olio e smorzare eventuali oscillazioni idrauliche.

Dal circuito principale l'olio raggiunge il pompante (15) attraverso il canale di collegamento (13). Il pompante viene azionato direttamente dalla camma (17)

mediante il bilanciere (16), trasformando il moto rotatorio dell'albero a camme in una variazione di pressione del fluido idraulico.

Tra il pompante e la valvola di aspirazione è interposta un'elettrovalvola (12), comandata dalla centralina elettronica del motore. Tale componente rappresenta il cuore del sistema MultiAir, poiché regola la comunicazione tra il circuito principale e l'accumulatore (10), consentendo di controllare la pressione dell'olio agente sul pistoncino di comando della valvola.

Variando con precisione l'istante di apertura e di chiusura dell'elettrovalvola è quindi possibile controllare in maniera completamente elettronica il diagramma di distribuzione, ottenendo differenti strategie di funzionamento senza modificare il profilo della camma.

3.6.2 Full Lift

La modalità Full Lift rappresenta la condizione di funzionamento più semplice del sistema MultiAir e corrisponde al comportamento di una distribuzione tradizionale.

In questa configurazione l'elettrovalvola rimane costantemente chiusa durante l'intero ciclo di apertura della valvola di aspirazione. L'olio contenuto nel circuito idraulico non può quindi defluire verso l'accumulatore e, grazie alla sua pressoché incomprimibilità, trasmette integralmente il moto imposto dalla camma al pistoncino di comando della valvola.

Di conseguenza la valvola di aspirazione riproduce fedelmente il profilo della camma, raggiungendo la massima alzata e la durata di apertura prevista dal diagramma di distribuzione. In questa modalità il sistema MultiAir si comporta quindi come un comando meccanico convenzionale, senza introdurre alcuna modifica al moto della valvola.

La modalità Full Lift viene generalmente utilizzata quando il motore opera ad elevato carico e ad alti regimi di rotazione, condizioni nelle quali è necessario massimizzare il riempimento del cilindro per ottenere la massima coppia e potenza disponibili. Mantenendo completamente chiusa l'elettrovalvola, l'intera energia trasmessa dalla camma viene utilizzata per comandare l'apertura della valvola di aspirazione, garantendo il massimo coefficiente di riempimento del cilindro.

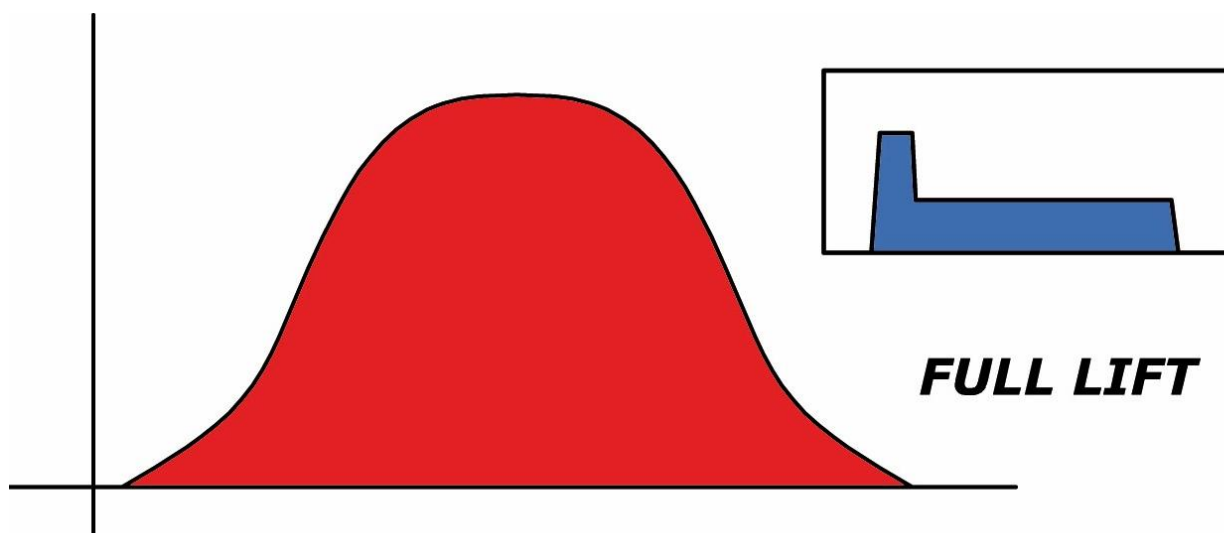


Figura 29: Modalità Full Lift del sistema MultiAir. [12]

Dal diagramma è possibile osservare come il profilo di alzata della valvola coincida interamente con quello imposto dalla camma. In questa configurazione il sistema MultiAir non modifica il diagramma della distribuzione.

La modalità Full Lift costituisce inoltre la condizione di riferimento rispetto alla quale il sistema MultiAir realizza tutte le altre strategie di funzionamento. Agendo esclusivamente sull'istante di apertura e di chiusura dell'elettrovalvola è infatti possibile ottenere infiniti diagrammi all'interno del diagramma di partenza Full Lift.

3.6.3 Early Intake Valve Closing

La modalità Early Intake Valve Closing (EIVC) rappresenta una delle strategie di funzionamento più importanti del sistema MultiAir, in quanto consente di regolare la massa d'aria aspirata senza ricorrere alla tradizionale valvola a farfalla.

In questa configurazione la camma inizia normalmente il comando della valvola di aspirazione, mantenendo chiusa l'elettrovalvola prima che il profilo della camma abbia completato la propria corsa. L'olio contenuto nel circuito idraulico può così defluire verso l'accumulatore, interrompendo il collegamento idraulico tra la camma ed il pistoncino di comando della valvola.

In assenza della pressione idraulica, la molla della valvola richiama quest'ultima verso la sede determinandone una chiusura anticipata rispetto a quella imposta dal profilo della camma. Quest'ultima continua il proprio moto fino al termine della corsa, ma non esercita più alcuna influenza sulla posizione della valvola di aspirazione.

La chiusura anticipata della valvola permette di ridurre la quantità d'aria introdotta nel cilindro pur mantenendo la valvola a farfalla completamente aperta. In questo modo viene notevolmente ridotta la depressione nel collettore di aspirazione e, di conseguenza, diminuiscono le perdite di pompaggio che caratterizzano il funzionamento dei motori ad accensione comandata a carico parziale come abbiamo visto nel capitolo precedente.

Questa modalità è in genere impiegata durante il funzionamento ai bassi e medi carichi, condizioni nelle quali consente di migliorare il rendimento del motore, ridurre il consumo specifico di combustibile e contenere le emissioni inquinanti mantenendo al tempo stesso un'elevata regolarità di funzionamento.

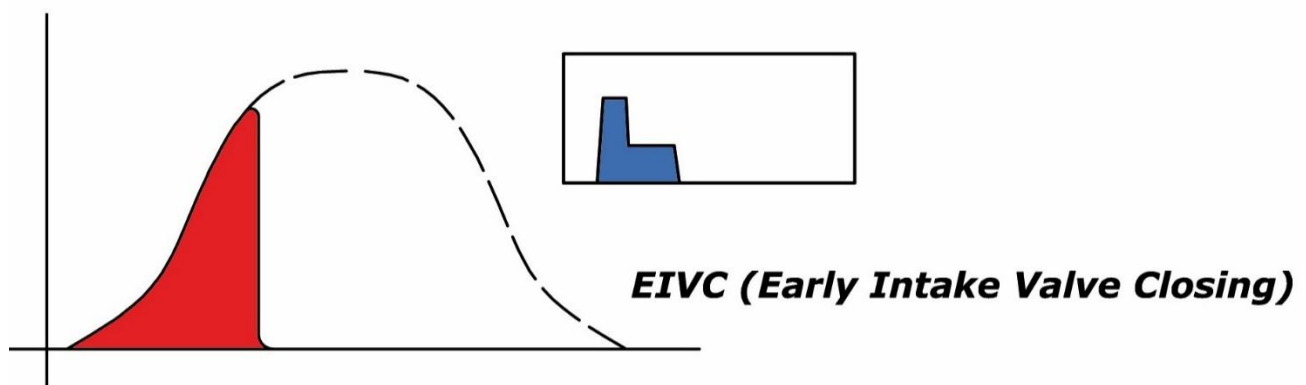


Figura 30: Diagramma della camma con la modalità EIVC. L'apertura dell'elettrovalvola interrompe il collegamento idraulico tra la camma e la valvola di aspirazione, determinandone la chiusura anticipata rispetto al profilo imposto dall'albero a camme. [12]

Come evidenziato in Figura 30, la valvola di aspirazione segue inizialmente il profilo della camma fino all'istante in cui la centralina comanda l'apertura dell'elettrovalvola. Da questo momento il circuito idraulico viene messo in comunicazione con l'accumulatore e la pressione dell'olio diminuisce rapidamente, consentendo alla molla della valvola di richiuderla anticipatamente.

La linea tratteggiata rappresenta il profilo teorico che la valvola seguirebbe mantenendo l'elettrovalvola costantemente chiusa, mentre l'area evidenziata in rosso identifica l'effettivo diagramma di alzata ottenuto mediante la strategia EIVC. La riduzione della durata di apertura consente di limitare la massa d'aria aspirata dal cilindro attraverso il solo controllo della distribuzione, migliorando il rendimento ai carichi parziali e riducendo sensibilmente le perdite di pompaggio.

3.6.4 Late Intake Valve Opening

La modalità Late Intake Valve Opening (LIVO) rappresenta una seconda strategia di regolazione della massa d'aria aspirata ottenuta ritardando l'apertura della valvola di aspirazione rispetto al profilo imposto dalla camma.

All'inizio del profilo della camma la centralina mantiene aperta l'elettrovalvola, permettendo all'olio di defluire verso l'accumulatore. In queste condizioni il collegamento idraulico tra la camma e la valvola risulta interrotto e quest'ultima rimane chiusa nonostante il moto del pompante.

Quando viene raggiunto l'istante di apertura desiderato, la centralina comanda la chiusura dell'elettrovalvola. Il circuito idraulico torna così ad essere rigido e la restante parte del profilo della camma viene trasmessa alla valvola di aspirazione. Poiché una parte del profilo della camma è già stata percorsa, la valvola si apre in ritardo, con un'alzata massima e una durata di apertura inferiori rispetto alla modalità Full Lift.

Questa strategia consente di ridurre la quantità d'aria aspirata dal motore senza intervenire sul profilo della camma, risultando particolarmente efficace nelle condizioni di basso carico e durante il funzionamento al minimo, dove contribuisce a migliorare la stabilità della combustione e a ridurre il consumo di combustibile.

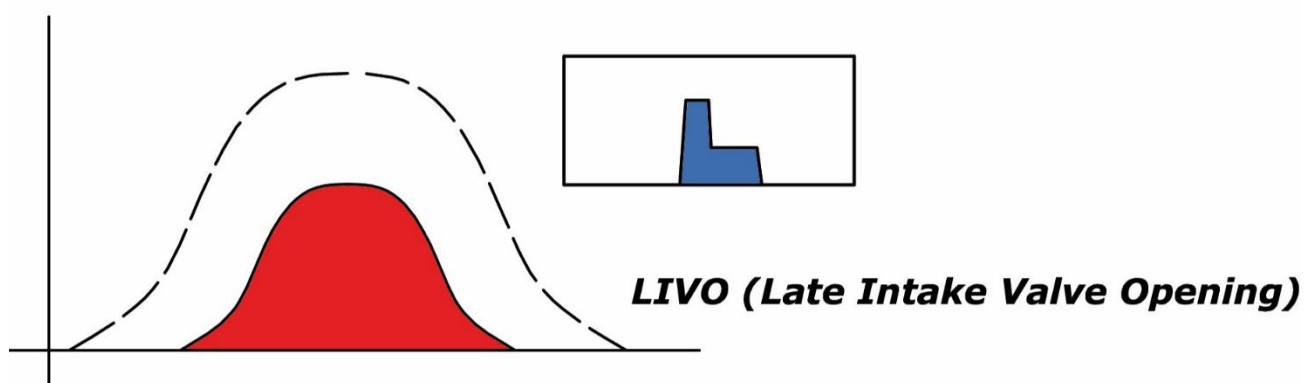


Figura 31: Modalità LIVO. È possibile notare come sia l'alzata che la durata siano inferiori rispetto al profilo standard della camma. [12]

La linea tratteggiata rappresenta il profilo teorico imposto dalla camma, mentre l'area evidenziata in rosso identifica il diagramma di alzata effettivamente ottenuto. È possibile osservare come la valvola rimanga inizialmente chiusa nonostante l'inizio del moto della camma, aprendosi solamente quando la centralina comanda la chiusura dell'elettrovalvola. Anche in questo caso il profilo della camma rimane completamente invariato, la variazione del diagramma di distribuzione è ottenuta esclusivamente mediante il controllo elettronico del circuito idraulico.

3.6.5 Multi Lift

La modalità Multi Lift rappresenta una delle strategie più innovative rese possibili dal sistema MultiAir. Diversamente dalle modalità precedentemente descritte, la centralina elettronica è in grado di comandare l'elettrovalvola più volte durante lo stesso ciclo motore, ottenendo aperture multiple della valvola di aspirazione mediante un unico profilo di camma.

All'inizio della fase di aspirazione l'elettrovalvola viene mantenuta chiusa, consentendo alla valvola di seguire il profilo della camma. Successivamente la centralina comanda l'apertura dell'elettrovalvola, interrompendo il collegamento idraulico e determinando la chiusura della valvola. Richiudendo nuovamente l'elettrovalvola prima del termine del profilo della camma, il circuito idraulico torna rigido e la valvola di aspirazione viene nuovamente azionata, realizzando una seconda apertura durante lo stesso ciclo.

La possibilità di effettuare aperture multiple consente di controllare con estrema precisione la massa d'aria aspirata e la velocità del flusso attraverso la valvola. Tale strategia migliora la turbolenza (swirl) della carica all'interno del cilindro, favorendo una migliore miscelazione tra aria e combustibile ed una combustione più rapida ed omogenea.

La modalità Multi Lift risulta particolarmente vantaggiosa ai bassi regimi e durante il funzionamento a carico ridotto, condizioni nelle quali risulta normalmente complesso creare turbolenze che rendono la miscela più omogenea incrementando il rendimento di combustione riducendo i consumi e le emissioni inquinanti.

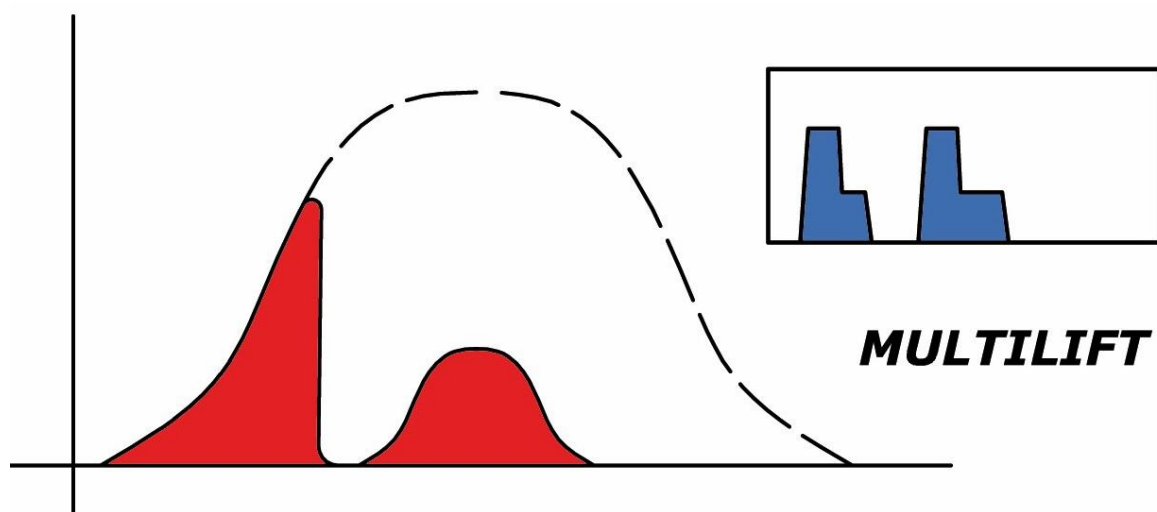


Figura 32: Multi Lift. La valvola di aspirazione può essere aperta più volte all'interno dello stesso ciclo. [12]

Il Sistema MultiAir rappresenta una delle più significative innovazioni introdotte nel campo della distribuzione variabile. L'impiego di un comando elettroidraulico delle valvole di aspirazione consente infatti di superare i limiti imposti dai tradizionali sistemi meccanici, permettendo un controllo estremamente flessibile del diagramma della distribuzione senza modificare il profilo della camma.

L'elevata precisione del circuito elettroidraulico richiede tuttavia una particolare attenzione alla qualità della lubrificazione. Poiché il corretto funzionamento del sistema dipende dalla pressione dell'olio e dal movimento di componenti caratterizzati da tolleranze estremamente ridotte, è fondamentale utilizzare lubrificanti conformi alle specifiche previste dal costruttore e rispettare rigorosamente gli intervalli di manutenzione. La presenza di morchie o di particelle metalliche può infatti compromettere il funzionamento dell'elettrovalvola o dei passaggi idraulici, alterando il comando delle valvole e influenzando negativamente le prestazioni e l'affidabilità del sistema.

Nonostante tali accorgimenti manutentivi, il MultiAir rappresenta un importante traguardo nell'evoluzione dei sistemi di distribuzione variabile, introducendo un livello di controllo della respirazione del motore precedentemente irraggiungibile con le sole soluzioni meccaniche costituendo una vera e propria rivoluzione nel settore automobilistico.

3.7 FreeValve – Sistema Camless

L'evoluzione dei sistemi di distribuzione variabile ha progressivamente aumentato la libertà di controllo delle valvole, passando dalla semplice variazione della fase fino alla gestione indipendente dell'alzata e della durata di apertura. Il naturale punto di arrivo di questa evoluzione è rappresentato dai sistemi camless, nei quali viene completamente eliminato il tradizionale albero a camme.

Tra le tecnologie più avanzate sviluppate in questo ambito si distingue il sistema FreeValve[13], progettato dall'azienda svedese FreeValve AB, appartenente al gruppo Koenigsegg. Presentato per la prima volta negli anni 2010, esso rappresenta una soluzione radicalmente innovativa nella quale ogni valvola viene comandata individualmente mediante un attuatore elettropneumatico controllato dalla centralina elettronica del motore.

L'eliminazione dell'albero a camme consente di svincolare completamente il moto delle valvole dalla cinematica dell'albero motore. Di conseguenza, l'istante di apertura, la durata, l'alzata e la velocità di movimento di ciascuna valvola possono essere controllati indipendentemente per ogni cilindro e per ogni singolo ciclo motore, permettendo di ottenere una flessibilità irraggiungibile con qualsiasi sistema di distribuzione meccanico tradizionale.

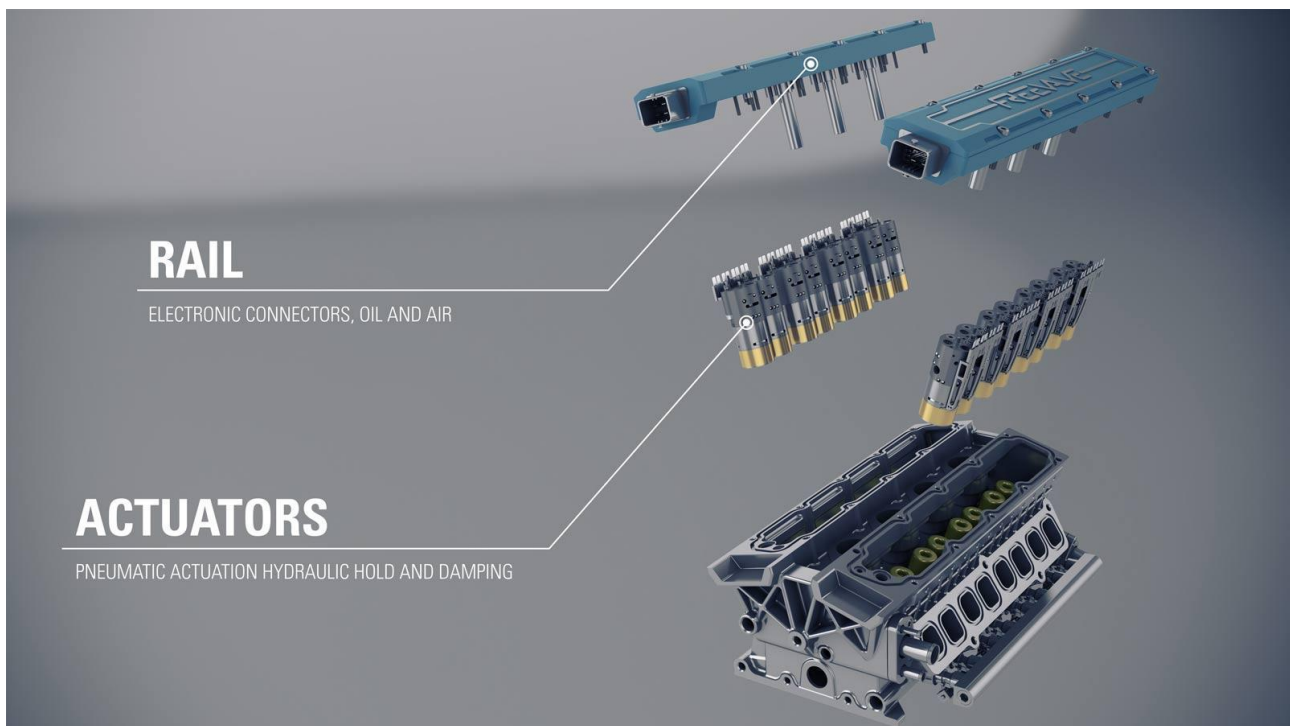


Figura 33: Architettura del sistema FreeValve. Ogni valvola è comandata da un attuatore elettropneumatico indipendente alimentato mediante il rail superiore, che distribuisce aria compressa, olio ed alimentazione elettrica ai singoli moduli di attuazione. [13]

Come illustrato in Figura 33, il sistema FreeValve elimina completamente l'albero a camme sostituendolo con un attuatore indipendente dedicato ad ogni singola valvola. Ciascun cilindro dispone quindi di quattro attuatori autonomi, due per le valvole di aspirazione e due per quelle di scarico, comandati individualmente dalla centralina elettronica del motore.

Gli attuatori sono alimentati attraverso un rail superiore che distribuisce l'aria compressa, l'olio necessario allo smorzamento idraulico e l'alimentazione elettrica agli elettroattuatori. In questo modo ogni valvola può essere gestita in maniera completamente indipendente dalle altre, senza alcun collegamento meccanico con l'albero motore.

L'attuatore impiega l'energia dell'aria compressa per movimentare rapidamente la valvola, mentre un sistema idraulico integrato provvede allo smorzamento del moto nelle fasi finali di apertura e chiusura, evitando urti contro la sede della valvola e garantendo precisione di funzionamento anche agli elevati regimi di rotazione. Il controllo dell'intero sistema è affidato alla centralina elettronica che, grazie ai sensori di posizione presenti su ciascun attuatore, è in grado di regolare in tempo reale l'alzata, la durata e l'istante di apertura della singola valvola.

Una soluzione di tipo camless apre le porte ad innumerevoli possibili soluzioni e regolazioni, come ad esempio:

- Controllo indipendente di ogni valvola, ossia all'interno dello stesso cilindro è possibile utilizzare solo una valvola di aspirazione e una di scarico facendo funzionare il motore come un due valvole per cilindro invece che un quattro.
- Fase, alzata e durata completamente libere, è infatti possibile spaziare in maniera molto vasta su queste caratteristiche, addirittura è possibile aprire la valvola per soli 2 mm e mantenerla così per tutta la corsa di aspirazione a differenza dei sistemi precedentemente analizzati nei quali il diagramma della distribuzione rimane vincolato ad un profilo di camma.
- Aperture multiple, come il MultiAir è possibile svolgere tante aperture durante la singola fase di aspirazione ma in questo caso è possibile spaziare maggiormente, ad esempio aprire prima una valvola e mentre si richiude aprire l'altra per aumentare i vortici in camera di combustione consentendo una miscelazione migliore. È possibile eseguire diverse aperture e al contrario del MultiAir quella con maggior alzata può essere fatta anche negli ultimi gradi della fase di aspirazione.

- Disattivazione selettiva delle valvole e dei cilindri, come il MultiAir o Camtronic è possibile disattivare alcuni cilindri ma qui è possibile scegliere quali in modo ancora più vasto se desiderato, inoltre la disattivazione è più semplice in quanto non ho particolari sistemi meccanici con accoppiamenti, bensì è sufficiente non mandare segnale all'elettrovalvola che comanda il passaggio dell'aria compressa. È possibile inoltre grazie all'implementazione di un'apposita valvola, durante la disattivazione, far funzionare questi cilindri come dei compressori, ossia aspirando aria dalla classica valvola di aspirazione e senza iniettare miscela e senza fornire scintilla si effettua una compressione con una apposita valvola aperta che porta l'aria ad un apposito serbatoio, in questo modo i pistoni disattivati possono svolgere un lavoro di compressione per una sorta di stoccaggio di aria momentaneo da riutilizzare in seguito o come sistema di sovralimentazione o ancora come antilag.
- Possibilità di implementare cicli Atkinson, Miller, HCCI e di fare numerose sperimentazioni ancora da sviluppare grazie alla sua versatilità.



Figura 34: Spaccato del sistema FreeValve, è possibile notare la presenza della molla di richiamo.[13]

Le numerose possibilità di controllo offerte dalla tecnologia FreeValve trovano applicazione diretta nello sviluppo di propulsori ad elevata efficienza. Una delle prime applicazioni pratiche è rappresentata dal motore Qamfree, sviluppato in collaborazione tra FreeValve e la casa automobilistica cinese Qoros, si tratta di un motore quattro cilindri turbocompresso da 1,6 litri.

Secondo i dati dichiarati dal costruttore, rispetto ad un propulsore tradizionale di analoga cilindrata, tale tecnologia ha consentito di ottenere una riduzione delle dimensioni complessive di circa il 50%, una diminuzione della massa del 30%, un incremento della potenza e della coppia nell'ordine del 30%, una riduzione dei consumi di combustibile fino al 30% e una diminuzione delle emissioni inquinanti fino al 50%.

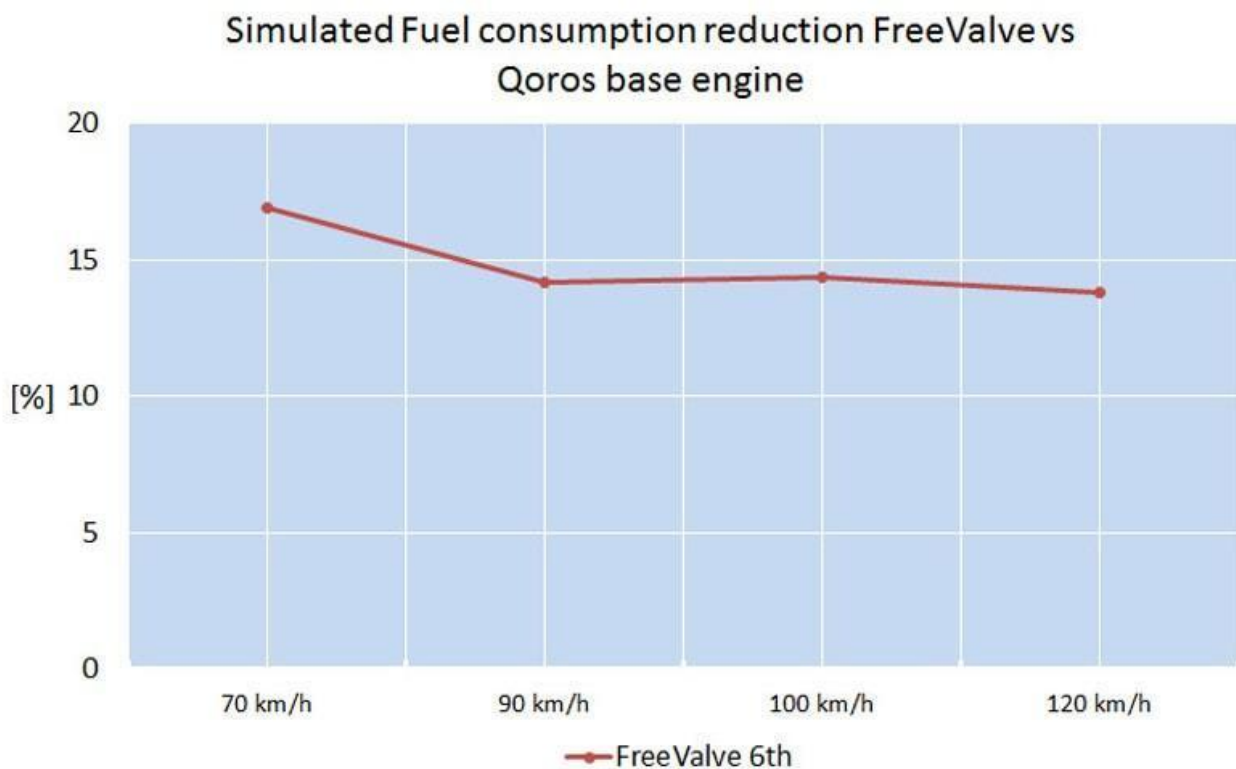


Figura 35: Simulazione di riduzione di consumo di carburante del motore Qoros con tecnologia FreeValve rispetto alla sua configurazione tradizionale. [13]

L'assenza dell'albero a camme, della relativa trasmissione e dei numerosi organi meccanici associato permette inoltre di ridurre sensibilmente gli attriti interni del motore, migliorandone il rendimento meccanico e diminuendo le perdite dovute al trascinamento della distribuzione, la semplificazione della cinematica comporta anche una riduzione delle masse in moto alterno e rotatorio, contribuendo ad aumentare l'efficienza complessiva del propulsore.

Nonostante l'elevato livello di controllo elettronico, il sistema è stato progettato con specifiche strategie di sicurezza per garantire l'affidabilità anche in presenza di eventuali anomalie. Ogni attuatore è infatti dotato di una molla di richiamo che riporta automaticamente la valvola in posizione di chiusura in caso di perdita

dell'alimentazione elettrica o pneumatica, evitando possibili interferenze tra valvola e pistone.

La centralina elettronica è inoltre in grado di riconoscere eventuali malfunzionamenti dei sensori o degli attuatori ed attivare una modalità di emergenza (limp-home mode). In tali condizioni il sistema può limitare l'alzata delle valvole ad un valore compatibile con il funzionamento sicuro del motore oppure disattivare completamente il cilindro incriminato in caso di anomalie o guasti, consentendo al propulsore di continuare a funzionare, seppur con prestazioni ridotte, fino al raggiungimento di un centro assistenza o di una posizione sicura, evitando danni meccanici ben più gravi o la sosta presso aree pericolose.

Ad oggi la tecnologia FreeValve non ha ancora trovato una diffusione significativa nella produzione automobilistica nella grande serie. Le elevate complessità progettuali, i costi di sviluppo e la necessità di garantire un'affidabilità quanto meno paragonabile ai tradizionali sistemi meccanici hanno infatti limitato la sua commercializzazione.

Nonostante ciò, il sistema rappresenta una delle innovazioni più promettenti mai sviluppate nel campo della distribuzione dei motori ad accensione comandata. L'eliminazione completa dell'albero a camme e la possibilità di controllare ogni singola valvola in modo totalmente indipendente consentono di superare tutti i vincoli imposti dai tradizionali sistemi meccanici, offrendo una libertà progettuale senza precedenti.

Capitolo 4. Conclusioni

Nel corso dei capitoli precedenti sono stati analizzati i principali sistemi di distribuzione variabile sviluppati nel settore automobilistico, evidenziandone il principio di funzionamento, le caratteristiche costruttive, i vantaggi e i limiti. L'evoluzione di tali tecnologie dimostra come il controllo della distribuzione abbia assunto un ruolo sempre più determinante nel miglioramento delle prestazioni, del rendimento e delle emissioni dei motori ad accensione comandata.

In questo capitolo vengono messi a confronto i sistemi analizzati, evidenziandone le principali differenze tecniche e funzionali, per poi formulare alcune considerazioni sull'evoluzione futura della distribuzione variabile nei motori endotermici.

4.1 Confronto tecnico e funzionale

Sistema	Variazione di fase	Variazione di alzata	Variazione della durata	Aperture multiple	Disattivazione dei cilindri	Presenza valvola a farfalla	Principio di funzionamento
VCT Alfa Romeo	✓	✗	✗	✗	✗	✓	Variatore idraulico
Honda VTEC	✗	✓	✓	✗	✗	✓	Camme multiple
BMW VANOS	✓	✗	✗	✗	✗	✓	Variatore idraulico continuo di fase
Mitsubishi MIVEC	✓	✓	✓	✗	MIVEC-MD	✓	Camme multiple e variazione di fase
Audi Valvelift	✓	✓	✓	✗	✗	✓	Camme multiple scorrevoli
Mercedes CAMTRONIC	✓	✓	✓	✗	Profilo ad alzata nulla	✓	Camme multiple scorrevoli e variatore di fase
Fiat MultiAir	✓	✓	✓	✓	✗	Impiego ridotto	Comando elettroidraulico
FreeValve	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Attuatori elettropneumatici indipendenti

L'analisi comparativa riportata nella tabella evidenzia chiaramente il percorso evolutivo seguito dai sistemi di distribuzione variabile nel corso degli ultimi decenni. Dalle prime soluzioni basate esclusivamente sulla variazione della fase, come il variatore Alfa Romeo, si è progressivamente passati a sistemi sempre più sofisticati, capaci di intervenire sull'alzata, sulla durata e, successivamente, sul controllo completamente indipendente delle valvole.

I primi sistemi, come il VTEC sviluppato da Honda, rappresentavano già un importante passo avanti rispetto alla distribuzione tradizionale, permettendo di ottimizzare il comportamento del motore ai bassi e agli elevati regimi mediante la selezione di differenti profili di camma. Successivamente, tecnologie quali VANOS e MIVEC hanno introdotto la variazione continua della fase, consentendo di adattare il diagramma della distribuzione alle diverse condizioni di funzionamento del propulsore.

L'evoluzione è proseguita con sistemi in grado di modificare direttamente l'alzata delle valvole come Audi Valvelift o addirittura di disattivare alcuni cilindri come Mercedes CAMTRONIC, fino ad arrivare al MultiAir sviluppato da Fiat Powertrain Technologies, che ha introdotto il comando elettroidraulico delle valvole di aspirazione, eliminando gran parte dei vincoli imposti dalla cinematica dell'albero a camme.

Il punto di arrivo di tale evoluzione è rappresentato dalla tecnologia FreeValve, nella quale l'eliminazione completa dell'albero a camme consente un controllo totalmente indipendente di ciascuna valvola. Ogni parametro della distribuzione, quali fase, alzata, durata e numero di aperture, diventa completamente programmabile mediante software aprendo possibilità di controllo irraggiungibili con qualsiasi sistema meccanico tradizionale.

Dalla tabella emerge inoltre come il progressivo incremento della libertà di controllo delle valvole abbia consentito non solo un miglioramento delle prestazioni, ma anche una significativa riduzione dei consumi di combustibile e delle emissioni inquinanti, l'obiettivo della distribuzione variabile si è infatti spostato dall'incremento della potenza massima verso il miglioramento del rendimento complessivo del motore, in risposta alle sempre più stringenti normative sulle emissioni e alla crescente attenzione verso l'efficienza energetica.

4.2 Considerazioni finali

L'analisi dei principali sistemi di distribuzione variabile sviluppati negli ultimi decenni evidenzia come il controllo delle valvole abbia rappresentato uno degli aspetti più importanti nell'evoluzione del motore a quattro tempi ciclo Otto. L'obiettivo comune di tutte le tecnologie analizzate è stato quello di superare i limiti imposti dalla distribuzione tradizionale a fasatura fissa, consentendo una maggior elasticità alle diverse condizioni di funzionamento del propulsore.

L'evoluzione tecnologica è avvenuta in maniera graduale. I primi sistemi erano in grado di modificare esclusivamente la fase della distribuzione oppure di selezionare differenti profili di camma, mentre le soluzioni più moderne hanno progressivamente incrementato il grado di libertà nel controllo delle valvole, arrivando a gestire in modo

indipendente fase, alzata e durata di apertura. Il sistema MultiAir ha rappresentato un'importante svolta in questo percorso evolutivo grazie all'introduzione del comando elettroidraulico delle valvole di aspirazione, mentre la tecnologia FreeValve costituisce oggi l'espressione più avanzata di tale filosofia progettuale, eliminando completamente il tradizionale albero a camme.

È interessante osservare come, parallelamente all'evoluzione tecnica, siano cambiati anche gli obiettivi progettuali. Se nelle prime applicazioni la distribuzione variabile era impiegata principalmente per incrementare la potenza agli elevati regimi senza penalizzare la coppia ai bassi regimi, i sistemi più recenti sono stati sviluppati con una particolare attenzione al miglioramento del rendimento termodinamico, alla riduzione delle perdite di pompaggio, al contenimento dei consumi di combustibile e delle emissioni inquinanti.

L'evoluzione della distribuzione variabile dimostra come il motore endotermico, nonostante oltre un secolo di sviluppo, abbia continuato ad offrire importanti margini di miglioramento grazie all'introduzione di soluzioni sempre più sofisticate, frutto dell'integrazione tra meccanica, elettronica e sistemi di controllo avanzati.

4.3 Possibili sviluppi futuri

L'evoluzione dei sistemi di distribuzione variabile dimostra l'importanza del controllo della miscela aspirata all'interno del cilindro. Sebbene negli ultimi anni il settore automobilistico stia attraversando una profonda trasformazione dovuta alla crescente diffusione delle propulsioni elettriche ed ibride, il motore a combustione interna mantiene ancora oggi un ruolo fondamentale in numerose applicazioni, rendendo attuale la ricerca di soluzioni sempre più efficienti.

Le future evoluzioni saranno orientate verso sistemi caratterizzati da un controllo sempre più preciso e flessibile delle valvole, grazie ad una crescente integrazione tra meccanica, elettronica e software di gestione. L'obiettivo sarà quello di ottimizzare continuamente il funzionamento del motore in funzione delle condizioni di esercizio, migliorando il rendimento termodinamico, riducendo le perdite e contenendo ulteriormente consumi ed emissioni.

Tra le tecnologie più promettenti rientrano i sistemi camless, nei quali il comando delle valvole avviene in assenza di un albero a camme. La possibilità di controllare in maniera indipendente ogni singola valvola consente infatti di realizzare strategie di funzionamento estremamente avanzate, adattando in tempo reale il diagramma della distribuzione alle esigenze del motore e aprendo nuove prospettive nello sviluppo di cicli termodinamici sempre più efficienti.

Ad oggi il progetto FreeValve è ancora in una fase di progressiva introduzione e non ha ancora trovato un'applicazione diffusa nella produzione automobilistica di grande serie. Qualora tale tecnologia raggiungesse la maturità industriale e i costi di produzione diventassero compatibili con quelli di una produzione di serie, il sistema FreeValve potrebbe rappresentare una delle più importanti evoluzioni del motore a quattro tempi ciclo Otto dalla sua introduzione. La completa programmabilità della distribuzione apre infatti nuove prospettive nello sviluppo di propulsori sempre più efficienti, prestazionali e rispettosi dell'ambiente, dimostrando come l'evoluzione del motore endotermico sia ancora oggi un settore ricco di potenzialità tecnologiche.

In conclusione, indipendentemente dalla tecnologia che si affermerà nei prossimi anni, l'evoluzione della distribuzione variabile ha dimostrato come l'innovazione del settore motoristico sia ancora in grado di offrire soluzioni estremamente sofisticate che fino a pochi decenni fa erano del tutto impensabili, come il sistema MultiAir, confermando che anche un organo apparentemente consolidato come il sistema di distribuzione può continuare ad evolversi e contribuire in maniera determinante al miglioramento delle prestazioni, dell'efficienza e della sostenibilità grazie soprattutto alla continua ricerca che effettuano ogni giorno tecnici ed ingegneri.

Bibliografia

- [1] J.B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, 2nd Ed., McGraw-Hill, 2018.
- [2] Robert Bosch GmbH, Automotive Handbook, 10th Ed., 2018.
- [3] Colombo & Bariani, Catalogo tecnico alberi a camme.
- [4] A.P. Brush, Variable Valve Gear, US Patent, 1904.
- [5] G. Torazza, Variable Valve Timing Mechanism, FIAT Patent, 1972.
- [6] G. Garcea, Hydraulic Camshaft Phase Variator, Alfa Romeo Patent, 1980.
- [7] Honda Motor Co., Honda DOHC VTEC Technical Documentation.
- [8] BMW AG, Double VANOS Technical Training Manual.
- [9] Mitsubishi Motors, MIVEC Technical Documentation.
- [10] Audi AG, Audi Valvelift System Self Study Programme.
- [11] Mercedes-Benz AG, CAMTRONIC Technical Training.
- [12] Fiat Powertrain Technologies, MultiAir Electro-Hydraulic Valve Actuation System, SAE 2009-01-0199.
- [13] FreeValve AB, Technical Documentation.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il mio relatore, il Professor Enrico Corti per la disponibilità dimostrata durante la redazione di questa tesi e per avermi consigliato di trattare una tematica rivelatasi estremamente interessante.

Un sentito ringraziamento va alla famiglia Venturini, proprietari della ditta TIBI Srl, azienda presso la quale lavoro da ormai diversi anni. Grazie per tutte le opportunità che mi sono state offerte, per la fiducia che mi è stata concessa e per aver sempre sostenuto i miei impegni universitari, permettendomi di conciliare il lavoro con il percorso di studi.

Desidero ringraziare inoltre i miei compagni di corso e, in particolare, Marco e Mariachiara, con i quali ho condiviso momenti di studio, difficoltà e soddisfazioni, la loro presenza ha reso questo percorso più leggero e sicuramente meno impegnativo.

Un ringraziamento speciale va alla mia ragazza, Francesca, per avermi sempre sostenuto, incoraggiato e confortato nei momenti più difficili, condividendo con me sia le soddisfazioni sia le inevitabili delusioni che un percorso così importante può riservare. Ringrazio inoltre la sua famiglia, che mi ha accolto come il figlio maschio che non hanno mai avuto, facendomi sentire parte della loro casa.

Ringrazio di cuore tutta la mia famiglia. I miei nonni, che non mi hanno mai fatto mancare un pasto caldo ed un luogo dove sentirmi sempre a casa. I miei genitori, Massimo e Cristina, ai quali devo i valori con cui sono cresciuto e tutti i sacrifici che hanno affrontato, e continuano ancora oggi ad affrontare, per permettermi di costruire il mio futuro.

Infine, per maggior importanza, desidero dedicare un pensiero alla persona che più di ogni altra ha contribuito ad alimentare la mia passione per la meccanica, mio nonno Divo. È stato lui a trasmettermi la curiosità, la manualità e la capacità di riuscire sempre a trovare una soluzione ad ogni problema, spesso in autonomia. Ovunque tu sia, spero soltanto di averti reso orgoglioso, anche solo un decimo di quanto tu continui a rendere orgoglioso me, ogni singolo giorno.

A te dedico questo traguardo.