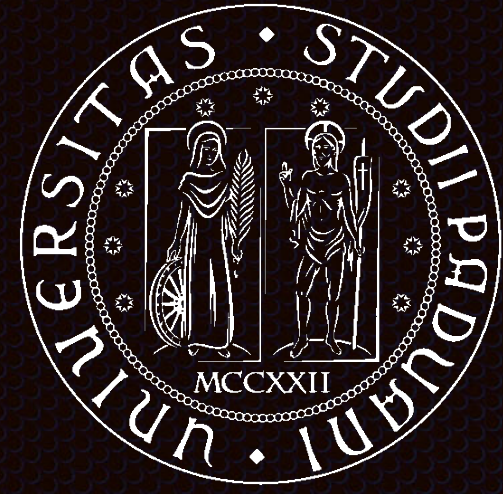




UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Turbocompressore monostadio delle macchine di Formula 1

Studio analitico del turbogruppo dagli anni '70 a oggi

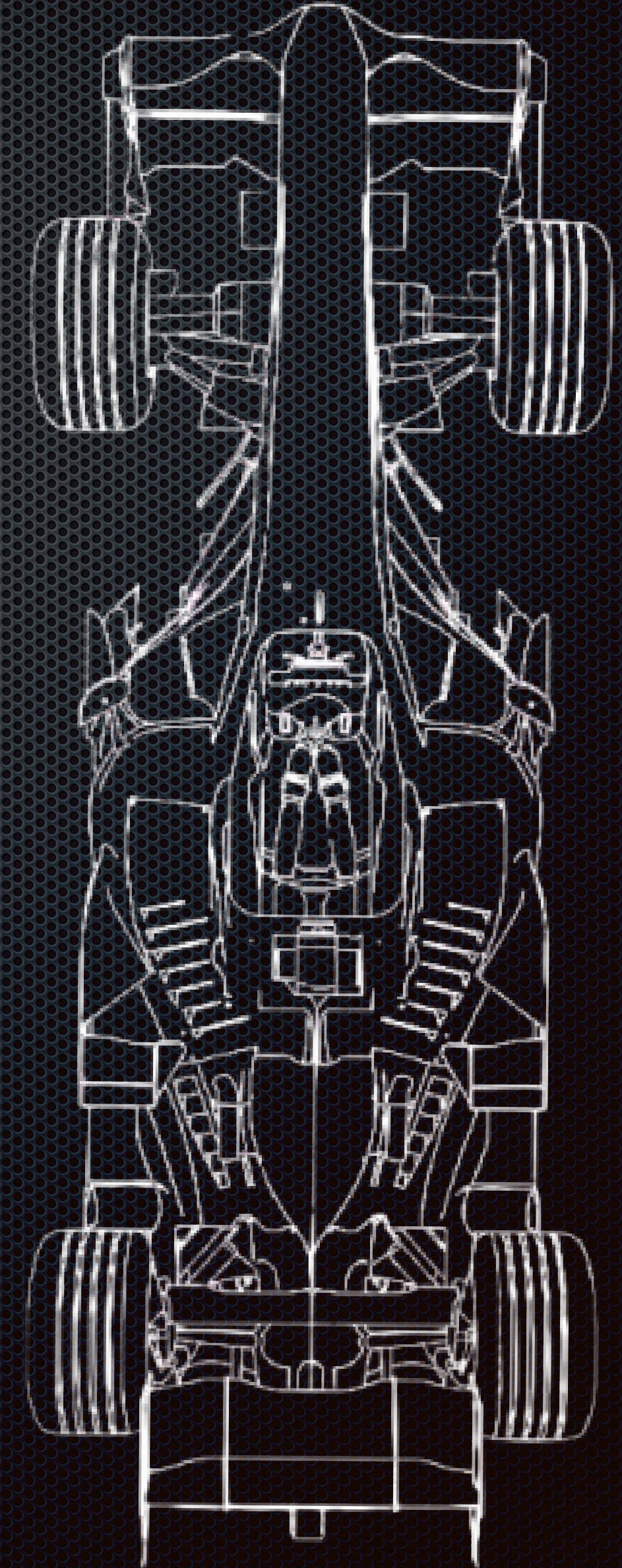
Tesi di Laurea triennale in Ingegneria Aerospaziale

Candidato: Alice Musarra | Relatore: Prof: Ernesto Benini



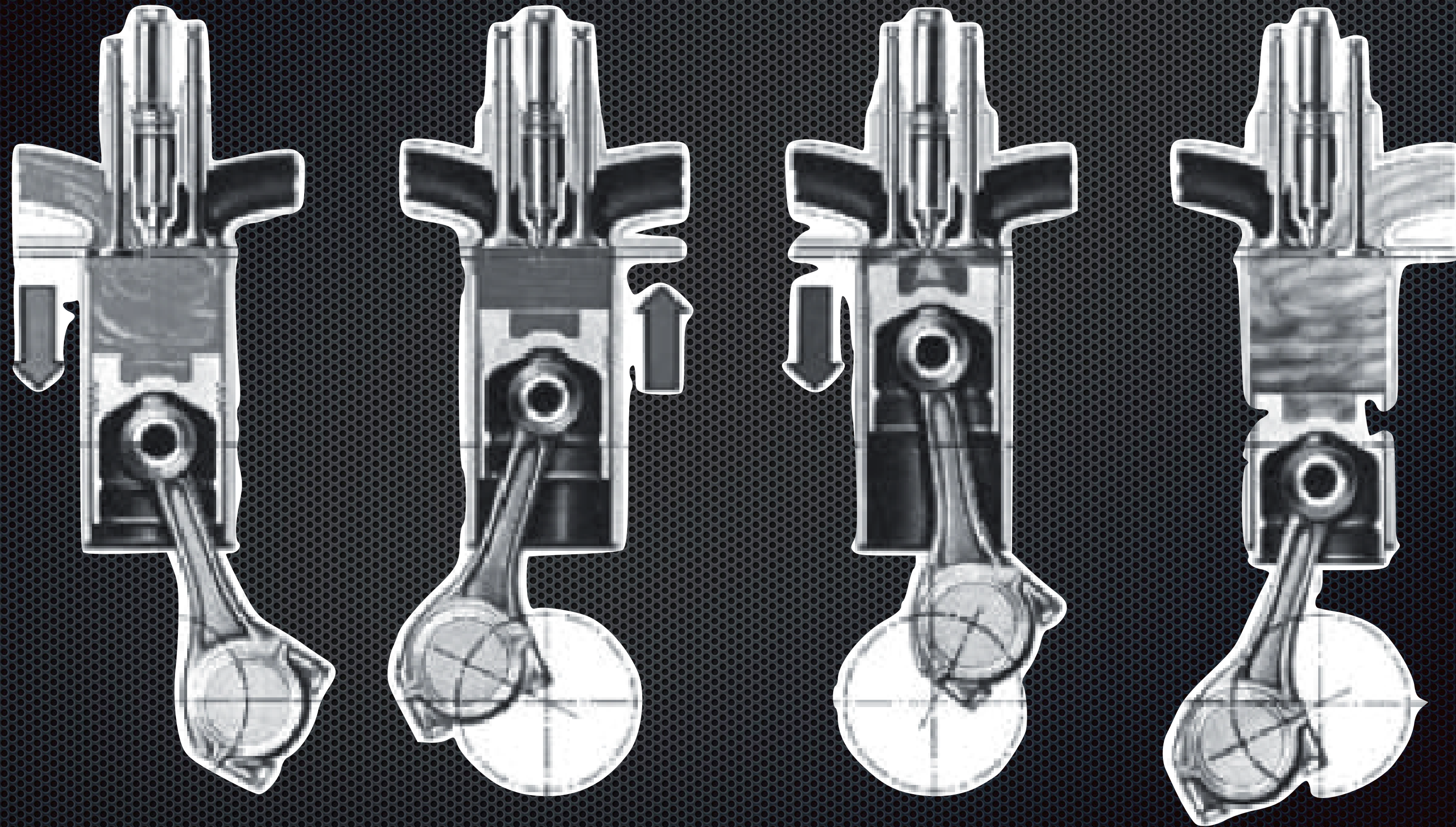
Obiettivi della tesi

- Analizzare l'evoluzione del turbocompressore monostadio in Formula 1.
- Confrontare le principali fasi tecnologiche: anni '70, era ibrida dal 2014 e scenario attuale.
- Studiare i modelli di calcolo del turbogruppo e i parametri che ne influenzano il funzionamento.
- Approfondire i fenomeni critici: temperatura in turbina, transitorio e turbo-lag.
- Valutare l'impatto di wastegate, MGU-H e nuovi regolamenti sulle prestazioni del sistema.



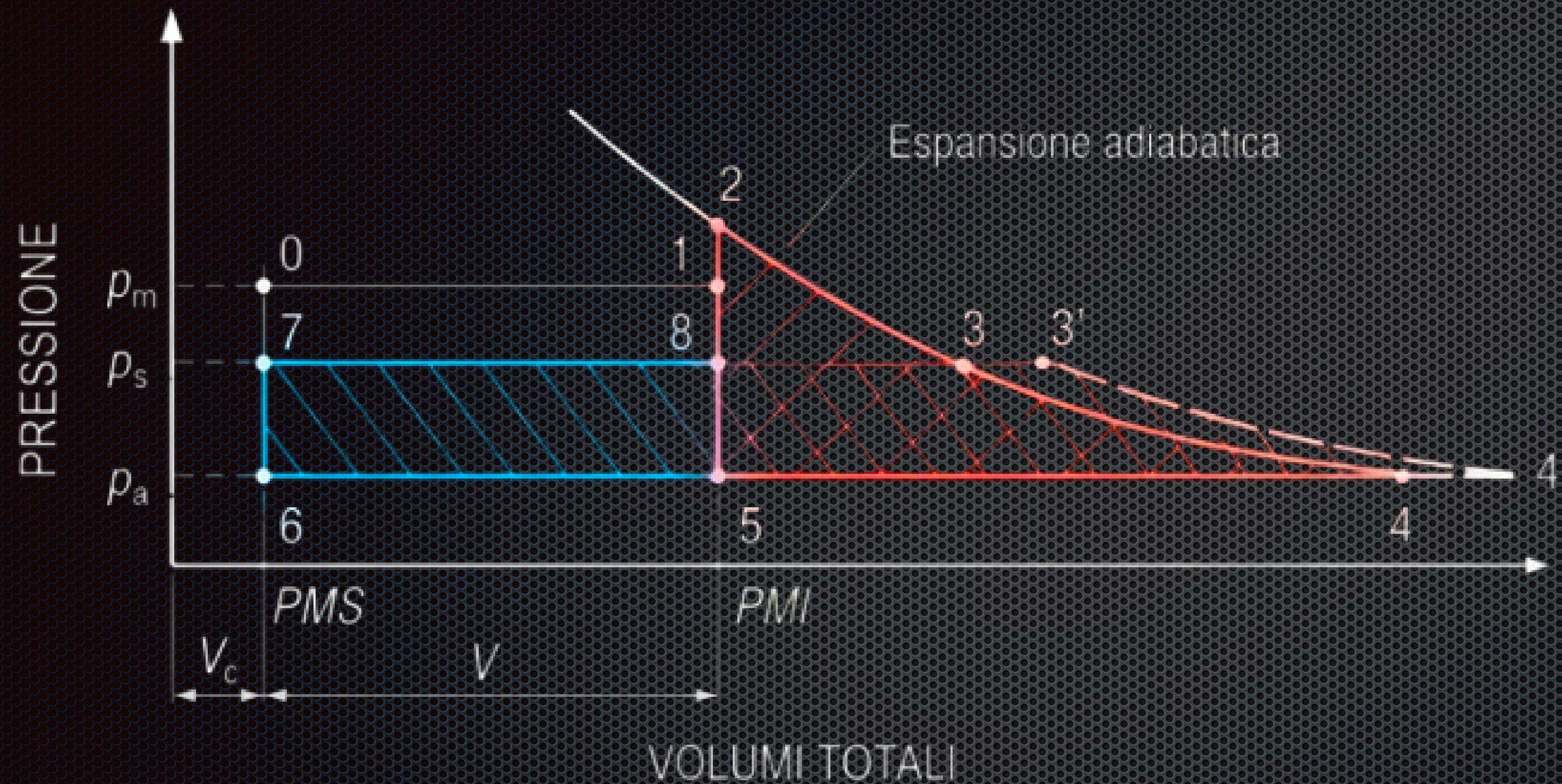
Perché serve il turbocompressore

In un motore aspirato, la massa d'aria introdotta nel cilindro è naturalmente limitata.



La sovralimentazione consente di aumentare la massa d'aria aspirata e quindi la potenza ottenibile a parità di cilindrata.

La Termodinamica del Lavoro Utile



$$h_2 - h_3 = c_p(T_2 - T_3)$$

$$T_s = T_2 \left[1 - \left(\frac{k-1}{k} \right) \left(1 - \frac{p_3}{p_2} \right) \right]$$

I gas di scarico forniscono l'energia necessaria a comprimere l'aria in ingresso e migliorare il rendimento del sistema.

Il Bilancio Energetico: Compressore e Turbina

$$P_{cp} = P_t$$

In condizioni stazionarie, la potenza fornita dalla turbina eguaglia quella assorbita dal compressore.

Lavoro del Compressore

Assorbe potenza meccanica per comprimere l'aria aspirata.

Lavoro della Turbina

Recupera energia dai gas di scarico e la converte in potenza meccanica all'albero.

Bilancio di potenza

In condizioni stazionarie, la potenza della turbina eguaglia quella assorbita dal compressore, al netto delle perdite.

L'Anatomia della Sovralimentazione

Turbina

Espansione Gas di Scarico

Compressore

Compressione Aria Fresca

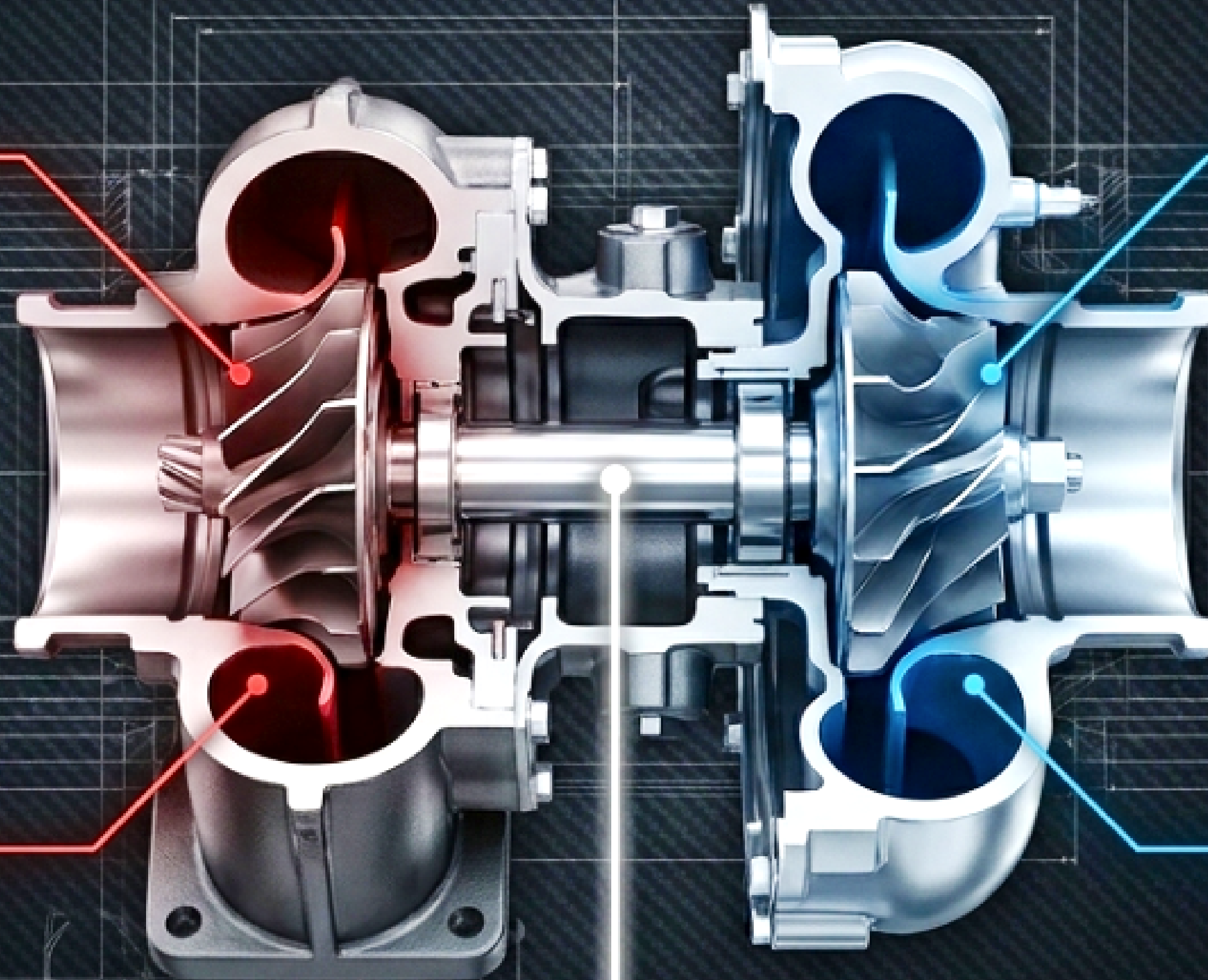
Turbina

Espansione Gas di Scarico

Compressore

Compressione Aria Fresca

Alberino: Trasferimento Diretto di Entalpia



Il Problema Fondamentale: La Fisica del Turbolag

1. Equazione del moto

$$\frac{dw_t}{dt} = \frac{\Delta M_t}{I_t}$$

L'accelerazione del rotore diminuisce se aumenta l'inerzia



2. Crescita dell'inerzia

$$I_t \propto D^5$$

L'inerzia cresce molto rapidamente con la dimensione del turbo



3. Massa elaborata

$$\dot{m}_t \propto D^2$$

Una turbina più grande elabora più massa fluida



4. Collo di bottiglia fisico

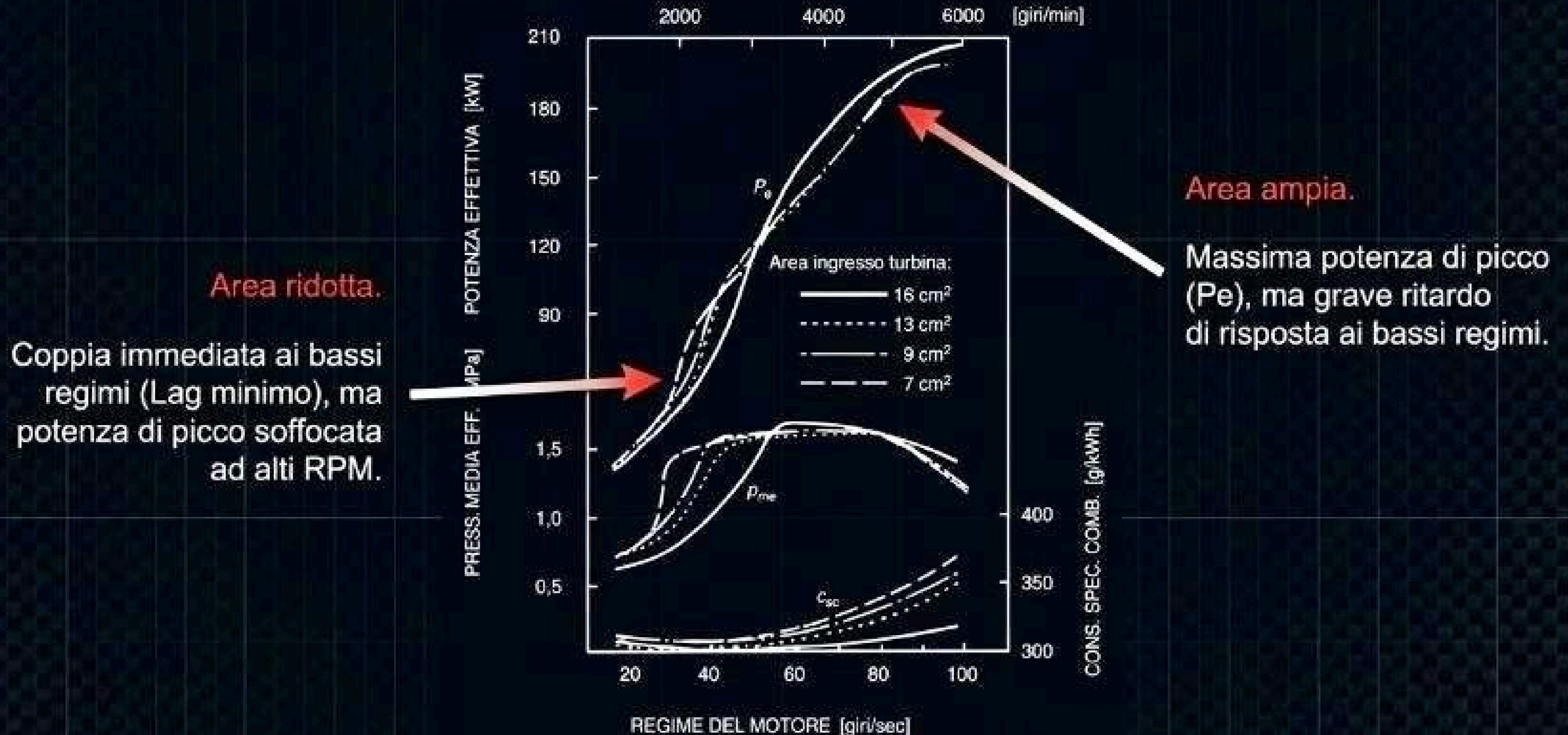
$$\tau \propto D$$

Aumentando il diametro cresce anche il tempo di risposta

*Per generare più potenza serve una turbina più grande.
Una turbina più grande aumenta esponenzialmente
l'inerzia.*

*Il risultato è un ritardo letale nell'organizzazione della
potenza.*

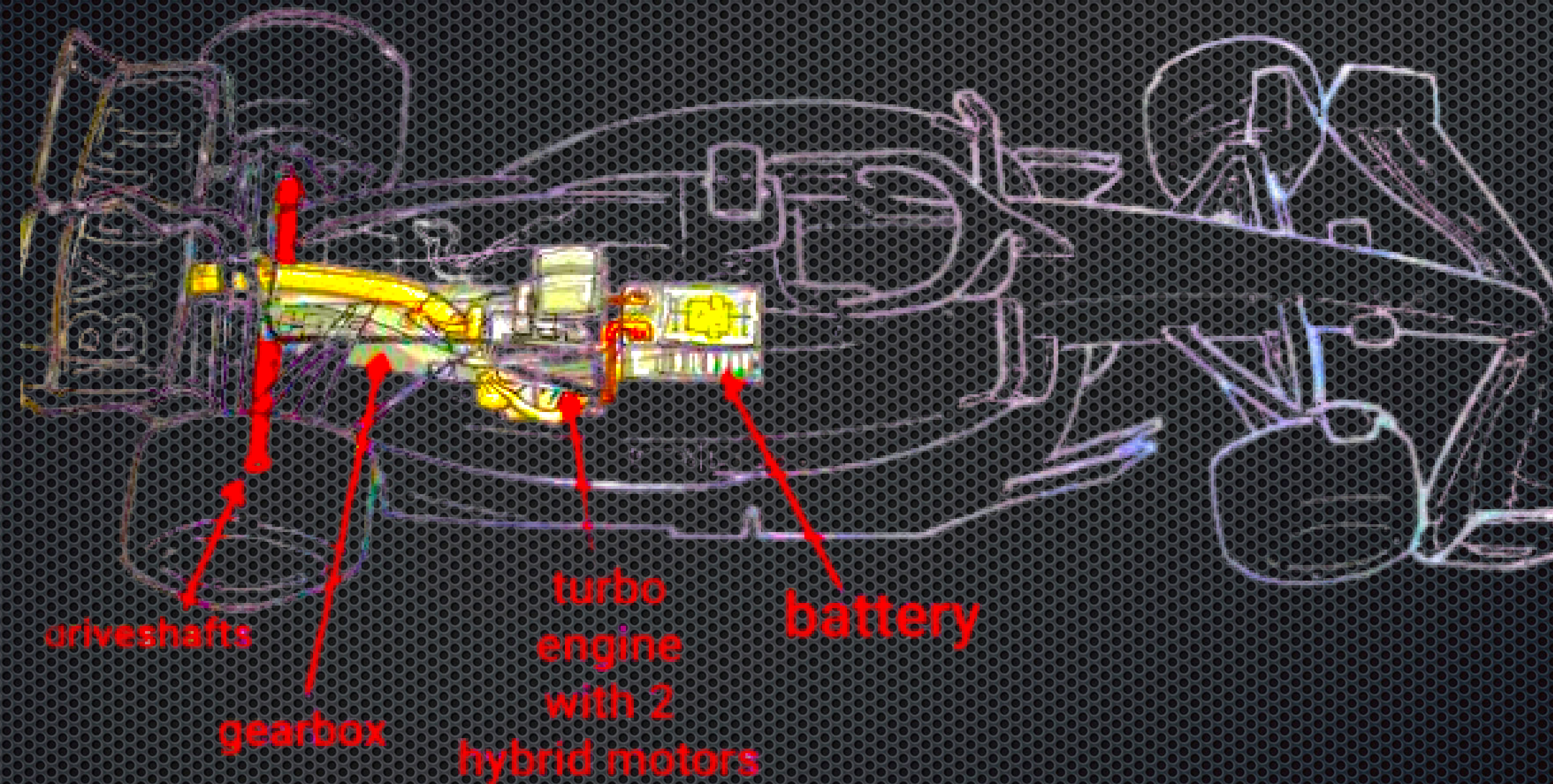
Il Paradosso della Sezione di Ingresso



Una geometria fissa impone un compromesso inaccettabile per i motori da competizione moderni

Verso soluzioni adattive

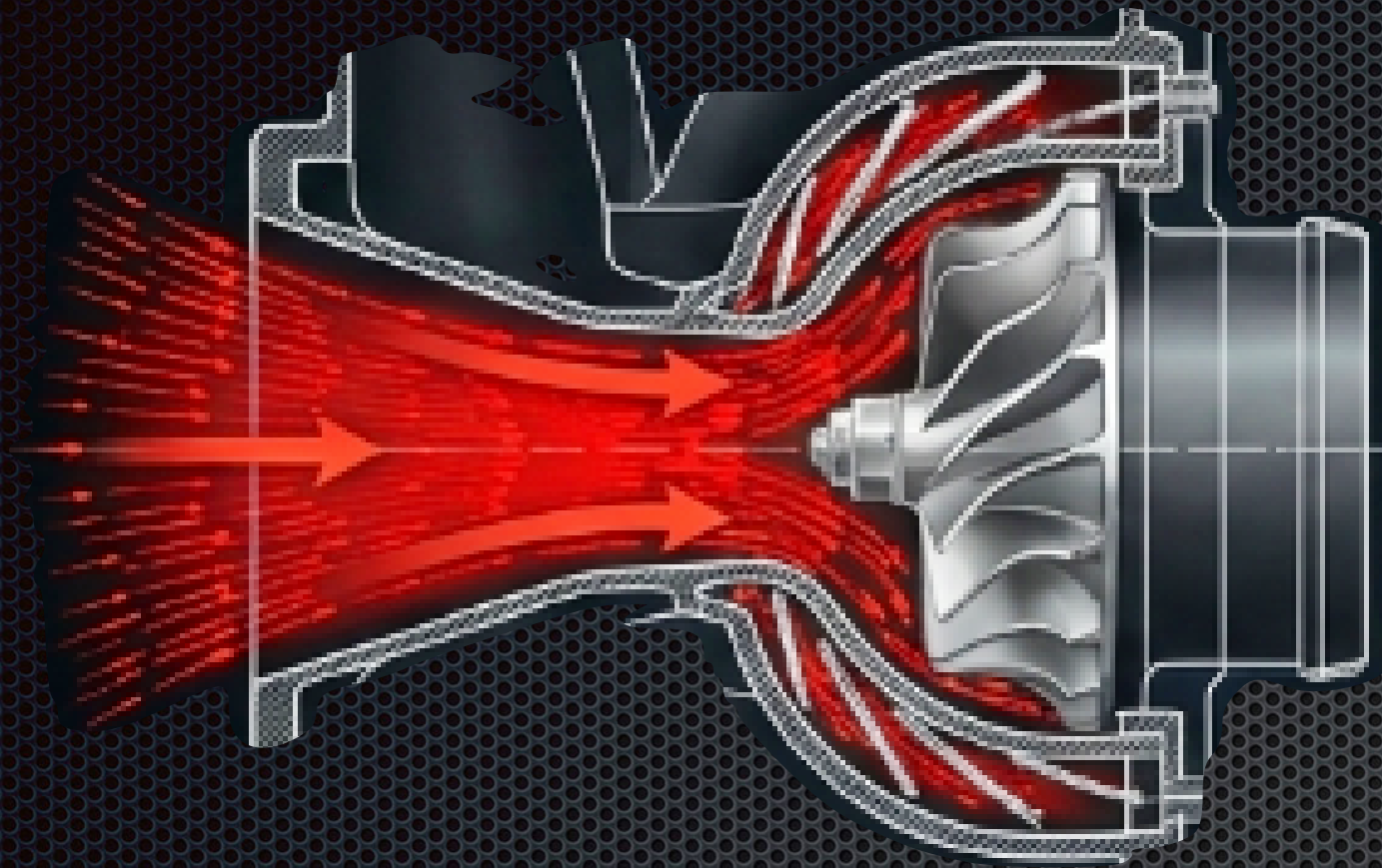
F1 - HYBRID



Geometria variabile, ibridizzazione del turbo e combustione avanzata nelle Power Unit F1.

Turbina a geometria variabile (VGT)

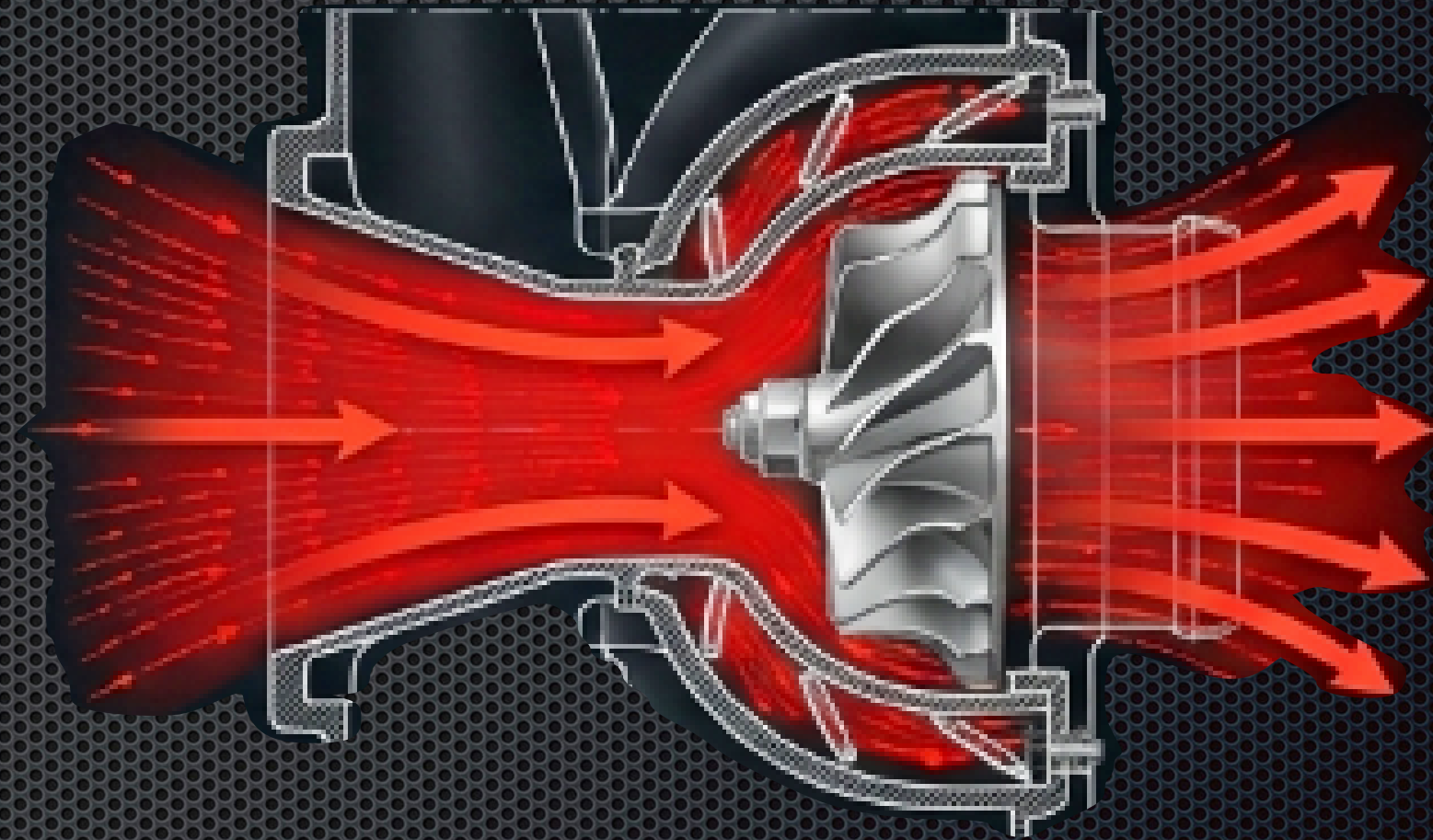
Bassi regimi



Palette chiuse: Effetto Ugello

Restringere l'area di ingresso accelera violentemente i gas di scarico. La turbina entra in pressione istantaneamente, eliminando il turbo lag

Alti regimi

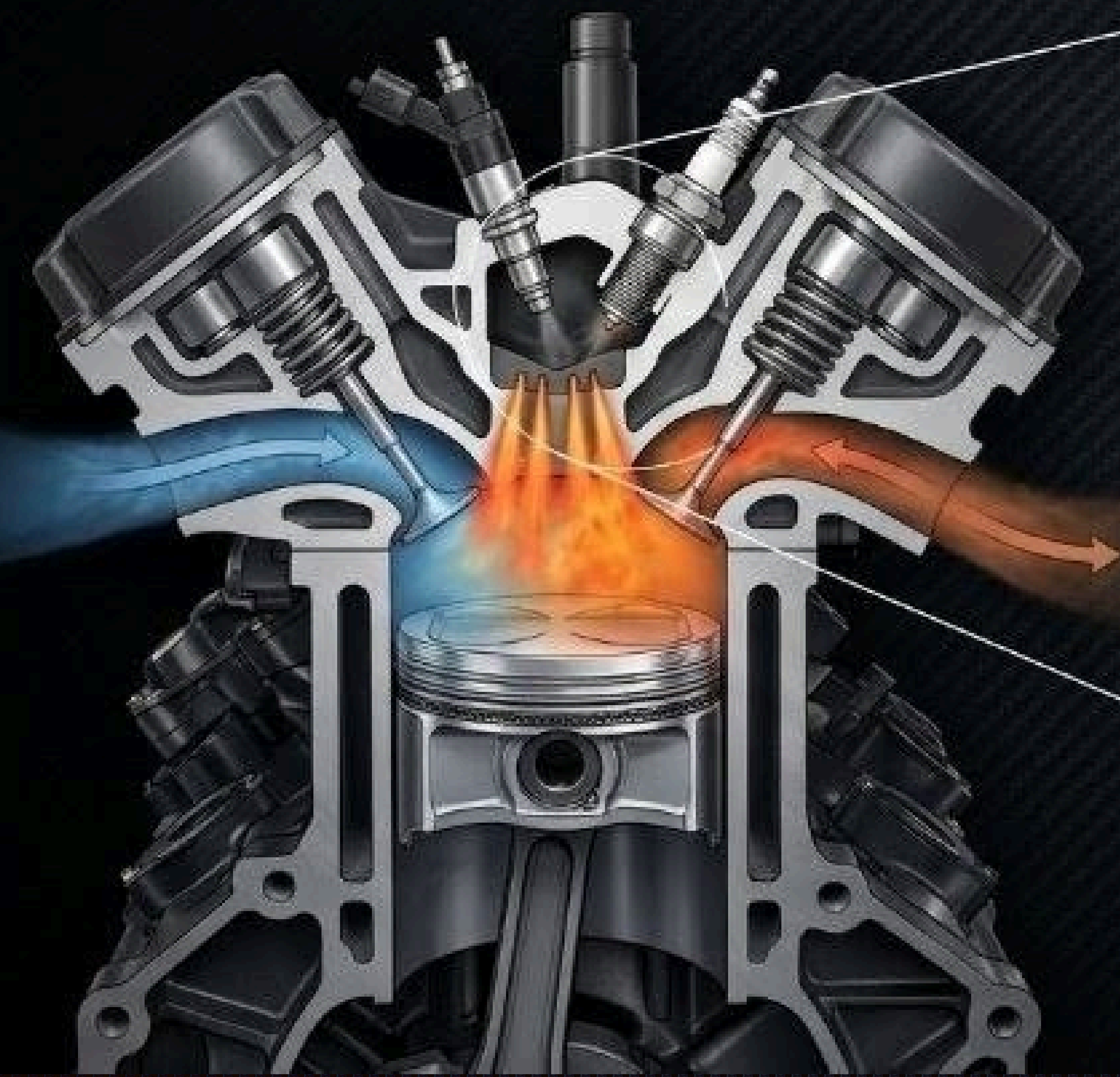


Palette Aperte: Massima Portata

L'apertura delle palette previene il soffocamento dei gas (choking), garantendo l'espulsione di enormi volumi per la massima potenza di picco

La VGT ottimizza il funzionamento della turbina lungo tutto il campo di regime del motore.

La Nuova Frontiera: Combustione a Pre-Camera (PCC)

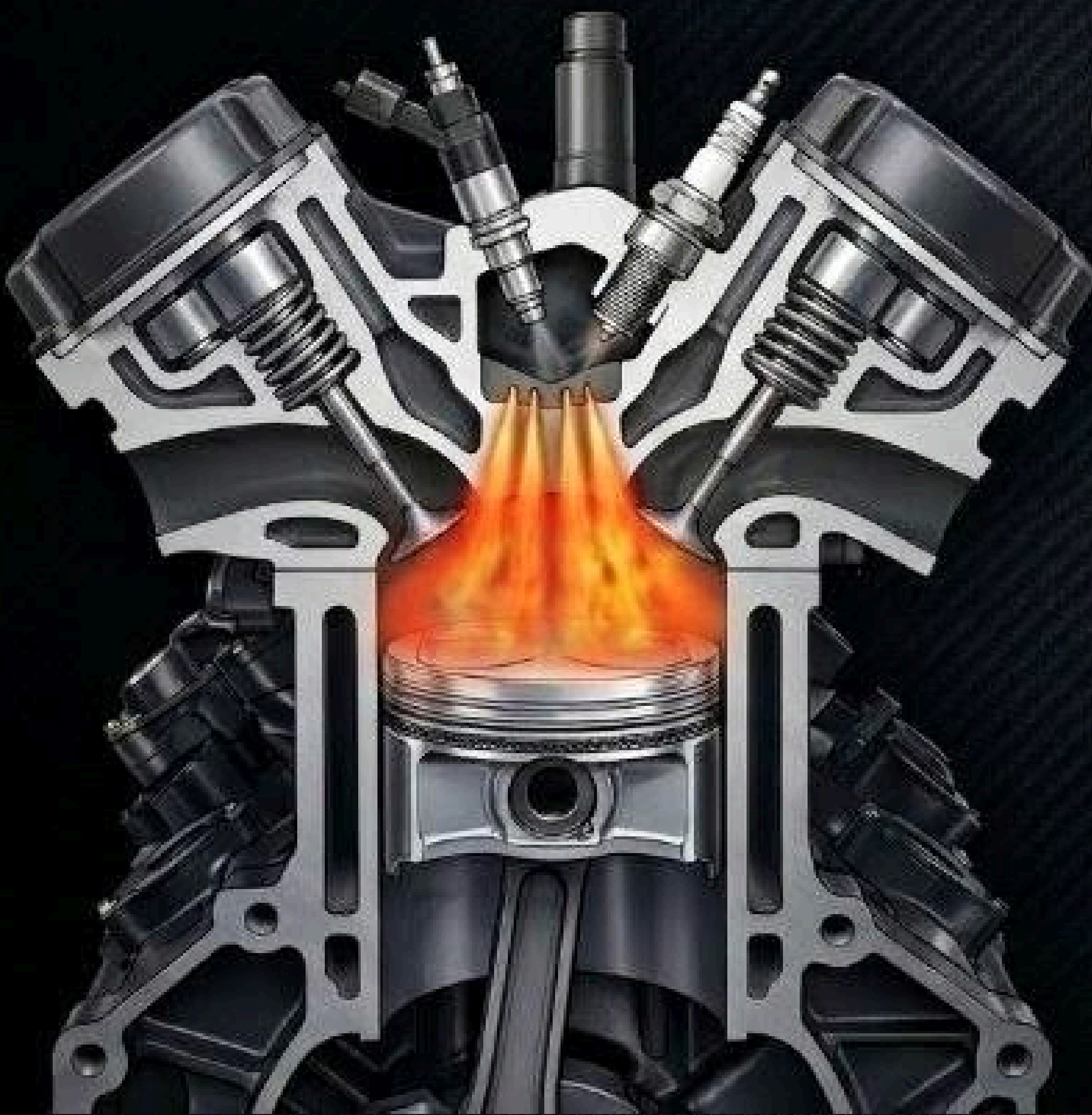


Pre-Camera (PCC):
Volume ultra-ridotto (1-2%
del volume di clearance).

**Iniettore Diretto &
Candela:** Posizionati
strategicamente
all'interno della
camera confinata.

Orifizi: I canali calibrati per la
proiezione dei getti di fiamma
verso il cilindro principale.

Dinamica di Innesco a Getto Turbolento (TJI)



Fase 1: Innesco Locale

Una miscela aria/carburante ricca viene iniettata e innescata dalla candela all'interno della PCC confinata. Risultato: Un picco istantaneo di pressione.

Fase 2: Propagazione

I Getti di Fiamma ad altissima energia penetrano la miscela ultra-magra nella camera principale, garantendo un'accensione volumetrica simultanea.

Vantaggio Ingegneristico: Brucia miscele estremamente magre in tempi ridottissimi, spingendo l'efficienza termica del motore oltre il 50%.

Evoluzione del turbocompressore in Formula 1

- **1977** – Renault introduce il V6 turbo in F1.
- **1980s** – Prima era turbo: crescita estrema delle prestazioni e grandi problemi di turbolag e affidabilità.
- **1989–2013** – Divieto dei turbo e ritorno ai motori aspirati.
- **Dal 2014** – Ritorno del turbo con le Power Unit ibride e integrazione con MGU-H.
- **Dal 2026**, l'abolizione della MGU-H e il maggiore ruolo della componente elettrica ridefiniscono l'integrazione tra turbocompressore, motore termico e recupero energetico.



McLaren MP4/5B guidata da Ayrton Senna, con cui vinse il campionato mondiale di Formula 1 nel 1990.



La Sintesi Perfetta tra Meccanica e Termodinamica

L'evoluzione dei motori da competizione sovralimentati rappresenta il progressivo superamento dei vincoli fisici. Se gli anni '80 cercavano la potenza assoluta scontrandosi con i limiti dell'inerzia rotorica, le moderne tecnologie VGT e PCC dimostrano che il futuro del motorsport non risiede nella forza bruta, ma nel controllo molecolare, dinamico e chirurgico della termodinamica.

Bibliografia

- Clarke, M., “Formula 1: i fantastici motori dell’era turbo – prima parte”, *Automoto.it*. Disponibile su: Automoto.it [Consultato il 29 maggio 2026].
- “L’era del turbo”, *Nordschleife1976.com*. Disponibile su: Nordschleife1976.com [Consultato il 29 maggio 2026].
- Scuderia Ferrari, “1989: Storia della Scuderia Ferrari Formula 1”, *Ferrari.com*, 2020. Disponibile su: Ferrari.com [Consultato il 29 maggio 2026].
- Senna Official, “1989 – Career on the tracks”, *Senna.com*. Disponibile su: Senna.com [Consultato il 2 giugno 2026].
- Ferrari, G., *Motori a combustione interna*. Torino: Il Capitello, 2008.
- Honda Motor Co., “Tecnologia Honda F1 – Power Unit”, *Honda.it*. Disponibile su: Honda.it [Consultato il 2 giugno 2026].
- FIA, Formula One Technical Regulations, edizione 2026.