

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Confronto tra powertrain tradizionale e powertrain ibrido/elettrico



Relatore

Prof.essa Cristiana Delprete

Candidato

Vincenzo Graziano Bertucci

Anno Accademico 2020/2021

Indice

PREFAZIONE

INTRODUZIONE

CAPITOLO 1 - Powertrain: definizione e classificazione	1
1.1 Definizione	1
1.2 Possibili architetture di un powertrain.....	1
1.2.1 Powertrain tradizionali.....	2
1.2.2 Powertrain elettrico/ibrido	3
1.3 Classificazione dei veicoli Elettrici/Ibridi	5
1.3.1 Grado di ibridazione	5
1.3.2 Layout del powertrain.....	7
1.3.3 Classificazione di un veicolo ibrido in funzione della posizione dell'e-motor	15
1.4 Interazione tra motore ICE e motore elettrico	22
1.5 Posizione del powertrain all'interno del veicolo	24
CAPITOLO 2 - Motore ICE e tecnologie ad esso associate	26
2.1 Introduzione.....	26
2.2 Concetti fondamentali dei motori ICE	27
2.2.1 Parametri funzionali	27
2.2.1.1 Durata, tempi e fasi del ciclo di lavoro.....	27
2.2.2 Parametri prestazionali	30
2.2.2.1 Potenza utile.....	30
2.2.2.2 Coefficiente di riempimento	32
2.2.2.3 Pressione media effettiva (pme)	33
2.2.3 Cicli di riferimento per i motori ad accensione comandata.....	33
2.2.3.1 Ciclo ideale di riferimento	33

2.2.3.2 Ciclo limite	35
2.2.3.3 Ciclo indicato.....	35
2.2.4 Rendimenti per i motori ad accensione comandata.....	37
2.2.4.1 Rendimento limite	37
2.2.4.2 Rendimento termo-fluidodinamico interno	38
2.2.4.3 Rendimento indicato.....	39
2.3 Curve caratteristiche.....	43
2.4 Consumi specifici e piani quotati	44
2.5 Sistemi di sovralimentazione.....	46
2.5.1 Principali metodi di sovralimentazione.....	47
2.5.2 Concetti base della sovralimentazione	50
2.5.3 Principali tipologie di sovralimentazione mediante sistemi turbocompressi.....	57
2.6 Legge di alzata delle valvole e vari sistemi di modifica	63
2.6.1 Variable valve actuation (VVA).....	65
2.6.2 Cylinders deactivation (CDA).....	68
2.6.3 Ciclo termodinamico Miller/Atkinson	72
2.7 Utilizzo dei motori ICE sui veicoli ibridi.....	74
2.7.1 Introduzione al downsizing e alle varie tecnologie associate.....	74
2.7.2 Sistemi correlati al processo di downsizing	75
2.7.3 Esempio di downsizing sul motore ICE	75
CAPITOLO 3 - Trasmissione nei veicoli tradizionali ed ibridi	79
3.1 Introduzione.....	79
3.1.1 Resistenza aerodinamica.....	79
3.1.2 Resistenza al rotolamento	80
3.1.3 Resistenza alla pendenza stradale	80
3.1.4 Resistenza all'accelerazione	81
3.1.5 Resistenza totale	82

3.2 Perché i veicoli hanno bisogno di un cambio.....	84
3.3 Componenti principali dei cambi di velocità	87
3.3.1 I sincronizzatori	88
3.3.2 Il volante	89
3.3.3 La frizione.....	90
3.4 Differenti tipi di trasmissioni nei veicoli.....	98
3.4.1 Trasmissioni manuali	99
3.4.2 Trasmissioni manuali automatizzate	103
3.4.3 Trasmissioni automatiche	105
3.4.4 Trasmissioni a doppia frizione (DCT)	109
3.4.5 Trasmissioni nei veicoli ibridi.....	112
3.4.6 Trasmissioni a variazione continua di fase (CVT)	115
CAPITOLO 4 - Overview sui componenti del powertrain elettrico	127
4.1 Introduzione e configurazione generale degli EV	127
4.1.1 Variazione nel sistema di accumulo dell'energia negli EV	128
4.1.2 Variazione nella disposizione nel sistema di propulsione degli EV	129
4.1.3 Variazione nella trasmissione della potenza alle ruote negli EV	130
4.2 Le batterie negli EV	131
4.2.1 Tensione di cella e tensione nominale (V)	132
4.2.2 Capacità della batteria (Ah)	133
4.2.3 Energia immagazzinata (Wh)	134
4.2.4 Energia specifica (Wh/Kg)	135
4.2.5 Densità di energia (Wh/m ³)	135
4.2.6 Potenza specifica (W/Kg)	135
4.2.7 Stato di carica (SOC).....	136
4.2.8 Profondità di carica (DOD)	137
4.2.9 Efficienza energetica	137

4.2.10	Temperatura di funzionamento della batteria	137
4.2.11	Geometria della batteria.....	137
4.2.12	Durata della batteria.....	138
4.3	Batterie al litio	138
4.3.1	Batterie agli ioni di litio	138
4.3.2	Batterie ai polimeri di litio.....	140
4.4	Elettronica di potenza	141
4.4.1	Inverter.....	141
4.4.2	Convertitori DC/DC.....	145
4.5	I motori elettrici.....	147
4.5.1	Motore brushed a CC.....	147
4.5.2	Caratteristiche principali motori dei motori a CC	148
4.5.3	Motori elettrici brussless a magneti permanenti (PM)	158
4.5.4	Motori a riluttanza commutata (SR).....	161
4.5.5	Motori ad induzione.....	163
4.5.6	L'efficienza dei motori elettrici	166
4.5.7	Confronto tra i diversi motori elettrici.....	168
4.6	Le trasmissioni nei veicoli elettrici	169
4.6.1	Trasmissione a rapporto fisso e singola velocità	169
4.6.2	Trasmissione a rapporto fisso e doppia velocità.....	170
4.7	Esempio di veicolo elettrico- Audi E-tron 55	171
4.7.1	Powertrain anteriore (APA 250).....	173
4.7.1	Powertrain posteriore (AKA 320)	177
CAPITOLO 5 - Installazione, analisi e costo dei sistemi ibridi		182
5.1.	Introduzione.....	182
5.2.	Descrizione dell'architettura MICRO-HYBRID.....	182
5.2.1	Sistema P1F 12 V	183

5.2.2	Impatto dell'installazione del sistema P1F 12 V su una vettura esistente	183
5.2.3	Modifiche in dettaglio.....	185
5.2.4	Esempio di installazione di un sistema P1F su una vettura esistente	186
5.3	Descrizione dell'architettura MILD HYBRID	188
5.3.1	Sistema P1F 48 V	189
5.3.2	Impatto dell'installazione del sistema P1F 48 V su una vettura esistente	189
5.3.3	Esempio di installazione di un sistema P1F 48V su una vettura esistente	191
5.3.4	Sistema P2 48 V.....	193
5.3.5	Impatto dell'installazione del sistema P2 48 V su una vettura esistente	194
5.3.6	Esempio di installazione di un sistema P2 48V su una vettura esistente.....	196
5.4	Introduzione analisi dei costi.....	198
5.4.1	Analisi dei costi	199
5.4.2.	Analisi comparativa e conclusioni.....	202

CONCLUSIONI

Prefazione

Negli ultimi anni si è assistito ad una sempre crescente introduzione nel mercato automobilistico di veicoli ibridi ed elettrici da parte delle varie OEM. Questo enorme investimento da parte delle case automobilistiche ha portato nel mercato un numero sempre maggiore di veicoli elettrici/ibridi. Per spiegare questo repentino cambio di rotta da parte dei vari car makers di tutto il mondo è opportuno porsi una semplice domanda: perché stanno investendo miliardi di euro in architetture elettriche/ibride?

La domanda precedente ha molteplici risposte, che possono variare in funzione della persona a cui viene posta. Infatti, si potrebbe pensare che le case automobilistiche stiano investendo tempo e denaro per migliorare l'ambiente e la salute di chi vi abita, ma casi come il Diesel Gate ci dovrebbero far subito tornare alla realtà. La verità dietro al massiccio sforzo da parte delle OEM sull'elettrificazione del proprio parco auto è legata all'impossibilità da parte di queste ultime di riuscire a rispettare i sempre più stringenti vincoli ambientali imposti dai differenti enti mondiali di controllo (CARB, CE, ecc.). Di seguito, riportiamo quanto richieste dall'Unione Europea sul tema. Secondo il regolamento 2019/631, la soglia di CO₂ calcolata sulla media della flotta, a partire dal 2020, sarà pari a 95 g/CO₂ al km, tale soglia corrisponde a circa 4 l/100 km per le auto a benzina e a 3,6 l/100 km per le auto diesel. La comunità Europea, per calcolare le emissioni di ogni singola macchina, ha introdotto la seguente formula:

$$CO_2 = 95 + C_{SCO} \cdot (Massa - Massa_{Rif})$$

Dove:

- $C_{SCO} = 0,0333$ è il coefficiente che determina lo scostamento dai 95 g secondo la differenza di peso;
- $Massa$, si intende la massa in ordine di peso, ossia incluso il conducente [Kg];
- $Massa_{Rif} = 1379,88$ [Kg] è la massa media delle auto immatricolate in Europa.

Mediante questa formula, si riesce a calcolare il valore di CO₂ emesso da ogni singola vettura. Come parametro discriminante tra un veicolo e l'altro è stato scelto il peso¹, vista la sua correlazione con il consumo di combustibile e quindi con le emissioni di CO₂. Il meccanismo che verifica il superamento dei limiti, e conseguentemente le relative sanzioni, è il seguente: nel 2021 si calcoleranno le emissioni di ogni vettura immatricolata nella comunità europea nel corso del 2020; se il valore medio fatto

¹ Le auto di peso uguale al valore medio hanno l'obiettivo di 95 g/km di CO₂, le più pesanti avranno una soglia più alta mentre quelle più leggere ne avranno una più bassa.

registrare dai modelli di un costruttore supera lo specifico obiettivo (che per tener conto del peso della vettura viene calcolato con la formula descritta precedentemente), la Casa dovrà pagare alle autorità UE un indennizzo di 95 euro per ogni grammo di CO₂ al di sopra del limite, moltiplicato per il numero di auto vendute durante l'anno.

Nella tabella seguente sono indicati i dati (società di consulenza PA Consulting) che forniscono una stima delle indennità che le Case dovranno pagare all'Unione Europea nel 2021 per il superamento delle emissioni medie di anidride carbonica per le vetture immatricolate nel 2020. Ovviamente, questi dati non tengono conto del calo delle vendite dovute all'emergenza COVID, ma possono dare un'idea del perché le case stiano investendo così tanto nell'elettrificazione.

Tabella Prefazione.1 - Stima delle indennità da pagare alla CE da parte delle principali case automobilistiche [7]

Car Maker	Delta target CO₂ [g/km]	Multe previste [milioni di euro]
Toyota	0,2	18
PSA	4	938
Renault/Nissan/Mitsubishi	4,9	1057
Hyundai/Kia	7,7	797
Volkswagen	12,7	4504
BMW	7,6	754
Ford	16,2	1456
Daimler	11	997
Honda	25,2	332
FCA	27	2461
Volvo	12,5	382
Mazda	28,7	877
Jaguar/Land Rover	4,4	93

Dai dati in tabella è facile capire quale sia il motivo per cui le case hanno deciso di investire nei veicoli elettrici. Tuttavia, se si va ad analizzare la norma in dettaglio, si aprono degli spiragli per gli OEM. Infatti, la UE per promuovere la diffusione delle auto elettriche e ibride plug-in ha previsto un meccanismo di super-crediti, il quale permette alle vetture che emettono meno di 50 g/km di CO₂ di avere un peso maggiore nel calcolo delle emissioni medie. Infatti, nel 2020 questo tipo di vetture conterà per 2, contro l'1,67 del 2021 e l'1,33 nel 2022 arrivando nel 2023 a pesare 1. Un altro parametro da tenere in considerazione è come l'Unione Europea considera le emissioni delle automobili. Quando si parla di ZEV (Zero Emission Vehicles), si deve capire a cosa si riferisce la

norma per un veicolo a zero emissioni. Si può effettuare un'analisi ambientale Well-to-Wheel_{AMB} (WTW, dal “pozzo alla ruota”), che si divide in:

- a) Well-to-Tank_{AMB} (WTT_{AMB}, dal “pozzo al serbatoio”): che quantifica i grammi di sostanze inquinanti emessi durante le fasi di estrazione, produzione e trasporto di ogni MJ di carburante (inteso come vettore energetico).
- b) Tank-to-Wheel_{AMB} (TTW_{AMB}, dal “serbatoio alla ruota”): che quantifica i grammi di sostanze nocive emessi durante la fase di utilizzazione del carburante per ogni chilometro percorso dal veicolo.

A differenza dei veicoli a combustione, nei quali si hanno delle emissioni inquinanti più o meno elevate in tutte le fasi dell'analisi ambientale WTW_{AMB}, per i veicoli elettrici l'inquinamento nella parte di analisi TTW_{AMB} si può considerare nullo. Per quanto riguarda la fase di analisi WTT_{AMB}, la quantità d'inquinanti varia al variare del tipo di tecnologia con la quale si ottiene l'energia immagazzinata nelle batterie. Da quanto detto precedentemente, si capisce che la norma non valuta il reale impatto ambientale dei veicoli elettrici, ma soltanto il consumo Tank to Wheel andando di fatto a falsare l'analisi [8]. Infatti, se si volesse andare a valutare l'impatto ambientale reale emesso da un'auto in termini di CO₂, si dovrebbe tener conto dell'intero ciclo vita del veicolo, includendo in questo modo: la fabbricazione, la produzione dell'energia per le ricariche ed il riciclo finale. In tal modo, si scopre che l'impatto delle auto elettriche, pur inferiore a quello delle tradizionali, è ben diverso da zero e molto variabile in funzione del modo in cui viene generata l'energia elettrica. Se quest'ultima è ricavata da fonti rinnovabili come l'eolico o il solare, le emissioni di anidride carbonica saranno minime, mentre se si impiegano centrali alimentate a carbone (che emettono oltre 700 g/kWh di CO₂) l'impatto di un'elettrica è vicino (e per alcuni studi superiore) a quello di un diesel. Tutti i produttori automobilistici, si sono dotati di appositi software atti a monitorare l'andamento delle emissioni medie della flotta (es. GreenPerformanceSystem di FCA) in modo da gestire le varie criticità e trovare metodi per porvi rimedio[7]. Un metodo molto semplice potrebbe essere quello di auto-immatricolare le vetture elettriche in modo da aumentare il numero di vendite oppure evitare verso la fine dell'anno di vendere vetture con un grado di emissione molto elevato. Da quanto detto, si può comprendere che le Case automobilistiche stanno investendo sull'elettrificazione non per una svolta ambientalista ma per meri fini economici.

Introduzione

Il 12 Dicembre 2015 è stato siglato, alla conferenza sul clima di Parigi (COP21), il primo accordo universale e vincolante sulla riduzione delle emissioni di CO₂ per raggiungere l'obiettivo di arrestare il cambiamento climatico e ridurre la temperatura globale di 1.5-2°C rispetto ai periodi pre-industriali. Il 28 Novembre 2018 la Commissione europea ha presentato la sua strategia a lungo termine per avere un'Europa ad impatto climatico zero entro il 2050. Infatti, da ricerche svolte dal gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico (IPCC), è emerso che le sole attività umane hanno causato, nel 2019, un riscaldamento globale di 1,1°C superiore ai livelli pre-industriali e che la temperatura terrestre sta aumentando di circa 0.2°C ogni decennio. Al fine di raggiungere gli obiettivi sopracitati, si stanno adottando politiche ambientali volte ad incentivare il passaggio all'uso di veicoli a propulsione elettrica. Queste politiche sono differenziate in funzione dell'interlocutore. Infatti, se si considera il cliente, le strategie più adottate sono:

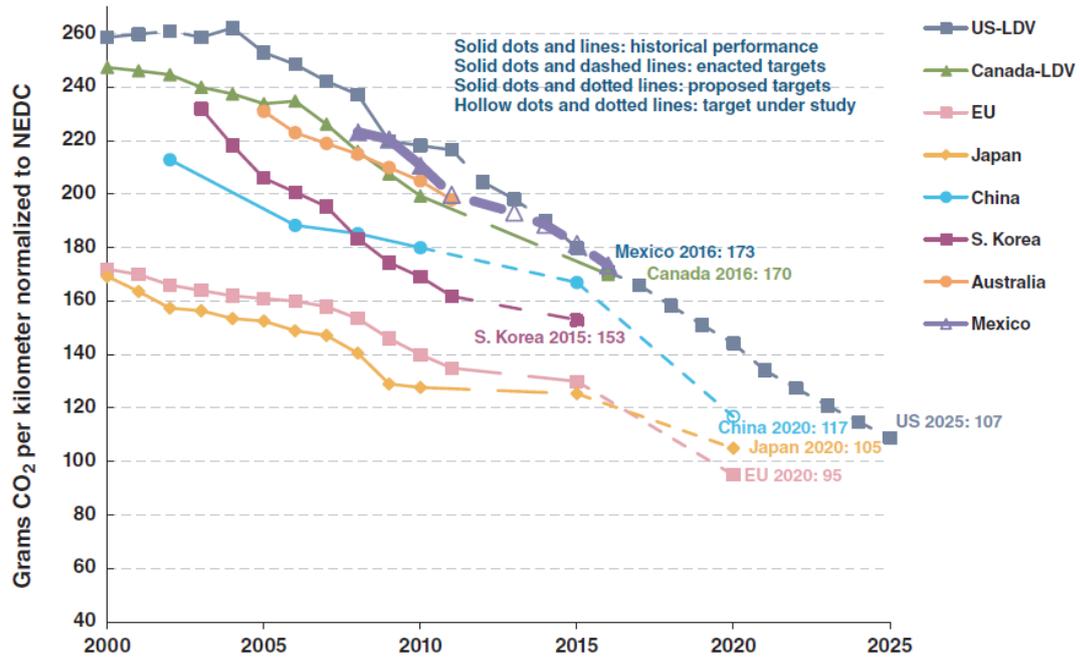
- Incentivi fiscali che permettono di ridurre il prezzo d'acquisto dei veicoli HEV/BEV;
- Sgravi fiscali sull'installazione delle centraline di ricarica;
- Sempre maggiori riduzioni della mobilità cittadina per veicoli diesel e/o benzina antecedenti alle normative Euro 4.

Mentre, se si considerano le case automobilistiche, le strategie più adottate sono:

- Incentivi economici per nuove forme di tecnologia green;
- Multe salate per la produzione e la vendita di veicoli troppo inquinanti;
- Normative sempre più stringenti sulla riduzione delle emissioni di CO₂.

Questo mix di fattori ha portato a dei vantaggi in termini di riduzione di emissione di CO₂, infatti nel 2017 la riduzione si è attestata a -29%, rispetto alle emissioni di CO₂ del settore trasporti del 1990. Nella figura seguente (Fig. I.1), viene riportato il trend di g di CO₂ al Km divisi per mercato, nel quale si ipotizza una costante riduzione di CO₂. Da quanto si evince dalla figura, le emissioni di CO₂ presentano un trend progressivamente in discesa in tutti i paesi. E bene ricordare, però, che le emissioni di CO₂ vengono prodotte anche nel caso di una combustione ideale e quindi, al fine di ridurre ciò, si deve andare a ridurre la quantità di combustibile bruciato durante il processo. Inoltre, si deve considerare che anche nella produzione dei veicoli elettrici e nell'energia elettrica stoccata negli accumulatori viene generata CO₂.

In questo lavoro di tesi verrà effettuato un confronto teorico tra le differenti tipologie di powertrain, tradizionale e ibrido/elettrico.



[1] China's target reflects gasoline vehicles only. The target may be lower after new energy vehicles are considered.
 [2] US, Canada, and Mexico light-duty vehicles include light-commercial vehicles.

Figura I.1-Emissioni globali di CO₂, dati storici e standard futuri. [1]

Capitolo 1

Powertrain: definizione e classificazione

1.1 Definizione

Il powertrain (PWT) può essere definito come l'insieme dei componenti che generano potenza e che poi trasmettono alle ruote, consentendo così il moto del veicolo. Un gruppo motopropulsore (Figura 1.1) è generalmente costituito da:

- Motore;
- Trasmissione;
- Alberi di trasmissioni;
- Differenziale;
- Ruote.

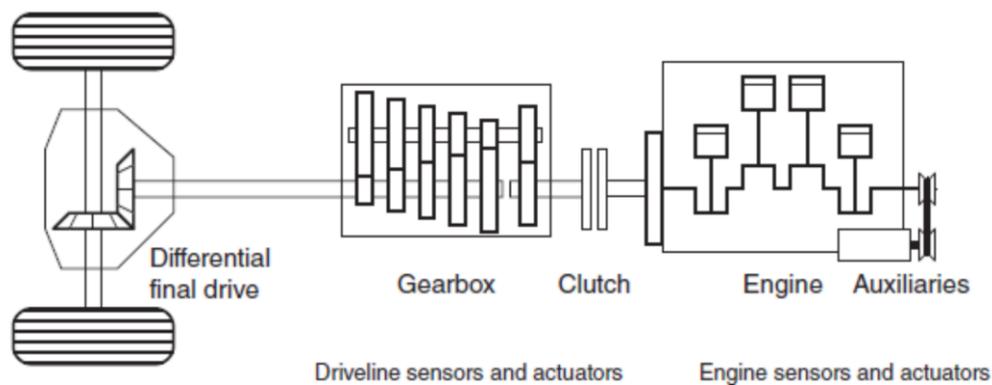


Figura 1.1-Esempio di powertrain tradizionale [1]

Obiettivo principale del powertrain è fornire alle ruote la potenza richiesta dal conducente. Alcune volte viene utilizzata in maniera erronea, al posto della parola powertrain, la parola driveline o drivetrain, tuttavia bisogna fare una distinzione. Si definisce driveline (o drivetrain) l'insieme dei componenti che trasferiscono la coppia dal motore alle ruote. Detto ciò, si può definire il gruppo motopropulsore come l'insieme del motore e della driveline.

1.2 Possibili architetture di un powertrain

Andremo a parlare di due differenti tipi di powertrain:

- Tradizionali;
- Ibridi/elettrici.

1.2.1 Powertrain tradizionali

Una possibile classificazione delle varie architetture può essere effettuata sulla base del tipo di ruote motrici. Quelle più comunemente usate sono:

- Trazione anteriore, chiamata anche Front-Wheel Drive (FWD);
- Trazione integrale, chiamata anche All-Wheel Drive (AWD);
- Trazione posteriore con motore posteriore o centrale, chiamata anche Rear-Wheel Drive (RWD).

In Figura 1.2 è viene riportato un esempio delle tre architetture precedentemente elencate.

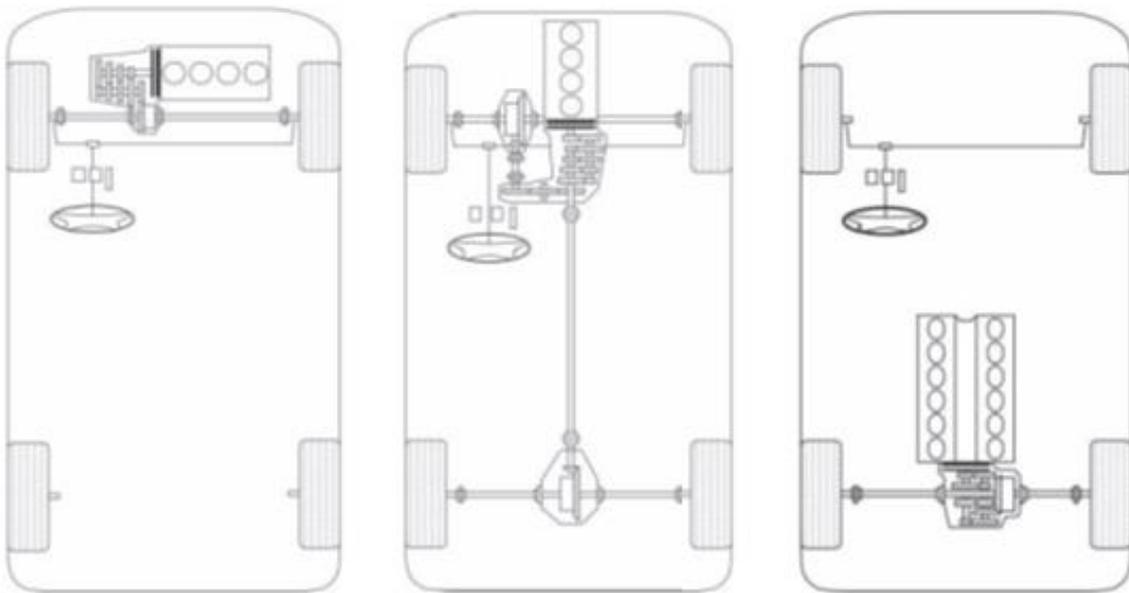


Figura 1.2-Tre differenti tipologie di architettura del gruppo motopropulsore [1]

La classificazione del PWT non si può limitare alla sola tipologia delle ruote motrici, in quanto la scelta dei componenti che possono andare a differenziare un gruppo motopropulsore sono molteplici. In Figura 1.3 sono visibili una serie di possibili elementi che possono caratterizzare un PWT, come il tipo di motore, diesel o benzina, la presenza o meno di un convertitore di coppia anziché una frizione singola e/o doppia e il tipo di trasmissione, che può essere:

- Automatica (AT);
- Manuale (MT);
- Manuale automatizzato (AMT);
- Doppia frizione (DCT);
- A variazione continua (CVT).

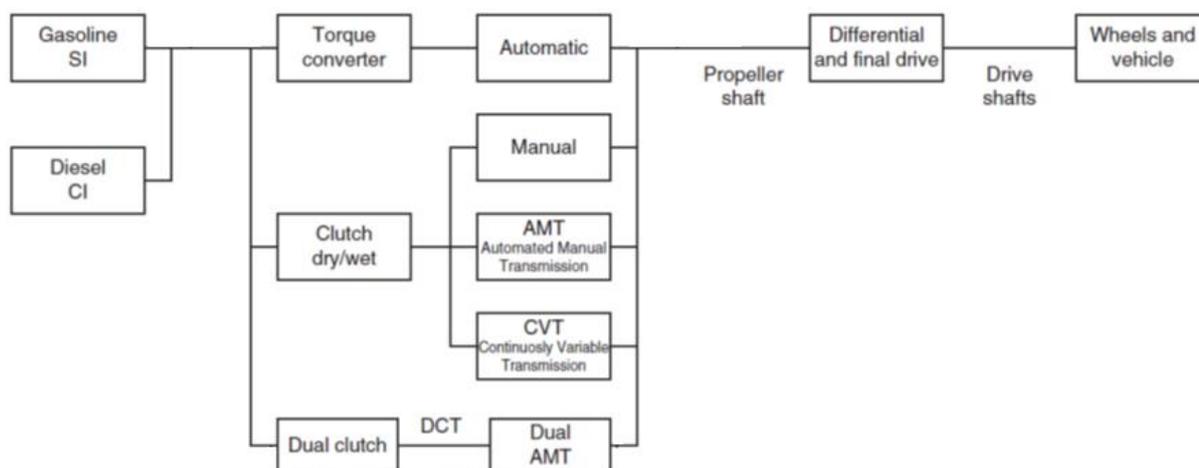


Figura 1.3-Diverse opzioni di componenti all'interno del gruppo PWT [1]

Un'ulteriore distinzione del powertrain, non presente in Figura 1.3 in quanto non fa propriamente parte di esso, è relativa alla presenza o meno di sistemi di recupero dell'energia proveniente dai gas di scarico: i cosiddetti sistemi EGR (Exhaust Gas Recirculation). Tali sistemi permettono di aumentare l'efficienza complessiva del veicolo andando a recuperare e riutilizzare l'energia ancora contenuta all'interno dei gas di scarico.

1.2.2 Powertrain elettrico/ibrido

Prima di addentrarci nelle varie classificazioni dei PWT ibridi/elettrici è conveniente fornire alcune definizioni fondamentali su questa tipologia di veicoli.

Si definisce, veicolo ibrido: un veicolo la cui potenza¹ necessaria per il movimento non viene generata soltanto dal motore a combustione, ma almeno da un'altra fonte propulsiva; queste fonti propulsive, cooperando tra di loro, permettono il movimento del veicolo. La definizione di veicolo ibrido è appositamente fornita in via generale, in quanto non esiste la sola ibridazione elettrica, ossia un motore elettrico alimentato da una batteria, ma i sistemi di accumulo che possono essere utilizzati per fornire energia per la trazione sono molteplici:

- Flywheel-Base Hybrid Vehicle, in cui l'energia viene immagazzinata sotto forma di energia cinetica rotazionale;
- Pneumatic Hybrid Vehicle, in cui l'energia viene immagazzinata come pressione in un serbatoio;

¹ Si parla di sorgenti di potenza e non di energia, in quanto per spostare il veicolo è necessaria un'energia nell'unità di tempo e quindi una potenza.

- Hydraulic Hybrid Vehicles, in cui l'energia viene immagazzinata in un serbatoio grazie all'ausilio di un fluido, come l'olio.

Seppure esistano differenti fonti propulsive e quindi differenti tipologie di ibridazione, in questo lavoro ci andremo a focalizzare sull'ibridazione elettrica.

Possiamo fornire alcune definizioni che saranno utili a comprendere meglio l'argomento:

- 1) Battery Electric Vehicle (BEV): questo tipo di veicolo è il veicolo elettrico puro, il suo powertrain è costituito da un e-motor. L'energia necessaria a far funzionare il motore elettrico viene stoccata in batterie che vengono ricaricate, principalmente, da una fonte di alimentazione esterna.
- 2) Hybrid Electric Vehicle (HEV): questo tipo di veicolo è dotato sia di un motore ICE che di un e-motor. Il pack batterie presente in questo tipo di veicolo (che vedremo di seguito nel dettaglio) viene caricato o dal motore a combustione o dall'energia recuperata durante la fase di decelerazione dall'e-motor.
- 3) Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV): questo tipo di veicolo non è altro che un ibrido che può inoltre essere caricato da una fonte di alimentazione esterna, quindi si può considerare come un'unione dei due veicoli precedenti, BEV e HEV. Inoltre, questi veicoli vengono chiamati anche Range extended electrical vehicle (REEV).
- 4) Fuel Cell Electric Vehicle: tipo di veicolo in cui l'energia viene generata in una cella a combustione.

Nella trattazione che ci accingiamo a compiere, vengono volontariamente applicate alcune semplificazioni. Non faremo distinzioni sul tipo di motore ICE, diesel o benzina, se il motore è aspirato o turbocompresso oppure se il sistema ibrido è un sistema plug-in². Un veicolo ibrido è più complesso rispetto a un veicolo tradizionale e questa complessità è anche legata al powertrain, nel quale è stata aggiunta l'elettronica di potenza. Inoltre, seppure il cambio in un veicolo ibrido possa essere lo stesso usato in una vettura tradizionale, la differenza si ha nel controllo di gestione della potenza. Per spiegare meglio, possiamo fare un esempio: se il conducente richiede un incremento di coppia, in una vettura tradizionale (o puramente elettrico) la richiesta passa dal pedale dell'acceleratore (non si tiene conto dei sistemi drive by wire) al motore termico (elettrico) e mediante tutta la catena cinematica viene trasmessa alle ruote; se invece si ha un veicolo ibrido, una volta che viene richiesto l'aumento di coppia dal driver, questa richiesta deve essere filtrata e, mediante un sistema di controllo (energy management system), viene scelta quanta coppia verrà fornita dal motore termico e quanta da quello elettrico.

² Si definiscono veicoli elettrici plug-in: i veicoli che possono essere ricaricati mediante una fonte di energia esterna.

1.3 Classificazione dei veicoli Elettrici/Ibridi

Dopo la precedente disquisizione sui veicoli elettrici/ibridi, la loro classificazione può essere fatta in tre categorie principali:

- A. Grado di ibridazione;
- B. Layout del powertrain;
- C. Classificazione in funzione della posizione dell'e-motor.

1.3.1 Grado di ibridazione

La classificazione più importante che viene fatta sui veicoli ibridi è relativa al grado di ibridazione; generalmente si possono definire tre differenti gradi di ibridazione:

- 1) MICRO-HYBRID (MHD): è la più leggera forma di ibridazione, la quale permette soltanto di implementare il sistema Start & Stop (S&S). Il sistema originale viene dotato di una piccola macchina elettrica che ha la funzione di sostituire il motorino di avviamento e l'alternatore, mediante la quale il motore ICE viene spento nelle condizioni di idle e riacceso quando si deve ripartire. Quindi, in questo tipo di sistema, l'energia necessaria viene fornita dal solo motore termico e, per questo motivo, non si parla di veri e propri sistemi ibridi. Se a questo tipo di sistema viene aggiunto un cambio automatico o robotizzato, durante la fase di decelerazione essi provvedono, sotto i 12 km/h, a spegnere il motore quando l'auto non è ancora ferma (es. la SMART MHD).
- 2) MILD-HYBRID (MHEV): è la forma di ibridazione ad oggi più utilizzata. I fattori principali per cui questo tipo di architettura sta prendendo piede sono:
 - Facilità di integrazione con le architetture di attuale produzione;
 - Elevato rapporto costi/benefici.

Infatti, a differenza del MHD, le architetture MHEV sono caratterizzate da un e-motor più potente, il quale può raggiungere i 20 KW con una tensione tra 48÷160 V. Quest'ultimo permette, oltre al sistema S&S (già presente nel micro-hybrid), anche un sistema di recupero dell'energia in frenata e un boost di coppia. Questi sistemi, cooperando tra loro, generano un aumento di prestazioni e una riduzione dei consumi che varia tra l'8 e il 20% rispetto al veicolo convenzionale. I MHEV si possono dividere a loro volta in altri tre sottogruppi in funzione della posizione e dell'integrazione della macchina elettrica con il motore termico:

- a. BiSG (Belt Driven Starter & Generator): questa è la configurazione già vista, con le opportune differenze, sul micro-hybrid. Essa è la configurazione più utilizzata grazie alla semplicità di realizzazione e, conseguentemente, meno costosa, nella quale una

macchina elettrica è montata al posto dell'alternatore FEAD (Front End Accessory Drive) e collegata al motore ICE attraverso una cinghia.

- b. TiMG (Transmission-integrated Motor Generator): in questo tipo di configurazione, l'e-motor è integrato nella trasmissione. Questa tipologia ha la massima flessibilità in termini di funzioni di controllo e/o modalità di guida, essendo simile a un veicolo elettrico full hybrid.
- c. CiSG (Crankshaft-integrated Starter Generator): in questa configurazione il motore elettrico è integrato nell'albero motore, tra motore e trasmissione, e funge da motorino di avviamento.

La tensione della batteria più usata nel MHEV è di 48 V. Questo tipo di veicoli, grazie all'introduzione di un pack batterie maggiorato, hanno la possibilità di viaggiare in modalità puramente elettrica (e-mode), seppure per un range limitato (circa 2 km).

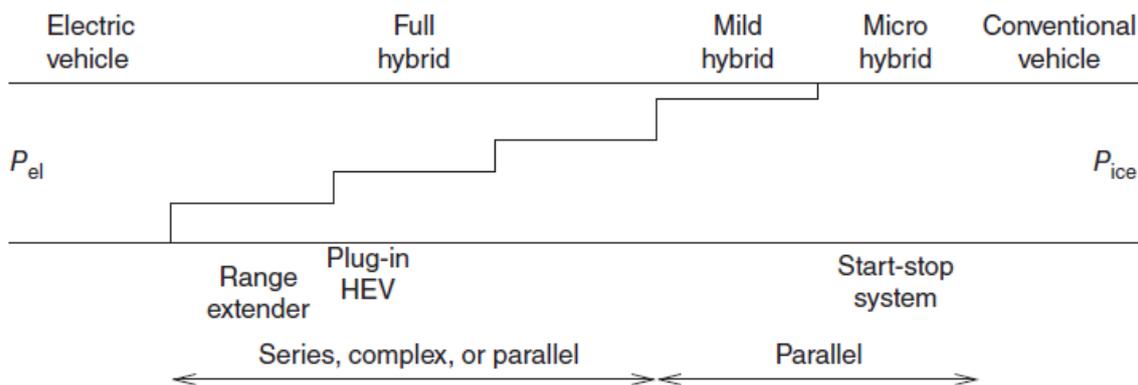


Figura 1.4-Illustrazione dei diversi tipi di veicoli ibridi [1]

- 3) FULL-HYBRID (HEV): presentano una potenza del motore elettrico maggiore di 25 KW e una tensione che può arrivare a 400 V. La differenza fondamentale rispetto alle altre tipologie di ibrido è che, avendo batterie con capacità elevate, possono compiere delle distanze maggiori ai 50 km in puro elettrico. Ovviamente, questa architettura ha come svantaggio principale il peso e il costo elevato del pack batterie, il quale si ripercuote sul prezzo finale dell'auto. Un tipo particolare di full-hybrid, è il PHEV, ossia plug-in hybrid electric vehicle, nel quale, per aumentare l'autonomia di marcia in puro elettrico, si possono caricare le batterie mediante una presa di corrente esterna. Per questo tipo di veicoli ibridi, la configurazione più utilizzata è l'interposizione del e-motor tra motore ICE e cambio. Per permettere l'integrazione tra i due sistemi nel modo più efficiente possibile, si tende ad utilizzare un cambio automatico, che può portare ad una riduzione dei consumi di circa il 40%.

Nella classificazione sopra descritta, si è tenuto conto soltanto dei veicoli ibridi, tralasciando i veicoli plug-in e i veicoli full electric; ovviamente, per quest'ultimo tipo di veicoli non si può definire un grado di ibridazione in quanto essi hanno un'unica fonte di alimentazione. Di seguito è riportata una tabella riassuntiva con le caratteristiche principali dei vari veicoli.

Tabella 1.1-Riassunto caratteristiche veicoli ibridi

Topology	MHD	MHEV			HEV	PHEV	EV
	Regular starter	BiSG	TiMG	CiSG	Powersplit	Powersplit / Parallel	Direct Drive
Electric power [kW]	2-4	10-15	< 21	15-20	25-60	40-100	> 60
Operating voltage [V]	12	48	48	< 160	150-350	< 400	< 450
Cold engine cranking	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Idle Stop & Start	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Moving Stop & Start	Optional	Optional	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Engine load shift	Optional	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Torque assist (fill)	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Torque boost	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Sailing / Coasting	No	Optional	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Energy recuperation	Optional	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Brake regeneration	No	Optional	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Electric driving / creep	No	No	Optional	No	Yes	Yes	Yes
External charging	No	No	No	No	No	Yes	Yes

Come si può immaginare, un fattore importante per definire il grado di ibridazione è il costo di conversione di un veicolo tradizionale in un veicolo ibrido. Infatti, più si aumenta il grado di ibridazione più aumentano i costi. Tali costi non dipendono soltanto dall'aggiunta di componenti elettrici, ma anche dal costo di integrazione di quest'ultimi con i vari sistemi carry over delle vetture originali (es. Fuel system, brake system, ecc.). Un parametro che può far variare il livello di ibridazione, è sicuramente il tipo di segmento del veicolo. Infatti, generalmente le vetture dei segmenti A e B, presentano un grado di ibridazione inferiore alle loro sorelle maggiori appartenenti ai segmenti C, D ed E. Il grado di ibridazione è definito come il rapporto tra la potenza nominale del motore elettrico e la potenza nominale dei sistemi di trazione:

$$\text{Fattore di ibridazione} = \frac{P_{ele}}{P_{ice} + P_{ele}} \quad (1.1)$$

Il grado di ibridazione è un valore compreso tra 0 e 1; i vari tipi di ibridi si trovano tra questi due estremi.

1.3.2 Layout del powertrain

Analizzando la Figura 1.4, si passa dal veicolo tradizionale (a destra), in cui vi è solo la potenza relativa al motore ICE, al veicolo completamente elettrico (a sinistra), in cui tutta la potenza motrice è generata dal solo motore elettrico. Nel mezzo, oltre ai differenti gradi di ibridazione sopracitati, è descritto anche in che modo i due sistemi cooperano. E' proprio grazie al tipo di interazione dei due

sistemi che si può andare a definire il secondo tipo di classificazione per i sistemi ibridi, ossia i differenti tipi di layout del powertrain:

- Ibrido Serie;
- Ibrido Parallelo;
- Ibrido complesso;
- Power-split powertrain.

1.3.2.1 Ibrido Serie

In Figura 1.5 è rappresentata l'architettura standard di un ibrido serie, nel quale si vede che l'energia prodotta nel motore termico non viene direttamente impiegata per muovere il veicolo ma, mediante un generatore, viene stoccata nel pack batterie. In questo tipo di veicoli soltanto la macchina elettrica è collegata meccanicamente alle ruote ed è, quindi, soltanto lei a poter trasmettere potenza al suolo. L'energia prodotta dal motore ICE attraverso un generatore viene convertita in potenza elettrica, la quale viene stoccata nelle batterie e, su richiesta del e-motor, viene prelevata per permettere il movimento del veicolo. Nella Tabella 1.2 sono riportate le principali modalità operative di un veicolo serie.

Tabella 1.2-Modalità operativa di un veicolo serie

Modalità	Flussi
Accelerazione/salita	Durante questa fase l'energia viene fornita dal motore termico e dalle batterie
Standard	La macchina elettrica viene alimentata dal motore a combustione, che lavora in condizioni di alto rendimento
Ricarica della batteria	Il motore a combustione ha potenza in esubero, che viene utilizzata per alimentare la macchina elettrica e quindi ricaricare le batterie
Decelerazione	Può essere vista come un sottogruppo della fase di ricarica della batteria, in quanto il motore elettrico è trascinato dalle ruote e, quindi, funge da generatore e ricarica il pack batterie

Questa soluzione permette di avere sia vantaggi che svantaggi. I vantaggi sono:

- Non sono più presenti problemi di autonomia;
- La dimensione del motore termico si riduce (down-sized), in quanto ora esso non ha funzione di trazione;

- Aumentare l'efficienza del motore, il quale lavora in un intervallo di giri più prossimo al punto di massimo rendimento;
- La posizione del motore ICE, svincolata dalle ruote, permette il posizionamento ottimale all'interno del veicolo;
- Può non essere presente un differenziale, ma, affinché la coppia venga ripartita su entrambe le ruote, si possono usare due motori elettrici ognuno dei quali pilota il moto di una ruota.

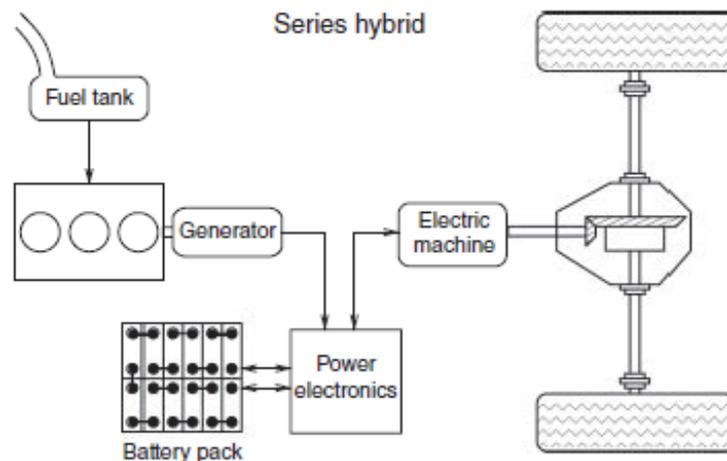


Figura 1.5-Schema ibrido serie [1]

Gli svantaggi sono:

- La maggiorazione del pacco batteria, con il conseguente aumento di peso;
- Il costo e il peso del veicolo aumentano a causa della presenza dei componenti elettrici;
- Tre conversioni di energia, con i loro relativi rendimenti (chimica-meccanica, meccanica-elettrica, elettrica-meccanica);
- Problemi di NVH dovuti alla necessità di far lavorare il motore sempre nello stesso punto, anche con veicolo fermo.

Da quanto detto, si può capire come l'architettura ibrida serie, a causa delle sue dimensioni, è poco utilizzata sulle macchine tradizionali. A oggi, sul mercato EMEA, è presente la sola BMW I3 RE con questo tipo di architettura, mentre è di largo uso in veicoli adibiti al trasporto pubblico, sia per la maggior dimensione di quest'ultimi, sia per i continui periodi di start and stop che vengono sfruttati al meglio dai sistemi serie. La soluzione in serie è solitamente utilizzata al fine di ridurre i consumi ed è tipica dei sistemi ibridi plug-in [3].

1.3.2.2 Ibrido Parallelo

Un ibrido parallelo è un veicolo dotato di due powertrain connessi meccanicamente tra di loro (Figura 1.6). Mediante questo tipo di configurazione entrambi i PWT sono connessi all'albero di trasmissione

e quindi possono fornire, in maniera indipendente e/o combinata, la potenza alle ruote necessaria per muovere il veicolo. Affinché si possano sommare le coppie e le potenze, a differenza di quanto avveniva nei PWT serie, si ha bisogno di un cambio di velocità e di una o più frizioni. In queste architetture il motore elettrico non viene usato per sostituire il motore ICE, ma piuttosto per compensarne le mancanze, come lo spunto a basso regime o il recupero dell'energia cinetica in frenata. Come si è potuto capire da quanto precedentemente detto, la caratteristica più importante per questo tipo di architetture è la possibilità, a seconda delle richieste, di muoversi solo in elettrico o solo in termico oppure in maniera combinata.

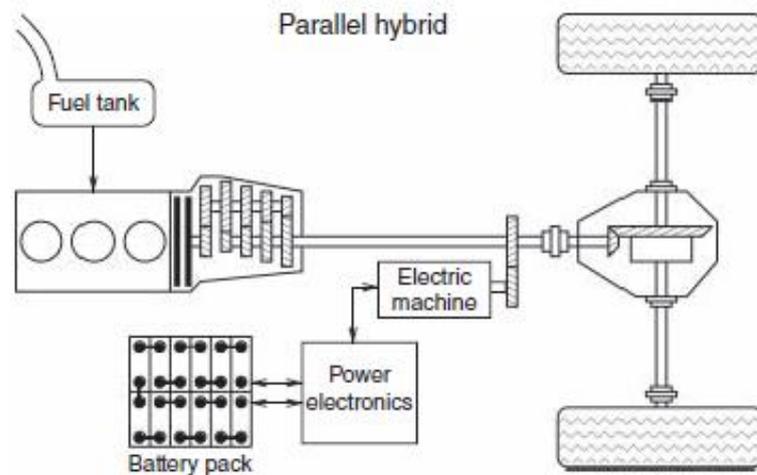


Figura 1.6-Schema ibrido parallelo [1]

In funzione del punto di collegamento meccanico tra i due powertrain si possono avere 3 possibili layout di ibrido parallelo:

- a) SINGLE SHAFT: in questa tipologia di ibrido si ha la trazione solo su un'asse del veicolo, il collegamento meccanico avviene a livello dei motori (es. tramite un giro cinghia). In Figura 1.7 possiamo vedere un single shaft schematizzato e si può notare che si ha solo una trasmissione.

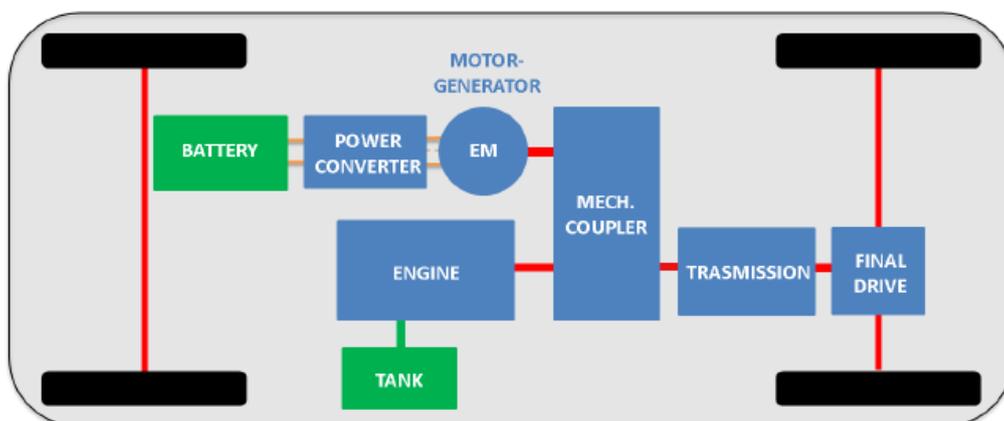


Figura 1.7-Schema veicolo ibrido parallelo single shaft [63]

- b) DOUBLE SHAFT: anche questo layout, come il precedente, agisce su un solo asse vettura. Come si vede dalla Figura 1.8, è presente una trasmissione dedicata ad ogni powertrain e il collegamento meccanico tra le due fonti di potenza si ha a valle delle singole trasmissioni. Questa soluzione, seppur più costosa, aumenta l'efficienza complessiva del sistema.
- c) DOUBLE DRIVE: in questo tipo di layout ibrido, si può avere la trazione su entrambi gli assi della vettura, generando così un veicolo con quattro ruote motrici (AWD). La macchina elettrica che viene introdotta ha un doppio fine, fornire energia necessaria alla trazione o assorbire l'energia in fase di decelerazione per ricaricare le batterie. In questa configurazione l'accoppiamento meccanico avviene mediante la strada, per questo motivo prende anche il nome di Through The Road (TTR).

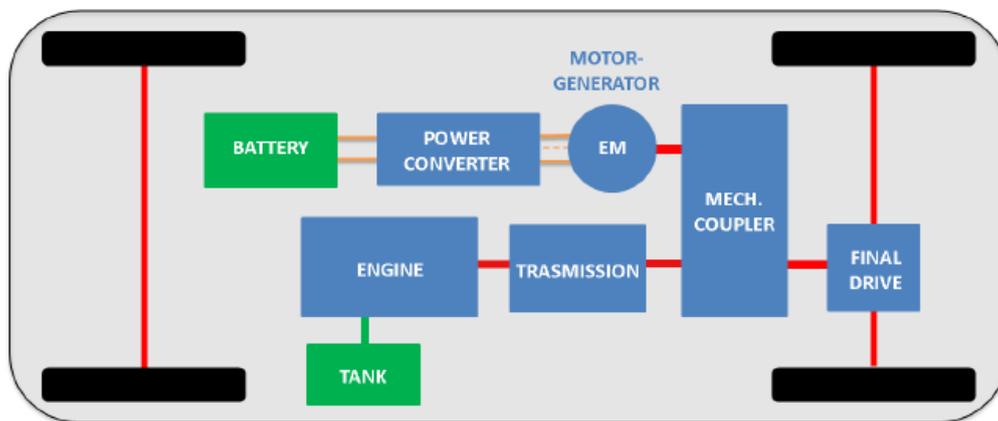


Figura 1.8-Schema veicolo ibrido parallelo double shaft [63]

In Tabella 1.3 si rappresentano le principali modalità operative di un veicolo parallelo.

Tabella 1.3-Modalità operative di un veicolo parallelo

Modalità	Flussi
Accelerazione/salita	Durante questa fase l'energia viene fornita dal motore termico e dal motore elettrico. L'ICE in questo caso viene utilizzato, a differenza dell'architettura serie, nell'OOL (optimum operation line).
Modalità puramente termica	L'energia necessaria per la propulsione viene generata solo dal motore termico, ed in questo caso il veicolo ibrido si può considerare come se fosse un veicolo tradizionale.

Modalità puramente elettrica	L'energia necessaria per la propulsione viene fornita solo dall'e-motor, ed in questo caso il veicolo ibrido si può considerare come se fosse un veicolo ZEV (zero emission vehicle).
Modalità ibrida	L'energia necessaria per la propulsione viene fornita da entrambi i motori, ovviamente se la richiesta di potenza lo consente, il motore ICE viene fatto lavorare in condizioni di massima efficienza.
Decelerazione	Durante la fase di decelerazione, il motore elettrico funge da generatore convertendo una parte dell'energia cinetica, che si genera durante la frenata, in energia da stoccare nelle batterie. In questa fase il motore elettrico può essere spento.

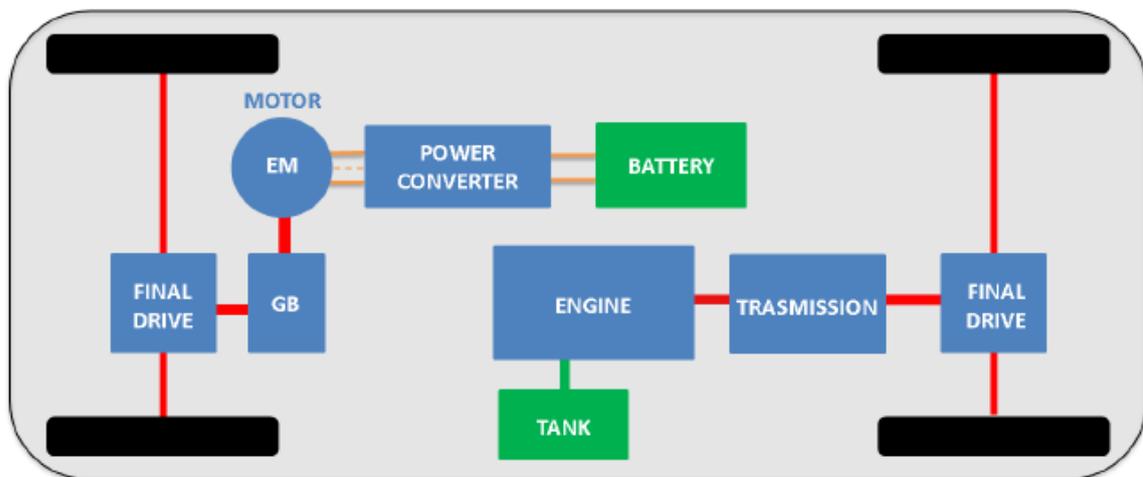


Figura 1.9-Schema veicolo ibrido double drive (Through The Road o TTR) [63]

Anche in questo caso si hanno vantaggi e svantaggi. I vantaggi sono:

- Grazie alla presenza dell'e-motor, a parità di prestazione, è permessa l'installazione di un motore ICE più piccolo (down-sized);
- L'energia prodotta dal motore termico viene immediatamente utilizzata per permettere il movimento del veicolo e quindi non si hanno delle conversioni di energia con le relative perdite che ne conseguono.
- Maggiore flessibilità nella fonte di potenza che genera il moto;

- Pack batterie più ridotte che, seppur diminuiscono la capacità, diminuiscono anche il peso ed il costo finale del veicolo.
- L'utilizzo di frizioni elettromagnetiche o di rotismi epicicloidali permette un'elevata flessibilità di accoppiamento tra i due motori: tali dispositivi infatti integrano meccanicamente i due motori permettendo loro, se necessario, di non essere vincolati alla velocità di rotazione delle ruote del veicolo[4].

Gli svantaggi sono:

- Maggiore complessità del sistema e del sistema di gestione dell'energia;
- Riduzione dell'efficienza del motore ICE in quanto il suo punto di lavoro varia con le richieste dell'utilizzatore e quindi non lavora più in condizioni di ottimo.

1.3.2.3 Ibrido Serie-Parallelo

L'architettura serie-parallelo offre i vantaggi di entrambe le configurazioni (serie e parallelo) con un aumento della complessità e dei costi del gruppo propulsore. Questo layout è composto da un motore a combustione e da due macchine elettriche, quindi, come si può vedere dalla Figura 1.10, si riesce ad effettuare un doppio accoppiamento di potenze. Il primo, è effettuato dalla trasmissione per quel che riguarda la potenza meccanica e il secondo è effettuato dall'inverter per quel che riguarda la potenza elettrica. Nella tabella 1.4 sono riassunte le modalità di funzionamento:

Tabella 1.4-Modalità operative di un veicolo serie-parallelo

Modalità di funzionamento	Flussi
Elettrico puro	La propulsione avviene tramite il solo motore elettrico EM2.
Termico	La propulsione avviene tramite il solo motore termico.
Ibrido serie	La trazione avviene grazie al solo motore elettrico EM2, mentre il motore ICE e l'energia prodotta da esso viene convertita dal generatore EM1 in energia elettrica utilizzata per ricaricare le batterie.
Ibrido parallelo	La trazione avviene con l'ausilio di entrambe le potenze che si sommano nella trasmissione. Sia il motore ICE che le due macchine elettriche sono in funzione, infatti una parte della potenza generata dal motore a combustione va alla trasmissione e una parte va al generatore che utilizza tale potenza per ricaricare le batterie.

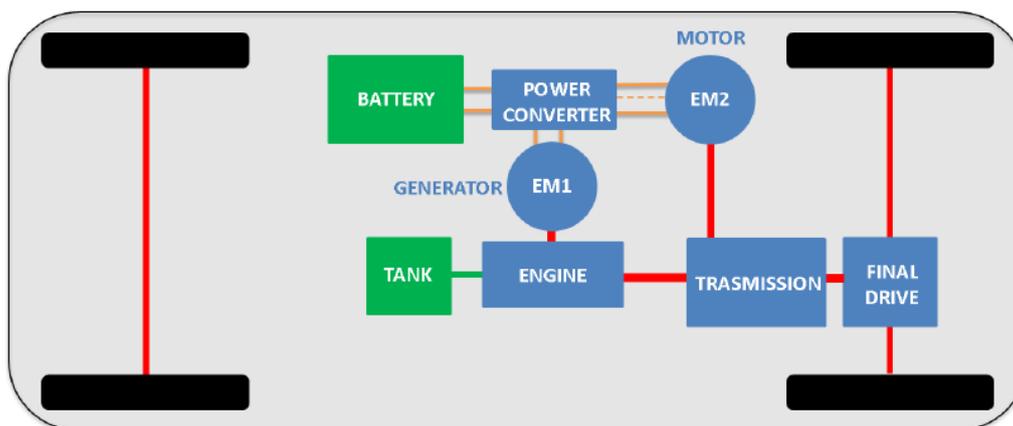


Figura 1.10-Schema di un veicolo ibrido Serie-Parallelo [63]

1.3.2.4 Ibrido complesso

Gli ibridi complessi sono caratterizzati da un layout simile a quelli di tipo serie-parallelo (Figura 1.11); in quest'ultimo caso viene aggiunta una macchina elettrica (EM1 e dell'inverter dedicato) che può fungere da motore e da generatore (nell'ibrido serie-parallelo fungeva solo da motore). Il vantaggio della nuova configurazione è che questo motore può fornire energia per la trazione. Nella tabella 1.5 sono riassunte le modalità di funzionamento:

Tabella 1.5-Modalità operative di un veicolo ibrido complesso.

Modalità di funzionamento	Flussi
Elettrico puro	La propulsione avviene tramite entrambi i motori elettrici (EM1 ed EM2), non per forza in contemporanea.
Termico	La propulsione avviene tramite il solo motore termico.
Ibrido serie	La trazione avviene grazie al solo motore elettrico EM2, mentre il motore ICE e l'energia prodotta da esso viene convertita dal generatore EM1 in energia elettrica utilizzata per ricaricare le batterie.
Ibrido parallelo	La trazione avviene con l'ausilio di entrambe le potenze che si sommano nella trasmissione. Sia il motore ICE che le due macchine elettriche sono in funzione.

Un esempio concreto di ibrido complesso è il sistema sviluppato da Toyota denominato Power-split, del quale in Figura 1.11 è presente uno schema.

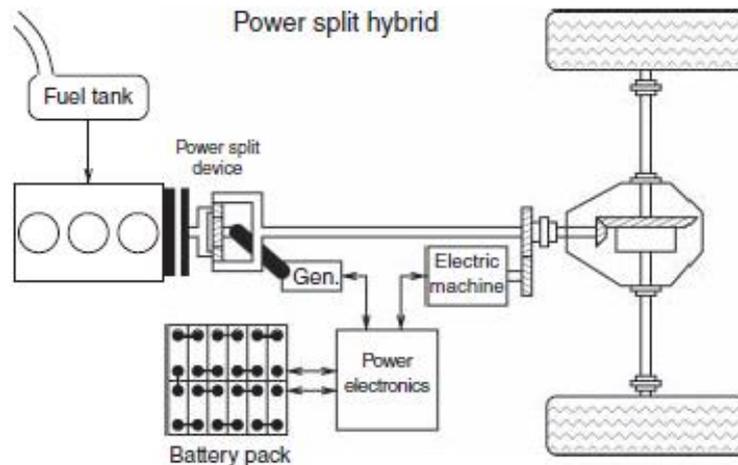


Figura 1.11-Schema ibrido complesso, power-split [1]

Di questo tipo di architettura, ne verrà discusso approfonditamente nel capitolo relativo alle trasmissioni (3.4.6.3). Per ora si può anticipare che per effettuare la ripartizione della potenza, tra il motore ICE ed il motore elettrico, si utilizza un rotismo epicicloidale e un riduttore planetario denominato power split device.

1.3.3 Classificazione di un veicolo ibrido in funzione della posizione dell'e-motor

L'ultima classificazione di cui andiamo a parlare per i veicoli ibridi è quella relativa alla posizione dell'e-motor nell'architettura del veicolo.

Come si può vedere dalla Figura 1.12, in funzione della posizione della macchina elettrica rispetto al motore a combustione, si possono avere differenti configurazioni di ibrido. Tuttavia, bisogna notare che queste configurazioni possono essere considerate solo per un ibrido parallelo, in quanto, come abbiamo spiegato prima, esso combina i due sistemi di trazione accoppiati sullo stesso asse a livello dell'albero motore o su assi diversi attraverso la strada.

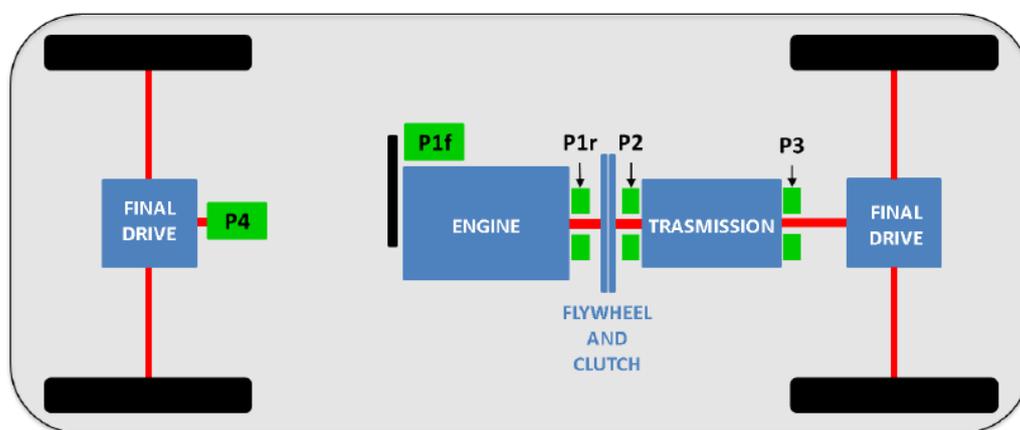


Figura 1.12-Classificazione dei veicoli ibridi in base alla posizione della macchina elettrica [63]

1.3.3.1 P1F o P0

Nel layout P1F (Figura 1.14), anche chiamato P0, una macchina elettrica è montata al posto dell'alternatore e collegata all'albero motore ICE attraverso una cinghia. Questo tipo di layout viene chiamato anche FEAD (front end accessory drive) o BiSG (Belt driven Starter & generator).



Figura 1.13-Esempio di installazione P1F

Seppur l'esiguo spazio lasciato dall'alternatore vada a limitare le dimensioni della macchina elettrica utilizzabile e, conseguentemente, la sua coppia e la sua potenza, questa configurazione può portare dei sensibili vantaggi per quel che riguarda i consumi e conseguentemente le emissioni. Questa è la configurazione più utilizzata grazie alla semplicità di realizzazione e al costo contenuto. La modalità di guida in puro elettrico è teoricamente possibile ma l'e-motor dovrebbe trascinare il motore a combustione con conseguenti perdite, rumore e vibrazioni; per questi motivi non viene generalmente effettuata. Nella Tabella 1.6 sono visibili una serie di caratteristiche dei sistemi P1F, mentre di seguito viene rappresentato un esempio reale di sistema P0.

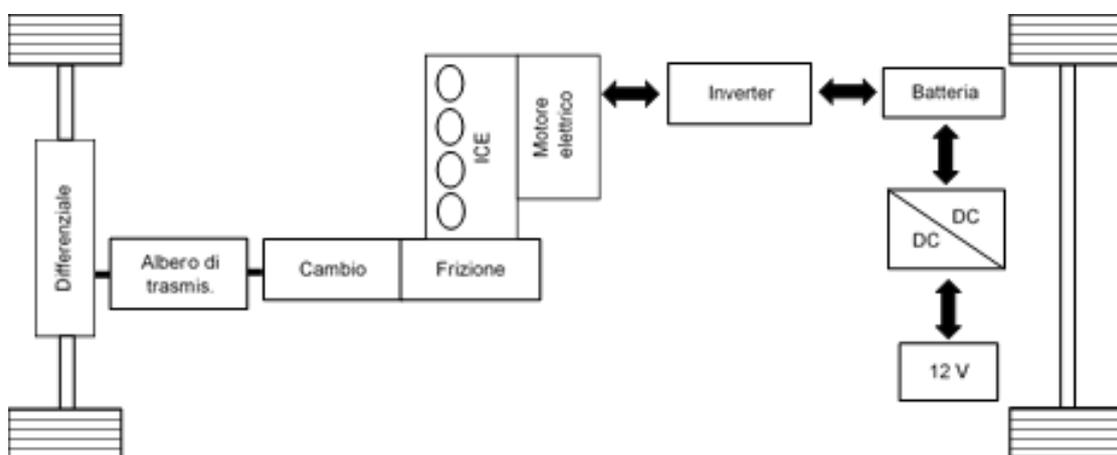


Figura 13-Architettura P1F

Tabella 1.6-Caratteristiche principali P1F

Ibrido parallelo P1f	
L'e-motor calettato sul FEAD sostituisce l'alternatore	
DC bus [48V]	Micro hybrid
DC bus [HV]	Non si considera un ibrido
Energia della batteria [KWh]	Fino a 0,5
Batteria a 12 V [Ah]	<10 Ah
Batteria a 48 V [Ah]	<30 Ah
Tipo di motore elettrico	Motore a corrente continua
Potenza motore elettrico [KW]	3-15
EV mode	Non raccomandata
Riduzione di CO2 in NEDC [%]	6-10

1.3.3.2. P1R

Nel layout P1R, chiamato comunemente P1, l'e-motor è connesso coassialmente all'albero motore e non vi è la possibilità di disaccoppiare i due motori, in quanto la frizione è montata a valle di essi. In questo modo si riesce ad avere un'integrazione ottimale con l'ICE, perché il suo rotore sostituisce il volano riducendo gli spazi assiali. Uno dei principali vantaggi di questa soluzione è che il motore elettrico può fornire una coppia maggiore rispetto al BiSG, poiché non vi è alcuna limitazione della cinghia (dovuta allo slittamento).

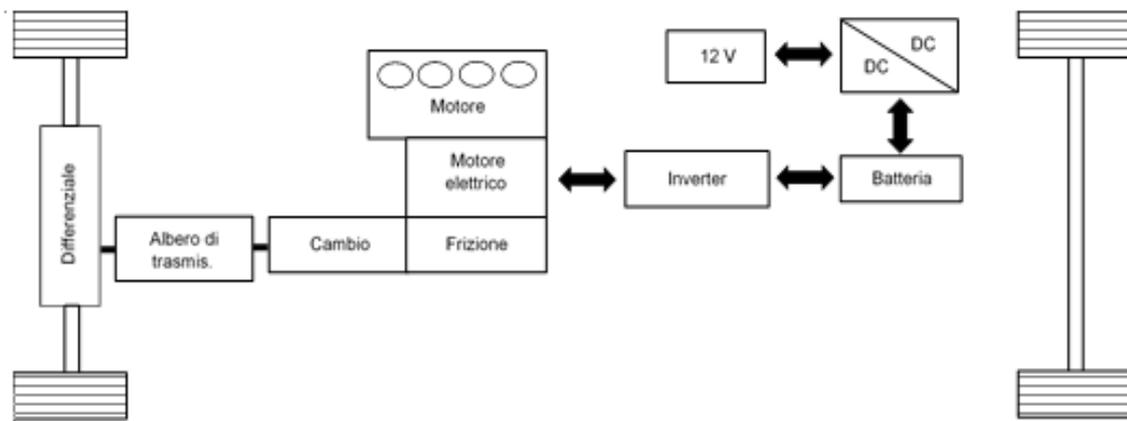


Figura 1.14-Architettura P1R

Tuttavia, a causa di questo tipo di configurazione, durante la frenata rigenerativa, il motore elettrico è costantemente collegato al motore ICE riducendo così l'energia recuperata a causa dell'attrito e delle perdite per pompaggio. Nella Tabella 1.7, vengono rappresentate le caratteristiche principali dell'architettura P1R.

Tabella 1.7-Caratteristiche principali P1R

Ibrido parallelo P1r
L'e-motor è collegato tra il motore termico e la trasmissione

DC bus [48V]	Mild hybrid
DC bus [HV]	Full hybrid
Energia della batteria [Kwh]	Fino a 1,5
EV mode	1-2 km possibili

1.3.3.3. P2

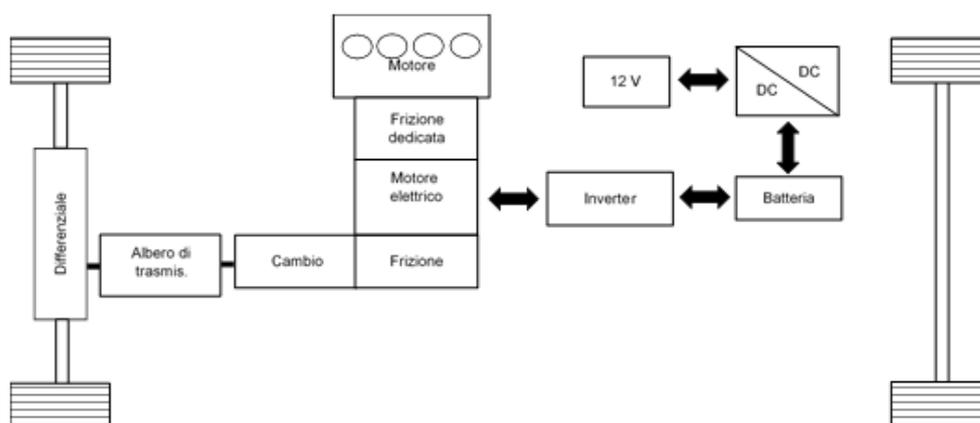


Figura 1.15-Layout veicolo ibrido P2

Nel layout P2 (Figura 1.16), a differenza di quello che avveniva nel P1F, l'e-motor viene installato tra motore ICE e frizione. In questo caso, è stata aggiunta una frizione tra i due motori che permette di ottenere un enorme vantaggio.

Tabella 1.8-Caratteristiche principali P2

Ibrido parallelo P2	
L'e-motor è collegato tra il motore termico e la trasmissione con l'aggiunta di una frizione.	
DC bus [48V]	Mild hybrid
DC bus [HV]	Full hybrid
Energia della batteria [KWh]	Fino a 1,5
Tipo di motore elettrico	Motore a corrente continua
Potenza motore elettrico [KW]	<20
EV mode	1-2 km possibili
Riduzione di CO2 in NEDC [%]	<20

Infatti, durante la frenata rigenerativa, la frizione aggiuntiva offre la possibilità di scollegare il motore a combustione dalla trasmissione, evitando le perdite dovute al trascinarsi. Inoltre, durante la modalità esclusivamente elettrica, la frizione disinnestata consente di mantenere il motore ICE spento e scollegato dalla trasmissione, permettendo così la modalità di funzionamento in puro elettrico. Le applicazioni P2 possono essere di due tipi:

- a) L'e-motor collegato in maniera non coassiale al motore ICE;
- b) L'e-motor collegato in maniera coassiale al motore ICE.

Nella Tabella 1.8 sono rappresentate le caratteristiche principali di un veicolo ibrido P2. Un'evoluzione dell'ibrido P2 è la versione plug-in, rappresentata nella figura seguente:

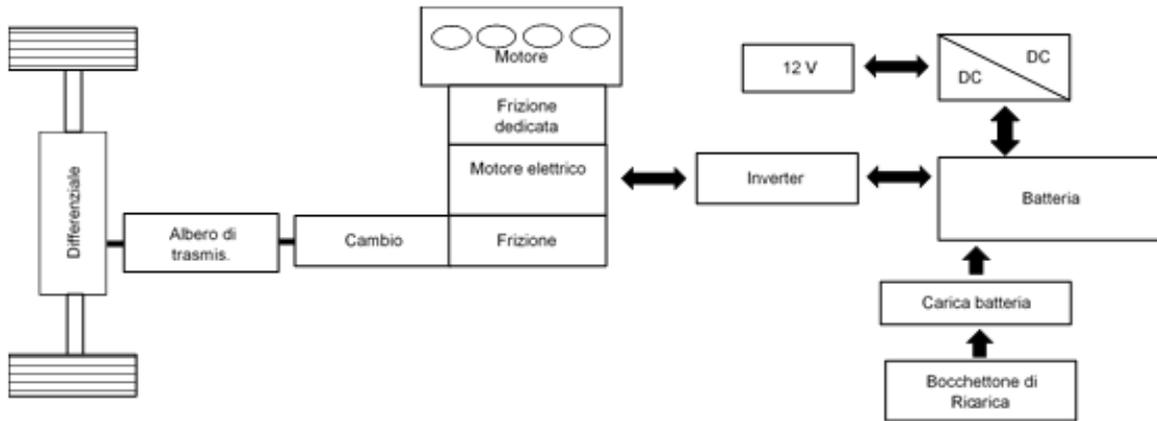


Figura 1.16-Layout veicolo ibrido P2 plug-in

La peculiarità di questo tipo di ibrido è che può essere ricaricato mediante una presa elettrica. La batteria, come si può vedere dalla Figura 1.17, è di dimensioni maggiore del veicolo P2 rappresentato nella figura 1.16 (non plug-in), in quanto essa è dimensionata in modo tale da fornire al veicolo un range di percorrenza in puro elettrico dell'ordine dei 25-50 km. Per far ciò anche il motore elettrico è di dimensioni maggiori, per permettere al veicolo di muoversi agevolmente in tutte le condizioni di utilizzo.

1.3.3.4. P3

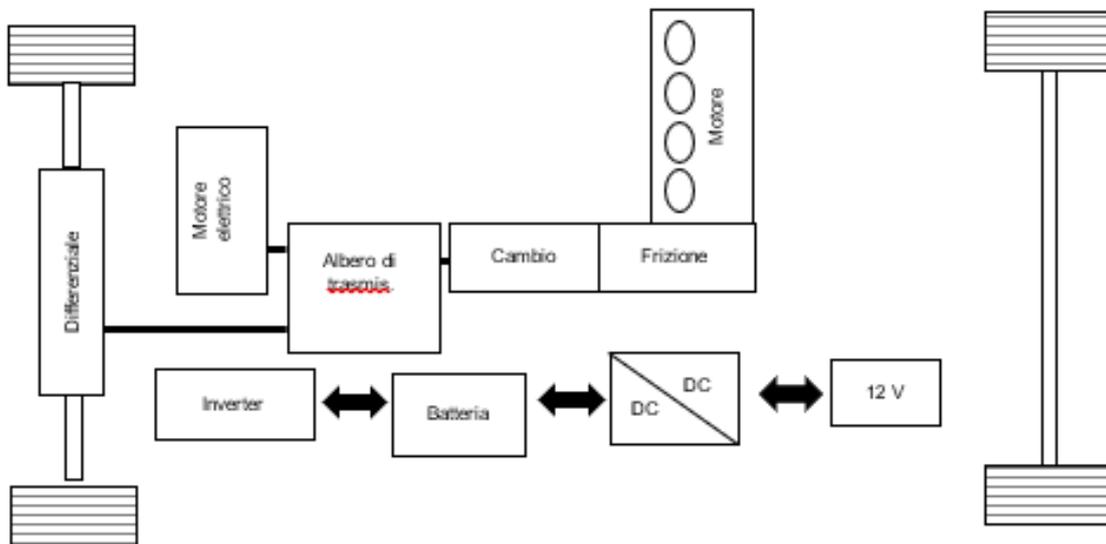


Figura 1.17-Layout veicolo ibrido P3

Nel layout P3, il motore elettrico è posizionato a valle della trasmissione, così facendo si riesce ad avere una massimizzazione della frenata rigenerativa, poiché tra le ruote e la macchina elettrica è presente il solo differenziale. Un altro vantaggio di questa configurazione, oltre all'aumento di coppia, è l'opportunità di scegliere separatamente la velocità dei due motori. Nella Tabella 1.9 sono rappresentate le caratteristiche principali di un veicolo ibrido P3.

Tabella 1.9-Caratteristiche principali layout P3

Ibrido parallelo P3	
L'e-motor è collegato a valle della trasmissione	
DC bus [48 V]	Mild hybrid
DC bus [HV]	Full hybrid
Energia della batteria [Kwh]	Fino a 2
EV mode	1-2 km possibili

1.3.3.5. P4

Nell'architettura P4, il solo motore elettrico contribuisce alla trazione del veicolo. Questo tipo di veicolo prende il nome di BEV (battery electric vehicle). Si possono avere sia delle automobili FWD, RWD o AWD in funzione della posizione dei motori e del loro numero. Nella Tabella 1.10 vengono riportate alcune caratteristiche di un veicolo full electric P4 FWD.

Tabella 1.10-Caratteristiche principali veicolo BEV P4

Veicolo elettrico BEV P4 FWD	
Pure electric vehicle or Battery electric vehicle	
DC bus [HV]	Full electric (400 V)
Energia della batteria [kWh]	22÷45, l'autonomia del veicolo e dal segmento
Tipo di motore elettrico	Motore a corrente continua
Potenza motore elettrico [kW]	118÷125
EV mode	Unica modalità possibile
Riduzione di CO2 in NEDC [%]	100

Partendo dall'architettura P4, vi è un particolare tipo di veicolo che si può definire a trazione ibrida, il REEV³ (range extended electric vehicle); in questo tipo di veicolo, l'energia necessaria per muovere il motore elettrico viene generata da un motore ICE, come si può vedere in Figura 1.18. Questo tipo di architettura è poco utilizzata, soprattutto a causa della sua particolare configurazione; l'autoveicolo non viene considerato una macchina ibrida/elettrica dal legislatore, andando così a perdere gli sgravi

³ L'unico esempio di ibrido serie proposto come variante range extender di una elettrica pura oggi disponibile sul mercato italiano è la BMW i3. Come la versione elettrica pura, ha un potente motore elettrico da 125 kW e una batteria da 27 kWh che assicura 170 km di autonomia, ma aggiunge un bicilindrico termico a benzina da 647 cc e 28 kW con un serbatoio da 9 litri a cui spetta il compito di generare abbastanza energia da portare l'autonomia complessiva a 300 km.

fiscali vantaggiosi per l'utente finale. Partendo dalle differenti configurazioni precedentemente enunciate, si possono ottenere differenti tipi di ibridi, i quali hanno sempre dei vantaggi e degli svantaggi.

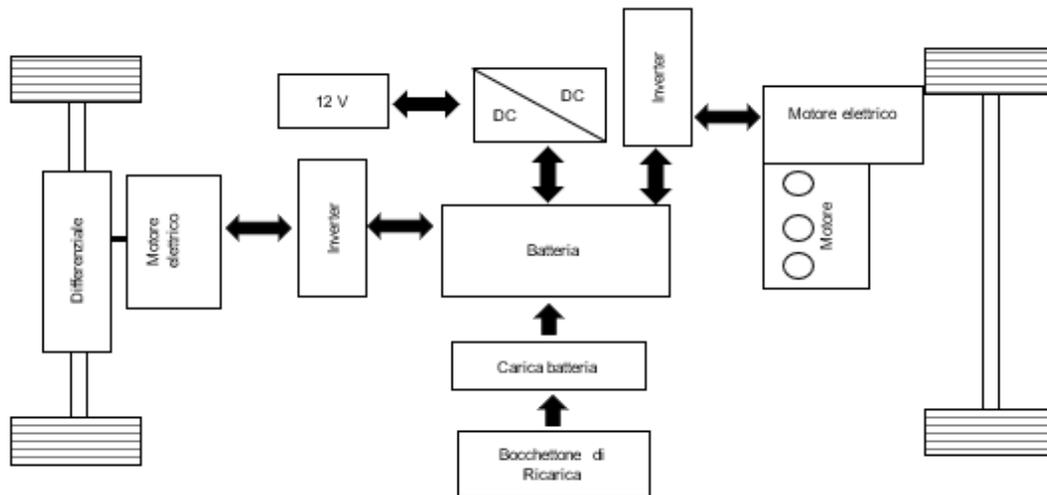


Figura 1.18-Layout veicolo REEV

Visto che questo non è l'argomento principale del lavoro di tesi, si enuncia di seguito solo un altro tipo di configurazione il P1f+P4.

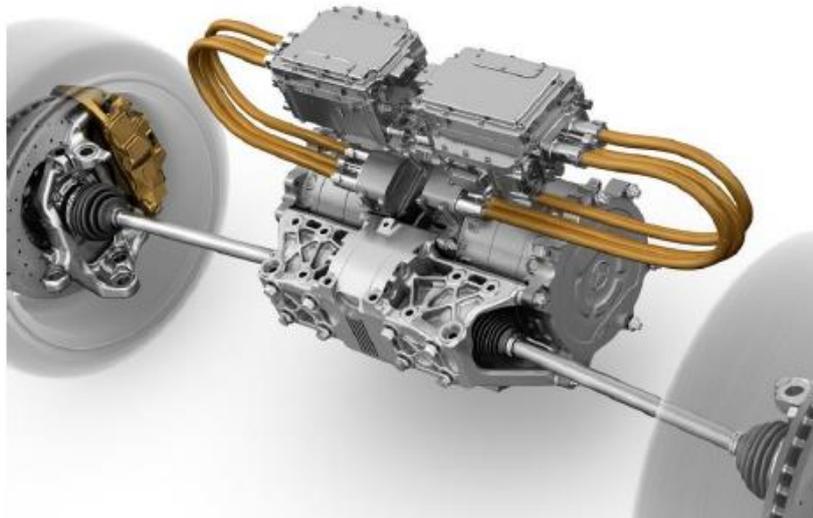


Figura 1.19-Esempio di installazione P4

I motori posizionati in configurazione P4 possono anche essere connessi in maniera indipendente direttamente alle ruote. Tale architettura possiede l'importante vantaggio di permettere un controllo indipendente della coppia su ciascuna ruota con notevoli benefici in termini di tenuta di strada e maneggevolezza, potendo implementare sofisticate tecniche di controllo del veicolo (TorqueVectoring).

1.3.3.5. P1F+P4

In questo tipo di layout, si va ad aggiungere un motore elettrico sull'asse secondario, ossia dove il motore a combustione non fornisce trazione, esso è collegato alle ruote tramite un differenziale elettrico dedicato. Così facendo si riesce ad avere un veicolo che in determinate circostanze può essere considerato un e-AWD e, grazie all'ausilio del motore elettrico, si riesce sia a recuperare l'energia in frenata sia a far funzionare il motore ICE in condizioni di alta efficienza.

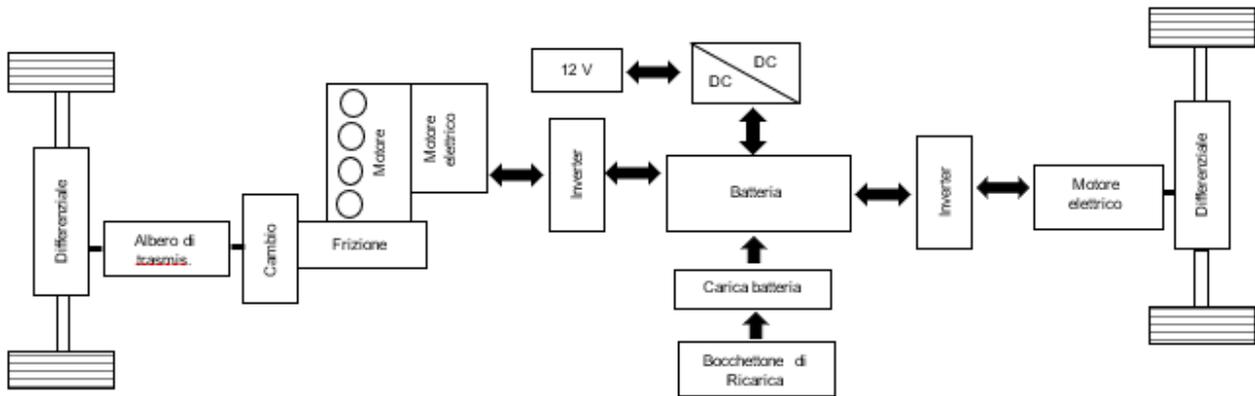


Figura 1.20-Layout veicolo ibrido P1F+P4

Nella Tabella 1.11 sono rappresentate le caratteristiche principali di un'architettura P1F+P4.

Tabella 1.11-Caratteristiche principali veicolo P1F+P4

Ibrido complesso PHEV -P1f+P4	
1 motore elettrico collegato su FEAD (P1F)	
1 motore elettrico sul secondo asse (P4)	
DC bus [HV]	Voltaggio nominale 350 V
Energia della batteria [kWh]	8-16
Tipo di motore elettrico	Motore a corrente continua
Potenza motore elettrico [kW]	60 in continuo e 100 di picco per 10-20 s
EV mode	Circa 50 km in NEDC
Riduzione di CO2 in NEDC [%]	73÷75

1.4 Interazione tra motore ICE e motore elettrico

La combinazione del motore a combustione interna e del motore elettrico offre una migliore autonomia e una migliore fruibilità rispetto a un veicolo con solo trazione elettrica. Come si vede dalla Figura 1.22, la capacità del motore elettrico di raggiungere la coppia massima a bassi regimi offre la possibilità di un'interessante interazione con i motori a combustione interna. All'aumentare della velocità, le prestazioni aumentano in modo approssimativamente lineare fino a raggiungere un valore di picco, nel quale si raggiungono le massime prestazioni. Oltre questa velocità angolare, la coppia elettromotrice diminuisce, seguendo un andamento iperbolico. Tuttavia, in contrapposizione, nello stesso range di velocità, la coppia e le curve di prestazione del motore a combustione

raggiungono tipicamente i loro valori più alti. Da quanto detto, è ovvio che si possono ottenere delle condizioni operative molto vantaggiose, facendo operare in maniera combinata il motore elettrico con il motore ICE.

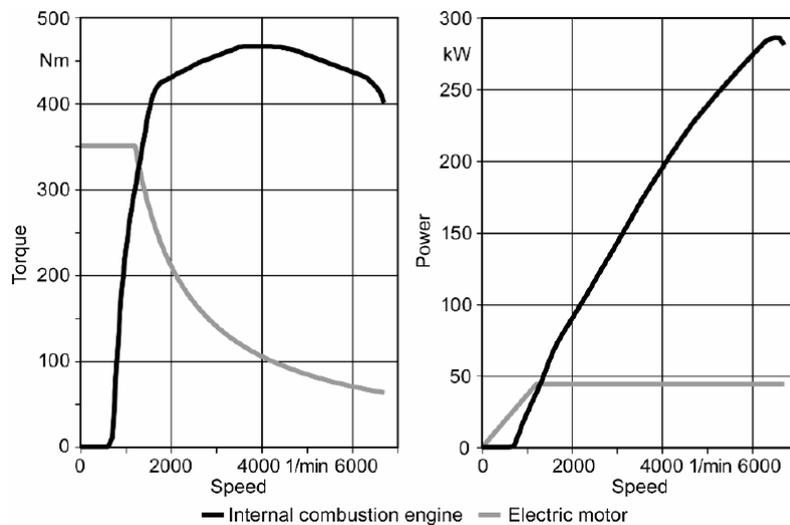


Figura 1.21-Confronto tra le caratteristiche principali di un motore ICE ed uno elettrico [13]

I vantaggi di una motorizzazione ibrida si possono riassumere come:

- Riduzione temporanea di rumore dentro e fuori dal cockpit;
- Valori di emissioni di inquinanti pari a 0 (effettuando un'analisi tank to wheels-TTW);
- Utilizzo della sola trazione ibrida, sia nelle partenze che nelle manovre;
- Recupero parziale dell'energia cinetica durante le fasi di decelerazione;
- Supporto dell'aumento della richiesta di coppia del motore ICE (boosting);
- Movimento del veicolo con il motore a combustione spento, ove possibile (coasting);
- Avvio/arresto del motore ICE quando si è in coda con il veicolo (S&S);
- Alimentazione del sistema di potenza del veicolo mediante il funzionamento da generatore del motore elettrico (eliminazione dell'alternatore).

Queste condizioni sono vantaggiose non solo per la riduzione dei consumi e delle emissioni, ma anche per il rispetto di altri criteri, come la dinamica di guida e il comfort. Ovviamente, i veicoli ibridi presentano anche degli svantaggi, soprattutto in termini di peso, rispetto ai veicoli tradizionali, poiché oltre alla seconda trazione richiedono anche un secondo sistema di accumulo dell'energia. Nei veicoli elettrici/ibridi il motore, che viene solitamente utilizzato per la propulsore, è il motore trifase a corrente alternata che ha come vantaggio principale di avere un'elevata densità di potenza in funzione del peso e dei requisiti di spazio richiesti per l'installazione. Vengono utilizzati fondamentalmente due diverse tipologie di motori a corrente alternata trifase:

- a) Motori asincroni (ASM);
- b) Motori sincroni a magneti permanenti (PSM).

Oltre a queste tipologie, in alcuni casi, vengono usati dei motori elettrici speciali:

- c) Motori a flusso trasversale a magneti permanenti (TFM);
- d) Motori a riluttanza commutata (SRM).

In quanto macchine di trazione ad alte prestazioni, i motori a corrente continua sono ancora in uso nei veicoli attuali.

1.5 Posizione del powertrain all'interno del veicolo

La posizione dei componenti del gruppo propulsore all'interno del veicolo può influenzare diversi parametri quali:

- Lo spazio disponibile per il propulsore e la disposizione all'interno del veicolo;
- La distribuzione dei pesi, dal momento che i componenti del gruppo propulsore sono relativamente pesanti;
- La struttura che supporta il powertrain e reagisce contro le coppie motrici;
- La manovrabilità del veicolo;
- La sicurezza e la protezione dei passeggeri durante un crash.

Bisogna considerare inoltre che vi sono differenti layout possibile per un veicolo, i quali dipendono dal settore di mercato di destinazione e dall'immagine del brand. Nella Figura 1.23, sono mostrate le principali configurazione dei layout in uso. Nell'immagine (a) si vede un veicolo a trazione anteriore, che ha il motore montato trasversalmente all'asse del veicolo, con la trasmissione anch'essa trasversale e in linea con il motore; il differenziale può essere incorporato all'interno della scatola del cambio. Nell'immagine (b) il gruppo powertrain è longitudinale rispetto all'asse anteriore del veicolo.

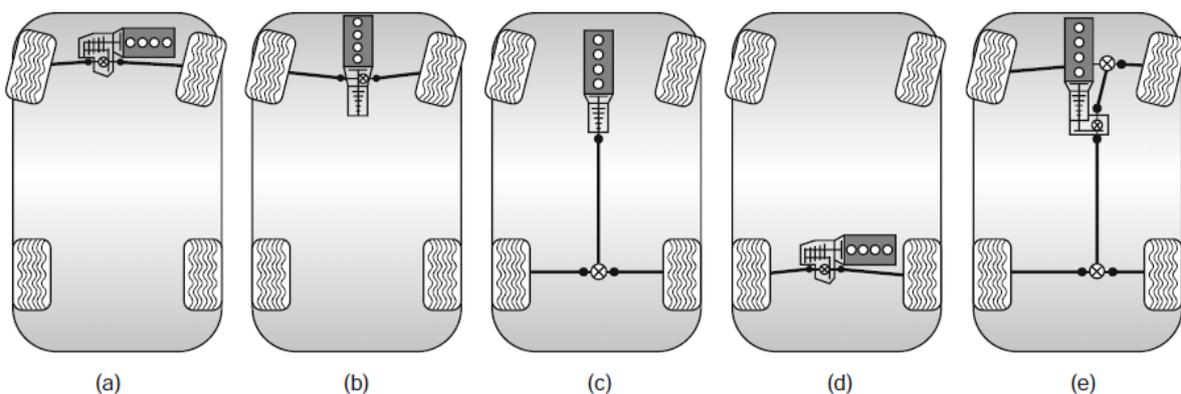


Figura 1.22-Posizione del PWT all'interno del veicolo [64]

Questa configurazione viene utilizzata per veicoli a trazione anteriore con motori di grandi cilindrata (es. SUV), nei quali l'installazione trasversale sarebbe impossibile. Nell'immagine (c) il motore e la trasmissioni sono ancora in linea ma montate longitudinalmente con un albero di trasmissione che si

collega con il differenziale posteriore; questo tipo di architettura viene usato sulle berline sportive (es. Alfa Romeo Giulia). Nell'immagine (d) il motore e la trasmissione sono montati trasversalmente nella parte posteriore del veicolo, la trazione è posteriore e di solito questo tipo di configurazione viene definito vettura con motore centrale. Nella figura (e) è rappresentato un veicolo a quattro ruote motrici, in passato questa configurazione veniva utilizzata sui veicoli off-road, ora invece viene usata anche su altri tipi di vettura (es. Audi con il sistema quattro). Ovviamente quelle rappresentate non sono tutte le configurazioni possibili, ma sicuramente rappresentano la stragrande maggioranza dei veicoli presenti su strada.

Capitolo 2

Motore ICE e tecnologie ad esso associate

2.1 Introduzione

Il motore a combustione interna (ICE) è il tipo di motore per trazione principalmente utilizzato nella società odierna. La sua nascita risale alla prima metà del 1800 quando Nicholas Otto, Rudolph Diesel e Jean Lenoir svilupparono i primi prototipi di motore termico a propulsione interna.

Sebbene i motori si siano evoluti notevolmente nel tempo, soprattutto negli ultimi decenni grazie anche alle nuove normative comunitarie che hanno contribuito al loro miglioramento in termini di efficienza e, quindi, di riduzione dei consumi e delle emissioni, i principi operativi di base dell'ICE non sono cambiati di molto. Un motore a combustione interna converte l'energia chimica presente nel carburante in energia termica e, attraverso il processo di compressione ed espansione del fluido di lavoro, converte l'energia termica in lavoro meccanico. Tutto questo processo avviene tramite un ciclo ripetitivo generato da un moto alternato di uno stantuffo all'interno di uno o più cilindri chiusi superiormente da una testata.

Le principali tecnologie dei motori ICE sono 2:

- Motori ad accensione spontanea (CI), che tipicamente utilizzano come carburante il diesel;
- Motori ad accensione comandata (SI) che tipicamente utilizzano come carburante la benzina.

In questo capitolo non approfondiremo le varietà di motori, ma ci limiteremo a fornire le informazioni fondamentali per comprendere le tecnologie comunemente adottate nei motori a combustione interna utilizzate nei veicoli in circolazione. Alcune tecnologie fondamentali da analizzare, che hanno permesso di passare dalla propulsione tradizionale a quella ibrida, sono:

- Sovralimentazione e Downsizing;
- Disattivazione dei cilindri;
- Fasatura variabile delle valvole.

Per semplicità verranno considerati solo i motori ad accensione comandata, che rappresentano la stragrande maggioranza dei motori utilizzati nelle applicazioni ibride. Tuttavia non bisogna dimenticare che esistono molte case automobilistiche, come Ford e Stellantis (ex PSA), che hanno a catalogo veicoli ibridi diesel.

2.2 Concetti fondamentali dei motori ICE

L'architettura tipica di un motore a benzina 4 tempi ad accensione comandata è rappresentata in Figura 2.1. Il pistone si muove in moto rettilineo alternato all'interno del cilindro. La parte superiore del cilindro è chiusa dalla testata; il volume contenuto tra cilindro, testata e pistone prende il nome di camera di combustione nella quale avviene il processo di accensione e combustione della miscela.

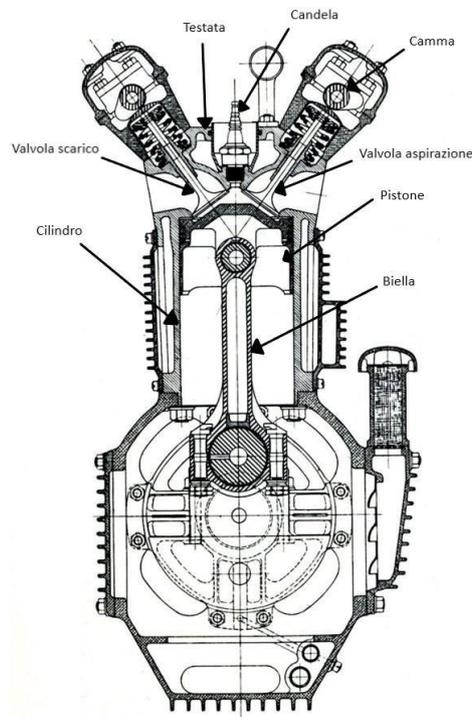


Figura 2.1-Rappresentazione in sezione di un motore alternato a ciclo Otto [55]

Nei motori ad accensione comandata, la miscela di combustibile e comburente si può formare nei condotti della testata o direttamente in camera; la quantità di miscela utilizzata per ogni ciclo di combustione è regolata da un'apposita centralina. Il processo di ricambio del fluido di lavoro avviene attraverso le valvole di aspirazione e di scarico che vengono azionate dalla distribuzione, costituita da molle e camme. Le camme sono ricavate sull'albero omonimo ed azionano le valvole secondo opportune leggi di alzata descritte dal profilo delle camme.

2.2.1 Parametri funzionali

Di seguito verranno riportati brevemente i parametri funzionali che caratterizzano il ciclo di lavoro di un motore a 4 tempi ad accensione comandata.

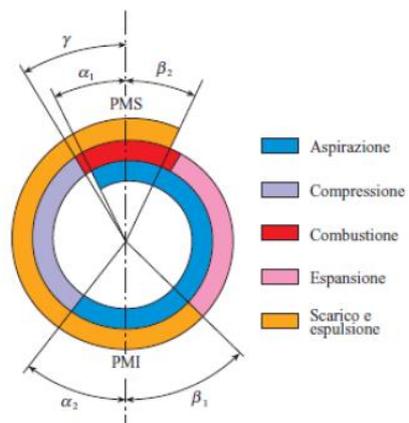
2.2.1.1 Durata, tempi e fasi del ciclo di lavoro

Quando si parla di tempi del ciclo di lavoro si fa riferimento al numero di corse del pistone necessarie a descrivere un ciclo di lavoro completo. In funzione dei tempi del ciclo di lavoro, possiamo distinguere il motore in 2 tipi:

1. Motore a due tempi (2T), il motore compie un ciclo completo ad ogni giro dell'albero motore. Questo tipo di motore non viene più utilizzato nell'industria automobilistica moderna.
2. Motore a quattro tempi (4T), il motore compie un ciclo completo ogni 2 giri dell'albero motore. Questo tipo di motore è il più utilizzato nell'industria automobilistica.

Le fasi di funzionamento di un motore 4T sono 6:

- 1) Aspirazione;
- 2) Compressione;
- 3) Combustione;
- 4) Espansione;
- 5) Scarico spontaneo;
- 6) Scarico forzato.



α_1 = Anticipo apertura valvola di aspirazione,
circa $10^\circ \div 40^\circ$ prima del PMS

β_1 = Anticipo apertura valvola di scarico,
circa $40^\circ \div 60^\circ$ prima del PMI

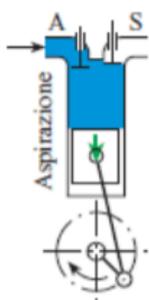
α_2 = Ritardo chiusura valvola di aspirazione,
circa $40^\circ \div 80^\circ$ dopo del PMI

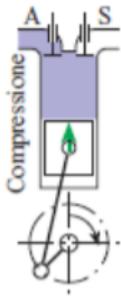
β_2 = Ritardo chiusura valvola di scarico,
circa $10^\circ \div 30^\circ$ dopo del PMS

γ = Anticipo dell'accensione,
circa $20^\circ \div 60^\circ$ prima del PMS

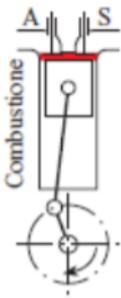
Figura 2.2-Diagramma circolare rappresentante le fasature delle valvole [46]

Durante la fase di Aspirazione (o Intake), viene immessa all'interno del cilindro la carica fresca (benzina più aria). Lo stantuffo spostandosi dal PMS al PMI crea una depressione che richiama il fluido attraverso la valvola di aspirazione. Tale valvola, mossa dall'albero di distribuzione, viene aperta leggermente prima dell'arrivo dello stantuffo nel PMS e chiusa poco dopo che lo stantuffo ha raggiunto il PMI. Così facendo la durata della fase di aspirazione è maggiore dei 180° di manovella che ci sono tra i due limiti. Tuttavia, questo avviene poiché le valvole non sono ideali ma hanno bisogno di un determinato periodo di tempo per aprirsi e chiudersi. Se non si apportasse nessun anticipo di apertura della valvole si avrebbe, per una parte della corsa di aspirazione, un'alzata inferiore all'alzata massima. Questo comporterebbe delle forti laminazioni all'introduzione della carica fresca. Anticipando, invece, l'apertura, si ottiene una riduzione dell'effetto di laminazione.

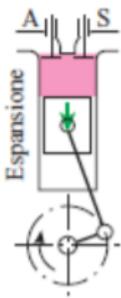




Nella fase di compressione (o Compression), si chiude la valvola (o le valvole) di aspirazione ed inizia la salita del pistone dal PMI al PMS, con il conseguente aumento della pressione della miscela di combustibile e comburente nel cilindro. Anche in questo caso la durata è inferiore ai 180° di manovella.

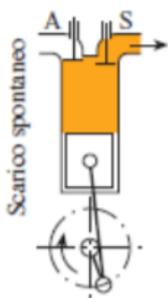


Nella fase di combustione (o Combustion) avviene l'innesco della combustione (scintilla). Questa non avviene al PMS, ma verso la fine della fase di compressione. In questa fase, a causa della combustione, si ha un elevato aumento della pressione all'interno del cilindro in prossimità del PMS.

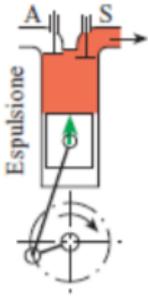


Nella fase di espansione (o Expansion), grazie all'aumento della pressione dovuta alla fase di combustione, i gas combusti in fase di espansione spingono il pistone dal PMS al PMI. Il pistone riceve su di esso un lavoro 4-5 volte maggiore rispetto a quello che esso necessita per spostarsi durante la fase di compressione. Ciò si verifica proprio grazie alla combustione che ha proprio lo scopo di amplificare le pressioni. Per i motivi prima citati, anche questa fase ha una durata maggiore di 180° di manovella.

La fase di scarico, invece, si divide a sua volta in 2 fasi:



Lo scarico spontaneo, nel quale prima dell'arrivo dello stantuffo al PMI si apre la valvola (o le valvole) di scarico e i gas, che si trovano nel cilindro con pressione di 3-4 bar, fluiscono spontaneamente fuori da esso proprio per la differenza di pressione.



Lo scarico forzato, nel quale il pistone muovendosi dal PMI verso il PMS, con le valvole di scarico ancora aperte, spinge fuori i gas di scarico rimasti nel cilindro.

Proprio a causa dell'apertura anticipata della valvola di scarico, non può essere sfruttata appieno l'espansione dei gas combusti; tuttavia, questa perdita del lavoro di espansione viene compensata dalla minore quantità di lavoro richiesto nella fase di scarico forzato. Inoltre, mediante sistemi quali l'EGR e/o la turbocompressione, si riesce a sfruttare parte dell'energia ancora presente nei gas di scarico. Durante il processo di combustione il pistone effettuerà 4 corse, passando 2 volte per il PMS e 2 volte per il PMI. Facendo ciò si riesce a sfruttare, però, la macchina solo per 1 ciclo ogni 2, mentre le altre 2 operazioni servono soltanto ad effettuare il processo di ricambio del fluido.

2.2.2 Parametri prestazionali

Prima di addentrarci nella comprensione dell'interazione tra il motore e l'utilizzatore, si devono conoscere i parametri prestazionali generati dal singolo motore.

2.2.2.1 Potenza utile

Si definisce potenza utile, generata da un motore a C.I, la potenza resa disponibile all'albero motore al netto di tutte le forze necessarie per azionare gli accessori fondamentali alla vite del motore. La potenza utile non è altro che la potenza effettivamente disponibile all'utilizzatore. Essa sarà pari a:

$$P_u = C \cdot w \quad (2.1)$$

Trattandosi di una macchina volumetrica, la (2.1) si può scrivere come:

$$P_u = C \cdot 2 \cdot \pi \cdot n = L_u \cdot i \cdot \frac{n}{m} \quad (2.2)$$

Dove:

L_u è il lavoro utile per cilindro;

i è il numero di cilindri;

n è il numero di giri nell'unità di tempo [giri/sec];

m è il numero di giri necessari per compiere un ciclo completo, ed è uguale a 2 per un motore 4T.

Il lavoro utile prodotto dal motore è, però, ottenuto dalla combustione del combustibile. Quindi, se si ipotizza una combustione perfetta, l'energia resa disponibile per ogni cilindro ad ogni ciclo termodinamico sarà:

$$E_u = m_b \cdot H_i \quad (2.3)$$

Dove:

m_b è la massa di combustibile per ciclo e per cilindro;

H_i è il potere calorifico inferiore [MJ/Kg].

Quanto precedentemente indicato nella (2.3) non è altro che una conversione di energia, da chimica a termica. Come tutte le conversioni essa non potrà avere un rendimento unitario e, per tener conto di ciò si inserisce il rendimento utile η_u che è pari a:

$$\eta_u = \frac{L_u}{E_u} = \frac{L_u}{m_b \cdot H_i} \quad (2.4)$$

Dalla (2.4) si ha:

$$L_u = \eta_u \cdot m_b \cdot H_i \quad (2.5)$$

Andando ora a sostituire la (2.5) nella (2.2) si ha:

$$P_u = \eta_u \cdot m_b \cdot H_i \cdot i \cdot \frac{n}{m} \quad (2.6)$$

Nella formula precedente, però, non si fa nessun riferimento all'aria aspirata all'interno dei cilindri che è necessaria a far avvenire il processo di combustione. Così facendo si introduce una forte approssimazione, in quanto il motore è una macchina volumetrica e come tale ha uno spazio limitato per incamerare il fluido di lavoro. Quindi un fattore limitante la potenza utile erogabile dal motore è proprio il quantitativo di aria che esso riesce ad incamerare ad ogni ciclo, il quale è direttamente proporzionale alla quantità di benzina bruciata. Quindi:

$$m_b = \frac{m_a}{\alpha} \quad (2.7)$$

Dove α è una costante di proporzionalità tra le masse denominata dosatura. Tale parametro tiene in conto che, affinché possa avvenire una completa reazione di combustione, la quantità di aria aspirata dal motore deve essere maggiore o uguale alla quantità di combustibile introdotta nel motore. Da quanto detto si può intuire che la dosatura α , espressa dalla relazione seguente, avrà sempre valori maggiore di 1.

$$\alpha = \frac{m_a}{m_b} \quad (2.8)$$

Il valore della dosatura non è univoco ma dipende dal tipo di combustibile e della tipologia di motore (Tabella 1.1). Andando a sostituire la (2.7) nella (2.6) si ha:

$$P_u = \eta_u \cdot \frac{m_a}{\alpha} \cdot H_i \cdot i \cdot \frac{n}{m} \quad (2.9)$$

L'equazione precedentemente descritta mette in evidenza che: la potenza sviluppabile da un motore ICE non è limitata dalla quantità di combustibile che viene immesso, ma dalla quantità d'aria comburente che il motore è in grado di aspirare.

Tabella 2.1-Differenti valori di potere calorifico e dosatura per i diversi combustibili [46]

Combustibile	Potere calorifico inferiore H_i [MJ/Kg]	Dosatura stechiometrica α_{st}
Benzina	44	14.6
Gasolio	42.5	14.5
Metanolo	20	6.5
Etanolo	27	9
Metano	50	17.2
Idrogeno	120	34.3

2.2.2.2 Coefficiente di riempimento

Per poter fare un confronto fra differenti tipologie di motori non si usa la dosatura ma è opportuno definire un parametro chiamato coefficiente di riempimento λ_V . Questo coefficiente è definito come il rapporto tra la massa d'aria aspirata, m_a , e la massa d'aria idealmente aspirabile dal motore in oggetto, $m_{a,rif}$. Quest'ultima è definita come la massa d'aria che potrebbe riempire completamente il volume messo a disposizione del cilindro, ossia la cilindrata del motore. Allora si ha:

$$\lambda_V = \frac{m_a}{m_{a,rif}} = \frac{m_a}{\rho_a \cdot V} \quad (2.10)$$

Analizzando soltanto la formula di potrebbe pensare di avere, in condizioni standard, un coefficiente superiore all'unità. Tuttavia, si deve tener presente che la massa d'aria effettivamente aspirata m_a è inferiore a quella di riferimento poichè, la densità dell'aria all'interno del cilindro è inferiore a quella dell'ambiente di aspirazione e, inoltre, il volume effettivo a disposizione dell'aria (considerando anche il combustibile necessario alla combustione) è inferiore alla cilindrata V . Di conseguenza il valore di λ_V è inferiore all'unità.

I principali fenomeni che influenzano il coefficiente di riempimento sono:

- a) Effetti quasi statici (in condizioni di flusso stazionario):
 - Laminazione all'aspirazione;
 - Laminazione allo scarico.
- b) Effetti dinamici (legati alla velocità del fluido):
 - Rifiuto o riflusso;
 - Effetti dinamici.

Una volta definito il coefficiente di riempimento si riesce a stabilire una relazione tra la potenza utile generata, l'efficienza del processo di conversione, le caratteristiche del combustibile e le dimensioni del motore, indicate dalla cilindrata complessiva V_{TOT} , ossia:

$$P_u = \eta_u \cdot \frac{\lambda_v \cdot \rho_a \cdot V}{\alpha} \cdot H_i \cdot i \cdot \frac{n}{m} = \eta_u \cdot \frac{\lambda_v \cdot \rho_a \cdot H_i}{\alpha} \cdot V_{TOT} \cdot \frac{n}{m} \quad (2.11)$$

2.2.2.3 Pressione media effettiva (pme)

Al fine di poter confrontare le performance di motori aventi differenti cilindrata, viene usata la pressione media effettiva (pme), la quale è definita come il rapporto tra il lavoro utile e la cilindrata; tale rapporto riesce a definire il grado di sfruttamento della cilindrata.

$$pme = \frac{L_u}{V} \Rightarrow L_u = pme \cdot V \quad (2.12)$$

Sostituendo la (2.12) nella (2.2) si ha:

$$P_u = C \cdot 2 \cdot \pi \cdot n = L_u \cdot i \cdot \frac{n}{m} = pme \cdot V \cdot i \cdot \frac{n}{m} = pme \cdot V_{tot} \cdot \frac{n}{m} \Rightarrow C = \frac{pme \cdot V_{tot}}{2 \cdot \pi \cdot m} \quad (2.13)$$

La potenza utile è pari al prodotto tra la pme e il numero di cicli nell'unità di tempo quindi, in caso si abbia un motore con una data cilindrata, è ovvio che per massimizzare la potenza utile bisogna aumentare il valore di pme.

Per fare ciò si può intervenire su 4 fattori:

- Aumentare il rendimento utile e quindi ridurre le perdite nel processo;
- Aumentare il coefficiente di riempimento λ_v e conseguentemente andare ad incrementare la quantità di aria aspirata all'interno dei cilindri;
- Aumentare la densità dell'aria aspirante andando cioè ad aspirare più aria a parità di volume, ciò è possibile grazie alla sovralimentazione (paragrafo 2.5) la quale permette di aumentare la pressione dell'aria aspirata;
- Utilizzare combustibili con un elevato potere calorifico H_i ed una bassa dosatura stechiometrica.

2.2.3 Cicli di riferimento per i motori ad accensione comandata

Di seguito andremo a spiegare brevemente i cicli di riferimento di un motore ad accensione comandata, partendo da un ciclo ideale fino ad arrivare al ciclo reale.

2.2.3.1 Ciclo ideale di riferimento

Se si tralasciano le ben note considerazioni termodinamiche, per i motori ad accensione comandata il ciclo di riferimento è il ciclo Otto, mostrato in figura 2.3. Il ciclo ideale si divide in 4 fasi:

- 1-2 \rightarrow Compressione adiabatica, ovvero il fluido viene compresso dal pistone;
- 2-3 \rightarrow Combustione isocora, nella quale avviene l'introduzione istantanea del calore Q_1 ;
- 3-4 \rightarrow Espansione adiabatica, la quale corrisponde al lavoro prodotto dal fluido;

- 4-1 → Scarico isocoro, ossia, apertura della valvola di scarico e sottrazione del calore Q_2 a volume costante.

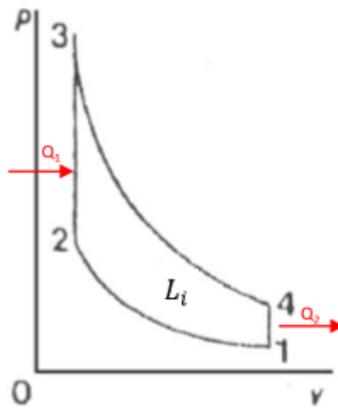


Figura 2.3-Ciclo Otto ideale

Effettuando dei semplici bilanci energetici si riesce a ricavare l'equazione del ciclo Otto ideale, definita come:

$$\eta_{id,otto} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^k - 1} \quad (2.14)$$

Dove:

ε è il rapporto volumetrico di compressione, che può variare tra 8-13 per i motori ad accensione comandata;

k è il coefficiente di dilatazione adiabatica che vale circa 1.4 per l'aria.

Dalla 2.14 si evince che all'aumentare del rapporto di compressione corrisponde un proporzionale aumento del rendimento del ciclo ideale. Tuttavia, il rapporto volumetrico di compressione ε non può avere valori troppo elevati altrimenti si potrebbero generare fenomeni di accensione spontanea del combustibile (knock o detonazione). Grazie alle semplificazioni apportate, come le trasformazioni adiabatiche e gli scambi istantanei di calore, il rendimento ideale può raggiungere dei valori molto elevati (0.5-0.6). Inoltre, se si va a calcolare l'aria racchiusa dal ciclo si riesce ad ottenere il cosiddetto lavoro ceduto dal fluido al pistone, che prende il nome di lavoro indicato:

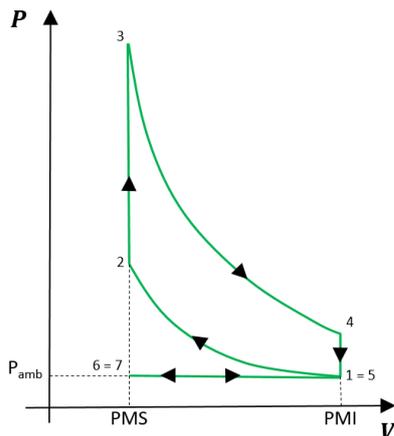
$$L_i = \oint_{ciclo} p dV \quad (2.15)$$

Tale lavoro risulterà positivo (lavoro fornito dal fluido al pistone) se il ciclo è percorso in senso orario, invece risulterà negativo (lavoro speso dal pistone) se il ciclo è percorso in senso antiorario. Visto che il lavoro indicato dipende anche dalle dimensioni del cilindro, per effettuare confronti tra diversi motori si può introdurre la pressione media indicata o pmi, la quale è definita come l'aria racchiusa dal ciclo indicato e la cilindrata:

$$p_{mi} = \frac{L_i}{V} = \frac{1}{V} \cdot \oint_{ciclo} p dV$$

2.2.3.2 Ciclo limite

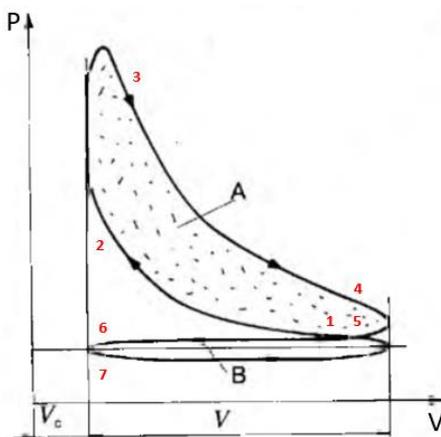
Finora abbiamo parlato di un ciclo ideale, il quale è caratterizzato da un fluido con proprietà chimiche e fisiche costanti. Invece, durante il reale utilizzo, sui motori ICE, il fluido subirà durante il ciclo delle alterazioni chimico-fisiche e, per tener conto di ciò, si deve passare da un ciclo chiuso ad uno aperto e provvedere periodicamente alla sostituzione del fluido di lavoro esausto. Questo ciclo prenderà il nome di ciclo limite, visibile in figura 2.4. A causa delle operazioni di ricambio del fluido, come si vede dalla figura, si vanno ad aggiungere due corse aggiuntive al ciclo ideale. Quest'ultime non andranno ad alterare il lavoro del ciclo, in quanto i lavori indicati delle due corse si annulleranno vicendevolmente. Da quanto detto è facile intuire che il ciclo limite rappresenta il miglior ciclo di lavoro che il motore possa percorrere con un fluido reale.



- 1-2 Compressione isoentropica;
- 2-3 Combustione a volume costante;
- 3-4 Espansione isoentropica;
- 4-5 Scarico spontaneo a volume costante;
- 5-6 Scarico forzato a pressione costante;
- 7-1 Aspirazione a pressione costante

Figura 2.4-Ciclo Otto limite

2.2.3.3 Ciclo indicato



- 1-2 Compressione;
- 2-3 Combustione;
- 3-4 Espansione;
- 4-5 Scarico spontaneo;
- 5-6 Espulsione;
- 7-1 Aspirazione

Figura 2.5-Ciclo Otto indicato

Dopo aver definito il ciclo ideale e il ciclo limite, al fine di avere un ciclo più vicino alla realtà, bisogna definire il ciclo indicato (figura 2.5) nel quale spariscono le discontinuità ed i punti spigolosi (le valvole si aprono con gradualità) nelle varie fasi. Infatti, come si vede dal grafico, l'apertura della valvola di scarico non avverrà quando lo stantuffo si troverà nel PMI, ma avverrà con anticipo. La combustione non sarà istantanea ma richiederà un certo tempo per la propagazione del fronte di fiamma e, al fine di ottenere il rilascio di calore in prossimità del PMS, si deve effettuare un anticipo nell'accensione. Inoltre, durante la fase di ricambio fluido, a causa delle laminazioni, si avrà un lavoro negativo. Il lavoro di espulsione è maggiore del lavoro di aspirazione, in quanto l'espulsione avverrà ad un livello di pressione superiore a quella ambiente, mentre la corsa di aspirazione avverrà ad un livello di pressione inferiore a quella ambiente.

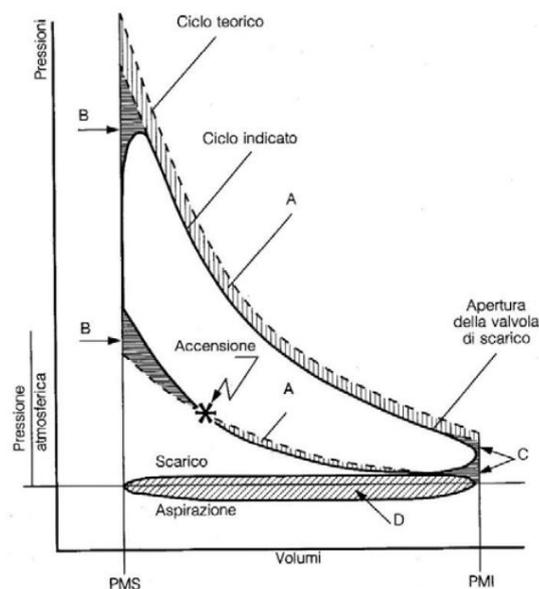


Figura 2.6-Rappresentazione del ciclo teorico ed indicato sul piano p-V [55]

Questo lavoro, necessario per il cambio fluido, prende il nome di lavoro di pompaggio¹. Nella figura 2.6 sono indicate le differenze tra il ciclo teorico e quello indicato. Esse possono essere riassunte come:

- Combustione non istantanea: la combustione avviene a volume costante nel ciclo teorico, mentre nel ciclo indicato si ha un anticipo dell'accensione che avviene prima del PMS ed arrotonda la linea generando una perdita, rappresentata in figura dall'area B.

¹ Il lavoro di pompaggio peggiora quando il motore funziona a carico parziale poiché, affinché si riesca ad avere un'adeguata velocità di propagazione del fronte di fiamma, si è costretti a ridurre la portata d'aria oltre a quella di combustibile; quindi si hanno maggiori laminazioni durante la fase di aspirazione, ovvero la pressione di aspirazione sarà molto più bassa di quella di scarico.

- Tempo di apertura delle valvole: il ricambio fluido non avviene istantaneamente, come nel ciclo teorico, ma in un determinato periodo di tempo che genera una perdita di lavoro utile indicato dall'area C.
- Perdite di calore: sono dovute allo scambio di calore con le pareti del cilindro e alle trasformazioni che non sono adiabatiche ma politropiche e generano una perdita di lavoro indicate dall'area A.
- Dissociazione dei prodotti della combustione: CO_2 e H_2O assorbono calore e si dissociano in altri composti come CO , H_2 , O_2 . Questi causano la riduzione delle massime temperature raggiungibili e quindi le pressioni in camera, con la conseguente riduzione del lavoro utile e del rendimento del ciclo.

Da quanto detto si evince che il lavoro indicato è inferiore al lavoro del ciclo limite.

2.2.4 Rendimenti per i motori ad accensione comandata

Per capire quali siano le tecnologie più adatte all'aumento dell'efficienza di un motore a combustione, si deve tener conto di tutti i rendimenti necessari alla conversione dell'energia chimica presente nel combustibile in energia meccanica utile al moto del veicolo. Di seguito, verrà effettuata una breve disamina dei vari rendimenti che interagiscono durante il processo di conversione dell'energia, fino ad arrivare al rendimento utile del motore.

2.2.4.1 Rendimento limite

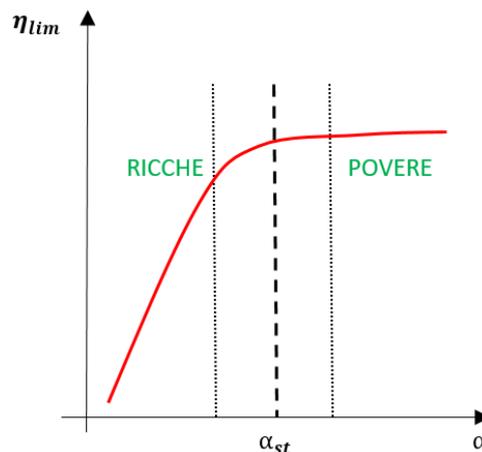


Figura 2.7-Andamento del ciclo limite in funzione della dosatura

Il rendimento limite può essere definito come il rapporto tra il lavoro ottenuto dal ciclo e l'energia introdotta nel ciclo stesso:

$$\eta_{lim} = \frac{L_{lim}}{E_u} = \frac{L_{lim}}{m_b \cdot H_i} = \frac{\alpha \cdot L_{i,lim}}{m_a \cdot H_i} \quad (2.17)$$

Se si va a rappresentare l'andamento del ciclo limite in funzione della dosatura (fig. 2.7), si vede che nelle dosature ricche una parte dell'energia immessa nel ciclo non viene convertita a causa della carenza di ossigeno. Quindi, se partiamo dalla dosatura stechiometrica e ci spostiamo verso la sinistra del grafico, il rendimento diminuisce a causa dell'eccessivo aumento di combustibile. Invece, se ci spostiamo nel campo delle miscele povere, il rendimento limite tende a crescere all'aumentare della dosatura poiché le temperature massime raggiunte nel ciclo diminuiscono all'aumentare di α . Questo comporta l'attenuazione di effetti negativi per il ciclo, come la riduzione dei fenomeni di dissociazione che si verificano alle alte temperature. Concludendo, possiamo affermare che per un ciclo Otto, a fronte di un rendimento ideale di 0.6 è possibile raggiungere un rendimento limite di circa 0,45.

2.2.4.2 Rendimento termo-fluidodinamico interno

Per tener conto del fatto che il lavoro indicato è inferiore al lavoro del ciclo limite, si introduce il rendimento termo-fluidodinamico interno, η_{θ_i} . Questo valuta le perdite che si hanno all'interno del motore quando non siamo in grado di garantire un'evoluzione del fluido priva di perdite. Ovvero, esso si definisce come il rapporto tra il lavoro indicato e il lavoro indicato ottenibile nel caso del ciclo limite:

$$\eta_{\theta_i} = \frac{L_i}{L_{i,lim}} \quad (2.18)$$

Tale rendimento varia in funzione di 2 parametri:

- a) La velocità di rotazione del motore

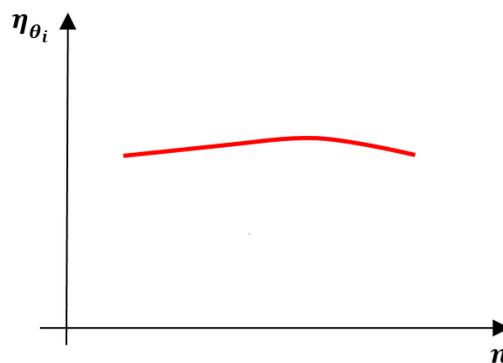


Figura 2.8-Andamento del rendimento termo-fluidodinamico interno in funzione della velocità del motore

Come si vede dal grafico, il rendimento termo-fluidodinamico interno tende a crescere all'aumentare della velocità del motore fino a raggiungere il picco a circa 3/4 della velocità massima. Infatti, al crescere della velocità di rotazione del motore diminuiscono le fughe e gli scambi termici, ma

aumentano le perdite per intemperività della combustione e le perdite dovute al ricambio del fluido di lavoro.

b) La dosatura

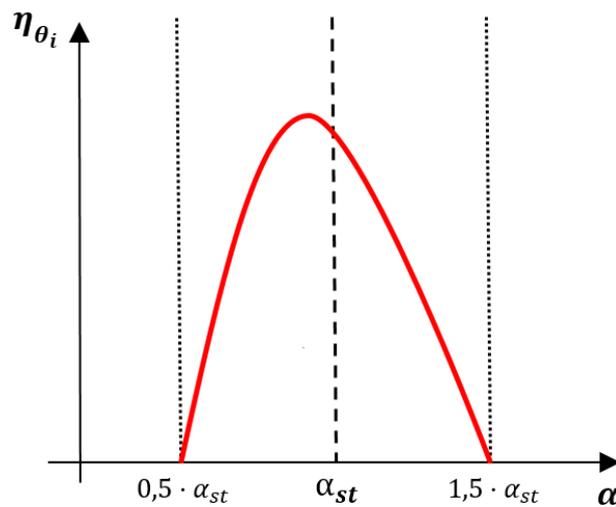


Figura 2.9-Andamento del rendimento termo-fluidodinamico interno in funzione della dosatura

In questo caso, come si vede dalla figura 2.9, essendo le perdite per intemperività estremamente sensibili alla dosatura, il rendimento termo-fluidodinamico interno risulta elevato in prossimità della dosatura stechiometrica, ossia dove le reazioni di combustione risultano sufficientemente rapide. In particolare modo, il rendimento è massimo per dosature leggermente ricche, $0.9 \cdot \alpha_{ST}$, dove si hanno appunto le massime velocità di propagazione del fronte di fiamma, invece si annulla per dosature troppo ricche ($0.5 \cdot \alpha_{ST}$) o troppo povere ($1.5 \cdot \alpha_{ST}$).

2.2.4.3 Rendimento indicato

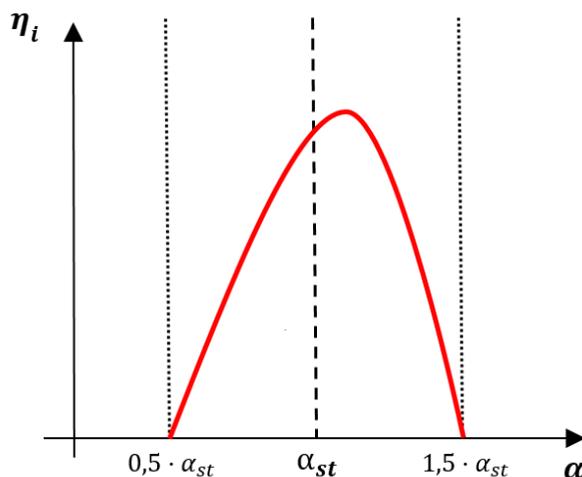


Figura 2.10-Andamento del rendimento indicato in funzione della dosatura

Andiamo a definire ora il rendimento indicato, il quale è pari al prodotto tra il rendimento limite e il rendimento termo-fluidodinamico:

$$\eta_i = \eta_{\theta_i} \cdot \eta_{lim} = \frac{L_i}{L_{i,lim}} \cdot \frac{\alpha \cdot L_{i,lim}}{m_a \cdot H_i} = \frac{L_i \cdot \alpha}{m_a \cdot H_i} = \frac{L_i}{m_b \cdot H_i} \quad (2.19)$$

Considerando le figure 2.7 e 2.9, rappresentanti rispettivamente il rendimento limite ed il rendimento termo-fluidodinamico, si può facilmente ottenere l'andamento del rendimento indicato, rappresentato nella figura 2.10. Possiamo vedere che il rendimento indicato sarà massimo nel campo delle miscele leggermente ricche. Un valore medio per il rendimento del ciclo indicato è circa 0,35.

2.2.4.4 Rendimento organico

Affinché dalle grandezze indicate si possa passare a quelle effettive, tenendo conto delle ulteriori perdite meccaniche dovute agli attriti in seno al manovellismo e alle perdite dovute al funzionamento degli accessori del motore (pompe, ecc.), si introduce il rendimento organico, η_o . Questo viene definito come il rapporto tra il lavoro utile e quello indicato, ossia:

$$\eta_o = \frac{L_u}{L_i} = \frac{pme}{pmi} \quad (2.20)$$

Il rendimento organico ha un range di valori compresi tra 0 e 0,9. La condizione in cui il rendimento organico si annulla è definita come condizione di marcia a vuoto del motore. In questa particolare condizione si ha che il lavoro indicato (L_i) è pari al lavoro di marcia a vuoto (L_v), ovvero il lavoro utile (L_u) è pari a 0, come il rendimento organico. Il lavoro di marcia a vuoto sarà pari a:

$$L_v = L_i - L_u \quad (2.21)$$

Considerando il lavoro di marcia a vuoto in funzione della cilindrata del motore si ha la pressione di marcia a vuoto:

$$p_v = \frac{L_v}{V} = \frac{L_i}{V} - \frac{L_u}{V} = pmi - pme \quad (2.22)$$

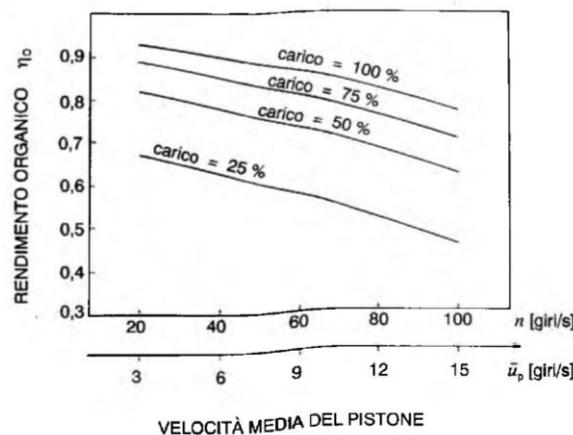


Figura 2.11-Andamento del rendimento organico al variare della velocità media del pistone [56]

La pressione di marcia a vuoto aumenta all'aumentare del numero di giri del motore, invece risulta indipendente dalla dosatura (si può considerare costante). Il valore della pressione di marcia a vuoto, per motori ad accensione comandata si aggira attorno a valori compresi tra 0.5 e 2 bar. Nella figura 2.11 è indicato l'andamento del rendimento organico al variare della velocità del motore e, proprio a causa dell'aumento della p_v , al crescere del numero di giri il rendimento organico diminuisce.

Dalla (2.22) si ha:

$$p_{me} = p_{mi} - p_v \quad (2.23)$$

Dalla (2.19) possiamo esplicitare il lavoro indicato:

$$L_i = \frac{\eta_i \cdot m_a \cdot H_i}{\alpha} \quad (2.24)$$

Sostituendo la (2.24) nella (2.16) si ha:

$$p_{mi} = \frac{L_i}{V} = \frac{\eta_{\theta_i} \cdot \eta_{lim} \cdot m_a \cdot H_i}{\alpha \cdot V} = \eta_{\theta_i} \cdot \eta_{lim} \cdot \frac{\rho_a \cdot \lambda_v \cdot H_i}{\alpha} \propto \frac{\eta_{\theta_i} \cdot \eta_{lim}}{\alpha} = \frac{\eta_i}{\alpha} \quad (2.25)$$

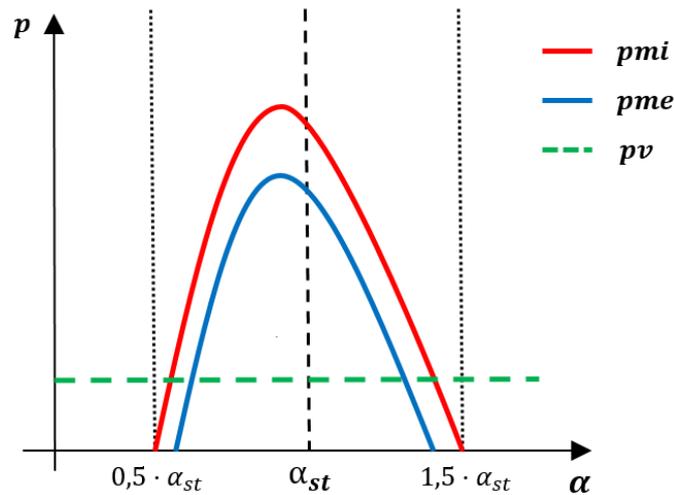


Figura 2.12-Andamento di p_{mi} , p_{me} e p_v al variare della dosatura

Dalla (2.25) si può ottenere l'andamento della p_{mi} in funzione della dosatura. Inoltre, considerando la 2.23 e ricordando che p_v è costante al variare della dosatura, si possono tracciare gli andamenti delle 3 pressioni sopracitate, visibili nella figura 2.12. Sostituendo la (2.23) nella (2.20) si ha:

$$\eta_o = \frac{L_u}{L_i} = \frac{p_{me}}{p_{mi}} = \frac{p_{mi} - p_v}{p_{mi}} = 1 - \frac{p_v}{p_{mi}} \quad (2.26)$$

Dalla quale si può stimare l'andamento del rendimento organico in funzione della dosatura:

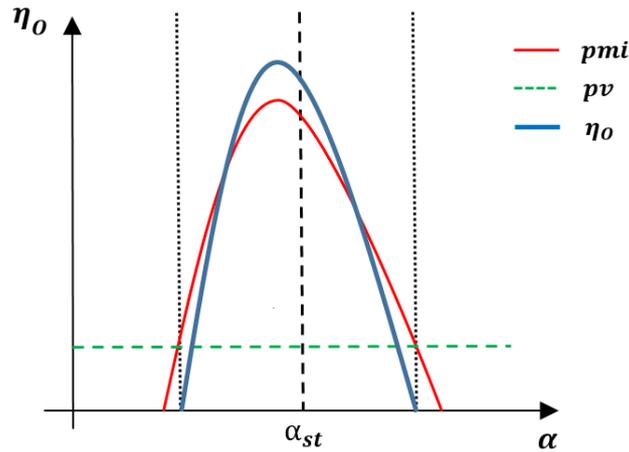


Figura 2.13-Andamento del rendimento organico al variare della dosatura

Come si vede dalla figura 2.13 il rendimento organico sarà massimo nel campo del leggermente ricco, ovvero dove è massima la pmi, mentre si andrà ad annullare quando la pmi è pari alla pv. Il campo di esistenza del rendimento organico sarà inferiore al rendimento termo-fluidodinamico e coinciderà con il campo di esistenza della pme.

2.2.4.5 Rendimento utile

Partendo dalla definizione di rendimento utile (2.4) e moltiplicando al numeratore e al denominatore per L_i ed $L_{i,lim}$, si ha:

$$\eta_u = \frac{L_u}{E_u} = \frac{L_u}{m_b \cdot H_i} = \frac{L_u}{L_i} \cdot \frac{L_i}{L_{i,lim}} \cdot \frac{L_{i,lim}}{m_b \cdot H_i} \quad (2.27)$$

Sostituendo nell'equazione precedente la (2.19) e la (2.20) si ha:

$$\eta_u = \frac{L_u}{E_u} = \frac{L_u}{m_b \cdot H_i} = \frac{L_u}{L_i} \cdot \frac{L_i}{L_{i,lim}} \cdot \frac{L_{i,lim}}{m_b \cdot H_i} = \eta_o \cdot \eta_i = \eta_o \cdot \eta_{\theta_i} \cdot \eta_{lim} \quad (2.28)$$

Allora, il rendimento utile, che misura l'efficienza con cui l'energia contenuta nel combustibile viene convertita in lavoro disponibile all'albero motore, è pari al prodotto tra il rendimento organico e il rendimento ideale. Il valore massimo per un motore ICE ad accensione comandata è compreso tra 0.3 e 0.4. Il rendimento utile ha lo stesso campo di esistenza della pme, ma il valore massimo del rendimento si trova spostato nel campo del leggermente povero a causa dell'andamento crescente del rendimento limite. Analizzando l'andamento del rendimento utile in funzione della dosatura (fig. 2.14) si può concludere che, se si vogliono massimizzare le prestazioni di un motore ICE ad accensione comandata, nelle condizioni di pieno carico, si deve scegliere una dosatura di funzionamento che sia nel campo del leggermente ricco. Invece, se si vuole massimizzare il rendimento del motore, esempio nel caso di carico parziale, si deve scegliere una dosatura di funzionamento nel campo del leggermente povero. Ovviamente questo nel caso ideale in cui non si

ha la necessità di contenere le emissioni e di far lavorare i sistemi di post trattamento dei gas di scarico nelle migliori condizioni di efficienza possibile.

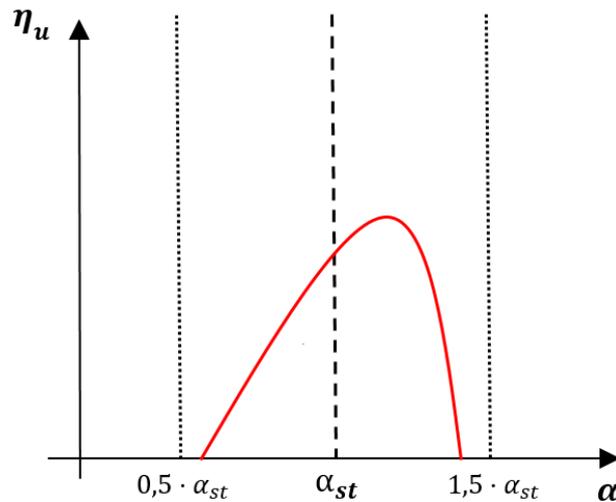


Figura 2.14-Andamento del rendimento utile al variare della dosatura

2.3 Curve caratteristiche

Le curve caratteristiche di un motore ICE sono quelle che definiscono il comportamento della coppia motrice e della potenza utile al variare della velocità di rotazione.

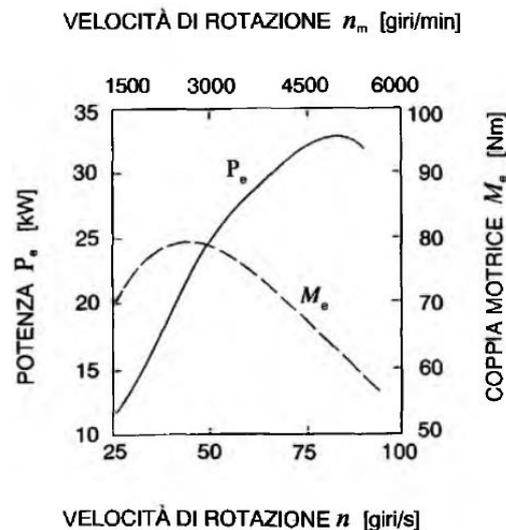


Figura 2.15-Andamento della coppia e della potenza effettiva al variare della velocità di rotazione [56]

E' importante ricordare che con un unico parametro operativo non si riescono a definire le condizioni di funzionamento, in quanto ad una data velocità di rotazione può corrispondere lo sviluppo di una potenza variabile. Generalmente, al fine di definire le condizioni operative di un motore,, sono necessari 2 parametri:

1. Il regime di rotazione;

2. Il carico, il quale può essere definito con diverse modalità, come la pressione media effettiva (pme) o la potenza massima erogabile.

Quindi, quando si indicano le curve caratteristiche, si devono indicare le condizioni di carico alle quali esse si riferiscono, anche se nella maggior parte dei casi viene fatto riferimento al massimo carico, in modo da poter definire il limite delle prestazioni per il motore in oggetto. Nella figura 2.14, sono mostrate le curve di coppia e di potenza massima per un motore ad accensione comandata. La curva rappresentante la coppia massima ha il suo picco per un regime di rotazione relativamente basso in funzione del regime di rotazione completo del motore. Ciò avviene a causa della variazione del rendimento utile e del coefficiente di riempimento al variare della velocità di rotazione. Infatti, il rendimento utile diminuisce al crescere di n , a causa delle perdite per attrito in seno al manovellismo (si riduce il rendimento organico). Invece, il coefficiente di riempimento, nel caso in cui non si abbiano dei sistemi di variazione dell'alzata delle fasi, si riduce all'aumentare di n a causa delle maggiori perdite fluidodinamiche mentre, per regimi più bassi di velocità, si riduce per reflusso all'interno del collettore di aspirazione. Concludendo, la coppia raggiunge un massimo nel regime ottimale di riempimento del cilindro e successivamente diminuisce al crescere di n proporzionalmente con η_u e λ_v . Per regimi inferiori al massimo, la coppia cresce al crescere di n proporzionalmente al valore di λ_v . La curva caratteristica della potenza, invece, cresce molto rapidamente nel primo tratto, poiché aumentano sia la coppia che la velocità di rotazione. Una volta che la coppia raggiunge il suo culmine ed inizia la fase decrescente, la potenza continua ad aumentare in quanto aumenta la velocità di rotazione. Tutto ciò si verifica fino a quando la potenza raggiunge un massimo, oltre il quale la diminuzione della coppia è predominante rispetto all'aumento della velocità di rotazione e quindi non riesce ad essere più bilanciata da quest'ultima.

2.4 Consumi specifici e piani quotati

Come discusso nel paragrafo precedente, per definire le condizioni di funzionamento di un motore ICE, bisogna conoscere il regime di rotazione e il carico. Tuttavia, affinché si riesca a determinare il costo di gestione di un motore, si usa un ulteriore parametro che tiene conto della quantità di combustibile utilizzata per generare trazione. Ossia, si definisce una grandezza che riesca a definire un valore di efficienza con cui il motore converte l'energia presente nel combustibile in energia di trazione: il consumo specifico:

$$bsfc = \frac{\dot{m}_b}{P_u} \quad (2.29)$$

Dove:

\dot{m}_b è il consumo di combustibile in g/h;

P_u è la potenza utile [KW];

L'unità di misura del consumo specifico è il g/KWh. È importante notare che il consumo specifico può essere legato al rendimento utile, ovvero:

$$\eta_u = \frac{P_u}{P_s} = \frac{P_u}{\dot{m}_b \cdot H_i} \Rightarrow P_u = \eta_u \cdot \dot{m}_b \cdot H_i \quad (2.30)$$

Sostituendo la (2.30) nella (2.29) si ha:

$$bsfc = \frac{\dot{m}_b}{P_u} = \frac{\dot{m}_b}{\eta_u \cdot \dot{m}_b \cdot H_i} = \frac{1}{\eta_u \cdot H_i} \quad (2.31)$$

Dalla (2.31) si può affermare che il consumo specifico (brake specific fuel consumption) è inversamente proporzionale al rendimento utile, da ciò è intuibile perché si deve far lavorare il motore sempre nelle condizioni ottimali. Questa grandezza viene rappresentata sulle mappe caratteristiche del motore utilizzando delle linee isoconsumo. Tutte queste informazioni discusse nei paragrafi precedenti, possono essere inglobate in un unico grafico, figura 2.16 e vanno a generare il cosiddetto piano quotato² dei consumi specifici di un motore:

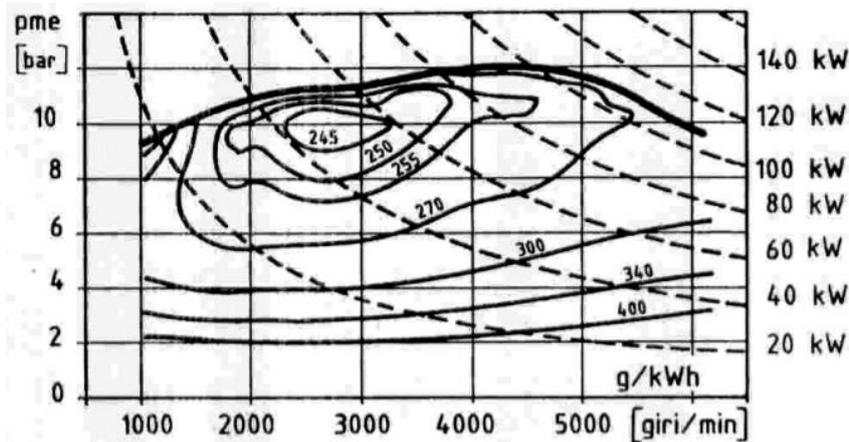


Figura 2.16-Piano quotato dei consumi specifici [56]

Come si vede dalla figura sono presenti, oltre alle grandezze precedentemente citate, delle iperboli rappresentati la potenza costante generata dal motore. Se si va ad analizzare la figura si vede come si abbia una zona di minimo consumo in corrispondenza di carichi molto elevati (80-90% del valore massimo) e valori di coppia attorno ai valori massimi. Se ci si allontana da quest'area, i consumi aumentano con un forte incremento al diminuire del carico. In particolar modo:

- Carico costante: Se n aumenta, aumentano i consumi poiché aumentano le dissipazioni per attrito e, per compensare ciò, si tende ad arricchire la miscela per avvicinarsi alla dosatura di massima potenza. Se n diminuisce, invece, aumentano i consumi poiché aumentano le perdite

² Con l'ausilio dei piani quotati si riesce a rappresentare in modo sintetico e completo le variazioni di prestazioni di un motore su tutto il campo di funzionamento [56]

termiche e, per compensare ciò, si tende ad arricchire la miscela per aumentare la velocità di propagazione del fronte di fiamma aumentando la stabile di funzionamento del motore.

- Regime costante: se aumenta il carico, aumentano i consumi poiché si arricchisce la miscela per raggiungere la massima potenza. Se il carico diminuisce, invece, aumentano i consumi poiché aumentano le perdite organiche e termiche che causano così la diminuzione della potenza utile sviluppata.

Per ridurre i consumi, vi sono differenti soluzioni, ma quelle più utilizzate sono generalmente 2:

1. Downsizing: si vanno ad usare delle marce lunghe, in modo che il motore eroghi la potenza richiesta a bassa velocità di rotazione e ad alto carico; così facendo esso va a lavorare nelle zone a rendimento maggiore.
2. Downsizing: si va ad usare un motore di cilindrata inferiore che operi ad un carico più elevato, rispetto ad utilizzare un motore avente cilindrata maggiore ma operante ad un carico ridotto. Così facendo si riescono a raggiungere le stesse prestazioni grazie all'utilizzo della sovralimentazione. Così si farà lavorare il motore in zone a rendimento maggiore.

2.5 Sistemi di sovralimentazione

L'operazione di sovralimentazione è il processo mediante il quale si comprime artificialmente la carica fresca al di fuori del cilindro, con lo scopo di aumentare la massa di aria aspirata dal motore. Attraverso uno o più compressori si produce un aumento della pressione, rispetto a quella ambientale, nei collettori di aspirazione, così da far aumentare la densità e la quantità di carica fresca introdotta nel cilindro, per ottenere una maggior potenza a parità di cilindrata. [47] Ricordando la (2.13), che definisce la potenza utile in funzione del numero di giri e della pme, è facile intuire che al fine di aumentare la potenza utile, mantenendo costante la cilindrata, si possono far variare 2 parametri:

- Il regime di rotazione n ;
- La pme.

Se si andasse ad aumentare la velocità di rotazione n , a causa dell'aumento quadratico delle forze d'inerzia, si dovrebbero andare ad alleggerire le parti in movimento. Invece, aumentando la pme, seppur si devono apportare degli irrobustimenti agli organi del motore, i costi della modifica da effettuare sono molto più contenuti. Ora andando ad uguagliare la (2.11) con la (2.13) si ha:

$$pme = \eta_u \cdot \frac{\lambda_v \cdot \rho_a \cdot H_i}{\alpha} \quad (2.32)$$

Dalla (2.32) si può osservare che il lavoro al ciclo può essere incrementato andando ad aumentare la densità dell'aria mediante la sovralimentazione. Ovviamente il valore di pme non può essere aumentato per valori troppo elevati in quanto esso è direttamente collegato ai fenomeni di knock.

2.5.1 Principali metodi di sovralimentazione

I metodi di sovralimentazione si possono classificare in base al principio di funzionamento del compressore installato a monte dell'aspirazione motore e all'energia utilizzata per trascinarlo. Infatti, il compressore può essere azionato:

- Dal motore stesso, tramite collegamento meccanico con l'albero motore;
- Da una turbina, sfruttando l'energia residua posseduta dai gas di scarico del motore;
- Da una sorgente esterna al motore, ad esempio da un motore elettrico alimentato da un sistema di accumulatori dedicato.

Andiamo ora ad analizzare le differenti architetture di sovralimentazione.

2.5.1.1 Sovralimentazione mediante collegamento meccanico

La prima architettura da considerare è il compressore rotativo a comando meccanico il quale, come si vede dalla figura 2.17, prevede per la sovralimentazione l'utilizzo di un compressore a comando meccanico, ossia direttamente azionato dall'albero motore mediante una cinghia o degli ingranaggi.

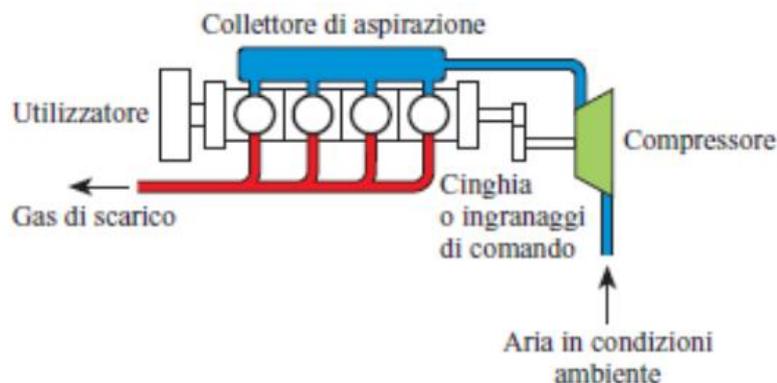


Figura 2.17-Compressore rotativo azionato dall'albero motore [46]

Con questo tipo di sovralimentazione vengono utilizzati dei compressori volumetrici, in quanto l'utilizzo di un turbocompressore è difficilmente praticabile a causa, soprattutto, della difficoltà di accoppiamento diretto tra motore e turbocompressore dovuta alla notevole differenza di velocità tra le macchine (circa due ordini di grandezza). Il principale problema di una sovralimentazione a comando meccanico diretto è rappresentata dal fatto che al crescere della velocità di rotazione del motore, cresce proporzionalmente la velocità di rotazione del compressore. Di conseguenza si avrà un lavoro di compressione che cresce con il quadrato della velocità di rotazione, cosa non concorde con il desiderio di avere un grado di sovralimentazione costante al variare di n . Questo tipo di sovralimentazione ha una bassa efficienza ed una marcata rumorosità dovuta al fatto che la compressione avviene per riflusso. Inoltre, essendo il compressore direttamente collegato all'albero motore, va ad aumentare le perdite meccaniche del motore riducendone così il rendimento organico.

2.5.1.2 Sovralimentazione mediante turbina

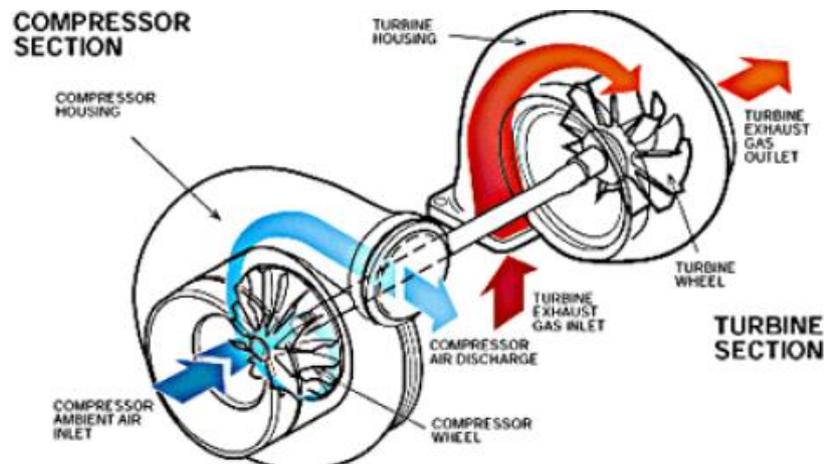


Figura 2.18-Esempio di funzionamento di un gruppo turbocompresso [58]

Nella seconda architettura il turbocompressore, centrifugo, è calettato sullo stesso albero di una turbina assiale o centripeta, la quale viene azionata dall'energia residua presente nei gas di scarico. In questo modo l'accoppiamento tra il motore e il sistema di sovralimentazione avviene per via fluidodinamica. In questo modo non viene sottratta alcuna potenza all'albero motore andando così ad aumentare oltre alle prestazioni anche l'efficienza.

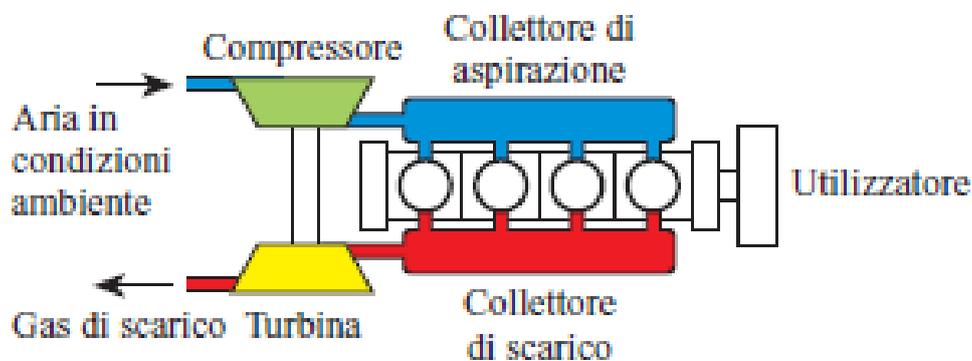


Figura 2.19-Gruppo turbocompressore alimentato a pressione costante [46]

Un schema indicativo del funzionamento del sistema turbocompresso di sovralimentazione è indicato nella figura 2.18. Nel caso della sovralimentazione si possono presentare 2 differenti varianti costruttive:

- a) Gruppo turbocompressore alimentato a pressione costante

Come si vede dalla figura 2.19, i gas di scarico vengono convogliati in un unico collettore di scarico nel quale si espandono. All'interno di questo collettore si stabilisce una pressione pressoché costante in modo che alla turbina arrivi un flusso quasi stazionario, così facendo ovviamente si perde gran parte dell'energia posseduta dai gas di scarico. Questa configurazione è molto adatta quando si ha un

motore che lavora a punto fisso, mentre è poco fruibile per i motori automobilistici a causa della bassa risposta del sistema durante i transitori.

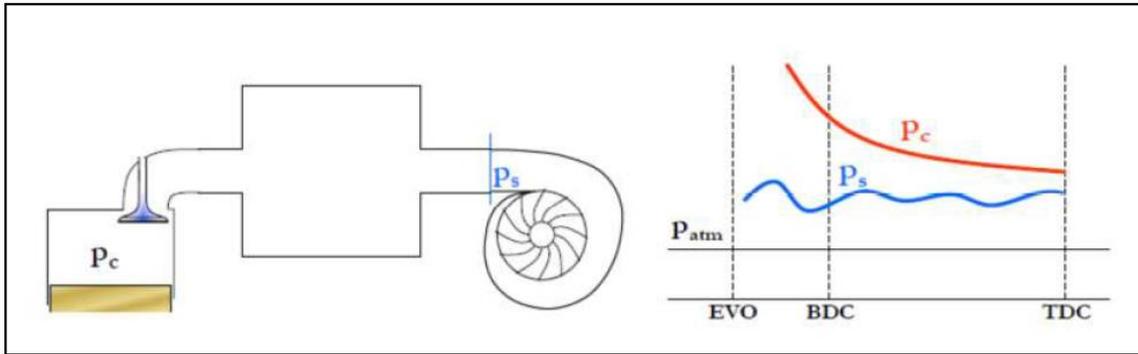


Figura 2.20-Andamento delle pressioni in un turbocompressore a pressione costante [47]

b) Gruppo turbocompresso alimentato a pressione:

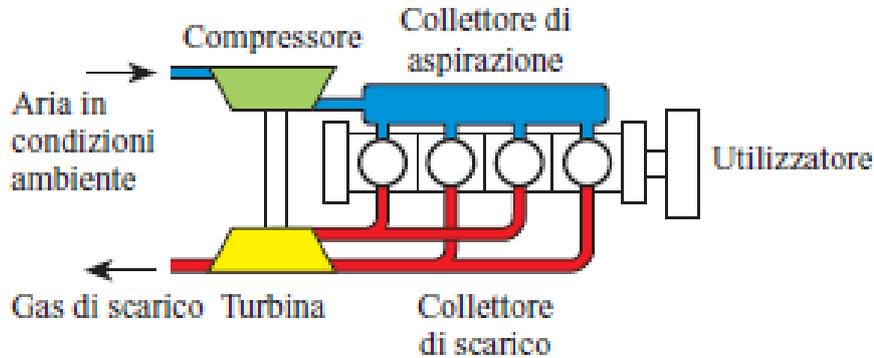


Figura 2.21-Gruppo turbocompresso alimentato a impulsi [46]

In questo caso, i condotti di scarico dei singoli cilindri restano separati tra loro fino all'immissione in turbina. Mediante dei condotti di scarico molto corti si cerca di mantenere l'energia cinetica presente nei gas fino a quando non si raggiunge la turbina per l'espansione. Così facendo si riduce la contropressione allo scarico a fronte del fatto che la turbina lavori ad impulsi.

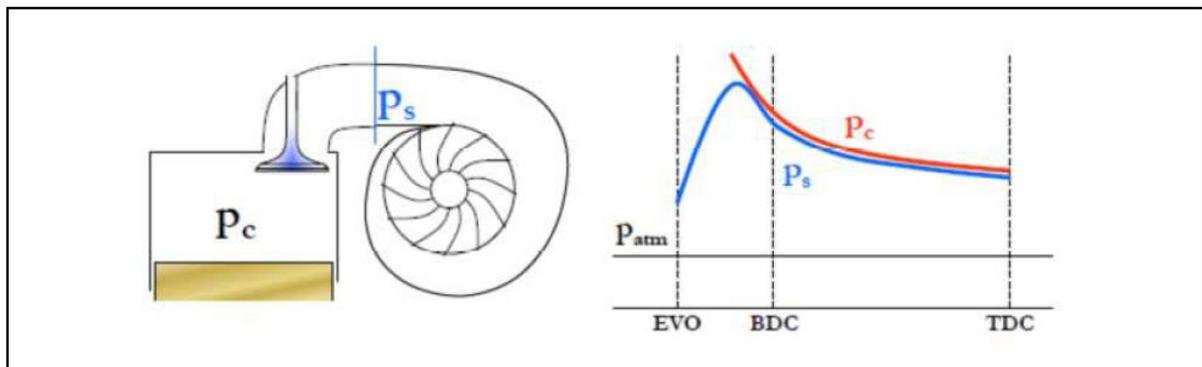


Figura 2.22-Andamento delle pressioni in un turbocompressore ad impulsi [47]

Per sopperire a ciò si cerca di raggruppare i condotti di scarico, opportunamente sfalsati e in accordo all'ordine di accensione, in modo che la turbina venga alimentata nella maniera più uniforme possibile

ed eviti quindi di lavorare in continuo transitorio. Questa soluzione permette di aumentare la velocità di risposta del sistema durante le fasi transitorie di guida del veicolo.

2.5.1.3 Sovralimentazione mediante una fonte esterna

La terza architettura da considerare è quella riguardante l'alimentazione del compressore mediante una fonte esterna al motore. Fino all'avvento della moderna elettronica di potenza questo tipo di sovralimentazione era poco utilizzato. Invece, soprattutto negli ultimi anni, si è assistito alla diffusione di un sistema di turbocompressore elettrico. Il successo ottenuto dall'elettrificazione del turbocompressore è dovuto principalmente alla capacità della macchina elettrica di produrre in modo efficiente la coppia istantaneamente richiesta in una gamma di velocità notevolmente ampia, da zero a valori molto elevati di rpm.

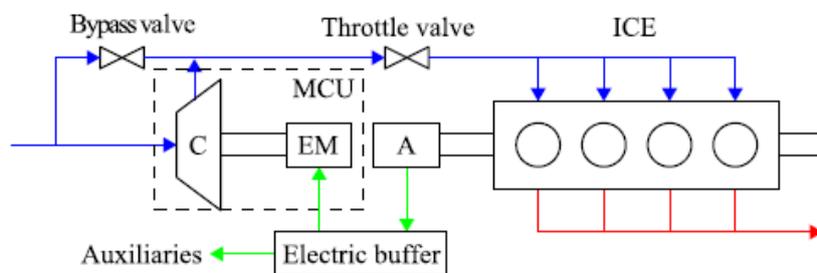


Figura 2.23-Schema a blocchi di un turbocompressore azionato elettricamente [48]

In figura 2.23, abbiamo un motore ICE con il suo classico alternatore (A), il quale carica una batteria (in questo caso non dedicata) che, a sua volta, viene sfruttata sia per alimentare gli organi ausiliari sia per azionare il compressore (C). Da questo schema possiamo vedere che in caso la valvola di bypass sia aperta, il motore viene alimentato alla pressione atmosferica e funziona quindi come un normale motore aspirato. Mentre, nel caso sia richiesto un boost di potenza, si chiude la valvola di bypass e si attiva il compressore facendo così lavorare il motore mediante un sistema di sovralimentazione. Questa architettura può essere paragonata a quella di un sistema che lavora mediante un collegamento meccanico tra motore e compressore, in quanto l'assenza della turbina non permette di recuperare l'energia ancora presente nei gas di scarico.

2.5.2 Concetti base della sovralimentazione

Come tutti i sistemi, anche la sovralimentazione porta con sé degli svantaggi e dei vantaggi, i quali dipendono sia dal processo di sovralimentazione che dagli elementi che lo permettono. Infatti, come spiegato in precedenza, la sovralimentazione fornisce al motore la massa d'aria necessaria per garantire una combustione altamente efficiente. Sia nei veicoli a benzina che in quelli diesel, il turbocompressore comprende due gruppi: un compressore centrifugo e una turbina. I gas esausti fanno ruotare la turbina che fa ruotare il compressore poiché entrambi sono collegati tramite uno

stesso albero. Il compressore è composto da una girante e da un diffusore, alloggiati nella carcassa del compressore. La girante accelera l'aria aspirata dall'atmosfera e la forza verso il diffusore. Il diffusore rallenta l'aria in rapido movimento che ne aumenta la pressione e la temperatura nell'alloggiamento del compressore. L'aria compressa viene quindi diretta al motore. In questo modo, una quota maggiore di aria viene iniettata nella camera di combustione e brucia il carburante aggiuntivo necessario per mantenere la potenza del motore.

2.5.2.1 Vantaggi del processo di sovralimentazione

A causa della sovralimentazione all'interno del collettore di aspirazione, oltre al già citato aumento di pressione (p_c) nel collettore, si genera anche un aumento della temperatura dell'aria (T_c). Partendo dalla definizione della pressione media indicata in funzione della dosatura (2.25) ed assumendo costante il rendimento indicato, si può facilmente dedurre che i termini dipendenti dalla sovralimentazione sono ρ_a e λ_v . Infatti, dall'equazione di stato dei gas si ha:

$$\rho_a \propto \frac{p_a}{T_a} \quad (2.33)$$

Mentre, dalla definizione del coefficiente di riempimento (2.10) si è visto, sperimentalmente, che a causa della minore incidenza degli scambi termici si ha:

$$\lambda_v \propto \sqrt{T_a} \quad (2.34)$$

Concludendo, in prima approssimazione si avrà un aumento delle prestazioni secondo il seguente rapporto:

$$\frac{pmi_{compr}}{pmi_{orig}} \cong \frac{\lambda_{v,compr}}{\lambda_{v,orig}} \cdot \frac{\rho_{compr}}{\rho_{orig}} \cong \frac{p_c}{p_a} \cdot \sqrt{\frac{T_a}{T_c}} \cdot \xi \cong \beta_c \cdot \sqrt{\frac{T_a}{T_c}} \cdot \xi \quad (2.35)$$

Dove:

p_c è la pressione nel collettore di aspirazione nel motore sovralimentato;

p_a è la pressione ambiente nel motore aspirato;

T_c è la temperatura nel collettore di aspirazione nel motore sovralimentato;

T_a è la temperatura ambiente nel motore aspirato;

β_c è il rapporto manometrico di compressione;

ξ è un parametro che tiene conto del guadagno di volume che si potrebbe avere a causa della sovralimentazione.

Inoltre, un ulteriore incremento può derivare dal ciclo di ricambio fluido, ossia:

$$pmi_{compr} \cong pmi_{orig} \cdot \frac{p_c}{p_a} \cdot \sqrt{\frac{T_a}{T_c}} \cdot \xi + (p_c - p_s) \cong pmi_{orig} \cdot \beta_c \cdot \sqrt{\frac{T_a}{T_c}} \cdot \xi + (p_c - p_s) \quad (2.36)$$

Per completezza rappresentiamo la portata d'aria del motore sovralimentato in funzione della portata d'aria del motore aspirato, cioè:

$$\dot{m}_{sovr} = \dot{m}_{asp} \cdot \frac{p_c}{p_a} \cdot \sqrt{\frac{T_a}{T_c}} \cdot \xi = \left(\lambda_{v_{asp}} \cdot \rho_a \cdot V_{tot} \cdot \frac{n}{m} \right) \cdot \beta_c \cdot \sqrt{\frac{T_a}{T_c}} \cdot \xi \quad (2.37)$$

Infine, considerando la (2.26) si può affermare che in caso di sovralimentazione, il rendimento organico migliora al crescere del grado di sovralimentazione, poiché cresce più la pmi che la pressione di marcia a vuoto.

2.5.2.2 Svantaggi e limiti del processo di sovralimentazione

I limiti fisici del processo di sovralimentazione in un motore ad accensione comandata sono rappresentati nella figura 2.24:

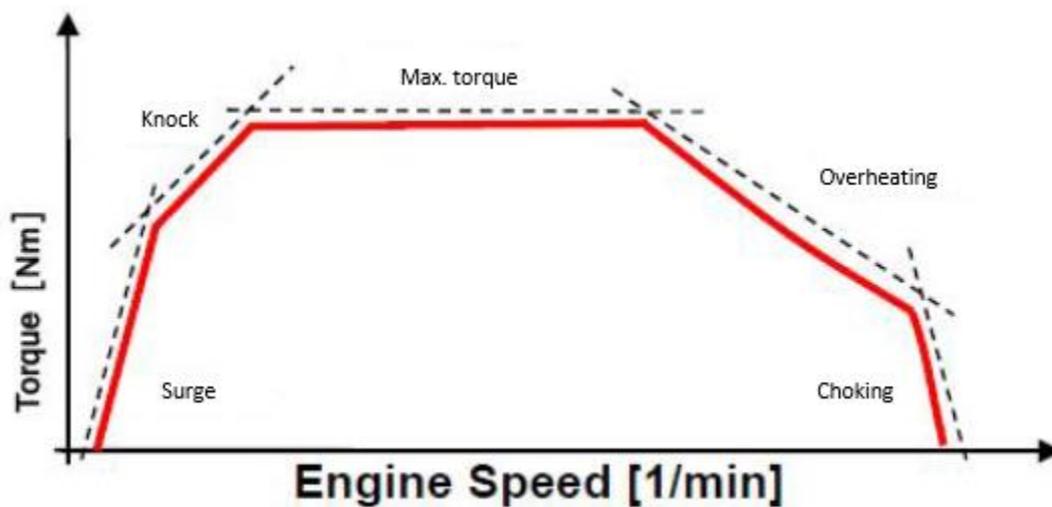


Figura 2.24-Limiti sulla caratteristica massima ottenibile in un motore turbocompresso [46]

Come si può vedere, al variare del numero di giri del motore si ha:

- A bassi regimi si ha una limitazione dovuta ai limiti del compressore, surge o pompaggio, che non è altro che un fenomeno di instabilità che si verifica per elevati rapporti manometrici di compressione (β_c) e portata ridotta. Esso genera un'inversione del flusso all'interno del compressore che può causare l'usura dei componenti interni e un'elevata rumorosità.
- Al crescere della velocità di rotazione del motore, il limite deriva dalla necessità di evitare combustioni anomale. Infatti, minore è la velocità di rotazione del motore e maggiore sarà il tempo necessario affinché il fronte di fiamma possa raggiungere l'end gas.
- Continuando ad aumentare la velocità di rotazione, la limitazione in termini di coppia deriva dalla possibilità di scaricare al suolo la coppia motrice (es. limite di coppia sulla trasmissione).

- Per regimi ancora più elevati i limiti sono legati alla massima potenza termica che gli organi possono sopportare.
- Per regimi di massima rotazione del motore, si ha un'altra limitazione dovuta al compressore, choking, il quale corrisponde al raggiungimento delle condizioni di blocco sonico che causa l'impossibilità di smaltire ulteriori portate, in quanto la velocità non può essere ulteriormente aumentata.

Ovviamente oltre ai limiti fisici sopracitati, il processo di sovralimentazione causa anche dei limiti dovuto al modo in cui esso avviene, i più importanti e noti sono il turbo lag e l'aumento della temperatura della carica nel collettore di aspirazione.

2.5.2.2.1 Turbo lag

Uno dei problemi principali che si ha nell'utilizzo dei sistemi di sovralimentazione turbocompressi è il ritardo di risposta durante i transitori di accelerazione, noto come turbo lag. Alle basse velocità, quando si preme l'acceleratore, a causa della ridotta presenza dei gas di scarico, la turbina non riesce a raggiungere immediatamente la velocità necessaria per generare la compressione dell'aria durante l'aspirazione.

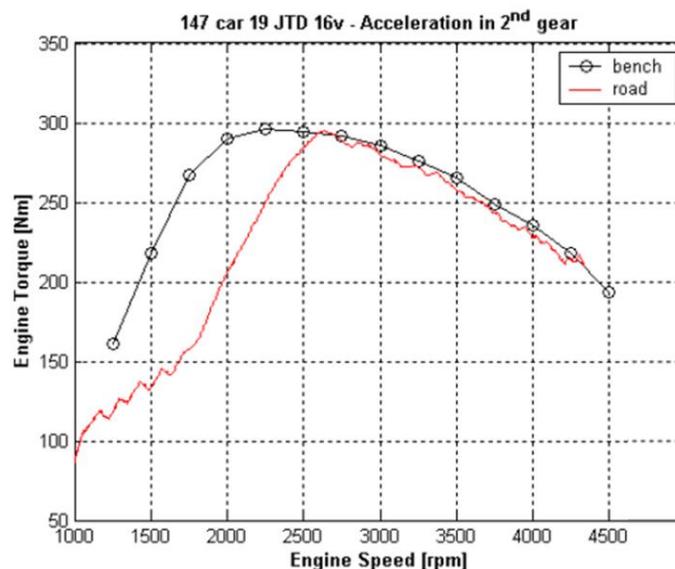


Figura 2.25-Andamento della coppia per un Alfa Romeo 147 1.9 16V JTD in seconda marcia[46]

Questo si traduce in una sensazione di ritardo tra la fase di accelerazione e la fase in cui si riceve il boost da parte del compressore; questo fenomeno può compromettere la guidabilità del veicolo e le prestazioni in fase di accelerazione. Per spiegare meglio quanto detto andiamo a considerare le figure 2.25 e 2.26, nelle quali sono rappresentate rispettivamente la coppia e la pressione di sovralimentazione, per un motore 1900 JTD 16 V in fase di accelerazione in 2° marcia. Le due curve presenti sui grafici indicano le rilevazioni fatte sia su strada che sul banco. Andiamo ora ad analizzare

nel dettaglio la figura 2.25, nella quale si ha in nero la coppia che il motore eroga a banco, mentre in rosso quella che il motore eroga (a parità di condizioni) su strada. Come si nota dal grafico la coppia che il motore eroga ai bassi regimi è molto lontana dalla coppia che il motore è in grado di erogare in condizioni di funzionamento stazionario. Passando ora ad analizzare la figura 2.26, si vede che la linea nera corrisponde alle pressione di sovralimentazione misurabile in condizioni di funzionamento su banco, durante una fase di accelerazione in seconda marcia, mentre la linea verde corrisponde alle condizioni di pressione di sovralimentazione misurabili in condizioni stradali. Si può notare come, anche in questo caso, la curva rappresentante la pressione di sovralimentazione misurata su strada salga con un notevole ritardo rispetto alla curva rappresentante la pressione di sovralimentazione misurabile a banco. Per entrambe le caratteristiche le due curve si sovrappongono solo a circa 2500 rpm. Il ritardo che si nota tra le due curve è il turbo lag che è dovuto alla presenza di 2 transitori, uno fluidodinamico ed uno meccanico. A causa di ciò si ha una risposta di accelerazione molto differente tra le rilevazioni al banco e quelle su strada.

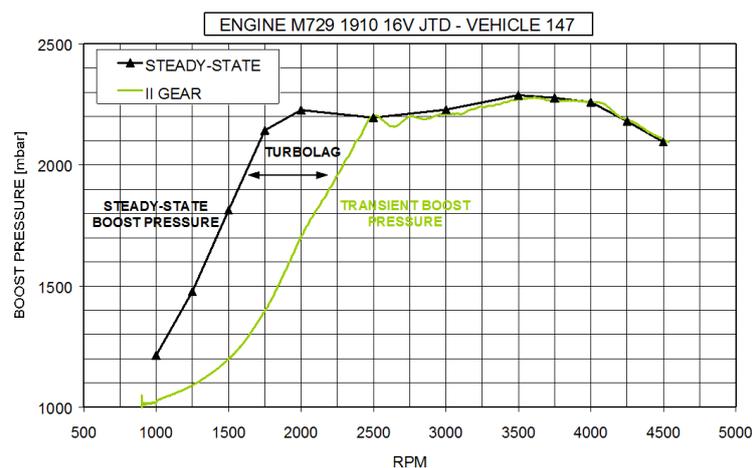


Figura 2.26-Andamento della pressione di sovralimentazione per un Alfa Romeo 147 1.9 16V JTD in seconda marcia[46]

Per diminuire questo ritardo le case automobilistiche cercano di agire in vari modi:

- Riducendo l'inerzia delle parti rotanti, quindi il peso di quest'ultime;
- Utilizzando un turbocompressore elettrico o ibrido, che permetta di colmare il divario di tempo durante le fasi di transitorio;
- Mediante l'ausilio di due turbocompressori disposti in parallelo tra di loro che lavorino in simultanea su ciascuna bancata di un motore a V (Twin turbo);
- Mediante l'utilizzo di due turbocompressori con funzionamento in sequenziale, uno per le basse portate ed uno per le alte;
- Utilizzando due turbocompressori disposti in serie, in modo che si abbia una turbina molto efficiente alle basse portate ed una che lavora solo alle alte portate (Twin stage).

2.5.2.2.2 Refrigerazione della carica aspirata

Durante la fase di sovralimentazione, la compressione della carica fresca è sempre accompagnata da un aumento di temperatura, la quale può ridurre i benefici della sovralimentazione in termini di densità, soprattutto per rapporti di compressione molto elevati. Allora, per evitare di ridurre le performance del motore inserendo in fase di aspirazione dell'aria ad elevata temperatura, è opportuno prevedere un sistema di raffreddamento a valle del compressore in modo da ridurre la temperatura dell'aria a valori attorno ai 40-45 °C. Per spiegare meglio quanto appena detto andiamo ad uguagliare la (2.11) con la (2.13), ottenendo così una nuova definizione di pme :

$$pme = \eta_u \cdot \lambda_v \cdot \rho_a \cdot \frac{H_i}{\alpha} \quad (2.38)$$

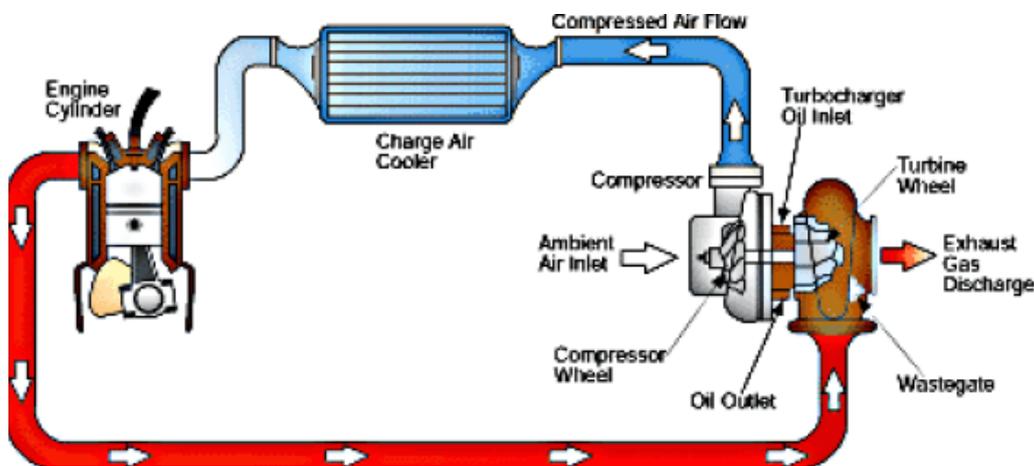


Figura 2.27-Schema esemplificativo di un sistema sovralimentazione con intercooler [58]

Nell'equazione 2.38 gli unici parametri dipendenti dalla sovralimentazione, considerando il rendimento utile costante, sono ρ_a e λ_v . Allora, andando ad applicare le considerazioni (2.33) e (2.34) si ha:

$$pme \propto \frac{p_a}{\sqrt{T_a}} \quad (2.39)$$

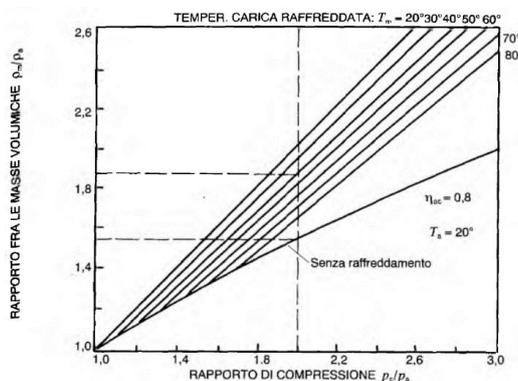


Figura 2.28-Effetto dell'interrefrigerazione sulla massa volumica della carica inviata al motore [56]

Dalla quale si può notare che la pressione media effettiva diminuisce all'aumentare della temperatura, in quanto diminuisce la quantità di aria aspirata dal motore e, conseguentemente, si avrà una riduzione del combustibile iniettato. Nella figura 2.28 viene rappresentata la temperatura dell'aria all'uscita del compressore per alcuni valori della temperatura in ingresso (T_a) e del rendimento adiabatico del compressore η_{ac} , in funzione del rapporto di compressione β_c . Si può notare che per valori del rapporto di compressione inferiore ad 1,5 non si hanno dei vantaggi nell'utilizzare dei sistemi di intercooler (aria-aria o aria-olio), mentre questi sono molto rilevanti per valori del rapporto di compressione superiore a 2. I vantaggi ottenuti mediante l'inter-refrigerazione sono:

- Aumento della quantità di aria aspirata dai cilindri e quindi aumento della potenza motore. Infatti, analizzando la figura 2.28 si vede che per una rapporto di compressione di 2 e una temperatura dopo la refrigerazione di 40°C si ha un aumento dell'aria aspirata di circa il 20% rispetto al caso senza inter-refrigerazione.
- Si riesce a ridurre il livello di temperatura raggiunto durante il ciclo, il che permette di abbassare le sollecitazioni termiche sul gruppo turbocompressore e di ridurre le emissioni di inquinanti (soprattutto NOx).
- Si riesce a migliorare il rendimento organico andando ad aumentare la potenza senza variare i livelli di pressione e quindi le perdite per attrito negli accoppiamenti meccanici.
- Si riduce, nei motori ad accensione comandata, il rischio di detonazione, che è un limite per l'incremento del valore di sovralimentazione nei motori.

2.5.2.2.3 Riduzione del lavoro di pompaggio

È opportuno ricordare che nell'utilizzo dei sistemi di sovralimentazione mediante un turbocompressore non è detto che la fase di ricambio fluido dia sempre un lavoro positivo, a differenza di quello che avviene in un sistema di sovralimentazione a comando meccanico. Infatti, durante la fase di aspirazione, si ha una pressione P_c superiore alla pressione ambiente (P_a). Tuttavia, a causa della presenza della turbina alla fine dei condotti di scarico, si può generare un aumento della laminazione e quindi della pressione allo scarico P_s durante la corsa di espulsione. Questo può andare a creare la situazione in cui la pressione allo scarico sia superiore alla pressione di aspirazione P_c e ciò provocherà un lavoro di ricambio fluido negativo, anche se siamo in presenza di un motore sovralimentato. L'aumento o il decremento del ciclo di ricambio fluido dipende dal rendimento della turbina e del compressore.

2.5.3 Principali tipologie di sovralimentazione mediante sistemi turbocompressi

Prima di addentrarci nei più noti sistemi di sovralimentazione è importante capire come avviene la scelta dei componenti di un sistema turbocompresso al fine di raggiungere gli obiettivi richiesti dalla trazione stradale. Quando un motore viene sovralimentato si realizza un accoppiamento tra 2 macchine le cui caratteristiche di funzionamento sono spesso differenti. Un corretto matching del turbocompresso con il motore dovrà permettere al gruppo di lavorare in modo soddisfacente su tutto il campo d'impiego. Questo accoppiamento, nel caso di un motore stradale, risulta molto difficile rispetto a quello che si verifica su motori adibiti ad altre applicazioni (es. marina), in quanto si ha la necessità di ottenere una curva di coppia decrescente con il numero di giri in modo da permettere un'ottima guidabilità del veicolo e di avere una buona risposta durante le fasi transitorie. Affinché possa avvenire ciò, non deve essere effettuata la scelta del turbocompressore privilegiando la massima potenza, ma bisogna cercare un buon compromesso in modo da avere un buon boost di coppia nel più ampio range di funzionamento possibile. Infatti, più si sposta il range di massima coppia verso le basse velocità del motore e più si migliora la guidabilità, anche se ciò comporta una riduzione della potenza massima.

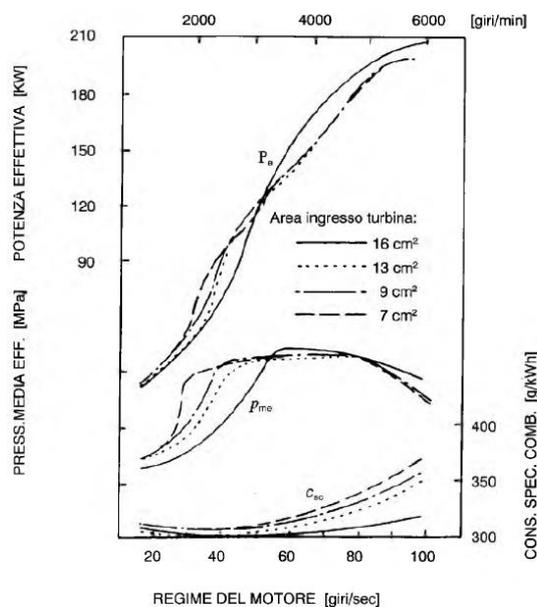


Figura 2.29-Influenza della riduzione dell'area della sezione di ingresso in turbina, sulle prestazioni di un motore sovralimentato [56]

Di solito si cerca di dimensionare la turbina e il compressore in modo da fornire un grado di sovralimentazione accettabile già in corrispondenza del 20-40% della massima velocità del motore, in modo da avere un valore di coppia ai bassi regimi. Tuttavia, così facendo si avrebbe un problema di pressione di sovralimentazione troppo elevata agli alti regimi; per evitare di raggiungere valori critici per i componenti meccanici in gioco, si provvede a scaricare una parte dei gas combusti prima dell'immissione in turbina (o nei motori diesel di aria compressa dopo il compressore). Questo viene realizzato con l'inserimento di una valvola waste gate (WG) che agli alti regimi consente ad una parte

dei gas combusti di by-passare la turbina, riducendo così l'energia trasferita al compressore ed abbassando quindi la pressione di sovralimentazione. Solitamente, la valvola è normalmente chiusa ed è mantenuta in posizione da una molla opportunamente tarata. Sulla parte superiore della valvola agisce un diaframma metallico che divide in due la camera di controllo della WG. Come si vede dalla figura 2.30, la parte superiore della camera è collegata al collettore di aspirazione e, se nel collettore si supera il valore della pressione di taratura della molla, la membrana si apre permettendo il bypass di una parte dei gas sulla turbina che così permette la limitazione della pressione di sovralimentazione. Dal punto di vista energetico, lo scarico dei gas combusti è più conveniente rispetto a quello dell'aria compressa in quanto così facendo si riesce a ridurre la contropressione al motore nelle condizioni di pieno carico, riducendo il lavoro necessario al pistone per l'espulsione dei gas dal cilindro. Ciò permette di utilizzare un turbocompressore con una turbina di dimensioni minori e, quindi, con una minore inerzia delle parti in gioco. L'uso della waste gate permette di incrementare la pressione di sovralimentazione (coppia) ai bassi giri, scegliendo una turbina avente un'area di ingresso di dimensioni ridotte ed aumentando, di conseguenza, il flusso di massa attraverso la waste gate agli alti regimi.

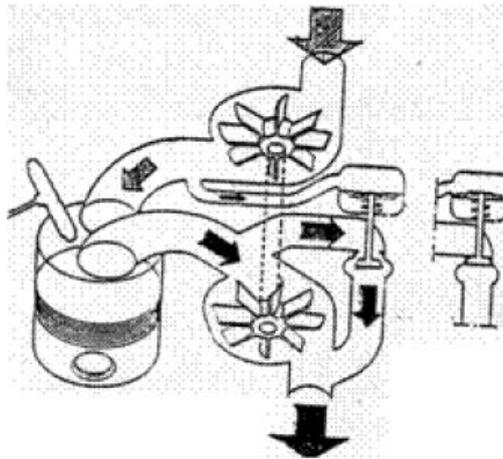


Figura 2.30-Esempio di valvola waste gate [46]

Nella figura 2.29, vengono rappresentati i benefici che si ottengono quando si riduce l'area di ingresso alla turbina per differenti valori (da 16 cm² a 7 cm²). Tuttavia, viene anche riportato lo svantaggio relativo all'aumento dei consumi specifici di combustibile agli alti regimi, a causa delle elevate contropressioni allo scarico prodotte dalle turbine di area più piccola. Per risolvere il problema, un'ulteriore soluzione potrebbe essere quella di usare una turbina a geometria variabile, mediante la quale si varia l'inclinazione della palettatura, andando così ad adeguarsi al regime di rotazione del motore. Al variare della velocità di rotazione del motore o della portata in massa dei gas di scarico si fa variare l'angolo della palettatura del distributore. Seppur si hanno degli innumerevoli vantaggi (è come se si avesse un numero n di turbine installate sul sistema), si ha un'elevata difficoltà di

realizzazione per questa tipologia di turbina e per il relativo sistema di controllo che sia, allo stesso tempo, affidabile e conveniente dal punto di vista economico. Ora, dopo l'introduzione del matching tra turbogruppo e motore, andiamo a considerare le architetture dei più utilizzati sistemi di sovralimentazione odierni in ambito automobilistico, ossia:

- Sistemi Twin Turbo;
- Sistemi Twin Stage;
- Sistemi E-booster.

2.5.3.1 Sistemi Twin turbo parallelo (o bi-turbo)

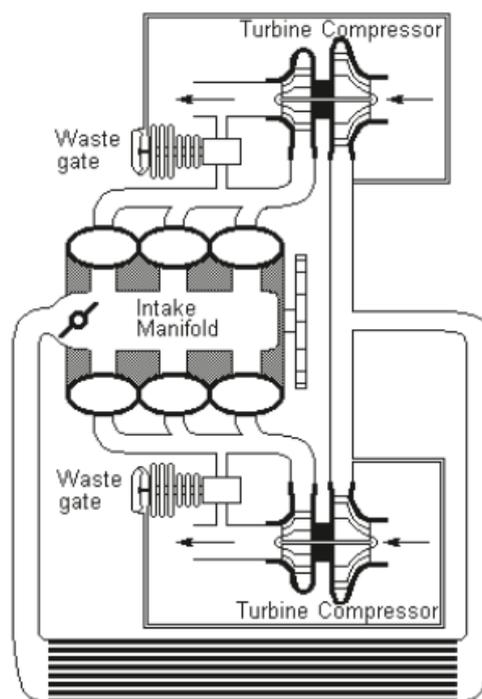


Figura 2.31-Sistema twin turbo [46]

Quando si ha un motore di dimensioni importanti (V6/V8), quindi con un grado di frazionamento molto elevato, può essere utile utilizzare due sistemi di sovralimentazione in parallelo, uno per ogni bancata del motore (es. AR Giulia quadrifoglio), così facendo si riesce a ridurre il fenomeno del turbo lag del 40% utilizzando dei turbogruppi di dimensioni ridotte. È importante notare che, anche per i sistemi bi-turbo, seppur si ha un valore di coppia elevata ai bassi regimi, non si può trascurare il limite fisico dei compressori che si ha alle basse portate, rappresentato dal fenomeno di pompaggio degli stessi (fenomeni di riflusso nel compressore). Se si analizza la figura 2.31, si vede che il sistema è molto semplice. Infatti, ogni turbina è alimentata dallo stesso numero di cilindri, mentre l'aria fresca, dopo essere passata in uno scambiatore di calore, viene convogliata in un unico collettore di aspirazione prima di raggiungere la camera di combustione. Così facendo, le velocità di rotazione dei

due turbocompressori sono relativamente basse rispetto ai sistemi tradizionali, evitando di far lavorare il sistema a velocità di funzionamento elevate, andando così a migliorare il rendimento. Questo tipo di sistema genera molti vantaggi nel caso di utilizzo con motori a V, mentre riduce le sue performance se applicato su altre architetture motore.

2.5.3.2 Sistemi Twin stage

Quando si vuole raggiungere un grado di sovralimentazione molto elevato ($\beta_C = 4 \div 5$), si utilizzano i sistemi di sovralimentazione Two-stage o doppio stadio. Il sistema, come si vede dalla figura 2.32, è composto da 2 turbocompressori di taglia differente connessi in serie, con una valvola di sovrappressione sullo stadio di alta pressione. La turbina e il compressore di HP sono di dimensioni ridotte rispetto alle macchine di LP.

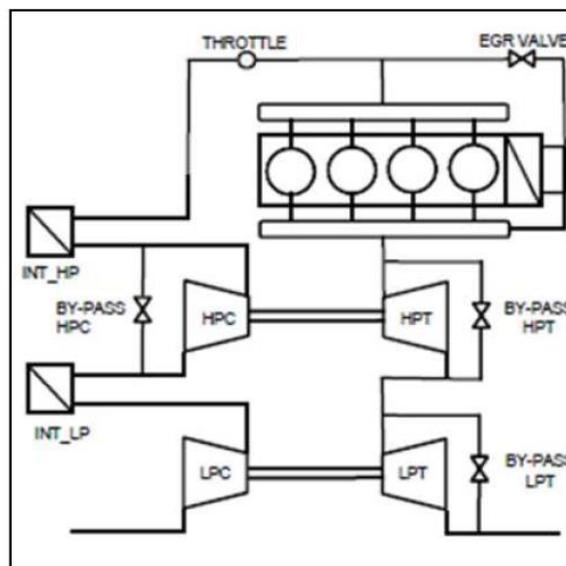


Figura 2.32-Schema di funzionamento sistema Twin Stage Serie [47]

Quando il motore lavora a basse velocità di rotazione, la valvola di by-pass o WG rimane chiusa, così facendo la turbina di HP trascina il compressore (HPC) il quale, essendo di piccola taglia, permette l'elaborazione di basse portate mantenendo un rendimento elevato. Inoltre, le sue ridotte dimensioni permettono di avere una risposta dinamica rapida e quindi di ridurre il turbo lag. Al crescere della velocità di rotazione, raggiunto un valore impostato, la WG si apre consentendo progressivamente, ad una parte dei gas combusti, di bypassare lo stadio di HP e di raggiungere lo stadio di LP. In questo momento, le due turbine dal punto di vista fluidodinamico lavorano in parallelo, mentre i compressori lavorano in serie e così facendo si ha un rapporto manometrico di compressione pari a:

$$\beta_{tot} = \beta_{HP} \cdot \beta_{LP} \quad (2.40)$$

L'utilizzo dei due turbocompressori in serie consente di avere una maggiore flessibilità del sistema e di poter garantire anche un elevato grado di sovralimentazione su un più ampio intervallo di velocità

di rotazione del motore. Se si volesse realizzare lo stesso grado di sovralimentazione con un solo turbogruppo si avrebbero 2 problemi:

- Il motore andrebbe a lavorare in zone lontane da quelle del rendimento massimo sulla mappa del compressore;
- Bisognerebbe cambiare il materiale della girante del compressore a causa dell'elevata temperatura, la quale risulta incompatibile con le specifiche di funzionamento delle leghe leggere (valori attorno ai 200°C).

Una variante dei sistemi Two stage sono i sistemi a due stadi sequenziale-parallelo, rappresentato nella figura 2.33, nel quale non si hanno più due turbomacchine di dimensioni differenti, ma equiparabili. Alle basse velocità (fino a 1800-2000 rpm) è in funzione soltanto il turbo T1, con le valvole VT2 e VC2 chiuse che escludono il turbo T2. Man mano che la velocità aumenta vi è una condizione di transitorio (2000-3000rpm) nella quale viene aperta la valvola VT2 mantenendo chiusa la VC2 ed aprendo, al contempo, la Vrecirc in modo da riuscire a far funzionare a vuoto il compressore C2 ed avviare così il turno T2 prima dell'avvio vero e proprio. Superata la fase di transitorio, a velocità elevate (maggiore di 3000rpm), si ha che entrambi i turbogruppi operano in parallelo, come in un sistema Twin turbo grazie all'apertura delle valvole VC2 e VT2.

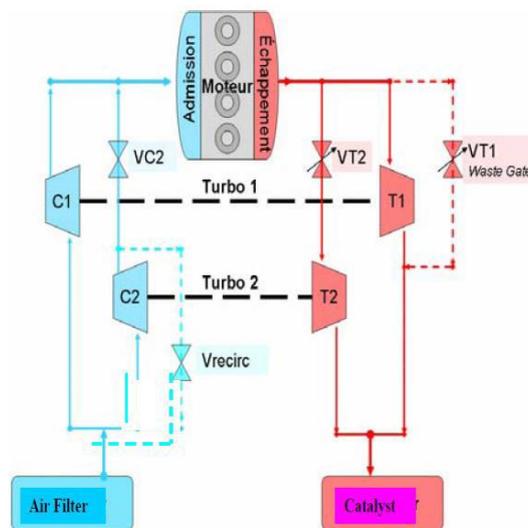


Figura 2.33-Schema di funzionamento Sistema Twin Stage Sequenziale parallelo [46]

Ovviamente, a differenza del classico twin-turbo parallelo, questo sistema offre il vantaggio di poter variare le portate di gas di scarico da elaborare e, di conseguenza, la quantità di aria da iniettare nell'aspirazione motore. Inoltre, si ottiene un sistema in grado di lavorare ad elevata efficienza in un più ampio range di velocità, generando un incremento di potenza del 25% nonché un aumento della coppia a bassi regimi del 30%, oltre ad un netta riduzione del turbo lag[46]. Ovviamente, questo sistema presenta anche 2 svantaggi, non trascurabili:

- Aumento della complessità realizzativa e di gestione del funzionamento del sistema;
- Aumento dei costi di progettazione e realizzazione del sistema di turbocompressione che si vanno a ripercuotere sul prezzo finale del veicolo.

2.5.3.4 Sistemi E-booster

Negli ultimi anni, tutte le case automobilistiche stanno virando alla sovralimentazione assistita elettricamente, la quale permette di ridurre il consumo di carburante e mitigare, se non annullare del tutto, il fenomeno del turbo-lag. Il turbocompressore elettrico noto anche come e-Booster è costituito da un motore elettrico ad alta velocità posto tra la turbina e il compressore. Il dispositivo grazie alla sua bassa inerzia e alle basse perdite meccaniche/elettriche permette una risposta quasi istantanea. Inoltre, mediante questo sistema si aumenta la pressione di sovralimentazione senza generare una contropressione allo scarico. Nella figura 2.34, viene rappresentato uno schema semplificato di un e-booster, nel quale si vede che il motore elettrico, calettato sullo stesso albero tra la turbina e del compressore, compensa le mancanze della turbina durante le fasi di transitorio. Generalmente, nei classici sistemi di sovralimentazione, l'energia dei gas di scarico può essere in eccesso rispetto a quella massima sopportabile dalla turbina. Durante queste fasi, per evitare possibili danneggiamenti ai componenti meccanici, si apre la WG che permette di scaricare l'eccesso di portata proveniente dallo scarico motore.

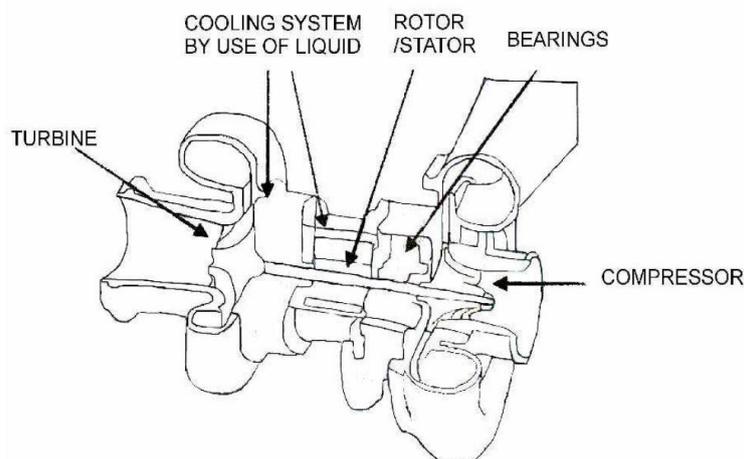


Figura 2.34-Turbocompressore elettrico[49]

Mentre, nei turbocompressori elettrici quando si ha energia in eccesso proveniente dai gas di scarico, invece di essere sprecata attraverso la WG della turbina, viene recuperata dalla macchina elettrica in modalità generatore, che così facendo trasforma il surplus di energia elettrica immagazzinabile negli accumulatori del veicolo.

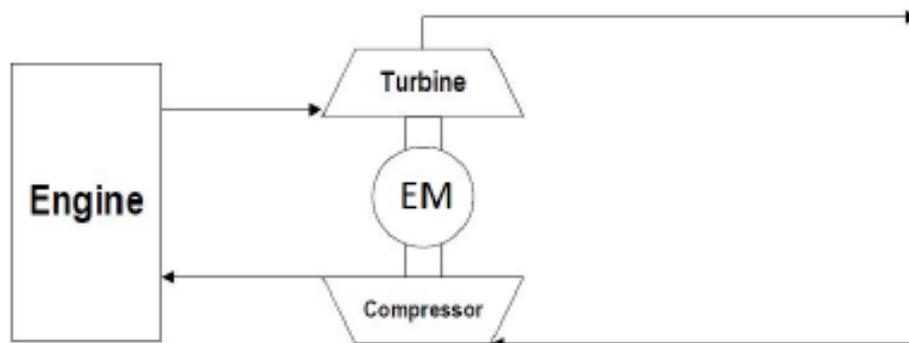


Figura 2.35-Schema di funzionamento di un turbocompressore elettrico [49]

Tuttavia, la chiusura della WG, induce un aumento della contropressione allo scarico e, quindi, un aumento dei consumi, i quali però risultano inferiori rispetto all'aumento della potenza e, conseguentemente, l'efficienza complessiva del motore ICE aumenta. Quanto appena detto può essere riassunto in 3 differenti modalità operative:

1. Funzionamento in fase di accelerazione

Quando il driver preme l'acceleratore, il turbocompressore agisce inizialmente come un compressore meramente elettrico. Il compressore è alimentato dall'accumulatore di energia e gli consente di accelerare fino a raggiungere le condizioni di regime in un breve intervallo di tempo. Questa velocità di accelerazione elimina il ritardo del turbo.

2. Funzionamento durante un surplus di energia (ricarica)

Ad alti regimi del motore, l'energia in eccesso viene generata dalla turbina, a causa dell'elevata portata dei gas di scarico, rispetto a quanto richiesto dal compressore. Questa energia in eccesso viene immagazzinata nell'accumulatore in modo da essere fruibile per la successiva fase di accelerazione o per alimentare i sistemi ausiliari come un sistema di condizionamento elettrico.

3. Funzionamento a regime

In questo caso, durante la condizione a regime il sistema si comporta come sistema di sovralimentazione standard alimentato dai gas combusti provenienti dal motore.

2.6 Legge di alzata delle valvole e vari sistemi di modifica

Come visto nella figura 2.2, le valvole di aspirazione e scarico, si devono aprire e chiudere in determinati momenti del ciclo per permettere il ricambio del fluido di lavoro. Ovviamente, parlando di un ciclo reale, affinché le valvole si aprano e si chiudano, è necessario un tempo fisico necessario per il loro movimento. Per rappresentare ciò, si utilizza il diagramma delle alzate delle valvole che lega il movimento della valvola con l'angolo di manovella del motore (fig. 2.36).

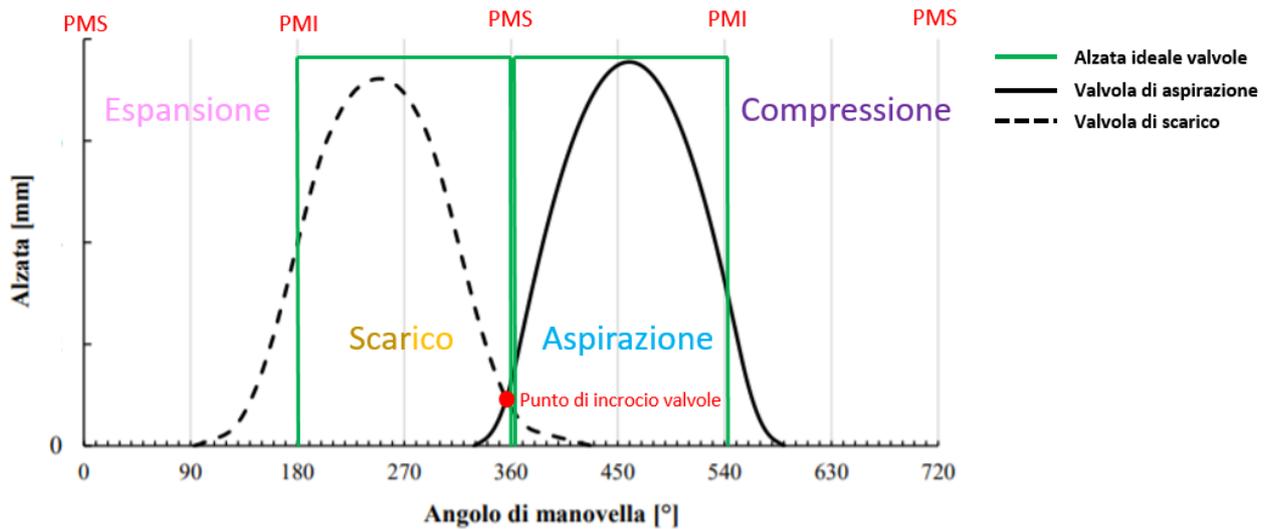


Figura 2.36-Diagramma di alzata delle valvole

Analizzando la figura si riesce ad apprezzare il valore della alzata massima e il profilo di apertura delle valvole. Per evitare che il fluido, durante la corsa di aspirazione, passi attraverso una valvola parzialmente chiusa, si adotta un anticipo di apertura rispetto al PMS e un posticipo di chiusura rispetto al PMI. La stessa cosa viene fatta per la valvola di scarico, ovviamente a parti invertite. Ciò avviene, oltre che per ovvie ragioni fisiche, anche per sfruttare gli effetti dinamici (rifiuto³) durante le fasi di ricambio fluido. Sia l'anticipo che il posticipo saranno determinati dal profilo della camma e saranno quindi fissi in termini angolari:

$$\Delta\theta = w \cdot \Delta t \quad (2.40)$$

Ovviamente tale intervallo angolare corrisponde ad intervalli differenti al variare della velocità di rotazione, quindi il flusso in ingresso (uscita) avrà inerzie differenti a seconda della velocità di rotazione. Ciò comporta che, avendo una fasatura fissa ed avendo dei fenomeni di riempimento sensibili al tempo, si devono effettuare delle scelte di compromesso sul profilo della camma. Infatti, se si ottimizzasse il profilo della camma per velocità di rotazione molto elevate si avrebbe un posticipo di chiusura della valvola di aspirazione molto marcato che permetterebbe di sfruttare tutta l'inerzia presente nel fluido. Tuttavia, quando le velocità di rotazione si abbassano si genereranno i fenomeni dinamici di riflusso che causeranno l'espulsione dal cilindro di una parte della miscela di fluido precedente introdotta. Mentre, se si ottimizzasse il profilo della camma per velocità medio-basse, si andrà a chiudere la valvola di aspirazione in anticipo, evitando sì il problema del riflusso per queste velocità, ma generando un problema di rifiuto a velocità elevate non sfruttando tutta l'energia presente nel fluido. Al fine di evitare le perdite sopracitate si ha bisogno di un sistema che permetta di variare il profilo o almeno l'anticipo e il posticipo di chiusura della valvola di aspirazione. Si

³ Fenomeno per il quale si posticipa la chiusura della valvola di aspirazione rispetto al PMI (fase di compressione) per sfruttare l'inerzia posseduta dall'aria in ingresso al cilindro, prima che si verifichi l'inversione della colonna d'aria dovuta alla risalita del pistone (riflusso).

anticipa la chiusura, proporzionalmente con la riduzione della velocità di rotazione, in modo da evitare il riflusso alle basse velocità e si posticipa la chiusura, proporzionalmente con l'aumento della velocità di rotazione, in modo da evitare il rifiuto alle alte velocità. Per far ciò sono nati, a partire dagli anni 80, i sistemi di fasatura variabile delle valvole o VVT, i quali permettevano di variare la fasatura delle valvole ma non il profilo di alzata (figura 2.37).



Figura 2.37-Principio di funzionamento del sistema di fasatura variabile VVT [59]

2.6.1 Variable valve actuation (VVA)

È chiaro che i sistemi VVT (variable valve timing), sui quali veniva utilizzata una serie aggiuntiva di profili delle camme (Es. Honda VTEC) non riuscivano ad apportare un miglioramento dell'efficienza su tutto il range di funzionamento del motore, ma solo per valori di velocità molto bassi o molto alti. Allora, nei primi anni 2000 sono stati sviluppati i sistemi VVA i quali permettono non soltanto di variare la fasatura ma anche di modificare il profilo alzata delle valvole. I vantaggi che si ottengono attraverso questi sistemi sono:

- Una coppia elevata a bassa velocità di rotazione;
- Un'elevata potenza alla massima velocità di rotazione;
- Riduzione dei consumi di combustibile e conseguentemente delle emissioni inquinanti nelle condizioni di carico parziale (riduzione del lavoro di pompaggio);
- Disattivazione dei condotti di alimentazione e scarico (CDA o controllo della turbolenza).

Nella figura 2.38 vi è un'immagine contenente le differenti strategie di utilizzo di un sistema VVA a seconda delle condizioni operative:

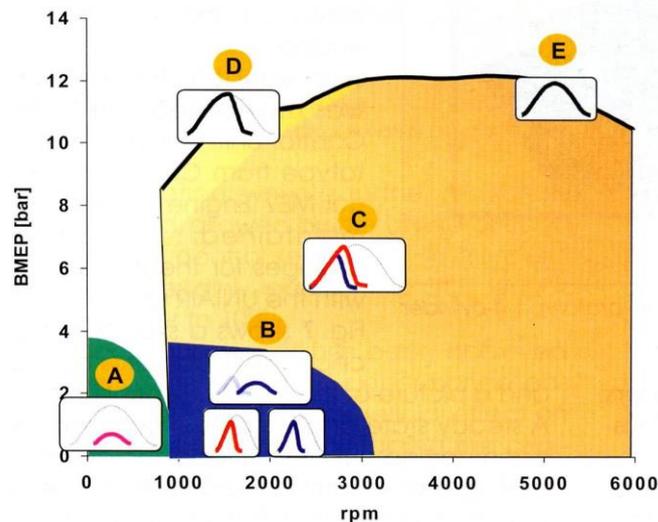


Figura 2.38-Esempio delle varie strategie di alzata mediante un sistema VVA in funzione della caratteristica motore [46]

Andiamo brevemente a discutere i vari casi indicati nel grafico:

- A. Ritardo di apertura della valvola di aspirazione al fine di migliorare la combustione e ridurre il rumore a un basso regime di rotazione del motore e a basso carico (partenze o condizioni di idle).
- B. Chiusura anticipata (EIVC) o apertura ritardata (LIVO) nella zona di bassi carichi per problemi legati alla stabilità della combustione.
- C. Chiusura anticipata (EIVC) per ridurre il lavoro di pompaggio necessario al ricambio fluido.
- D. Chiusura anticipata (EIVC) per evitare gli effetti di riflusso a pieno carico e a basse velocità.
- E. Utilizzo della massima alzata (LIVC) in piena potenza per massimizzare il riempimento.

2.6.1.1 Riduzione del lavoro di pompaggio mediante VVA

L'effetto più importante di un sistema VVA è quello di poter ridurre le perdite di pompaggio ai carichi parziali (fig.2.38-C). Per far ciò si usa una strategia EIVC durante la quale si lascia aperta la VA nella prima fase di aspirazione e successivamente si chiude la VA il più velocemente possibile in modo da ridurre al minimo le laminazioni attraverso di essa.

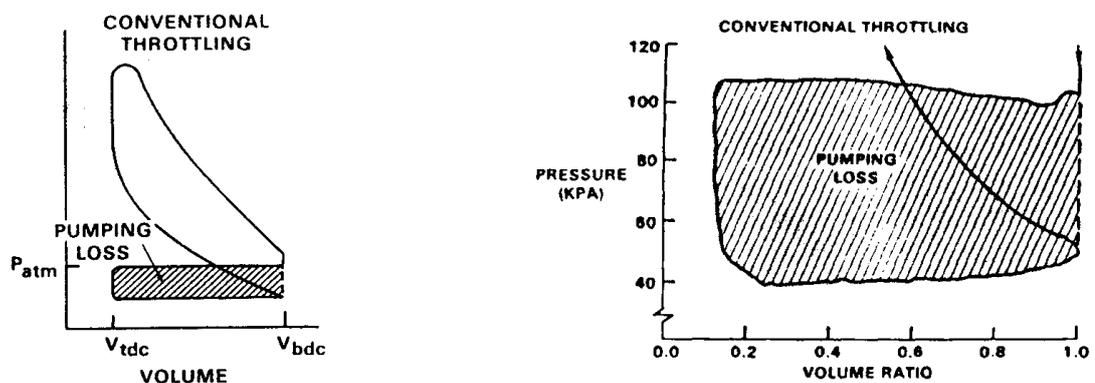


Figura 2.39-Perdite di pompaggio per un motore ICE senza convenzionali [46]

Il risultato ottenuto è visibile nella figura 2.40:

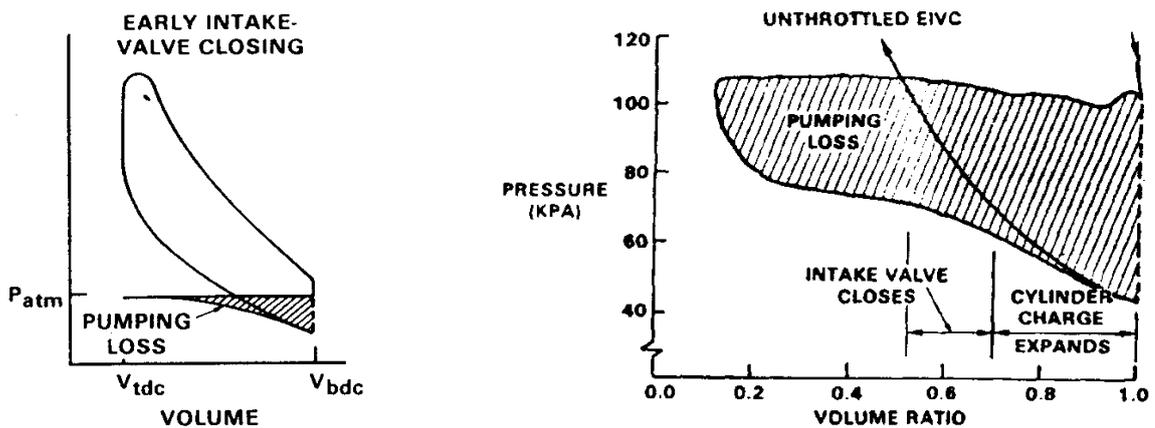


Figura 2.40-Perdite di pompaggio mediante sistemi VVA e strategia EIVC [46]

Se si vanno a confrontare le 2 figure precedenti, si vede un netta riduzione del lavoro di pompaggio quando viene utilizzato il sistema VVA. Tuttavia, l'inconveniente principale di una regolazione EIVC è la dissipazione della turbolenza all'interno del cilindro la quale rallenta il processo di combustione e va quindi a peggiorare l'efficienza della stessa. Ciò si verifica a bassi carichi in prossimità del punto morto inferiore. Quanto detto è facilmente visibile nella figura 2.41. Per ridurre l'effetto di dissipazione della turbolenza si possono utilizzare diversi metodi:

- a) EGR interno;
- b) Modificare le geometrie della testa del cilindro per mantenere la turbolenza della carica (tumble o swirl motion);
- c) Disattivare uno dei condotti di aspirazione ed aumentare così la turbolenza costringendo il fluido a passare attraverso una sola valvola parzialmente aperta (port deactivation).

Dei metodi precedentemente elencati quello più semplice da realizzare è l'utilizzo dell'EGR interno.

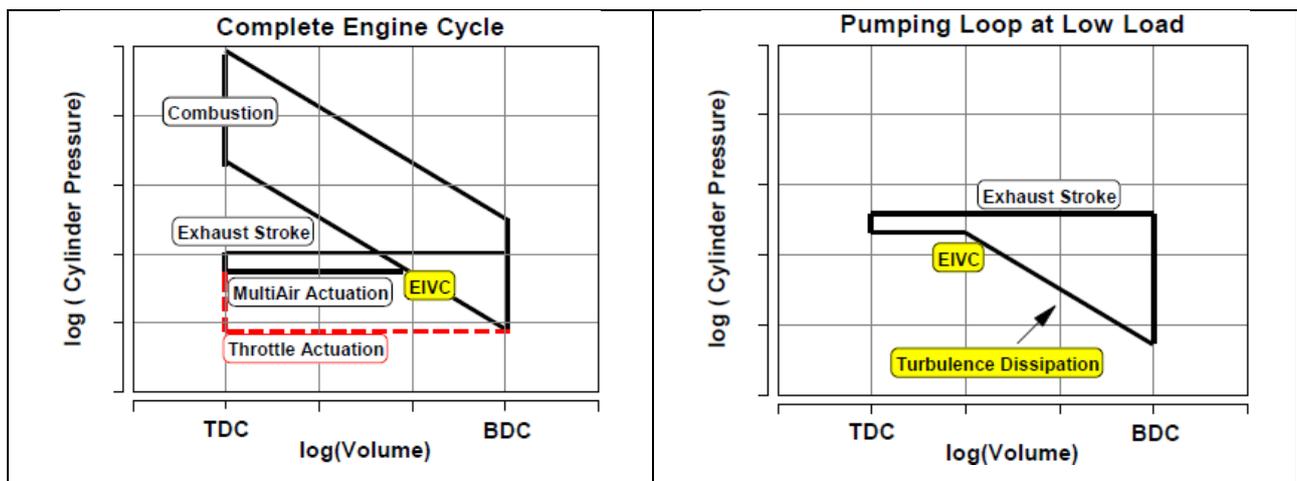


Figura 2.41-Rappresentazione del ciclo di pompaggio a basse cariche [46]

Questo consente significativi intervalli di riduzione delle perdite di pompaggio senza la necessità di utilizzare un anticipo di chiusura della valvola di aspirazione molto marcato. Visto che ci troviamo

nelle condizioni di carico parziale, ha poco senso riempire tutto il cilindro con carica fresca, ma si può introdurre nel cilindro della carica fresca diluita con dei gas inerti. La diluizione della carica mediante EGR, nei motori ad accensione comandata avviene sfruttando la fase di incrocio delle valvole (fig. 2.43). Questo processo, tuttavia, tende ad influenzare negativamente la stabilità della combustione e genera un aumento delle variazioni ciclo-ciclo. Da quanto detto si evince che si deve trovare un giusto compromesso nell'utilizzo dell'EGR affinché si possano ridurre al minimo le perdite di pompaggio ma allo stesso tempo preservare una qualità della combustione accettabile.

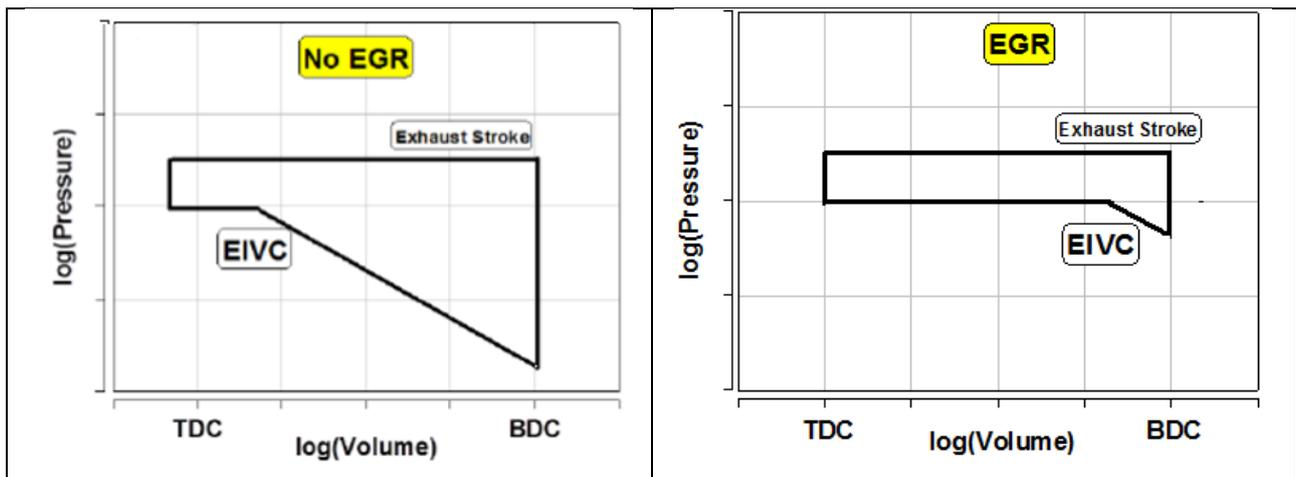


Figura 2.42-Perdite per pompaggio con e senza EGR [46]

2.6.2 Cylinders deactivation (CDA)

Un'altra tecnologia che viene utilizzata per la riduzione del consumo e conseguentemente delle emissioni è la disattivazione dei cilindri o CDA. Il CDA consiste in un downsizing temporaneo, nel quale si disattiva una parte del motore (di solito una bancata) ogni qualvolta che non è richiesta la piena potenza, ossia in condizioni di carico parziale, quando per esempio vengono percorsi tratti urbani.

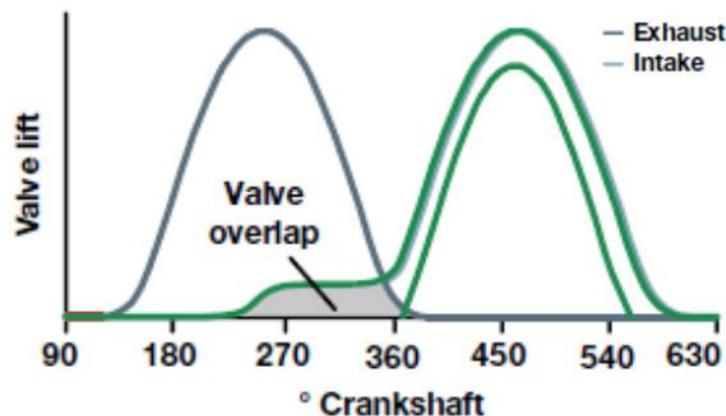


Figura 2.43-EGR interna motori ad accensione comandata [46]

Per far ciò non soltanto si interrompe l'alimentazione del fluido all'interno dei cilindri, ma si mantengono chiuse le valvole di aspirazione e scarico, in modo che il fluido intrappolato all'interno dei cilindri funga da molla a gas e non si vadano a generare perdite per pompaggio, andando a restituire, in espansione, lo stesso lavoro richiesto in compressione (lavoro al ciclo nullo). Come si vede dalla figura 2.44 affinché si possa passare da una modalità "standard" ad una modalità di funzionamento parziale del motore si devono far funzionare i cilindri attivi ad un carico maggiore rispetto a quello normale e, così facendo, si migliora l'efficienza di questi a carico parziale.

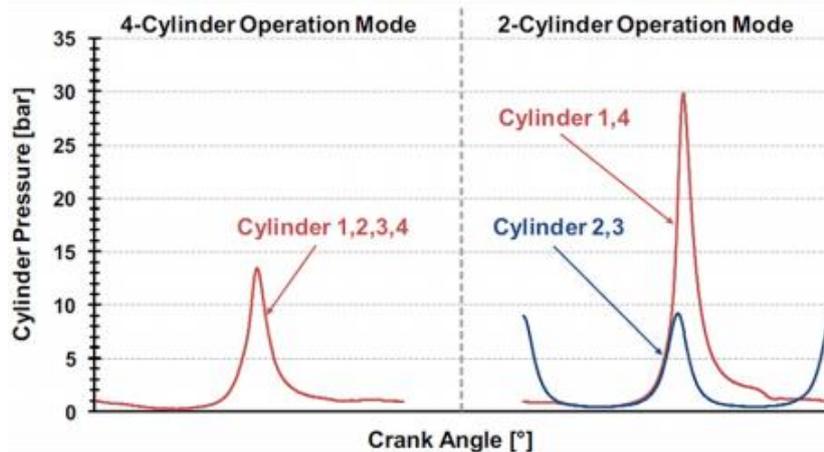


Figura 2.44-Confronto della pressione dei cilindri tra la modalità di funzionamento standard e quella funzionamento parziale [60]

La commutazione tra le varie fasi di funzionamento non è semplice, infatti non soltanto si devono disattivare le valvole dopo l'iniezione (Iniezione-chiusura valvola di scarico-chiusura valvola aspirazione), ma il tutto deve essere combinato con la disattivazione della combustione. Inoltre, l'intero processo deve avvenire senza che vi sia una variazione della coppia percepibile dal guidatore.

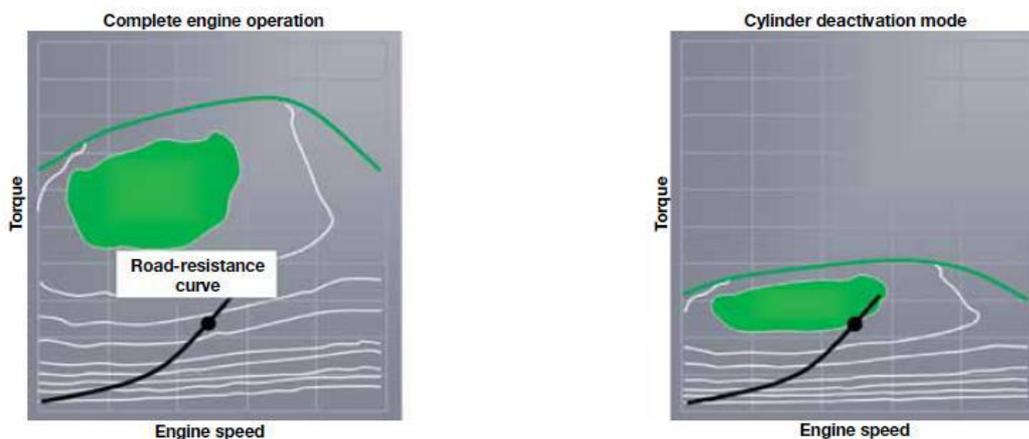


Figura 2.45-Confronto tra le mappe motore con e senza CDA [46]

Quindi, per evitare brusche variazioni di coppia si va a regolare l'anticipo dell'accensione. In particolare, quando l'ECU invia l'impulso del passaggio alla modalità CDA si riduce l'anticipo di accensione e si va ad aprire progressivamente la valvola a farfalla in modo da avere una riserva di coppia da poter utilizzare non appena si riporti l'anticipo di accensione al valore ottimale (MBT) sui

cilindri attivi, ottenendo così il livello di pme voluta senza che vi siano fluttuazioni nella coppia. Come si vede dalla figura 2.46, la disattivazione del cilindro provocherà sempre una pulsazione di coppia a frequenza inferiore e ad ampiezza maggiore sull'albero motore, la quale potrebbe non essere accettabile in tutte le condizioni operative. Quindi per evitare problemi di rumore e/o vibrazioni che possano inficiare il comfort veicolo si deve effettuare la disattivazione dei cilindri solo quando ciò non comporti delle criticità lato NVH.

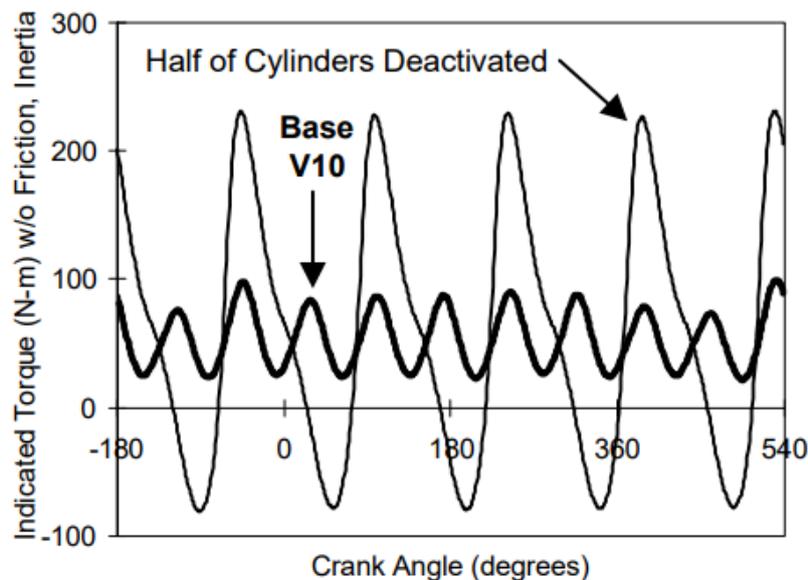


Figura 2.46-Pulsazioni di coppia con disattivazione del cilindro, rispetto alla modalità a 10 cilindri [60]

Questa tecnologia è stata sviluppata attorno agli anni 80, ed inizialmente è stata concepita per applicazioni su motori di grandi dimensioni. Infatti, la riduzione dei consumi per motori V8-V10 è compresa tra il 6 e l'11%. Oggi i sistemi CDA vengono applicati anche su motori di piccole dimensioni con 3 o 4 cilindri. È bene notare che la disattivazione dei cilindri non è un'alternativa ai sistemi VVT, ma entrambi lavorano con lo stesso obiettivo di ridurre le perdite relative al lavoro di pompaggio a carico parziale. Nella figura 2.47 è rappresentata un'immagine di confronto del lavoro di pompaggio con differenti tecnologie. Nella prima figura, in blu, viene indicato il lavoro di pompaggio di un motore 4 cilindri standard. Nella seconda figura, in rosso, è rappresentato il lavoro di ricambio fluido utilizzando un sistema VVT con un sistema di regolazione EIVC (paragrafo 2.6.1.1) che permette una notevolmente riduzione delle perdite rispetto al motore base. In questo secondo caso le perdite rimanenti sono dovute alla laminazioni attraverso le valvole che si hanno a causa del basso carico motore. Quando si attiva la modalità CDA a 2 cilindri (area arancione) le valvole sono chiuse e quindi, durante la fase di ricambio fluido, i cilindri disattivi non contribuiranno al lavoro di pompaggio. Tuttavia, il carico richiesto dai cilindri attivi è più che raddoppiato e la durata dell'apertura della valvola di aspirazione deve essere per ovvie ragioni prolungata.

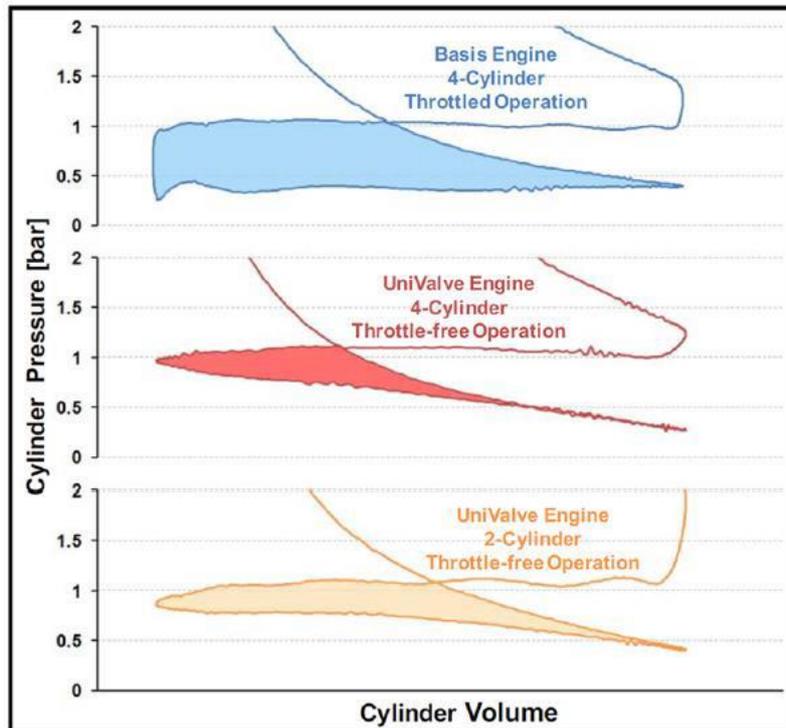


Figura 2.47-Confronto tra i lavori di pompaggio per un motore 1600 cm³, 4 cilindri @2000 rpm - 2bar [46]

Questo è contemporaneamente accompagnato da un picco di sollevamento che genera minore perdite dovute al trafilamento attraverso le valvole del cilindro. In conclusione, la disattivazione dei cilindri, può essere utilizzata anche in abbinamento ad un sistema di controllo EIVC, andando così a generare dei benefici anche solo parziali.

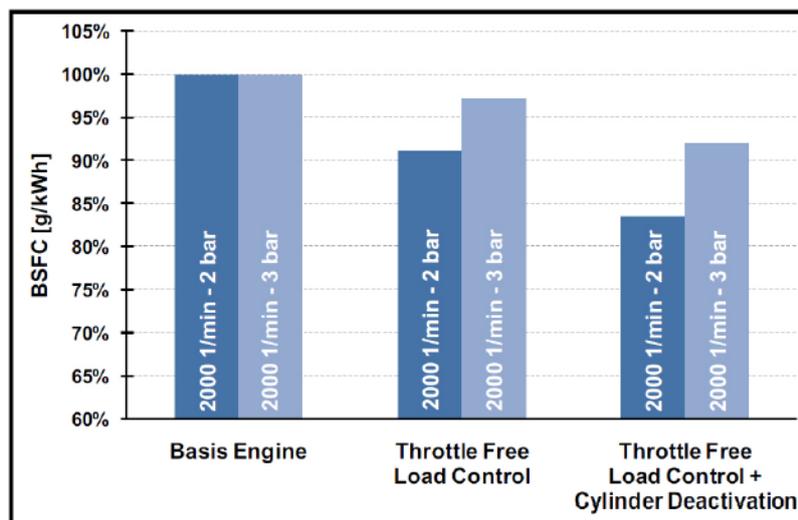


Figura 2.48-Riduzione dei consumi con le diverse tecnologie applicate su un motore 1600 cm³, 4 cilindri @2000 rpm - 2 e 3 bar [46]

Nella figura 2.48 viene rappresentato un'estrapolazione dalle mappe motore di un 1600cm³ 4 cilindri con le diverse tecnologie e con differenti valori di carico. Come si vede, con l'utilizzo del solo sistema VVT, si genera una riduzione di consumo di circa l'8%. Invece, se si va ad aggiungere anche la disattivazione dei cilindri si passa ad una riduzione dei consumi di circa il 16% rispetto al motore

base. Tuttavia, all'aumentare del carico, si ha una riduzione meno marcata dei consumi (dal 3% all'8%) a causa delle alte pressioni presenti nei cilindri attivi, che porta a ritardare l'anticipo di accensione al fine di evitare il knock, allontanandosi dalla fasatura ottimale e penalizzando di conseguenza i consumi. Invece, se proporzionalmente al carico si andasse ad aumentare anche il numero di giri del motore, si andrebbe a spostare anche il limite superiore del carico motore ristabilendo di nuovo i vantaggi in termini di riduzione dei consumi visti per valori inferiori di carico con i sistemi CDA.

2.6.3 Ciclo termodinamico Miller/Atkinson

Quando si parla del ciclo dei motori ad accensione comandata, si pensa subito al ciclo Otto (paragrafo 2.2.3), il quale è caratterizzato da un'unica fase in cui si produce energia (l'espansione) e da 3 fasi passive le quali assorbono energia. Quindi la massima potenza utile sviluppata da un motore a 4T Otto è pari alla differenza tra la potenza prodotta in fase di espansione e le potenze assorbite durante le altre 3 fasi del ciclo.

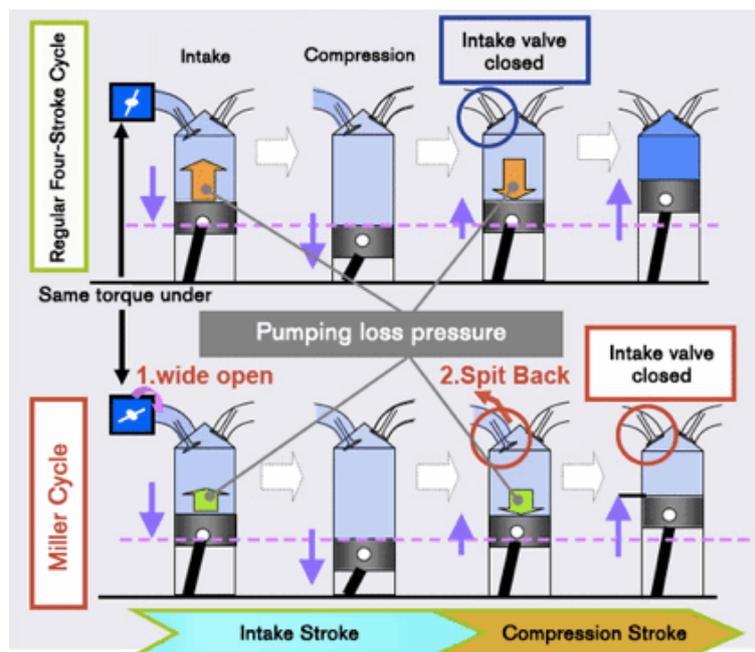


Figura 2.49-Confronto tra un ciclo tradizionale ed un ciclo Miller per un motore 4T [52]

Al fine di migliorare ciò sono nati cicli alternativi a quello Otto come il ciclo Miller-Atkinson, che ha come obiettivo quello di ridurre le fasi nelle quali si dissipa l'energia. Infatti, esso è caratterizzato da un rapporto di espansione differente al rapporto di compressione, in modo tale da ridurre al minimo le perdite durante quest'ultima fase e migliorare, quindi, l'efficienza del motore. Inizialmente, per generare le due differenti fasi del ciclo, si utilizzavano particolari manovellismi (Atkinson). Oggi, grazie all'avvento dei VVA si raggiunge lo stesso obiettivo applicando diverse strategie di apertura e chiusura della valvola di aspirazione. Inoltre, in questo modo, tutti i motori Otto possono funzionare mediante il ciclo Miller. Di solito le strategie utilizzate sono 2, visibili in figura 2.50:

- LIVC, si posticipa la chiusura in modo da far uscire per riflusso una parte della carica attraverso la valvola di aspirazione. In questo modo il pistone incontrerà meno resistenza durante la salita richiedendo un lavoro di compressione inferiore al lavoro di espansione. Così facendo, inoltre, si riescono a ridurre le perdite per laminazione ai carichi parziali.
- EIVC, si anticipa la chiusura della valvola di aspirazione in modo tale da ridurre il riempimento del cilindro e quindi la pressione di compressione. In questo modo, si evita il rischio di detonazione quando si utilizzano sistemi di sovralimentazione.

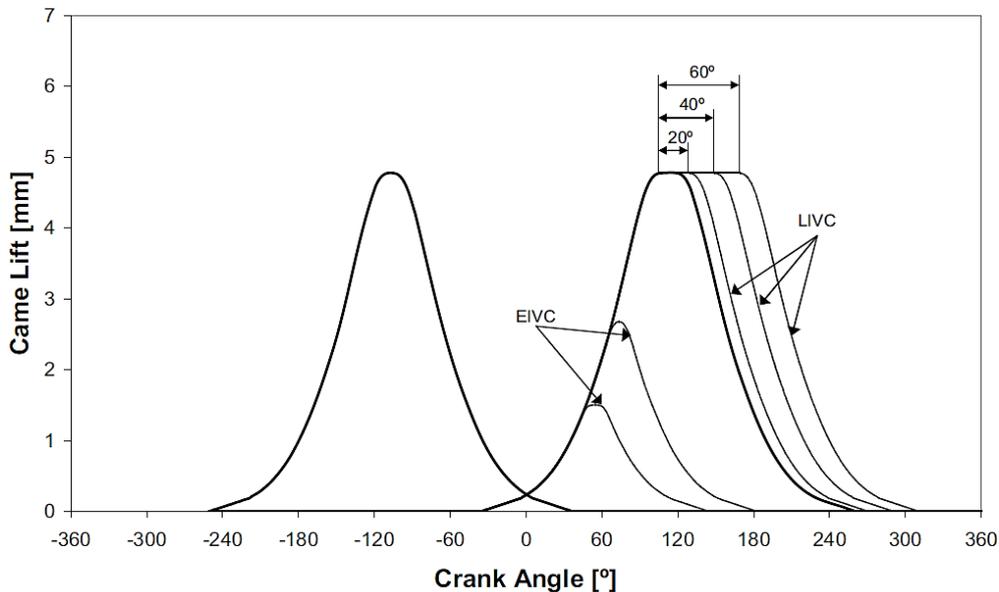


Figura 2.50-Profili di fasatura delle valvole del ciclo Miller di EIVC o LIVC [53]

Utilizzando questo ciclo si ottengono principalmente 2 effetti:

- Un aumento del rendimento;
- Una riduzione della potenza (7-10%);

Entrambi gli effetti generano una riduzione dei consumi e quindi delle emissioni. Il problema della minore potenza si potrebbe risolvere con un sistema di sovralimentazione. Tuttavia, nel caso dell'utilizzo di un sistema di sovralimentazione alimentato dai gas di scarico, a causa della minore pressione dei gas, si rischia di non ricavare sufficiente potenza da questi ultimi. Invece, introducendo un sistema di sovralimentazione volumetrica, bisogna capire se l'aumento di potenza generata dal compressore è maggiore rispetto alla potenza persa a causa del collegamento meccanico tra il motore e il compressore. Da quanto detto si può intuire perché il ciclo Miller è associato ai veicoli ibridi elettrici: grazie all'ausilio di un motore elettrico si riesce a recuperare una parte della potenza trasformata dal ciclo in maggiore efficienza. Concludendo, usando il Ciclo Miller si riesce ad ottenere una miscela omogenea con una minore quantità di benzina meglio nebulizzata, una minore temperatura dei gas di scarico e meno lavoro meccanico; il risultato è un aumento dell'efficienza e una riduzione dei consumi. Tuttavia, i vantaggi elencati portano anche a una riduzione della potenza

generata dal motore. In sostanza, in proporzione alla quantità di aria che si immette nel cilindro attraverso l'apertura della valvola di aspirazione, il motore si comporta come un propulsore di cilindrata inferiore. Questo porta inevitabilmente ad una perdita di potenza che viene compensato o dall'utilizzo di un piccolo compressore o dall'aggiunta della trazione elettrica.

2.7 Utilizzo dei motori ICE sui veicoli ibridi

Le tecnologie più utilizzate dai vari OEM affinché si possa utilizzare il motore ICE sui veicoli ibridi, andandone così ad aumentare l'efficienza complessiva sono molteplici. Ovviamente, queste tecnologie non sono state sviluppate appositamente per la propulsione ibrida, ma mediante essa sono riuscite ad ottenere una spinta preponderante in termini di investimenti e, quindi, di sviluppo. La tecnologia che negli ultimi anni si è più legata a doppio filo all'ibridazione elettrica è il downsizing. Questo non è altro che una riduzione della cilindrata del motore con compensazione delle perdite di potenza mediante la sovralimentazione e le tecnologie ad essa collegate.

2.7.1 Introduzione al downsizing e alle varie tecnologie associate

Si è erroneamente portati a pensare che più un motore ha cilindrata maggiore e più esso sia potente. Tuttavia, grazie al downsizing e alle tecniche associate, si riescono a raggiungere le stesse prestazioni del propulsore originale con un motore di cilindrata minore sovralimentato. Così facendo si riesce a far lavorare il motore a carico maggiore e a una velocità di rotazione minore, in modo che si possa lavorare nella zona avente dei rendimenti maggiori.

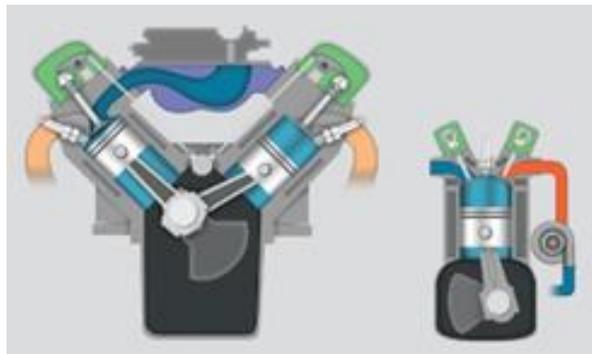


Figura 2.51-Confronto tra un motore 3.0 V6 aspirato @200 CV Vs motore 2.0 L4 turbo @200 CV [57]

La ridotta dimensione del motore permette che vi sia un minore volume spazzato dal pistone durante il suo moto alterno, con la conseguente riduzione degli attriti e del peso finale del veicolo. Il tutto genera una riduzione dei consumi di combustibile e delle emissioni le quali devono essere rispettate per legge ma, a causa della sempre più alta consapevolezza da parte del cliente finale sul riscaldamento globale, possono rilevarsi come una forte spinta in termini di marketing per le vendite finali dei veicoli.

2.7.2 Sistemi correlati al processo di downsizing

E' obsoleto parlare solo della sovralimentazione quando si parla di downsizing, in quanto l'utilizzo di questa tecnologia senza alcun dispositivo supplementare porta pochi vantaggi. Di seguito, sono elencate le tecnologie comunemente associate al processo di ridimensionamento del motore. Per semplicità possiamo dividerle in 2 categorie: interne ed esterne. Come si può immaginare, le prime si riferiscono alla modifica esterna o a un sistema che viene aggiunto al motore, mentre le seconde si riferisce a una modifica della strategia di combustione effettuata all'interno del cilindro.

- Esterne:
 - 1) Sistemi di sovralimentazione;
 - 2) Sistemi di fasatura variabile delle valvole (VVT);
 - 3) Sistemi di disattivazione del cilindro.
- Interne:
 - 1) Cicli termodinamici non convenzionali (Miller, Atkinson, ecc.)

Ovviamente quelle precedentemente elencate non sono tutte le tecnologie/strategie implementabili per apportare un processo di downsizing, mancano l'HCCI, il dynamic skip fire, il waste heat recovery, ecc., ma sono quelle più inerenti al lavoro di tesi.

2.7.3 Esempio di downsizing sul motore ICE

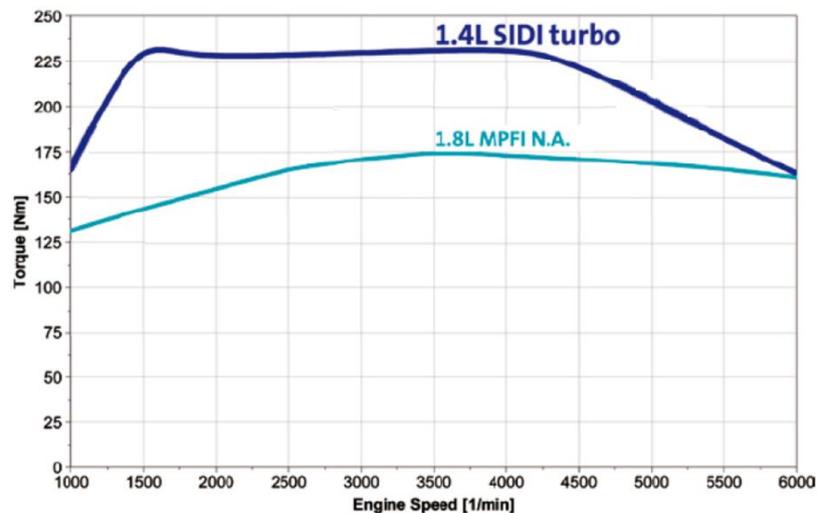


Figura 2.52-Confronto tra le caratteristiche di coppia tra 1.4TC Vs 1.8NA [46]

Andiamo a considerare ora un esempio concreto di downsizing, andando ad analizzare i vantaggi ottenuti dal processo di riduzione della cilindrata motore passando da un 1.8 NA ad un 1.4 turbocompresso (figura 2.52). Infatti, la possibilità di ottenere dei benefici in termini di riduzione dei consumi e/o di incremento del rendimento è legato al grado di downsizing o DownSizing Factor,

definito come il rapporto tra le cilindrata del motore originale e quelle del motore ridimensionato, confrontate a parità dello stesso profilo missione.

$$DSF = \frac{V_{NA}}{V_{downsizing}} \quad (2.41)$$

Per il confronto sopracitato utilizziamo come profilo missione il vecchio ciclo omologativo per i light duty l'NEDC. Questo ha delle specifiche richieste di velocità del veicolo, indipendentemente dal motore utilizzato. Quindi, applicando i due motori con cilindrata differenti sullo stesso veicolo, sul ciclo NEDC i punti di funzionamento avranno la stessa velocità di rotazione del motore, ma valori di PME più elevati per il motore a cilindrata ridotta. Ovviamente, se si andasse ad effettuare un confronto tra i piani quotati dei 2 motori, considerando la stessa PME per entrambi, il 1.4 turbo avrebbe un rendimento inferiore rispetto al 1.8 aspirato. Per evitare di effettuare un confronto poco realistico, avendo un ciclo a velocità imposta, si deve effettuare il confronto tra i 2 motori non in funzione della PME ma in funzione della coppia (figura 2.53).

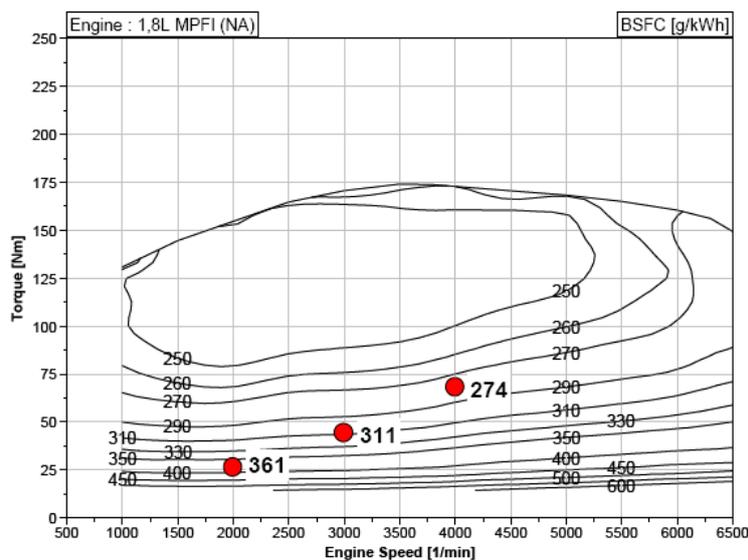


Figura 2.53-Piano quotato motore 1.8 NA (MPFI, Multipoint Port Fuel Injection) [46]

Il confronto dei 2 motori viene fatto per 3 differenti valori di velocità di rotazione e per gli stessi valori di coppia, quanto detto è visibile nelle figure 2.53 e 2.54:

- 2000 rpm: in questo caso il consumo specifico del motore passa da 361 g/KWh a 346 g/KWh con una riduzione sul consumo superiore al 4%.
- 3000 rpm: in questo caso il consumo specifico del motore passa da 311 g/KWh a 308 g/KWh con una riduzione sul consumo pari a circa l'1%.
- 4000 rpm: in questo caso il consumo specifico del motore passa da 274 g/KWh a 284 g/KWh con una aumento del consumo di circa il 4%.

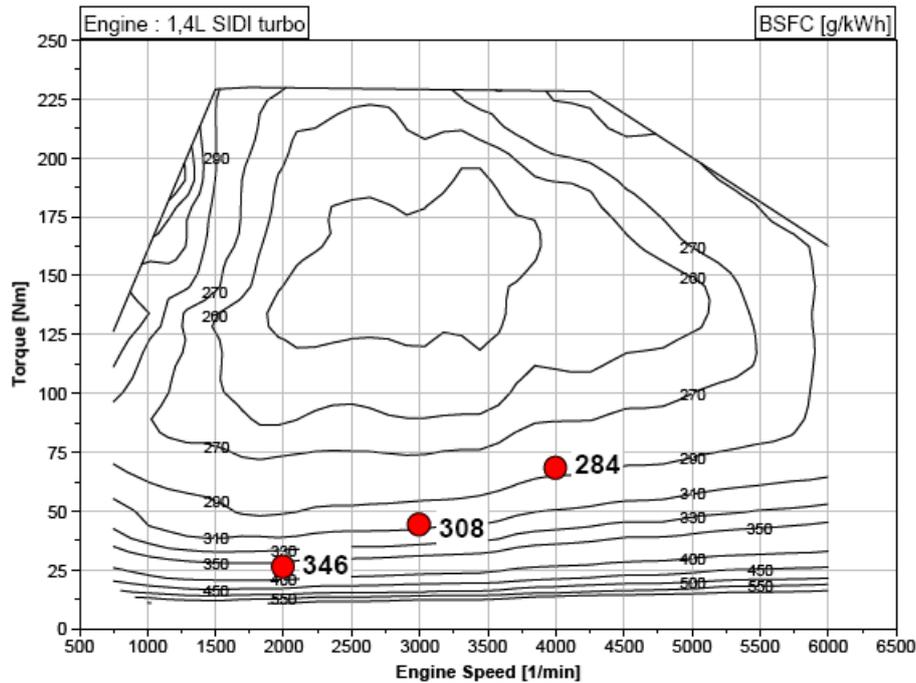


Figura 2.54-Piano quotato motore 1.4 TC [46]

Dall’analisi appena effettuata è facile comprendere che: salendo di giri e di coppia, il motore sovralimentato tende ad avere un consumo specifico maggiore rispetto al motore aspirato, da ciò si può dedurre che il vantaggio del downsizing si ottiene quando si fa lavorare il motore a bassi valori di coppia. Quanto detto è visibile nella figura 2.55, nella quale è stato fatto un confronto tra i due motori a parità di coppia.

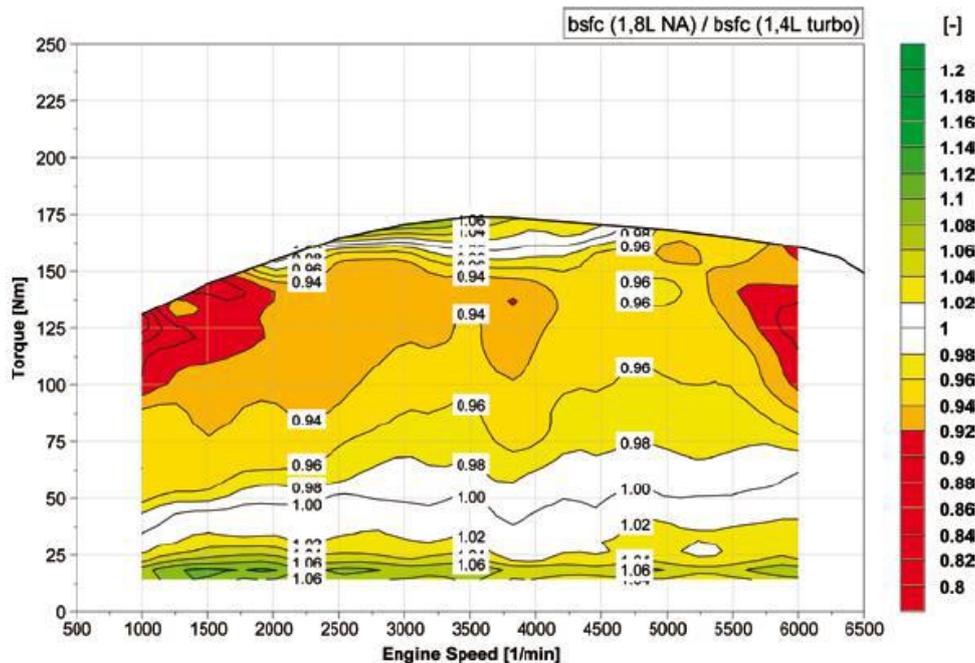


Figura 2.55-Confronto tra le mappe motore dei due motori a parità di coppia e velocità angolare [46]

Dalla figura precedente, si vede che si hanno dei benefici per effetto del downsizing indicato dalle zone verdi, mentre l’utilizzo della sovralimentazione comporterà un aumento dei consumi per elevati valori

di coppia, zone in rosso. Ovviamente, facendo un unico confronto tra motori, non si riesce a capire se al variare del DSF aumentano o diminuiscono i consumi. Dalla letteratura, si evince che maggiore è la riduzione della cilindrata e maggiore saranno i benefici. Quanto detto è visibile analizzando la figura 2.56, nel quale vengono effettuati dei confronti tra differenti cilindrata motore.

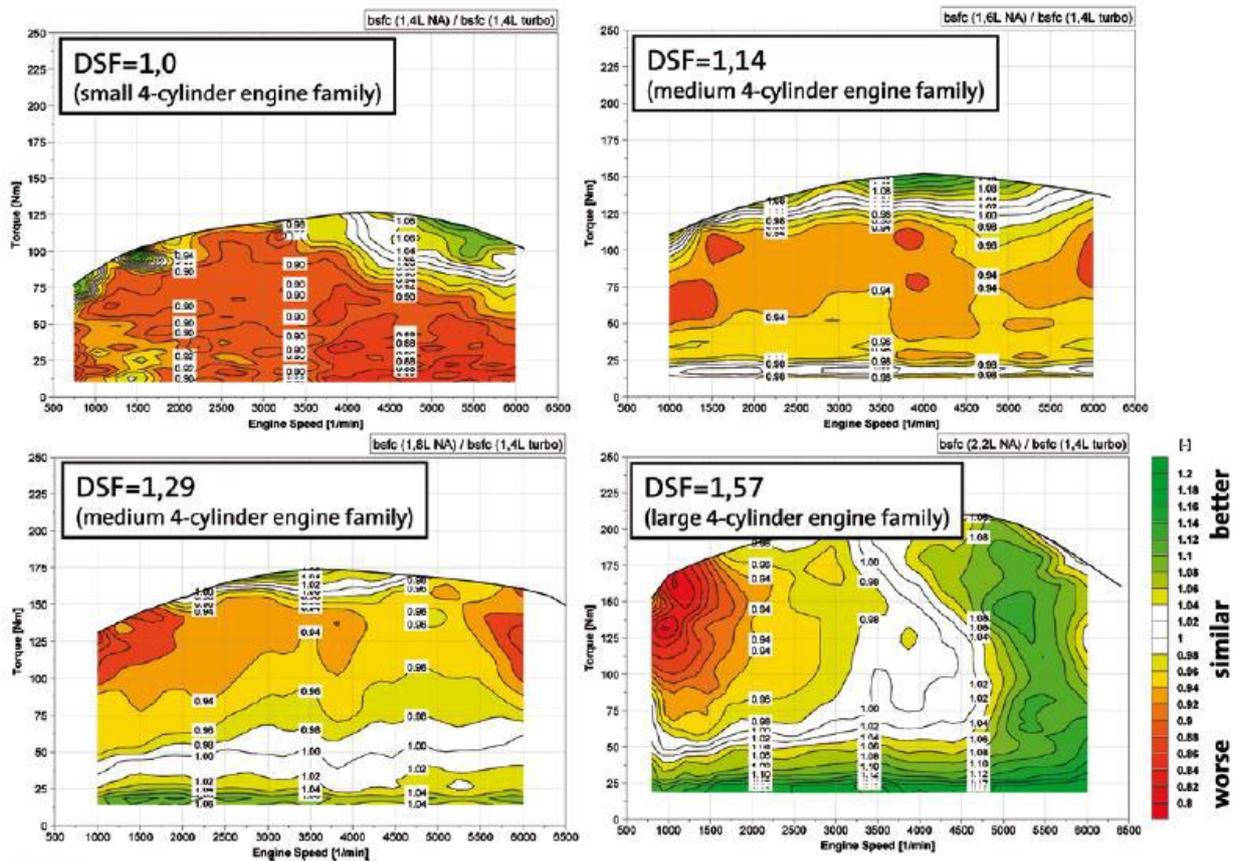


Figura 2.56-Impatto del DSF sulla riduzione dei consumi [46]

Concludendo possiamo affermare che con un motore di cilindrata ridotta si hanno minori perdite in termini di attrito grazie alle minori superfici a contatto, minori perdite meccaniche, anche se in maniera non proporzionale rispetto alla cilindrata e, in generale, minori perdite per pompaggio che, come detto in precedenza, dipendono dalle condizioni operative e variano al variare del sistema di sovralimentazione utilizzato. Grazie al downsizing si possono avere dei vantaggi nel consumo di carburante (e quindi delle emissioni di CO₂) compresi tra il 10% e il 30% a seconda del grado di ridimensionamento e del processo di combustione. Oggi è normale trovare nel listino delle case automobilistiche dei veicoli aventi un motore turbocompresso ad iniezione diretta con VVT con una cilindrata ridotta anche a valori inferiori a 1 litro. Questi veicoli raggiungono i vantaggi sopradescritti, soprattutto durante l'utilizzo urbano, quando si riesce a far lavorare il motore a basse velocità di rotazione e alto carico, ossia nelle zone con rendimento massimo.

Capitolo 3

Trasmissione nei veicoli tradizionali ed ibridi

3.1 Introduzione

Prima di addentrarci nel mondo delle trasmissioni, bisogna capire perché sia necessario il drivetrain all'interno di un veicolo. Per far ciò, si deve partire dall'equazioni di base della dinamica longitudinale e dalle forze agenti sul veicolo durante il moto. A seguito della richiesta di coppia da parte dell'utilizzatore, affinché un veicolo si possa muovere, deve essere generata dal gruppo propulsore una potenza tale da vincere le forze che si oppongono al moto. Andiamo di seguito a calcolare, in maniera approssimata, la potenza resistente totale che si oppone al moto del veicolo, la quale, è composta prevalentemente da 4 fattori:

- 1) Resistenza aerodinamica;
- 2) Resistenza al rotolamento;
- 3) Resistenza alla pendenza stradale;
- 4) Resistenza all'accelerazione;

Di seguito si analizzerà nel dettaglio quanto sopra elencato.

3.1.1 Resistenza aerodinamica

Quando un veicolo si muove dentro un fluido qual è l'aria, trova resistenze che si oppongono al moto. La resistenza aerodinamica F_L , dal punto di vista fisico si considera come un attrito di tipo viscoso causato dall'aria che circonda il veicolo; tale resistenza è causata dalla sovrappressione che si genera nella parte anteriore del veicolo e dalla depressione che si forma nella parte posteriore. Dal momento che nel veicolo le resistenze frontali sono maggiori rispetto agli attriti laterali che si formano lungo le fiancate, i termini di attrito dovuti a questi ultimi si trascurano. [8] La resistenza aerodinamica si può calcolare come:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_l C_x A v^2 \quad (3.1)$$

Dove:

C_x = *coefficiente di resistenza aerodinamica frontale*

ρ_l = *densità dell'aria* $\left[\frac{Kg}{m^3} \right]$

A = *Sezione frontale del veicolo* $[m^2]$

v = *la velocità del veicolo* $\left[\frac{m}{s} \right]$

Dalla formula (3.1), si può notare che la resistenza è proporzionale al quadrato della velocità; quindi incrementando la velocità, per esempio su percorsi extraurbani o autostradali, detta forza costituisce la resistenza maggiore al moto del veicolo. L'unico metodo per diminuirla, è avere un buon design aerodinamico, in modo che si possa diminuire il valore del C_x [8].

3.1.2 Resistenza al rotolamento

La resistenza al rotolamento è dovuta al movimento relativo dello pneumatico rispetto alla sede stradale; a bassa velocità essa rappresenta il maggior contributo della resistenza totale [8]. La resistenza al rotolamento è pari a:

$$F_R = m_F g f \quad (3.2)$$

Dove:

m_F = massa del veicolo [Kg]

g = accelerazione di gravità $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

f = coefficiente di resistenza al rotolamento

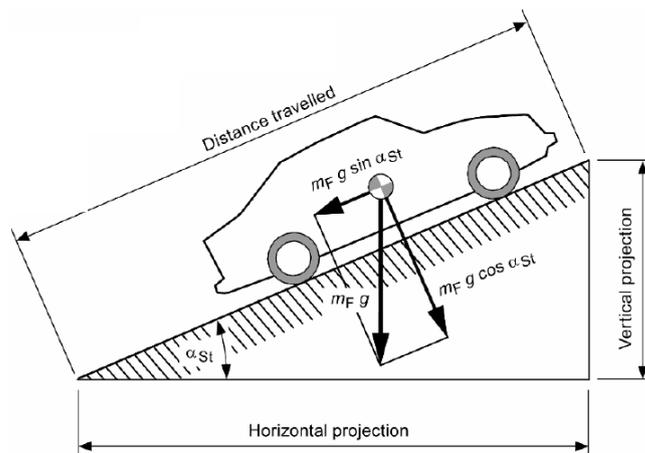


Figura 3.1 - Forze che agiscono sul veicolo che viaggia in salita [13]

Andando a considerare il veicolo come un corpo puntiforme e analizzando la Figura 3.1 si può riscrivere la formula (3.2) come:

$$F_R = m_F g f = f m_F g \cos \alpha_{ST} = f P \cos \alpha = f P_N \quad (3.3)$$

Dove:

α_{ST} = pendenza della strada [°];

3.1.3 Resistenza alla pendenza stradale

Nel caso in cui la macchina si muova su una strada in pendenza (Figura 3.1), bisogna tener conto della resistenza all'avanzamento che si viene a generare. In realtà, la pendenza ha un effetto doppio, infatti, oltre a generare una forza che si oppone al moto, nel caso in cui tale pendenza sia negativa,

può favorire quest'ultimo facendo diminuire la resistenza al rotolamento, riducendo il carico del veicolo perpendicolarmente al suolo. [8] La resistenza alla pendenza stradale è pari a:

$$F_{ST} = m_F g \sin \alpha_{ST} = P \sin \alpha_{ST} \quad (3.4)$$

Dove:

m_F = massa del veicolo [Kg];

g = accelerazione di gravità $\left[\frac{m}{s^2}\right]$;

α_{ST} = pendenza della strada $[\circ]$;

3.1.4 Resistenza all'accelerazione

L'equazione principale dell'equilibrio di un veicolo su strada piana è:

$$P_{Z,A} = P_{Z,B} = \eta_{tot} \cdot P_m \quad (3.5)$$

Dove:

$P_{Z,A}$ = Potenza disponibile alle ruote [Kw];

$P_{Z,B}$ = Potenza resistente al moto del veicolo [Kw];

η_{tot} = Rendimento complessivo della trasmissione;

P_m = Potenza disponibile all'albero motore [Kw];

$F_{Z,B}$ = Resistenza totale al moto del veicolo [N];

v = velocità del veicolo $\left[\frac{m}{s}\right]$

La potenza necessaria ad accelerare il veicolo è definita come la differenza tra la potenza disponibile alle ruote e la potenza resistente al moto del veicolo:

$$P_a = P_{Z,A} - P_{Z,B} \quad (3.6)$$

Analizzando la formula (6) si possono avere due possibili casi:

a) $P_{Z,A} < P_{Z,B} \Rightarrow P_a < 0$, quindi il veicolo sta decelerando;

b) $P_{Z,A} > P_{Z,B} \Rightarrow P_a > 0$, quindi il veicolo sta accelerando.

Si può definire P_a come:

$$P_a = d \frac{E_c}{dt} \quad (3.7)$$

Dove

E_c = l'energia cinetica del veicolo

Essa è composta dall'unione di due termini:

1. Energia cinetica di traslazione;
2. Energia cinetica di rotazione di tutti gli organi rotanti presenti sul veicolo.

Quindi l'energia cinetica si può riscrivere come:

$$E_c = \left(\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2\right) + \left(\frac{1}{2} \cdot \sum_i J_i \cdot w_i^2\right) \quad (3.8)$$

Dove:

$m =$ massa del veicolo [Kg];

$v =$ velocità del veicolo [$\frac{m}{s}$]

$J_i =$ momento d'inerzia di tutte le parti rotanti del veicolo [$kg \cdot m^2$]

$w_i =$ velocità angolare degli organi rotanti [$\frac{rad}{s}$]

Se si va a considerare il modello della driveline come un sistema rigido, ossia andando a trascurare i g.d.l. torsionali e flessionali, si ha:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m_{res} \cdot v^2 \quad (3.9)$$

Dove:

m_{res} è la massa di un corpo, che si muove alla stessa velocità del veicolo e possiede un'energia cinetica di traslazione pari all'energia cinetica totale del veicolo stesso. In altre parole essa rappresenta la massa statica del veicolo maggiorata di un termine che tiene conto dell'inerzia delle masse in rotazione: ruote, ingranaggi, organi del motore, ecc. [8].

Sostituendo l'equazione (3.9) nella (3.7) si ha:

$$P_a = d \frac{E_c}{d_t} = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \cdot m_{res} \cdot v^2 \right] = m_{res} \cdot v \cdot \frac{dv}{dt} = m_{res} \cdot v \cdot a \quad (3.10)$$

$a =$ accelerazione del veicolo [$\frac{m}{s^2}$];

Dalla (10) dopo dei semplici calcoli matematici si ottiene che la resistenza all'accelerazione è pari a:

$$F_a = m_{res} \cdot a \quad (3.11)$$

3.1.5 Resistenza totale

Dopo quanto detto possiamo considerare la resistenza totale al moto $F_{Z,B}$ come la somma delle resistenze discusse nei paragrafi precedenti, ossia:

$$F_{Z,B} = F_R + F_L + F_{ST} + F_a \quad (3.12)$$

Sostituendo nella (3.12) la (3.1), (3.3), (3.4) e la (3.11) si ha:

$$F_{Z,B} = f m_F g \cos \alpha_{ST} + \frac{1}{2} \rho_l C_x A v^2 + m_F g \sin \alpha_{ST} + m_{res} a \quad (3.13)$$

Dalla (13) si ricava che la potenza resistente totale che è pari a:

$$P_{Z,B} = F_{Z,B} \cdot v \quad (3.14)$$

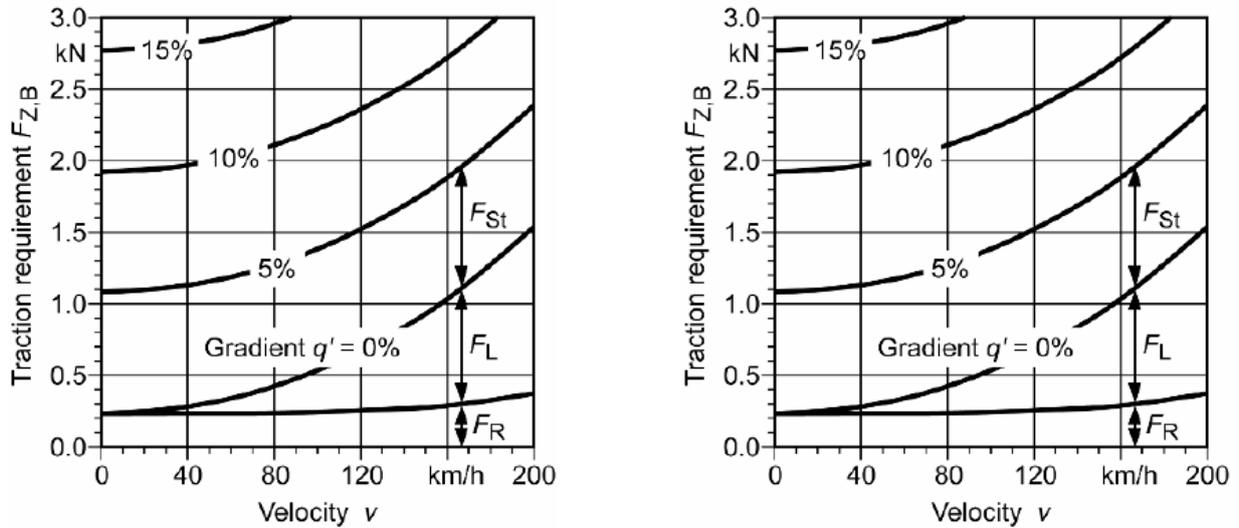


Figura 3.2-Forza e Potenza richieste in funzione della velocità per un veicolo di medie dimensioni [13]

Partendo dall'equazione (3.5) e tenendo in considerazioni anche il rapporto di trasmissione e il rapporto di riduzione finale, la forza $F_{Z,A}$ disponibile alle ruote può essere calcolata partendo dalla curva caratteristica del motore, ossia:

$$F_{Z,A} = \frac{P(nM)}{v} \cdot \eta_{tot} = \frac{T(nM) \cdot i_x \cdot i_o}{r_{dyn}} \eta_{tot} \quad (3.15)$$

Dove:

r_{dyn} = raggio dinamico della ruota [m]

i_x = rapporto di trasmissione della singola marcia

i_o = rapporto di riduzione finale

Analizzando la (3.15) si può notare una diretta proporzionalità tra il numero di giri del motore e la potenza istantanea necessaria a muovere il veicolo. In molti casi, per semplicità di analisi, si tende ad usare la forza disponibile alle ruote espressa in funzione della potenza massima del motore, ossia:

$$F_{Z,A_{id}} = \frac{P_{max}}{v} \quad (3.16)$$

Dove:

$F_{Z,A_{id}}$ = la forza disponibile alle ruote espressa in condizioni ideali

Se si va a considerare anche il rendimento complessivo della trasmissione la (3.16) si può riscrivere come:

$$F_{Z,A_e} = \frac{P_{max}}{v} \cdot \eta_{tot} \quad (3.17)$$

Dove:

F_{Z,A_e} = la forza disponibile alle ruote espressa in condizioni reali

3.2 Perché i veicoli hanno bisogno di un cambio

Quasi tutte le automobili in uso oggi sono azionate da motori a combustione interna, funzionante secondo il principio dell'accensione a scintilla o diesel. I motori a combustione interna, oltre ai numerosi vantaggi come l'elevato rapporto peso/potenza e l'efficienza relativamente buona, presentano anche importanti svantaggi dal punto di vista della trazione, indipendentemente dal tipo di carburante utilizzato:

- Il motore a combustione non è in grado di produrre coppia da fermo (velocità del motore pari a 0);
- Il motore a combustione interna produce la massima potenza solo ad un determinato numero di giri;
- Il consumo di carburante dipende dal punto di funzionamento del motore;
- Il senso di rotazione non può essere modificato (ruota solo in un senso);
- Ha una velocità operativa minima (idle);

Per spiegare meglio a cosa serve il cambio, conviene partire dallo spostamento ideale del veicolo. Infatti, dal punto di vista della trazione, la massima accelerazione del veicolo si ottiene applicando costantemente alla ruota la massima potenza del motore, quindi, considerando la formula (3.16), si può ottenere il seguente grafico:

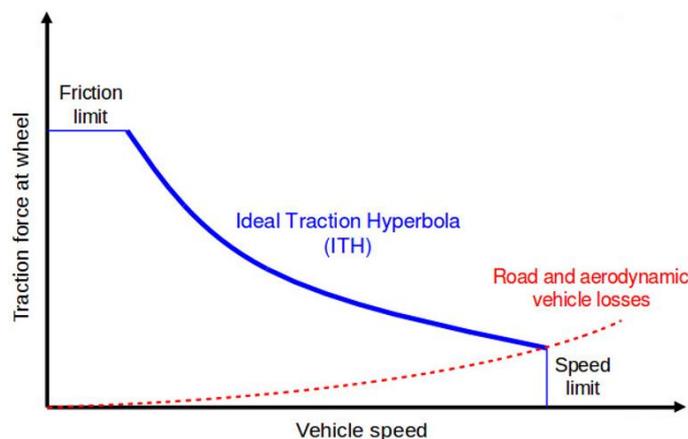


Figura 3.3-Iperbole di trazione ideale [15]

Analizzando la Figura 3.3, si può capire che se la potenza del motore a pieno carico P_{max} fosse disponibile su tutto il range di velocità si avrebbe l'iperbole ideale di trazione (ITH), indicata in blu. La forza di trazione disponibile alle ruote ha come limite inferiore, a basse velocità, il limite di attrito delle ruote (friction limit) e come limite superiore, ad alte velocità, un punto di limite fisico del veicolo dovuto alla pendenza della strada e alle perdite aerodinamiche del veicolo. Quindi, la forza necessaria alla trazione teoricamente disponibile alle ruote è tutta quella che si trova sotto l'iperbole. Ora, consideriamo la (3.15) e andiamo a supporre che non ci siano marce sul veicolo (niente cambio,

trasmissione e differenziale), quindi il rendimento complessivo della trasmissione η_{tot} , il rapporto di trasmissione della singola marcia i_x , ed il rapporto di trasmissione finale i_o hanno valore unitario e di conseguenza si ha:

$$F_{Z,A} = \frac{T_{Max}}{r_{dyn}} \quad (3.18)$$

Tutta la coppia del motore può essere tradotta in forza di trazione alle ruote dividendo per il raggio della ruota. Mediante l'equazione (3.18), si riesce a prendere la linea di coppia massima del motore e convertirla in linea di trazione disponibile alle ruote. Andando a sovrapporre la linea di trazione del motore all'iperbole di trazione ideale, si ha:

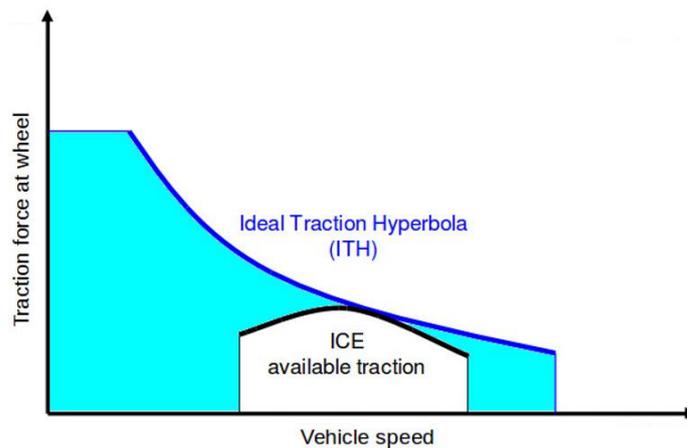


Figura 3.4-Iperbole di trazione ideale con la caratteristica del motore [15]

Come si evince dalla Figura 3.4, la linea di trazione del motore può coprire solo una piccola area delle prestazioni di trazione richieste (area blu). Da ciò, si intuisce l'esigenza del cambio, ossia uno strumento in grado di convertire la caratteristica del motore ICE in modo che si possa coprire il maggior quantitativo di area al di sotto dell'iperbole di trazione. Arrivati a questo punto è conveniente passare dalle condizioni ideali alle condizioni reali, introducendo un grafico che tenga conto anche del rendimento complessivo della trasmissione:

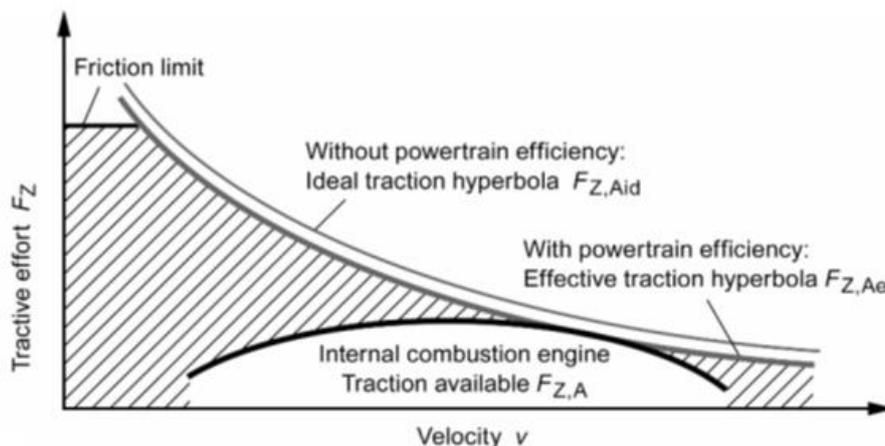


Figura 3.5-Iperbole di trazione ideale e reale con la caratteristica del motore[13]

Dalla Figura 3.5 si può vedere che, senza la presenza di un cambio di velocità, il veicolo non sarebbe in grado né di partire né di avere prestazioni di accelerazione elevate. Andando a prendere l'equazione (3.15) e considerando un cambio a 4 velocità si ha:

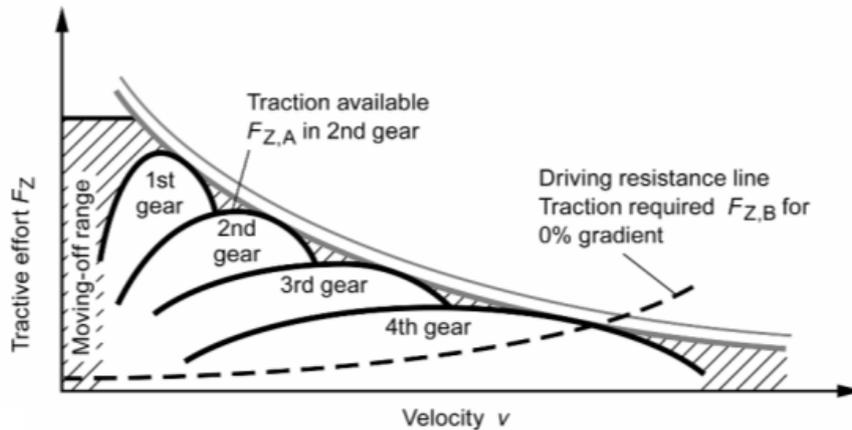


Figura 3.6-Iperbole di trazione ideale con un motore ICE ed un cambio di velocità a 4 rapporti[13]

Grazie all'introduzione del cambio, si hanno 4 linee di trazione del motore, una per ogni marcia. La sovrapposizione delle linee di trazione del motore (per ciascuna marcia) con l'iperbole di trazione permette di andare a ridurre l'area tratteggiata (e quindi non utilizzabile) rispetto al caso precedente senza cambio (Figura 3.5). Ciò comporta una maggiore efficienza, tra l'energia prodotta dal motore ICE e l'energia utilizzata per la trazione. Quindi, utilizzando un cambio di velocità, si riesce a ridurre la forbice tra la forza di trazione generata dal motore ICE e l'iperbole di trazione ideale. Maggiore è il numero di marce migliore sarà l'approssimazione, fino ad arrivare al caso estremo del CVT nel quale l'iperbole ideale di trazione può corrispondere alla curva di trazione reale. Per concludere la trattazione, andiamo ad analizzare la figura seguente:

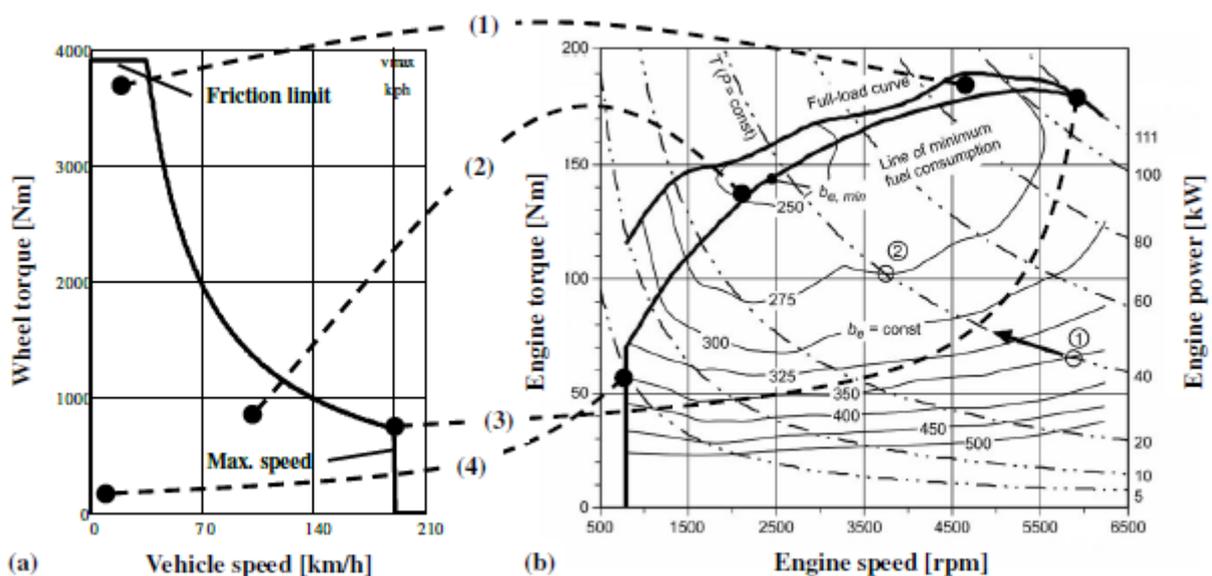


Figura 3.7-Richiesta della coppia massima alle ruote Vs Mappa motore con consumi specifici[14]

Ogni veicolo necessita di una trasmissione per abbinare la velocità del motore e la coppia del motore con la velocità del veicolo. Nella Figura 3.7 è presente un confronto tra la richiesta di coppia alla ruota e la mappa del motore a combustione interna, da questo confronto si possono estrapolare alcune considerazioni:

- a) Lo stesso fabbisogno di potenza del veicolo può essere soddisfatto in diversi punti di funzionamento del motore (punto ① e punto ② nella mappa motore).
- b) La coppia di accelerazione disponibile diminuisce con la freccia dal punto ① al punto ②.
- c) Il punto ① ha un consumo specifico di carburante maggiore rispetto al punto ②.
- d) La coppia massima del motore è molto inferiore alla richiesta di coppia delle ruote.
- e) La velocità massima del motore è molto maggiore della velocità di rotazione delle ruote.

In conclusione, la trasmissione ha lo scopo di collegare queste caratteristiche così diverse e di farle combaciare tra loro, rendendo effettivamente utilizzabile il veicolo.

In altre parole:

- Adattare la coppia di uscita di trazione del motore ICE all'iperbole di trazione (ideale) richiesta dal veicolo (attraverso le marce avanti);
- Lasciare che il veicolo si fermi scollegando il motore dalla trasmissione ed interrompendo il trasferimento di potenza;
- Consentire al veicolo di partire da fermo;
- Consentire al veicolo di muoversi in retromarcia;
- Mantenere i punti di funzionamento del motore lungo la linea del consumo minimo di carburante quando il veicolo viaggia in autostrada;
- Il conducente può ottenere un'elevata dinamica di guida o un'elevata economia di guida in diversi punti di funzionamento del motore utilizzando la trasmissione.

Bisogna fare una considerazione a parte per i veicoli BEV, i quali utilizzano motori elettrici per la trazione e, conseguentemente, non hanno bisogno di un cambio poiché la loro forza di trazione corrisponde all'iperbole di trazione ideale. Inoltre, il motore elettrico può anche emettere coppia rotante in direzione opposta e quindi effettuare autonomamente la retromarcia.

3.3 Componenti principali dei cambi di velocità

Prima di procedere con l'analisi dei diversi cambi, ci si deve focalizzare su alcuni concetti fondamentali della trasmissione mediante i quali si riuscirà meglio a comprendere gli argomenti trattati di seguito. Il cambio può essere costituito da rotismi ordinari ad asse fisso od epicicloidali. In funzione di come avviene l'azionamento degli innesti, si può effettuare una prima classificazione delle trasmissioni (in base alla variazione del rapporto di trasmissione):

- **Trasmissioni manuali:** comprendono i cambi manuali non sincronizzati, i cambi manuali sincronizzati e i cambi manuali ad innesti frontali (anche detti cambi sequenziali);
- **Trasmissioni automatiche:** comprendono le trasmissioni automatiche (a rotismi epicicloidali) e le trasmissioni a variazione continua del rapporto (CVT meccanici o elettroidraulici);
- **Trasmissioni semiautomatiche:** comprendono le trasmissioni automatizzate (cambi robotizzati, cambi a doppia frizione e cambi ad innesti continui) e le trasmissioni semiautomatiche [21].

3.3.1 I sincronizzatori

Negli autoveicoli moderni, per permettere l'intercambiabilità tra le varie coppie di ruote dentate in presa adiacenti tra loro, durante il cambio della marcia, si utilizzano i "sincronizzatori" [21]. In base alla presenza o meno dei sincronizzatori le trasmissioni possono essere divise in:

- Cambi non sincronizzati;
- Cambi sincronizzati.

Nei cambi senza sincronizzatori le ruote dentate non sono permanentemente ingranate ma, bensì, esse vengono spostate dal guidatore mediante l'ausilio della frizione e della leva del cambio. Per effettuare il corretto inserimento della marcia, è richiesta una buona preparazione e sensibilità da parte del driver. In caso contrario, l'innescò non avviene a causa dell'eccessiva velocità relativa tra le ruote dentate e, in alcuni casi, per evitare lo sfregamento tra gli ingranaggi e rovinare il cambio del veicolo, viene utilizzata la tecnica del doppio disinnescò. Oramai, i cambi senza sincronizzatore non vengono più utilizzate dalle OEM e si possono trovare solo nelle auto d'epoca.

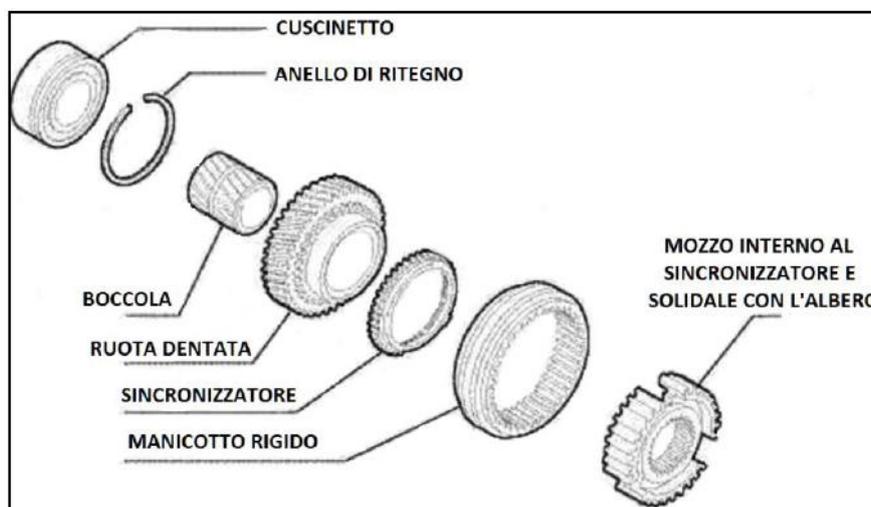


Figura 3.8-Schema del sincronizzatore [21]

I cambi delle autovetture moderne sono dotate di sincronizzatore il quale consente, al momento d'innestare la marcia, che la velocità periferica delle ruote dentate, che devono ingranare tra loro, sia la stessa così da evitare sfregamenti e provocare, oltre al fastidioso rumore, usura e danneggiamenti dei denti delle ruote. Per effettuare il perfetto ingranamento di due ruote dentate, il manicotto (spinto dalla forcella del selettore azionata a sua volta dalla leva del cambio) scorre verso la ruota dentata che gira sulla boccola; il sincronizzatore, quindi, viene spinto verso la ruota dentata e ne accelera o ne diminuisce la velocità fino a fargli raggiungere la velocità di rotazione dell'albero su cui sono calettate le ruote dentate delle marce, poiché all'interno del sincronizzatore è presente il mozzo solidale con l'albero stesso [21]. Gli ulteriori elementi utili a comprendere meglio i differenti tipi di cambio sono il volano e la frizione. Si è volutamente tralasciata l'analisi dei differenziali, seppur essi sono parte integrante del drivetrain, in quanto non vi sono importanti differenze tra un veicolo tradizionale e un veicolo ibrido per quel che riguarda questi componenti.

3.3.2 Il volano

Il volano è una ruota metallica montata all'estremità dell'albero motore, vicino alla trasmissione, sul quale è montata la frizione.



Figura 3.9-Confronto tra volano singolo e bi-massa

Nel powertrain si inserisce il volano, collegato all'albero motore, per rendere il più costante possibile la coppia proveniente dal motore stesso. Infatti, senza il volano, si avrebbe una trasmissione della coppia impulsiva. Il volano, la cui massa dipende da alcune caratteristiche del motore e in particolare dal numero di cilindri, immagazzina energia durante la fase attiva del pistone e la rilascia nel momento in cui, a fine corsa, il pistone stesso tende a fermarsi per cambiare il verso del suo movimento; proprio in questo momento il volano interviene restituendo l'energia cinetica che ha catturato e rendendo più continuo e regolare il movimento del veicolo [21]. Esso tende ad opporsi a ogni tentativo di variazione della sua velocità angolare, permettendo così di stabilizzare la rotazione

di un albero motore quando viene applicata una coppia motrice periodica. Quindi, la presenza del volano permette d'armonizzare la catena cinematica, smorzando le vibrazioni e rendendo più morbido e fluido l'intervento della frizione. Il volano può essere costituito da un unico pezzo rigido oppure, nel caso del volano bi-massa, essere dotato di una struttura più complessa. Questa tipologia prevede, infatti, che il volano sia sdoppiato: al disco accoppiato al motore si aggiunge un secondo disco coassiale collegato al primo attraverso un sistema di molle immerse nel grasso che permettono ai due elementi di muoversi parzialmente anche in senso opposto. In questo caso, il disco su cui lavorano gli elementi d'attrito della frizione è il secondo [22].

3.3.3 La frizione

Il motore a combustione interna non può fornire coppia a velocità zero, per cui risulta necessario un dispositivo da frapporre tra la trasmissione ed il motore, la frizione. Essa, fissata al volano, è posizionata nella parte anteriore della scatola del cambio. Si può definire come un organo in grado di interrompere il collegamento fra l'albero motore e gli altri elementi della trasmissione. Le funzioni principali della frizione sono:

- Permettere l'avviamento del veicolo;
- Permettere il cambio marcia;
- Permettere il fermo del veicolo mantenendo il motore in moto;
- Permettere il disaccoppiamento tra il motore e la trasmissione.

I tipi di frizione attualmente più utilizzati sono:

a) **Frizioni meccaniche**, le quali si dividono a loro volta in base al tipo di frizione:

- A secco;
- Bagno d'olio;
- Monodisco;
- Multidisco;

b) **Frizioni automatiche**, sono frizioni che riescono ad effettuare autonomamente l'operazione di innesto e disinnesto. Possono essere di due tipi:

- Ad azionamento elettromagnetico;
- Ad azionamento elettropneumatico.

c) **Frizioni idrauliche**, sono il giunto idraulico ed il convertitore di coppia.

Dei differenti tipi di frizione sopraelencati, si possono fornire le linee guide, per capire su che veicoli si utilizzano:

- La frizione monodisco a secco - usata comunemente nei cambi manuali;

- La frizione multidisco in bagno d'olio, frequentemente utilizzata nelle motociclette, o nelle vetture dotate di trasmissioni variabili;
- Il convertitore di coppia, utilizzato nella maggioranza dei cambi AT;
- La frizioni elettromagnetica, utilizzate in alcune trasmissioni variabili;

3.3.3.1 Frizioni meccaniche

Esistono differenti tipi di frizioni meccaniche, ma quelle ad oggi più utilizzate in ambito automobilistico sono le frizioni monodisco a secco, le quali possono essere composte da una serie di molle (solitamente elicoidali) o da un'unica molla (a spirale o a diaframma). Di seguito andiamo a riportare l'esploso di una frizione monodisco a secco con un'unica molla a diaframma:

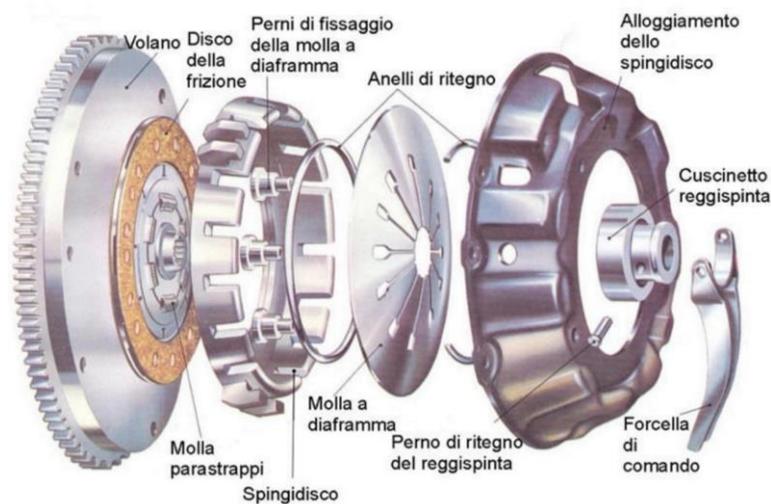


Figura 3.10-Esempio di frizione monodisco a secco con molla a diaframma [21]

Il disco della frizione, collegato all'albero primario del cambio e posizionato tra lo spingi-disco e il volano, è costituito da diversi elementi in lamiera, dalle guarnizioni di attrito e da molle parastrappi (Figura 3.11). Quest'ultime servono ad assorbire gli impulsi di coppia, causati dall'inerzia del motore, nel caso di manovre di innesto eccessivamente veloci [21].

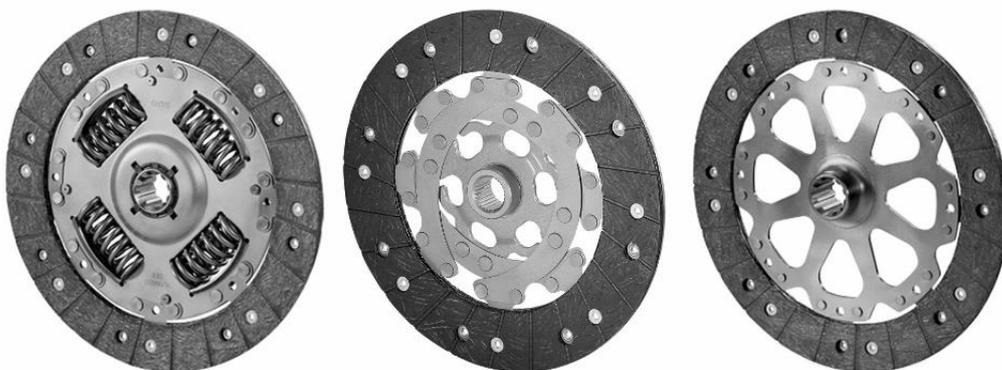


Figura 3.11-Differenti tipi di frizione usate negli autoveicoli [20]

Tra lo spingidisco e il suo alloggiamento è presente una molla a diaframma, costituita da un disco in acciaio avente forma conica. Come si vede dalla Figura 3.10, il pacco frizione è completato da due anelli di ritegno, dal cuscinetto reggispinginta con i relativi perni di sostegno, e da una forcella di comando. L'evoluzione "naturale" delle frizioni monodisco sono le frizioni a dischi multipli, le quali, come dice il nome, sono formati da due o più dischi. Così facendo si riesce ad aumentare la coppia trasmissibile avendo a disposizione una maggiore superficie di attrito.

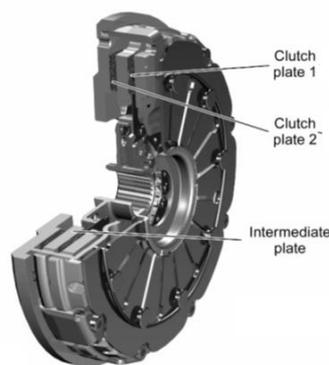


Figura 3.12-Esempio di una frizione multidisco [21]

Il tipo più diffuso di frizione multidisco (Figura 3.13) è quella a bagno d'olio. Queste vengono utilizzate nei cambi automatici.

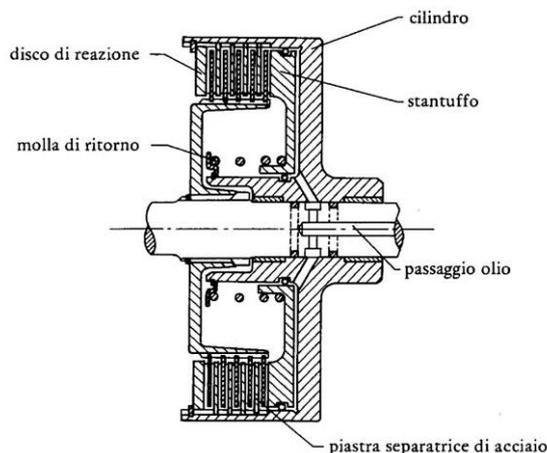


Figura 3.13-Esempio di frizione a dischi multipli [21]

Come si vede dalla sezione presente nella figura precedente, lo stantuffo spinge una serie di dischi della frizione contro il disco di reazione solidale al cilindro. Mediante una molla si riesce ad effettuare il ritorno in posizione dello stantuffo. Come si vede dalla Figura 3.13, i dischi della frizione sono montati sul mozzo e tra di essi sono interposte delle piastre separatrici in acciaio calettate sul cilindro. Questo tipo di frizioni, a parità di coppia trasmessa, seppur presentando una forma compatta radialmente, hanno un'efficienza minore rispetto alle frizioni a secco. Ciò, è dovuto alla dissipazione di energia causata dalla presenza dell'olio.

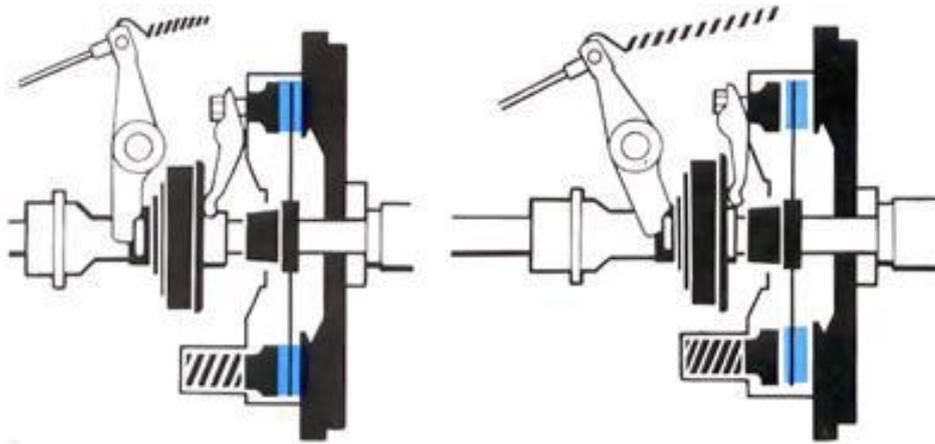


Figura 3.14-Immagine di innescio e disinnesco della frizione [21]

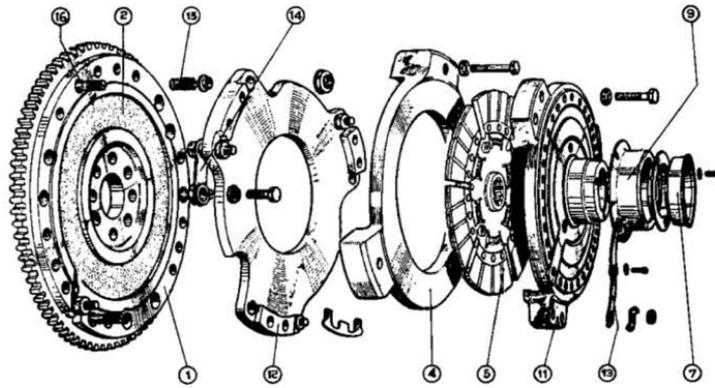
Durante il funzionamento della frizione si possono avere tre possibili configurazioni:

1. Frizione innestata;
2. Frizione disinnestata;
3. Slittamento.

Nella configurazione frizione innestata (visibile dall'immagine di sinistra della Figura 3.14), lo spingidisco comprime il disco della frizione sul volano e, così facendo, l'albero motore e l'albero primario del cambio ruotano con la stessa velocità angolare, permettendo di trasmettere la coppia dal motore al cambio e quindi alle ruote. Nella configurazione frizione disinnestata (immagine destra della Figura 3.14), mediante il pistone, viene attivata la forcella di comando, che permette il movimento assiale del cuscinetto reggispinta. Quest'ultimo, a causa del suo spostamento, preme sulla molla a diagramma, permettendo così l'allontanamento dello spingidisco dal volano. Conseguentemente, si riesce a svincolare la velocità di rotazione della trasmissione da quella del motore, interrompendo il flusso di potenza alle ruote. La terza configurazione è una condizione transizione nel passaggio dalla frizione disinnestata a quella innestata. In questo caso il disco della frizione è in contatto con il volano, ma la pressione esercitata dallo spingidisco non è sufficiente per mantenere i componenti collegati a pacco. A causa di ciò, le velocità di rotazione del motore e della trasmissione sono differenti e solo una parte della coppia generata dal motore può essere trasmessa alle ruote.

3.3.3.2 Frizioni automatiche

Le frizioni automatiche, come detto precedentemente, sono quelle frizioni che non necessitano di nessun input da parte dell'operatore per effettuare la loro funzione. Le frizioni automatiche più utilizzate sono quelle ad azionamento elettromagnetico.



Frizione automatica "Ferlec".

1. Volano; 2. Bobina; 3. Boccola di centraggio; 4. Anello intermedio; 5. Disco condotto; 6. Porta carboncino; 7. Anello collettore negativo; 8. Alberino frizione; 9. Anello collettore positivo; 10. Porta-carboncino; 11. Anello spingidisco; 12. Armatura; 13. Linguetta; 14. Piastra di trascinamento; 15. Molle di spinta; 16. Spine di supporto molle.

Figura 3.15-Frizione automatica ad azione elettromagnetica di tipo Ferlec [21]

Nella Figura 3.15, sono indicati gli elementi principali della frizione:

- Un volano ①, contenente una bobina in modo da formare un elettromagnete;
- Un'armatura ⑫ metallica;
- Un anello intermedio ④ fissato al volano;
- Un disco condotto ⑤ in grado di accoppiarsi all'anello intermedio;
- Un anello spingidisco ⑪ fissato all'armatura;
- Un anello collettore negativo ⑦, collegato a massa;
- Un anello collettore positivo ⑨, collegato alla bobina;
- Due spazzole ⑥ - ⑩ (con i relativi porta spazzole) di alimentazione.

Il funzionamento della frizione Ferlec è molto semplice, il tutto si basa sul passaggio di corrente. Infatti, a causa del passaggio di corrente, si eccita l'elettromagnete, ciò causa l'attrazione dello spingidisco verso il volano e, così facendo, avviene l'innesto della frizione. Invece, per effettuare il disinnesto, basta interrompere l'alimentazione elettrica della bobina causando l'allontanamento dello spingidisco dalla frizione e quindi il disaccoppiamento di quest'ultima dal volano. La fase di slittamento, viene limitata andando ad introdurre delle resistenze che vanno a limitare l'alimentazione della bobina. Senza queste resistenze non sarebbe possibile effettuare la fase di avviamento del veicolo.

3.3.3.3 Frizioni idrauliche

Le frizioni idrauliche, vengono utilizzate grazie all'elevato comfort generato durante l'utilizzo. Infatti, grazie alla loro conformazione, i cambi marcia avvengono in maniera costante senza buchi di coppia. Ne esistono di due tipi:

- Il giunto idraulico;
- Il convertitore di coppia.

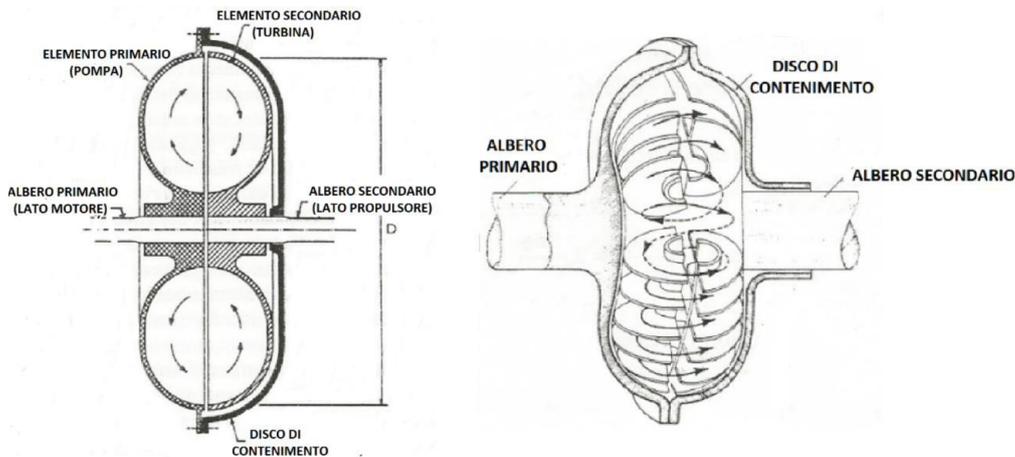


Figura 3.16-Sezione di un giunto idraulico ed esempio di circolazione dell'olio all'interno di esso [21]

Nella Figura 3.16, sono schematizzati i componenti ed il comportamento del giunto idraulico che non è altro che un trasmettitore di coppia. E' costituito da 3 elementi principali:

1. Pompa, calettata sull'albero motore;
2. Turbina, calettata sul propulsore;
3. Disco di contenimento, che avvolge la turbina ed evita, durante il funzionamento, al liquido di fuoriuscire.

A causa della loro forma si crea, all'interno di essi, uno spazio libero nel quale è contenuto l'olio, che ha il compito di trasmettere energia tra gli elementi e la coppia motrice. Il funzionamento è molto semplice: con la rotazione dell'albero primario, collegato al motore, si applica alla pompa una coppia motrice la quale imprime un'energia cinetica all'olio che viene assorbita dalla turbina. Così facendo, la turbina acquisisce energia cinetica generando una rotazione dell'albero secondario, che permette così di trasferire una coppia motrice all'albero secondario pari a quella in ingresso al primario. Quindi, l'olio viene accelerato dalle palettature della pompa e decelerato dalle palettature della turbina. Non essendoci collegamenti meccanici, non vi è praticamente usura e il rendimento del giunto è influenzato solamente dallo scorrimento con cui ruotano pompa e turbina. Il valore dello scorrimento è compreso tra 0 e 1. Se lo scorrimento è pari a 0, allora si ha la condizione di sincronismo e, quindi, pompa e turbina ruotano con la stessa velocità. Se lo scorrimento è pari a 1, la turbina è ferma: questa è la condizione di veicolo fermo. Da ciò si intuisce che, affinché si verifichi il trasferimento di coppia, si ha bisogno dello scorrimento. L'evoluzione del giunto idraulico è il convertitore di coppia nel quale, agli elementi visti precedentemente (pompa e turbina), se ne interpone un terzo denominato statore. Il convertitore di coppia è una macchina idraulica che permette di collegare due alberi secondo un rapporto di trasmissione variabile con continuità.



Figura 3.17-Schema semplificato di un convertitore di coppia
1) Pompa; 2) Turbina; 3) Reattore [20]

Così come il giunto idraulico, il convertitore di coppia si trova all'interno di un disco di contenimento di forma toroidale, all'interno del quale sono immersi in olio i 3 elementi principali che lo compongono:

1. Una pompa centrifuga, collegata all'albero motore, dal quale riceve una coppia in ingresso;
2. Una turbina, solidale all'albero d'ingresso della trasmissione che, grazie al movimento dell'olio, riceve la coppia da trasmettere al cambio;
3. Uno statore, interposto tra turbina e pompa, che ha il compito di modificare la direzione del flusso d'olio proveniente dalla turbina prima che esso ritorni nella pompa.

Il convertitore di coppia, a differenza del giunto idraulico, con l'inserimento dello statore riesce a far variare il momento della quantità di moto dell'olio, permettendo così di variare anche l'equilibrio delle coppie applicate al sistema. La pompa, alimentata dal motore, spinge il fluido verso l'esterno per effetto della forza centrifuga. Tale fluido va nella turbina, la quale riceve energia cinetica dall'olio mettendosi così in rotazione. Le palette della turbina hanno una curvatura opposta rispetto a quelle della pompa.

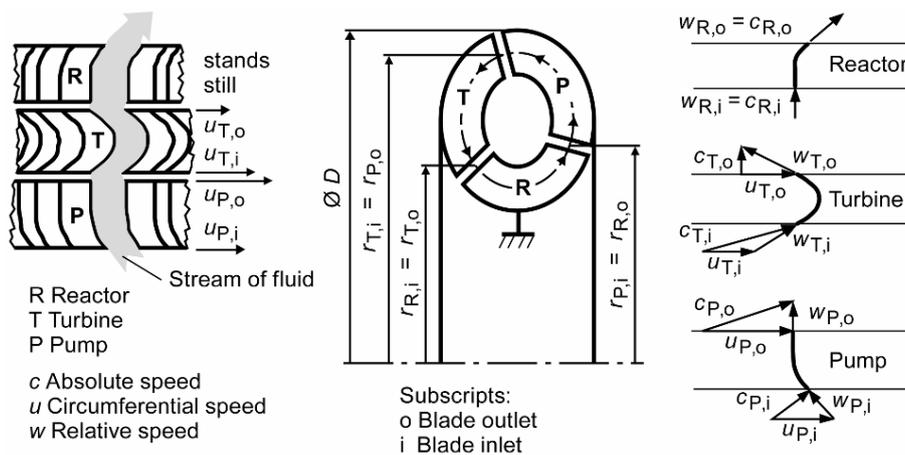


Figura 3.18-Ciclo di flusso nel convertitore [20]

La turbina trasmette la coppia ricevuta all'albero d'ingresso della trasmissione, facendolo così ruotare nello stesso verso dell'albero motore. A questo punto, il fluido si muove di nuovo verso la pompa ma, in questo caso, il passaggio non avviene direttamente come nel giunto idraulico, ma l'olio si sposta dalla turbina alla pompa attraverso lo statore, il quale è montato su una ruota libera che consente la rotazione in un solo senso. Quindi, lo statore devia il flusso dell'olio in modo da incrementare la coppia tra ingresso e uscita (riducendo conseguentemente la velocità di rotazione). Ossia, lo statore reindirizza il fluido in maniera tale da colpire il retro delle palette della pompa (il fluido incontra sempre tangenzialmente le pale), fornendo ad esso una spinta aggiuntiva.

I regimi di funzionamento del convertitore di coppia sono 3:

- 1) Regime di stallo, questo regime si verifica quando si ferma il veicolo senza spegnere il motore. Quest'ultimo, infatti, continua a generare una piccola coppia trasmessa al veicolo. Tuttavia, per rimanere fermi basta spingere il freno.
- 2) Regime di accelerazione, si verifica quando il veicolo sta accelerando e, conseguentemente, la pompa, collegata al motore, girando ad una velocità molto più elevata della turbina, trasmette la coppia al cambio. La coppia di uscita, grazie alla presenza del rotore (energizza il moto del fluido), è più elevata rispetto a quella in ingresso, da qui il nome del dispositivo¹.
- 3) Regime di moto uniforme, si verifica quando si raggiunge una velocità costante. In questo caso, pompa e turbina si muovono all'unisono. L'effetto dello statore va a ridursi e, di conseguenza, il convertitore di coppia è paragonabile ad un giunto idraulico.



Figura 3.19-Schema costruttivo di un convertitore di coppia [23]

Da quanto detto sui i regimi di funzionamento, il convertitore di coppia ha una duplice funzione: moltiplicatore di coppia fino ad un ben definito regime di giri e giunto idraulico, oltre il suddetto regime. Il passaggio da una fase all'altra avviene automaticamente senza generare scossoni per i passeggeri nel veicolo. Dal punto di vista del rendimento, il convertitore di coppia non ha un'elevata

¹ Una bassa coppia ad alta velocità angolare viene convertita in una coppia elevata a bassa velocità angolare.

efficienza in quanto, per trasferire la coppia, si ha sempre bisogno di una differenza di velocità e quindi di strisciamento tra le parti, con conseguente dissipazione di energia e aumento dei consumi. Per evitare ciò, è stata installata una frizione multi-disco a bagno d'olio, chiamata frizione di lock-up. Questa frizione, viene innestata quando la velocità della turbina e della pompa sono poco diverse fra loro. E, così facendo, essa rende solidali le due giranti e permette così il by-pass del fluido (eliminando ogni perdita dovuta agli attriti interni e quindi aumentando l'efficienza del sistema) andando a trasformare il convertitore di coppia in un giunto idraulico.

3.4 Differenti tipi di trasmissioni nei veicoli

Oltre alla classificazione già fatta nel paragrafo 3.3, le trasmissioni per autovetture e veicoli commerciali si dividono nelle seguenti tipologie:

1. Trasmissioni manuali (MT)
2. Trasmissioni manuali automatizzate (AMT)
3. Trasmissioni automatiche (AT)
4. Trasmissioni a doppia frizione (DCT)
5. Trasmissioni nei veicoli ibridi
6. Trasmissioni a variazione continua (CVT)

Tabella 3.1-Matrice di correlazione per i differenti tipi di trasmissione

Funzione principale	Soluzioni tecnologiche				
	1	2	3	4	5
Enable moving-off from rest	Mechanical dry	Mechanical wet	Electromechanical	Hydrodynamic	Hydrostatic
Change ratio/speed	Spur gears	Planetary gears	Hydrodynamic	Hydrostatic	Mechanical continuous
Shift/establish power flow	Positive-engaged Sliding gears	Positive-engaged Shifting dog, synchronized	Positive-engaged Shifting dog, unsynchronized	Frictional-engaged Multi-plate clutch	Frictional-engaged Multi-plate brake
Operate/control the trasmission	Manual shift	Automated Electr./mech	Automated Electr./hydr.	Automated Electr./pneum.	Automated Electr./Hydr.

La scelta di una tipologia di cambio anziché un'altra dipende da molti fattori, come: la potenza da trasmettere, il tipo di veicolo, il mercato di vendita, ecc. Negli ultimi anni sono state proposte numerose possibili soluzioni per le trasmissioni dei veicoli che possono essere riassunte nella tabella 3.1. Quest'ultima è una matrice di correlazione, nella quale le funzioni principali sono mostrate nelle righe, mentre le diverse soluzioni possibili sono rappresentate nelle colonne. Combinando tra loro i diversi campi presenti all'interno della matrice, si riesce ad ottenere tutti i possibili tipi di trasmissione. Ovviamente, non tutte le combinazioni teoriche possono avere un significato o una rilevanza nella pratica. Nella Figura 3.20, è rappresentata una comparazione, per le differenti tipologie di cambio, tra il comfort di marcia ed i consumi di combustibile.

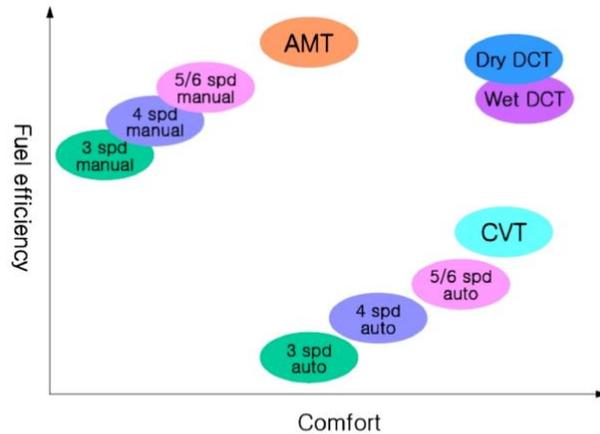


Figura 3.20-Comparazione tra comfort e consumi per differenti tipi di trasmissioni [65]

3.4.1 Trasmissioni manuali

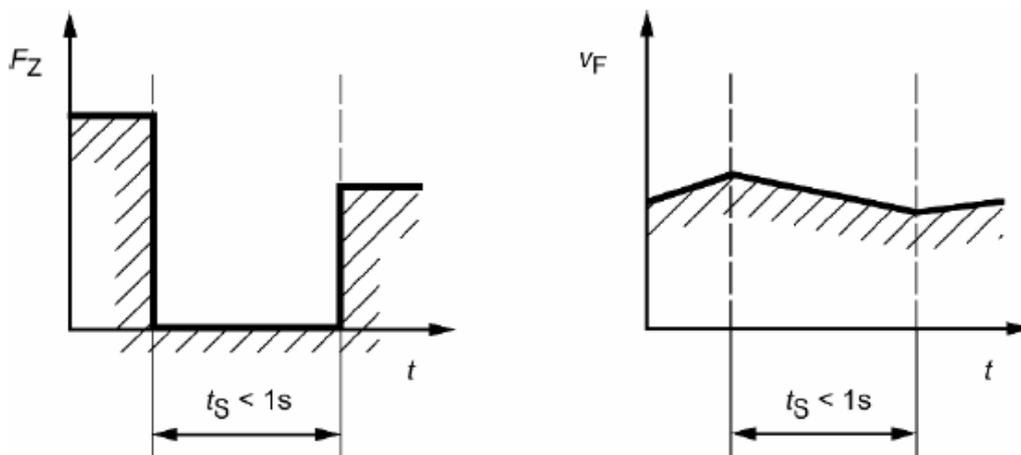


Figura 3.21-Diagramma qualitativo di forza e velocità quando si effettua il cambio marcia manualmente[13]

Con il termine trasmissione manuale, si intende una tipologia di trasmissione, mediante il quale, il processo di cambio marcia, il processo di innesco e disinnesco della frizione avvengono grazie all'azionamento dei comandi da parte del driver. La caratteristica principale di questo tipo di trasmissioni (ciò vale anche per le trasmissioni robotizzate) è che nel cambio marcia, la trasmissione di potenza avviene con un buco di coppia, e una conseguente riduzione di velocità, come viene mostrato nella Figura 3.21. Come anticipato nel paragrafo 3.3.1, tutti i cambi moderni sono dotati di sincronizzatori e, per questo motivo, le trasmissioni trattate di seguito sono da considerarsi tutte trasmissioni sincronizzate. I cambi manuali delle autovetture possono essere suddivisi in base al numero di stage in 3 categorie:

1. *Cambio ad un solo salto, od in cascata (single stage)*: sono impiegati nelle vetture in cui il motore e il cambio sono integrati nell'assale motore. Inoltre, per questa tipologia di cambi

non vi è nessuna variazione rispetto alla posizione del motore (longitudinale, trasversale, posteriore, anteriore), o del differenziale (di solito integrati nel cambio).

2. *Cambio a due salti, o a contralbero (dual stage)*: sono impiegati nelle vetture con motore anteriore longitudinale e trazione posteriore. In questa tipologia di cambio il differenziale, non è integrata nel cambio ma viene collegato ad esso attraverso un albero di trasmissione.
3. *Cambio a più salti, od a più contralberi (multi-stage)*: sono usati quando si vuole un cambio con dimensioni ridotte, soprattutto in veicoli con motori aventi 6 o più cilindri in linea e trazione anteriore.

Il termine stage o “stadio” si riferisce al flusso di potenza trasferito da una ruota dentata ad un’altra, le quali, sono posizionate su alberi di trasmissione differenti. Questa suddivisione riguarda principalmente le marce in avanti del cambio e non gli eventuali riduttori finali, differenziali e alberi intermedi necessari per la loro trasmissione.

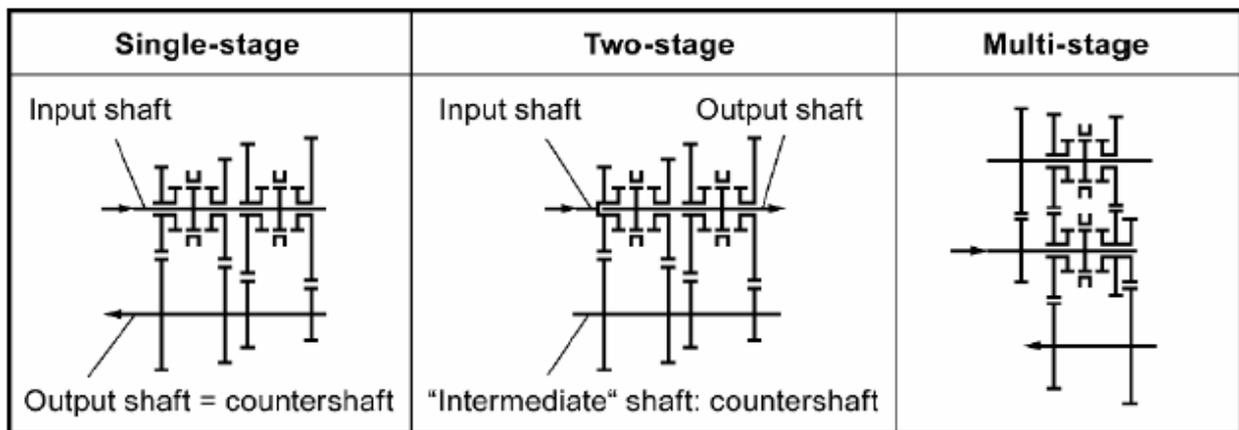


Figura 3.22-Rappresentazione di un cambio a 4 marce nelle 3 varianti: in cascata, a contralbero e a doppio contralbero [13]

Analizzando la Figura 3.22, si nota che: ogni ruota è rappresentata mediante un segmento, di dimensioni proporzionali al diametro primitivo dell’ingranaggio, terminato da due tratti orizzontali, a simboleggiare la larghezza dei denti. Se il segmento che rappresenta la ruota è interrotto in corrispondenza dell’albero significa che la ruota è folle²; viceversa, se esso interseca l’albero significa che la ruota è solidale all’albero. I mozzi di innesto sono rappresentati con le stesse regole, mentre il manicotto scorrevole è simboleggiato da due segmenti orizzontali. Le frecce indicano l’ingresso e l’uscita del moto [21]. Nella figura seguente, dove è rappresentato un cambio manuale sincronizzato a 5 rapporti, si riescono ad individuare gli altri elementi che compongono il cambio. I componenti rimanenti che fanno parte di un generico cambio di velocità sono:

² Con il termine “calettati in folle” si intende che tra il primo treno di ingranaggi e l’albero primario sono posti dei cuscinetti (bronzine o rullini) che permettono alle due parti di non essere vincolate nella rotazione; quindi, mentre l’albero primario gira con una certa velocità di rotazione, gli ingranaggi ad esso calettati possono essere fermi o ruotare a velocità differenti. [21]

- **L'albero primario:** permette il collegamento del motore alla trasmissione mediante la frizione. Esso, come si vede in figura, è collegato all'albero ausiliario tramite una coppia di ruote dentate sempre in presa.
- **L'albero ausiliario (o contralbero):** come detto precedentemente, è collegato all'albero primario grazie ad un ingranaggio sempre in presa. Inoltre, esso è collegato all'albero secondario tramite un numero di ingranaggi pari al numero delle marce;
- **L'albero secondario:** su di esso sono disposte un numero di ruote dentate pari al numero delle marce, le quali rimangono sempre in presa con quelle presenti sul contralbero. Questo trasmette il movimento alle ruote tramite l'albero di trasmissione, il riduttore finale, il differenziale e i semiassi;
- **Il rotismo ozioso della retromarcia:** grazie a questo ruotismo, si riesce a far girare l'albero di uscita nel verso opposto a quello d'ingresso. Questo set, composto da 3 ingranaggi, non ha il sincronizzatore e quindi, affinché si possa innestare la retromarcia, il veicolo deve essere fermo;
- **Ingranaggi:** coppia di ruote dentate (cilindriche o elicoidali) che, tramite il loro innesto, permettono di effettuare la variazione del rapporto di trasmissione tra l'albero primario e l'albero secondario;
- **Leva del cambio:** è generalmente posizionata nell'abitacolo e mediante essa si riesce a selezionare la marcia richiesta.

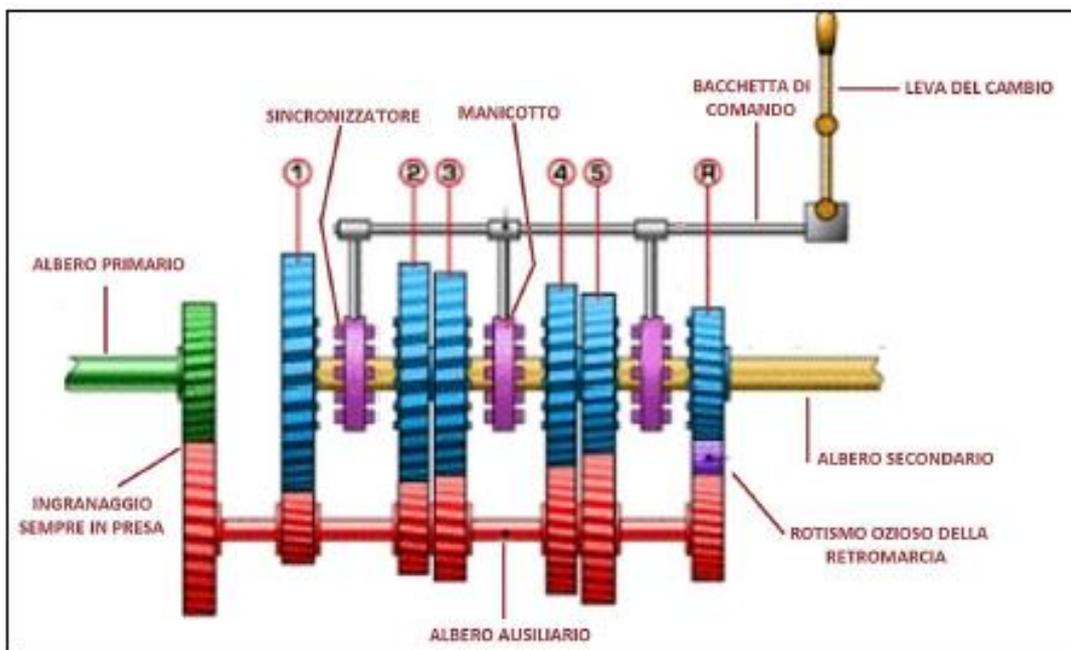


Figura 3.23-Esempio di un cambio manuale a 5 rapporti a contralbero o two stage [21]

Nella Figura 3.23, viene mostrato il funzionamento di un cambio manuale sincronizzato a contralbero. L'albero primario non è direttamente collegato con il secondario. Infatti, il primario trasmette la coppia motore al secondario mediante l'albero ausiliario. Il primario, è collegato all'albero ausiliario mediante una coppia di ruote dentate sempre in presa. L'ausiliario, a sua volta, è collegato al secondario mediante delle ruote dentate pari al numero di marce che costituiscono il cambio. Quando viene selezionata una marcia tramite la leva del cambio (innesto di una coppia di ingranaggi), la ruota dentata dell'ausiliario trasmette la coppia all'albero secondario mediante la coppia di ruote dentate ora in presa. Così facendo, la coppia proveniente dal motore ha raggiunto l'albero di trasmissione secondario e verrà trasferita alle ruote passando per il riduttore finale, il differenziale e i semiassi. Anche le trasmissioni, come gli altri componenti automobilistici, si sono evolute con il tempo.

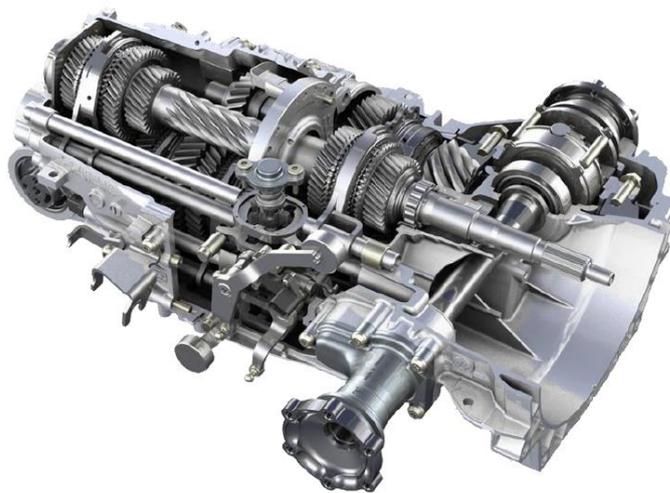


Figura 3.24-Cambio dual stage ZF -7MT

Infatti, si è passati da cambi con 3 o 4 rapporti, utilizzati a fine degli anni 70, a cambi con 5 rapporti fino alla fine degli anni 90, per poi arrivare a 6 o più rapporti negli ultimi anni. Tale evoluzione è da attribuire sia al sempre crescente aumento di potenza dei veicoli, sia alle normative anti-emissione, le quali, per essere rispettate, richiedono il funzionamento del motore ICE sempre alle condizioni di massima efficienza possibile. Nonostante siano presenti sul mercato differenti tipologie di cambio, automatici, semiautomatici o a variazione continua, il cambio manuale viene ancora ampiamente utilizzato. Quest'ultimo risulta, infatti, molto affidabile e robusto, non richiede uno specifico sistema di raffreddamento, presente nei cambi automatici, e, dal punto di vista del rendimento, ha un'elevata efficienza grazie all'utilizzo della frizione meccanica e non del convertitore di coppia. Anche dal punto di vista economico, il cambio manuale è molto competitivo rispetto a un cambio automatico, in quanto al suo interno sono presenti meno componenti elettronici ed è realizzato con un minor numero di elementi, permettendo così una manutenzione più agevole.

3.4.2 Trasmissioni manuali automatizzate

Le trasmissioni manuali automatizzate, o AMT, sono trasmissioni manuali nelle quali sia il processo di innesto e disinnesto della frizione sia il cambio marcia sono eseguiti da attuatori che ricevono il segnale di controllo tramite leve poste sul volante o, in caso di funzionamento completamente automatizzato, da un'unità di controllo della trasmissione (TCU). Tuttavia, anche su questo tipo di trasmissioni, il trasferimento di potenza avviene con un'interruzione di coppia, come nelle normali trasmissioni manuali (Figura 3.21). I cambi manuali automatizzati (AMT) sono disponibili nel mercato delle autovetture dalla fine degli anni '90. Questo tipo di trasmissione combina l'elevata efficienza delle trasmissioni manuali alla facilità di funzionamento di una trasmissione completamente automatica. Grazie alla loro semplicità di funzionamento, i cambi AMT trovano un elevato utilizzo nelle city car e nei veicoli commerciali leggeri, in quanto l'elevata efficienza della trasmissione può essere combinata con una strategia di cambio ottimizzata per i consumi, riducendo così le emissioni. I cambi AMT a loro volta si possono dividere in due tipi:

- a) Sistemi aggiuntivi;
- b) Sistemi integrati.

I sistemi aggiuntivi, come si può intuire dal nome, sono dei sistemi che possono essere aggiunti ad un cambio manuale pre-esistente per generare un AMT. I sistemi integrati, invece, sono quei sistemi che vengono progettati direttamente come AMT e, conseguentemente, non possono essere utilizzati come semplici cambi manuali.

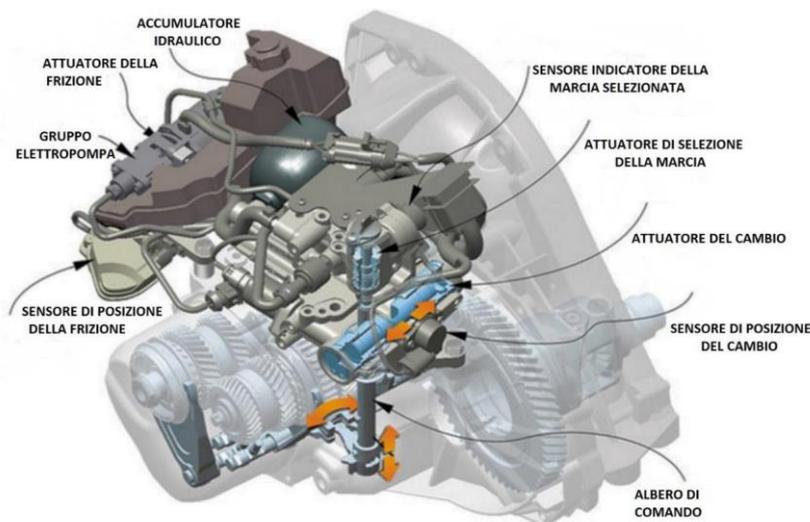


Figura 3.25-Esempio di cambio robotizzato con attuatori elettroidraulici [21]

I sistemi integrati hanno il vantaggio che, essendo sviluppati per una specifica applicazione, non devono scendere a compromessi, come succede invece nei sistemi aggiuntivi. Da questo si intuisce che essi sono migliori sia dal punto di vista delle performance (tempo di cambio e riduzione delle

emissioni), sia dal punto di vista della potenza trasmissibile. Gli elementi che permettono il cambio marcia sono gli attuatori, che possiamo classificare in due tipi:

- a) Elettroidraulici;
- b) Elettromeccanici.

I sistemi idraulici sono generalmente più costosi, ma presentano un vantaggio rispetto alle massime forze di cambio marcia possibili e ai tempi di cambio più brevi. Nei sistemi idraulici, i movimenti lineari sono generalmente implementati con l'utilizzo dei pistoni. I sistemi elettromeccanici, invece, utilizzano i motori elettrici come attuatori; questi sono utilizzati principalmente per le trasmissioni più piccole ed economiche con capacità di coppia fino a 250 Nm. La limitazione della coppia trasmissibile deriva dalla potenza necessaria per l'attivazione della frizione e dalle forze in gioco. Infatti, utilizzando dei motori elettrici, la potenza statica dell'attuatore aumenta all'aumentare della dimensione degli attuatori, mentre quella dinamica diminuisce a causa della maggiore inerzia. Andiamo qui di seguito a fare un esempio di un cambio a 7 velocità AMT. Per semplicità di comprensione, nello schema della trasmissione, sia i riduttori finali integrali che le retromarce delle varie trasmissioni saranno rappresentati con delle linee grigie. Inoltre, gli alberi sui quali è presente il rotismo ozioso della retromarcia, saranno rappresentati su piani differenti rispetto a quelli degli alberi principali. La posizione e le dimensioni degli ingranaggi folli hanno il solo scopo di dare un'idea del design fondamentale.

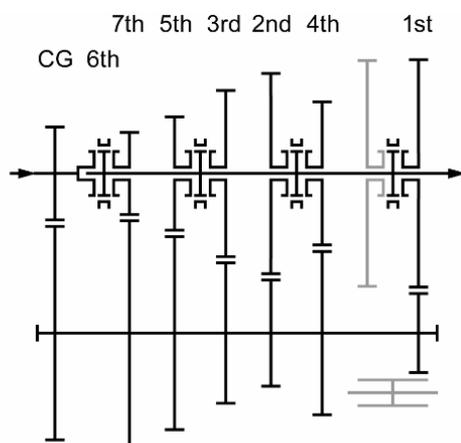


Figura 3.26-Two-stage 7-speed AMT (Getrag) [13]

Nella Figura 3.26 è rappresentato lo schema di un cambio a 7 rapporti sviluppato come cambio automatizzato con la tecnologia dell'attuatore integrato. Ciò consente di realizzare una disposizione del gruppo di ingranaggi specifica per una trasmissione AMT in cui, a differenza delle MT, le marce consecutive, fatta eccezione per la 6° e la 7°, sono posizionate su sincronizzatori differenti. In questo modo, i tempi di cambio marcia possono essere ridotti mediante l'attivazione contemporanea di due sincronizzatori (cambiata sovrapposta). Ossia, una volta inserita una marcia, es. la 3°, viene pre-selezionata la 4° marcia attraverso il sincronizzatore apposito (da notare che anche in caso di scalata

dalla 3° alla 2° si usa lo stesso sincronizzatore). Tuttavia, non è assolutamente possibile innestare due marce contemporaneamente, poiché ciò provocherebbe il blocco del gruppo propulsore. La riduzione dei tempi di cambio ha come conseguenza principale la riduzione del buco di coppia. La sesta marcia è una marcia diretta, ovvero gli alberi di ingresso e di uscita sono collegati direttamente, senza la presenza di ruote dentate nel flusso di potenza. Il meccanismo del cambio funziona in modo idraulico tramite attuatori a barra singola, producendo cambi di marcia estremamente rapidi. Gli attuatori idraulici si innestano direttamente nelle forcelle del cambio che sono realizzate in alluminio pressofuso. Questo cambio è stato sviluppato nel 2004 dalla Getrag ed è montato sulla BMW M5 (E60), nella Figura 3.27 è rappresentata una sezione reale del cambio discusso precedentemente.

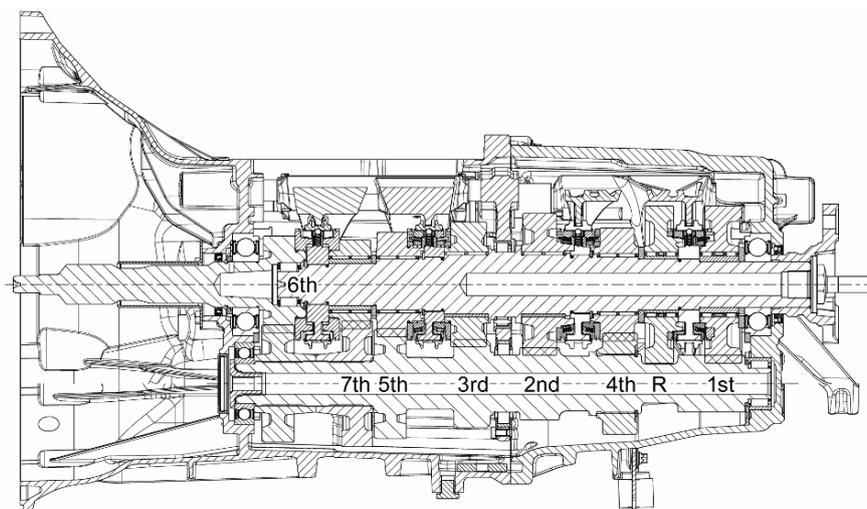


Figura 3.27-7-speed passenger car AMT Getrag 247 [13]

3.4.3 Trasmissioni automatiche

La trasmissione automatica (AT), è un tipo di trasmissione in grado di variare automaticamente i rapporti di trasmissione, svincolando il conducente dall'onere del cambio marcia. In Europa questo sistema di trasmissione è stato prevalentemente montato su veicoli di fascia alta. Mentre nel mercato NAFTA, i cambi automatici sono utilizzati nella maggior parte dei veicoli relegando i cambi manuali ad optional disponibili solo su vetture sportive. Di recente la situazione va in controtendenza: si realizzano cambi automatici dalle prestazioni sempre migliori, che permettono consumi di carburante minori e a costi più ridotti. In funzione della capacità di variare il rapporto di trasmissione, i cambi automatici si dividono in due categorie:

1. **Cambi automatici discreti**: il numero di rapporti di trasmissione disponibile è limitato, come avviene nei cambi manuali;
2. **Cambi automatici continui**: dispongono di un numero infinito di rapporti compresi fra due valori limite.

Di seguito andremo a soffermarci sui cambi automatici discreti, invece, in una sezione successiva dedicata (3.4.6), si approfondiranno le varie tipologie di cambio automatico a variazione continua del rapporto di trasmissione. Come precedentemente spiegato, i cambi automatici discreti, sono dei cambi automatici nei quali il numero totale dei rapporti è limitato. Nei cambi automatici con convertitore di coppia (3.3.3.3) quest'ultimo va a sostituire il rapporto della marcia più corta e, quindi, riduce di un'unità il numero di marce rispetto ad un cambio manuale con frizione. I rotismi impiegati nei cambi automatici discreti sono i rotismi epicicloidali (differenti configurazioni) che, in associazione a frizioni e freni, possono realizzare vari rapporti. Il rotismo epicicloidale è formato da una ruota dentata esterna (corona o ring gear) e da una ruota dentata interna (solare o sun gear) ad assi concentrici; insieme a questi due rotismi, con assi paralleli anch'essi, ingranano una serie di rotismi intermedi (satelliti o planet gear), i quali sono supportati da una struttura che può ruotare coassialmente al solare e all'anello, o corona, chiamata portatreno (o carrier).

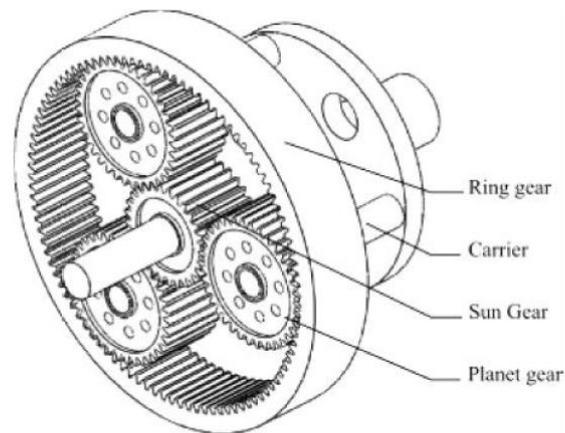


Figura 3.28-Schema semplificato di un riduttore epicicloidale [23]

Il numero di satelliti, disposti sul portatreno, equidistanti angularmente tra di loro, sono maggiori dell'unità. Al fine di trasmettere la coppia motore, si riesce ad effettuare la variazione del rapporto di trasmissione mediante l'ausilio di freni e frizioni che agiscono, a seconda dei casi, sulla corona, sul pignone centrale o sul porta-satelliti, rendendo solidali tra loro due di questi tre elementi. In condizioni ordinarie, il rotismo epicicloidale possiede tre gradi di libertà, tante quante sono le possibilità di rendere la scatola del cambio solidale con uno degli elementi. Dai 3 gradi di libertà, si riescono ad ottenere sette rapporti di trasmissione differenti. Infatti, i 3 rapporti principali si ottengono quando ogni singolo elemento si rende solidale allo statore del cambio, questi, a loro volta, devono essere moltiplicati per due, in quanto si deve tener conto della possibilità di essere collegati sia in ingresso che in uscita. L'ultimo rapporto lo si ottiene andando a collegare direttamente ingresso e uscita. Ovviamente, quanto detto va bene solo in via teorica in quanto sarebbe troppo oneroso rendere lo stesso elemento una volta ingresso e una volta uscita. Conseguentemente, nella realtà, i rapporti che si possono ottenere da un riduttore epicicloidale sono due. Quindi, per ottenere un maggior

numero di rapporti, è necessario collegare tra loro più rotismi epicicloidali in diverse modalità, andando a formare i cosiddetti rotismi composti. Nei cambi automatici, il cambio marcia avviene mediante un circuito idraulico gestito ed azionato elettronicamente. L'automazione del cambio richiede l'uso di un dispositivo di avviamento in grado di realizzare un innesto graduale, per questo motivo i cambi automatici discreti a rotismi epicicloidali presentano un convertitore di coppia.

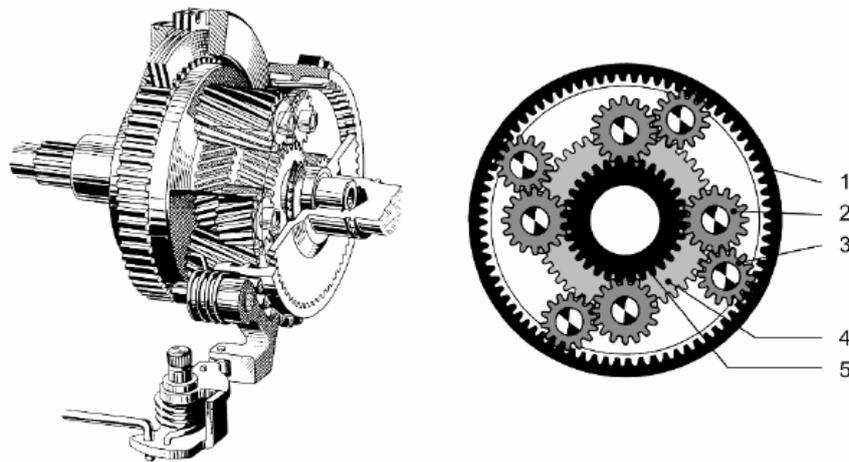


Figura 3.29-Esempio di un rotismo epicicloidale di Ravigneaux [13]

Un'evoluzione del classico rotismo epicicloidale è il rotismo di Ravigneaux, mostrato nella Figura 3.29. Esso è formato da un'unica corona (1) e da due solari coassiali di diametro diverso (4-5). Inoltre, vi sono due differenti tipi di planetari: quelli esterni (3), che ingranano con la corona (1) e con il solare di diametro maggiore (4), e quelli interni (2) che ingranano con il solare di dimensioni minori (5) e con la corona (1) mediante i planetari esterni (3). Con questo tipo di rotismo epicicloidale è possibile ottenere quattro rapporti in avanti ed una retromarcia; per ottenere rapporti più numerosi si è reso necessario aumentare la complessità dei rotismi componendo il riduttore di Ravigneaux con altri rotismi più semplici, fino ad ottenere anche sei rapporti in avanti e una retromarcia. Andiamo ora a fare un esempio di cambio automatico, lo ZF HP 26:

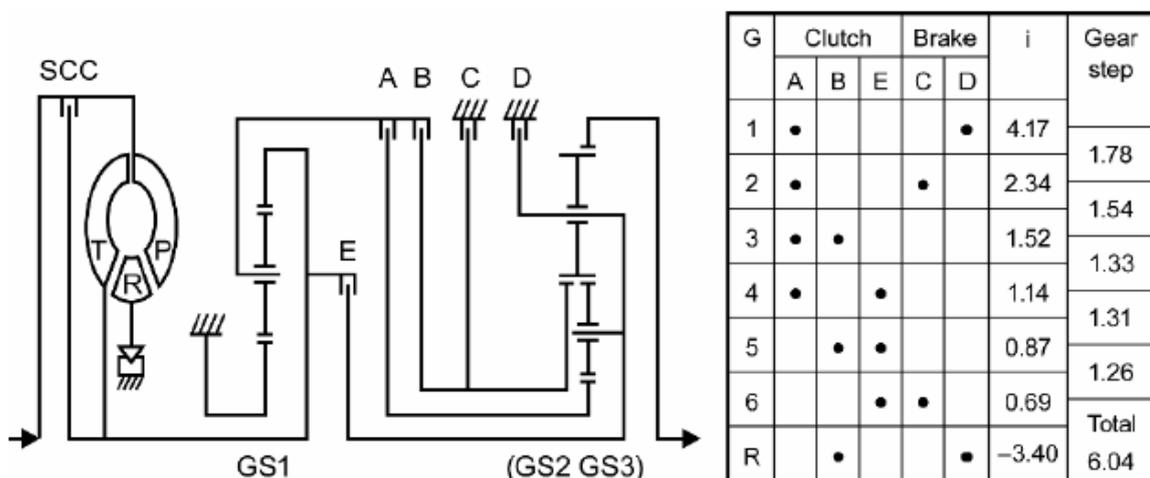


Figura 3.30-Schema esemplificato del cambio ZF HP26 [13]

Il cambio ZF 6 HP 26 può essere usato per una coppia motore fino a 600 Nm; esso si basa sul principio del cambio di Lepelletier, nel quale è presente un singolo ingranaggio planetario con un ingranaggio di Ravigneaux montato posteriormente. Questo cambio è costituito da 3 frizioni multidisco (A, B, E) e da 2 freni multidisco (C, D), ha una forma molto compatta (Figura 3.33) ed è in uso dal 2001. Andiamo a spiegarne brevemente il funzionamento. In marcia avanti e in retromarcia il convertitore di coppia aziona la corona dentata del gruppo di ingranaggi GS1 attraverso l'albero di ingresso; l'ingranaggio solare rimane fermo in tutte le marce. In prima marcia, la frizione multidisco A è chiusa e la potenza fluisce attraverso il portatreno del gruppo GS1 alla ruota solare piccola del cambio Ravigneaux montato posteriormente (GS2 e GS3). Il freno D è chiuso e il supporto dell'ingranaggio epicicloidale del gruppo Ravigneaux è fisso. Il rapporto è $i = 4,171$. In seconda marcia si apre il freno multidisco D e si chiude il freno C. Il solare del gruppo GS2 smette di muoversi e il supporto dell'ingranaggio planetario (portatreno) ruota. Gli ingranaggi planetari interni ed esterni ruotano l'uno sull'altro. Il rapporto totale è quindi $i = 2,340$. Quando si passa dalla seconda alla terza marcia, si apre il freno C e si chiude la frizione B. Nel set di ingranaggi Ravigneaux (GS2 e GS3), entrambi gli ingranaggi solari sono azionati con la velocità di rotazione del portatreno del gruppo GS1, quindi gli ingranaggi GS2 e GS3 ruotano come un unico blocco e il rapporto di trasmissione è pari a 1.521. In quarta marcia si apre la frizione B e si chiude la frizione E. In questo modo vengono azionati il solare e il supporto dell'ingranaggio planetario di GS3, il rapporto che si ottiene è di 1,143.

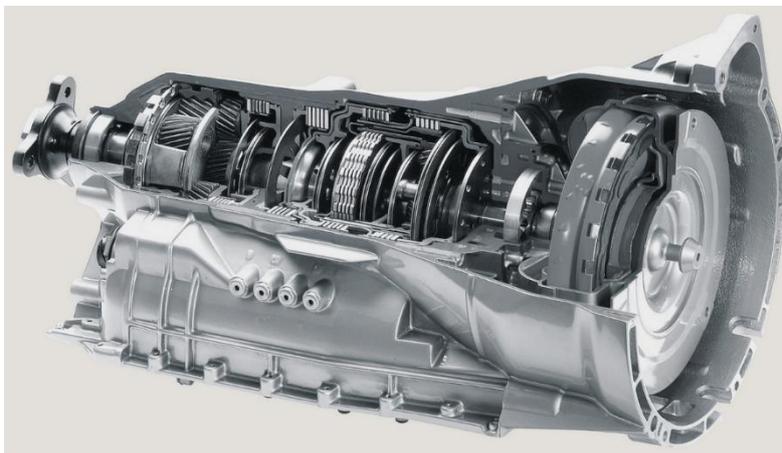


Figura 3.31-Rappresentazione della trasmissione ZF HP26

Quando si passa dalla 4° alla 5° marcia, la frizione A viene aperta e la frizione B chiusa. In questo caso, il solare del gruppo GS2 è quello guidato. Il rapporto di trasmissione è pari a 0,867. In sesta marcia si apre la frizione B e si chiude il freno C, facendo arrestare il solare del gruppo GS2. Gli ingranaggi planetari del gruppo GS1 sono bloccati. Il portatreno del riduttore Ravigneaux è azionato direttamente con la velocità della turbina, raggiungendo un rapporto di trasmissioni pari a 0,691. In

retromarcia la frizione B e il freno D sono chiusi. La corona dentata del gruppo Ravigneaux ruota ora in senso inverso rispetto a quello del motore con un rapporto di -3,403.

3.4.4 Trasmissioni a doppia frizione (DCT)

I cambi a doppia frizione combinano i vantaggi dei cambi manuali (elevata efficienza) con quelli dei cambi automatici (power shift, ossia trasferimento di potenza senza interruzione), (Figura 3.32).

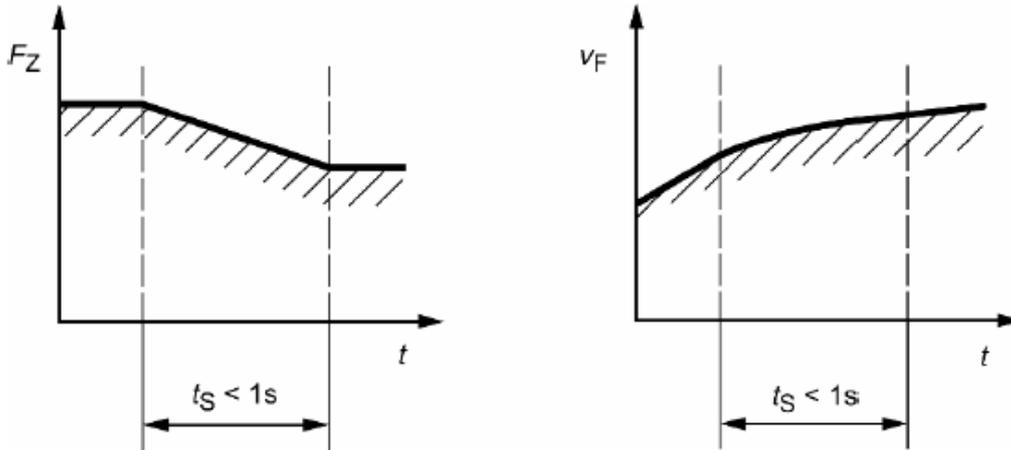


Figura 3.32-Diagramma qualitativo di forza e velocità quando si effettua il cambio marcia automatico[13]

Il principio dei cambi a doppia frizione è quello di avere due cambi secondari indipendenti collegati entrambi al motore tramite una frizione dedicata. Un cambio trasporta le marce dispari (1°, 3°, 5° ...) e l'altro le marce pari (2°, 4°, 6° ...). Entrambi i cambi secondari, se presi singolarmente, sono composti dagli stessi componenti visti per i cambi manuali (ruote dentate, sincronizzatori, ecc.). Il processo di cambio delle trasmissioni a doppia frizione, come detto precedentemente, avviene senza interruzione di potenza.

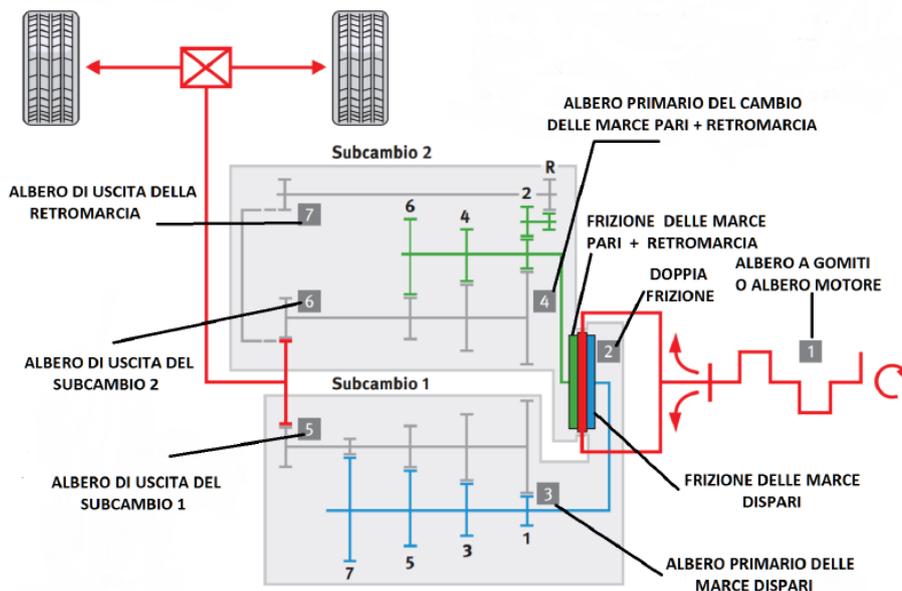


Figura 3.33-Schema semplificato di un cambio DCT con 7 marce [21]

Per spiegare il funzionamento dei cambi a doppia frizione, prendiamo ad esempio una condizione di upshift, cambio marcia dalle 2° alla 3°. Quando si verifica una situazione. Durante il funzionamento del veicolo, che richiede un passaggio dalla seconda marcia attualmente innestata (Cambio 2) alla terza marcia, quest'ultima viene innestata nel cambio secondario 1. La variazione del rapporto di trasmissione non avviene istantaneamente, ma vi sono delle fasi di sovrapposizione delle due frizioni, chiamato incrocio delle frizioni nelle quali la frizione collegata al cambio 2 si sta disinnestando e, contemporaneamente, la frizione collegata al cambio 1 si sta innestando. Quando la frizione collegata al cambio 2 è innestata e sta trasmettendo la coppia proveniente dal motore, la seconda marcia è completamente disinnestata. In funzione delle condizioni di guida rilevate dalla centralina, si va a preselezionare un'altra marcia sul cambio 2. Anche nel caso di downshift, il processo di base è lo stesso precedentemente enunciato. In linea di principio, il controllo del processo di cambio nelle trasmissioni a doppia frizione è simile alle trasmissioni automatiche. Tuttavia, i cambi a doppia frizione non possono saltare il cambio senza interruzione di coppia, trasmessa, per quanto riguarda le marce calettate, sullo stesso albero (cioè dal 1° al 3° o dal 2° al 4°). Durante il processo di selezione della marce, il conducente non si accorge di quello che sta succedendo.

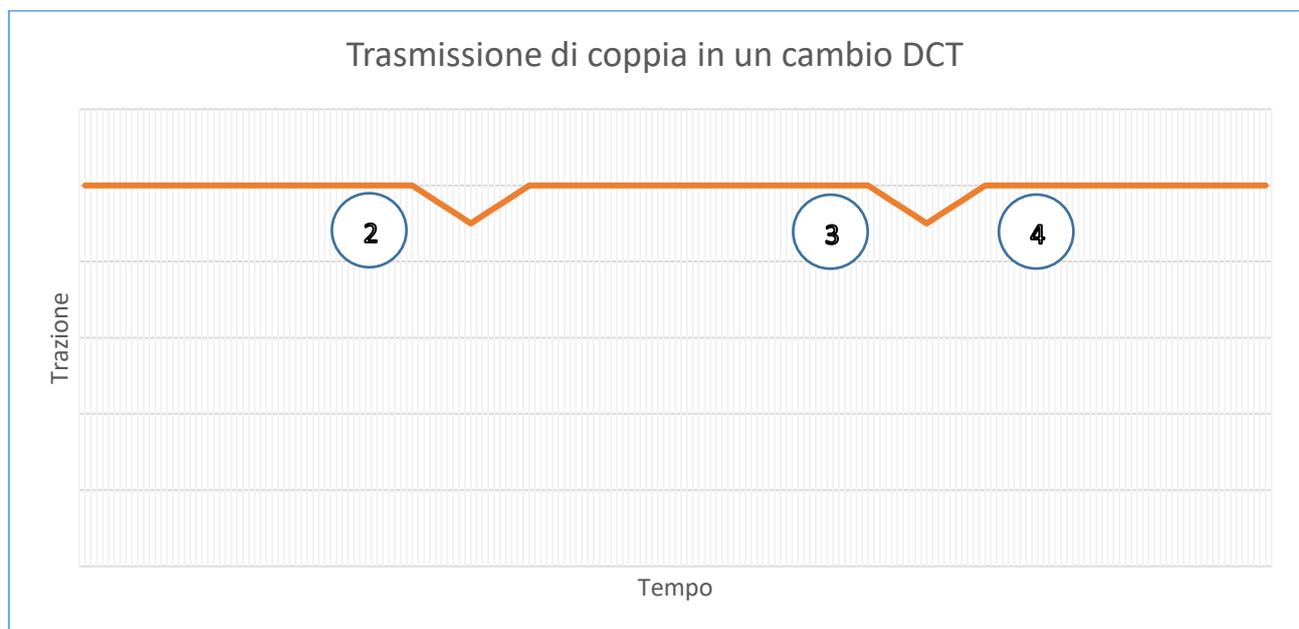


Figura 3.34-Esempio della trasmissione della coppia in un cambio DCT

Il cambio DCT può funzionare sia in modalità totalmente automatica, in cui il rapporto da inserire viene scelto elettronicamente, sia in modalità sequenziale, dove il guidatore decide di salire o scendere con i rapporti tramite la leva del cambio posta sul volante. Il vantaggio principale di un cambio DCT risiede nel fatto di poter sdoppiare i compiti della trasmissione, distribuendoli sulle due coppie di frizioni e alberi, consentendo di avere tempi di cambio molto più brevi rispetto a un cambio

tradizionale (3-4 centesimi di secondo). Mediante questo cambio, vengono garantire accelerazioni più rapide, rispetto a un cambio automatico, e un comfort maggiore, rispetto a un cambio manuale, poiché la cambiata può essere considerata senza interruzione di coppia motrice. Tuttavia, quest'ultima affermazione non è del tutto vera, infatti, durante il disinnesto della prima frizione e l'innesto della seconda, si notano delle piccole variazioni di coppia motrice (mostrate a solo scopo esemplificativo nella Figura 3.34). Ogni car makers possiede il proprio cambio a doppia frizione che, seppur chiamato con nomi differenti (DSG, S-tronic, TCT, Speedshift, ecc.), ha lo stesso principio di funzionamento precedentemente discusso. Di seguito andiamo ad analizzare più da vicino il famosissimo DSG (Direct Shift Gearbox) Volkswagen, introdotto per la prima volta sulle vetture mass market nel 2003.

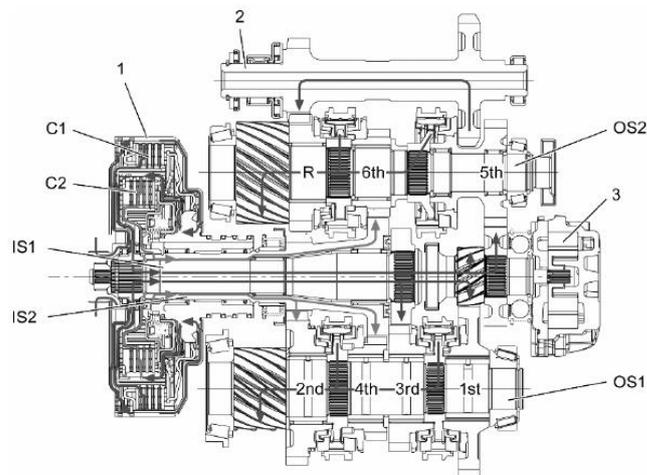


Figura 3.35-Sezione principale con flussi di potenza di un cambio a 6 velocità DSG VW [13]

Quello indicato in Figura 3.35 è il cambio trasversale a 6 marce Volkswagen, il quale è composta da:

1. Due frizioni in bagno d'olio C1 e C2;
2. Un albero folle della retromarcia 2;
3. La pompa dell'olio 3;
4. L'albero di entrata del primo albero secondario IS1 ($1^{\circ}/3^{\circ}/5^{\circ}/R$);
5. L'albero di entrata del secondo albero secondario IS2 ($2^{\circ}/4^{\circ}/6^{\circ}$);
6. L'albero di uscita 1 con pignone costantemente in presa OS1;
7. L'albero di uscita 2 con pignone costantemente in presa OS2;

A differenza di quanto visto nella Figura 3.33, i due alberi, d'ingresso e d'uscita, non sono disposti in parallelo ma coassialmente tra di loro per risparmiare spazio. Per far ciò l'albero posto esternamente deve essere, per ovvie ragioni, cavo. Il motore aziona i supporti della piastra esterna delle frizioni C1 e C2 tramite un volano a doppia massa. I supporti della piastra interna delle due frizioni sono collegati tramite scanalature dell'albero cardanico agli alberi di entrata dei due cambi secondari: il cambio secondario 1 con l'albero interno in entrata IS1 e il cambio secondario 2 con l'albero di ingresso più corto IS2 progettato come albero cavo. I sincronizzatori sono montati sugli

alberi di uscita OS2 e OS1. La 1° e la 3°, la 2° e la 4° e la 6° e la retromarcia sono gestite da un unico sincronizzatore. I due pignoni sono costantemente innestati nella trasmissione finale (non visibile nella figura), la quale, a sua volta, aziona un differenziale a coppia conica. La potenza viene trasmessa dal motore attraverso la scanalatura presente sull'albero cardanico esterno della doppia frizione, il quale è impegnato con il volano by-massa. La potenza viene trasmessa agli alberi di entrata IS1 e IS2 tramite i supporti delle rispettive frizioni C1 e C2. Durante il processo, la coppia viene trasmessa tramite i supporti dall'ingranaggio esterno a quello interno. I due alberi d'ingresso sono innestati con gli ingranaggi interni della doppia frizione. La frizione è progettata per 350 Nm. Tutto il funzionamento viene gestito elettronicamente tramite una serie di centraline e di sensori. La pompa dell'olio si trova sul lato del cambio lontano dal motore ed è azionata direttamente dalla velocità del motore tramite un albero centrale che scorre all'interno dell'albero d'ingresso IS1. Poiché la potenza totale assorbita dalla pompa rappresenta una differenza importante rispetto ai cambi manuali in termini di perdita di potenza complessiva, per aumentare l'efficienza si è provveduto sempre più a ridurre l'assorbimento della pompa.

3.4.5 Trasmissioni nei veicoli ibridi

Per discutere delle trasmissioni adottate nei veicoli ibridi bisogna riprendere i vari concetti discussi nel capitolo 1. Gli ibridi Micro e Mild sono progettati nella maggior parte dei casi con un'architettura di ibrido parallelo. Mentre, i veicoli Full-hybrid sono stati progettati con un'architettura di ibrido parallelo o di ibrido power-split.

3.4.5.1 Trasmissioni negli ibridi serie

Prima di iniziare la disquisizione sulle trasmissioni adottate nei veicoli ibridi serie (1.3.2.1) è opportuno effettuare un breve riepilogo di quanto enunciato in precedenza per questi veicoli:

- Non vi è nessun accoppiamento meccanico del motore ICE con le ruote;
- Il cambio meccanico non è obbligatorio;
- Il motore a combustione interna, funziona esclusivamente come produttore di energia per i motori elettrici;
- Il sistema è costituito da due macchine elettriche:
 1. La prima che funge da generatore;
 2. La seconda che funge sia da generatore che da motore.

I propulsori ibridi serie hanno una rilevanza pratica soprattutto per i veicoli commerciali, in quanto il motore ICE può lavorare sempre in condizioni di massima efficienza, mentre vengono poco utilizzate

sui light vehicles. Infatti, a listino, in Europa esiste la sola BMW I3 RE che non necessita di un cambio meccanico, in quanto il sistema che permette il moto è elettrico.

3.4.5.2 Trasmissioni negli ibridi paralleli

Per l'analisi delle trasmissioni utilizzate nei veicoli ibridi paralleli, bisogna riprendere i concetti discussi nel paragrafo 1.3.2.2:

- I motori possono funzionare in contemporanea oppure singolarmente;
- È richiesto un cambio meccanico, il quale può derivare anche dal veicolo ICE esistente;
- È necessaria una sola macchina elettrica;
- Quando viene utilizzato il motore a combustione interna, esso riesce a lavorare con un'efficienza ottimale;
- Se la potenza generata dal motore ICE è superiore a quella richiesta dall'utilizzatore, la potenza in eccesso può essere utilizzata per ricaricare gli accumulatori;
- Se la potenza richiesta dall'utilizzatore è inferiore a quella generabile dal motore a combustione, il motore elettrico può fornire supporto fintanto che lo stato di carica della batteria lo consente;
- Si deve tener conto delle perdite dovute alle differenti conversioni di energia.

L'ibrido parallelo descritto di seguito è un esempio di Full hybrid. Il riduttore di base nel sistema "BMW Active Transmission" mostrato nella Figura 3.36 è il cambio automatico a 6 marce ZF 6 HP 26.

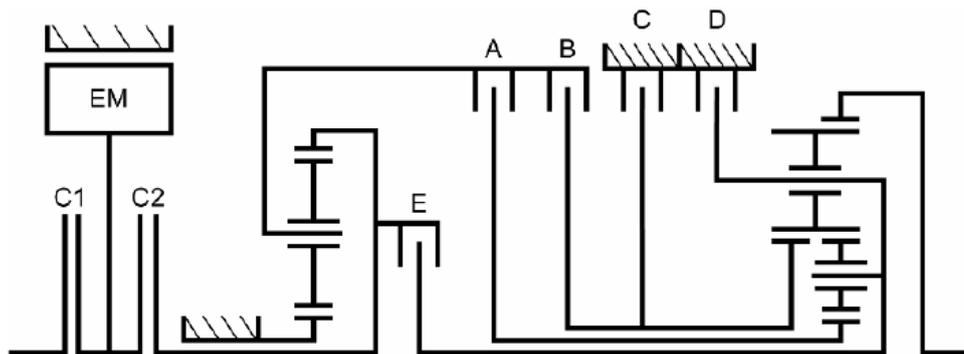
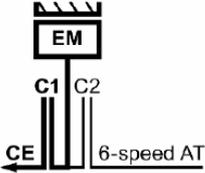
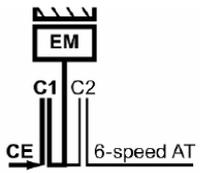
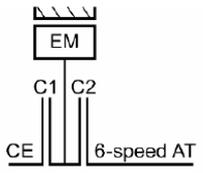
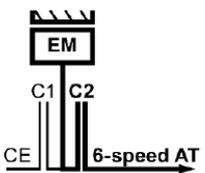
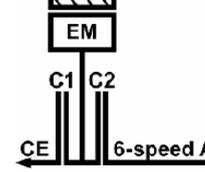
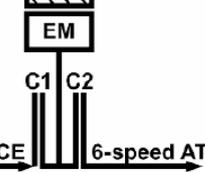
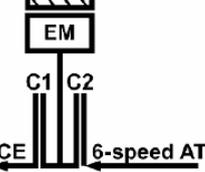


Figura 3.36-Schema semplificato della trasmissione automatica utilizzata sui veicoli ibridi paralleli [13]

Questo cambio è stato sviluppato aggiungendo a un cambio esistente un modulo che è costituito da una macchina elettrica EM collegata, tramite la frizione C1, al motore a combustione interna (CE) e, mediante la frizione C2, all'ingresso del cambio. Mediante quest'unità aggiuntiva si possono ibridizzare differenti tipi di cambio meccanico, in quanto l'unità aggiuntiva è facilmente installabile e poco ingombrante. Il modulo ibrido (una macchina elettrica con le due frizioni C1 e C2) sostituisce il convertitore di coppia idrodinamico nella campana del convertitore e assume anche la funzione di

frizione. Le funzioni ibride sono rappresentate nella tabella 3.2. Le direzioni delle frecce indicano sempre la direzione del flusso di corrente:

Tabella 3.2-Differenti modalità di funzionamento del cambio ZF HP 26

	<p>Avviamento a freddo del CE tramite macchina elettrica utilizzando la frizione C1 (si può quindi omettere il motorino di avviamento del motore).</p>
	<p>Il veicolo è fermo, il CE fa funzionare e carica l'accumulatore di energia elettrica (batteria elettrochimica o condensatori a doppio strato) con la macchina elettrica azionata da generatore tramite la frizione chiusa C1.</p>
	<p>Se lo stato di carica dell'accumulatore di energia lo consente, il CE può essere spento in fasi stazionarie o ai semafori (Start&stop). L'alimentazione di bordo viene rilevata durante queste fasi dall'accumulatore di energia.</p>
	<p>Partenza o manovra a bassa velocità utilizzano solo il propulsore elettrico (CE spento, frizione C1 aperta).</p>
	<p>Avvio del CE durante la guida a causa di maggiori prestazioni richieste da parte del conducente chiudendo la frizione C1.</p>
	<p>Dopo un periodo di transitorio, durante il quale nella frizione C1 si ha uno slittamento, il CE fornisce la potenza richiesta per il movimento. In questa condizione operativa, la coppia prodotta dalla macchina elettrica può temporaneamente sovrapporsi a quella del motore ICE, cosa che si verifica durante la fase di boost.</p>
	<p>Durante la fase di coasting, guidando in discesa, la coppia può essere fornita per inerzia dal motore elettrico funzionante da generatore. L'energia prodotta per inerzia viene quindi convertita in energia elettrica e temporaneamente immagazzinata nelle batterie.</p>
	<p>L'efficienza della conversione dell'energia cinetica in energia elettrica durante la fase di coasting o in frenata, può essere migliorata andando a disaccoppiare la frizione C1, andando non solo a spegnere il motore CE, ma evitando che quest'ultimo venga trascinato e che possa sottrarre energia.</p>

Di seguito viene riportata una sezione costruttiva della trasmissione ZF 6 HP 26, precedentemente analizzata:

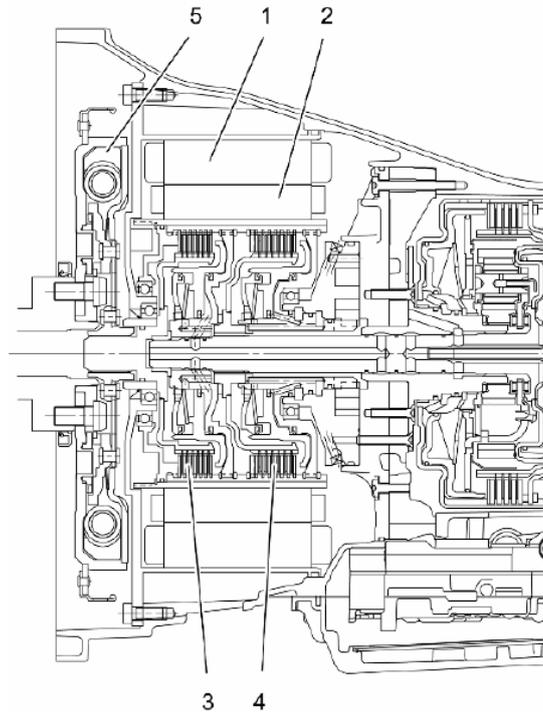


Figura 3.37-Sezione costruttiva del cambio ZF HP 26 [13]

Come si può vedere dalla Figura 3.37, il convertitore di coppia è sostituito da un motore sincrono a magneti permanenti (PSM), che comprende uno statore (1) e un rotore (2). Il motore risulta integrato con le due frizioni multidisco, in bagno d'olio, C1 (3) e C2 (4). La frizione separatrice C1 e la frizione principale C2 sono innestate e raffreddate ad olio tramite la centralina del cambio idraulico. Un volano a bi-massa (5) disaccoppia le irregolarità di rotazione del motore nella direzione di ingresso del cambio.

3.4.6 Trasmissioni a variazione continua di fase (CVT)

Come visto nei paragrafi precedenti, per sfruttare a pieno la potenza generata da un motore a combustione interna, si ha bisogno di un cambio. La quantità di energia che può essere effettivamente utilizzata non può essere sfruttata appieno dal numero finito di marce. Quindi, se si avesse un numero illimitato di marce si riuscirebbe a sfruttare tutta l'energia prodotta dal motore; è proprio da questo concetto che nasce la trasmissione con variazione continua, mediante la quale il motore può essere azionato nel punto di funzionamento ideale per privilegiare i consumi o le prestazioni, a seconda della necessità. Queste tipo di trasmissioni sono denominate CVT (Continuously Variable Transmissions), e posso essere classificate, come si vede dalla Figura 3.39, in 3 famiglie a seconda delle modalità di trasferimento e di conversione dell'energia.

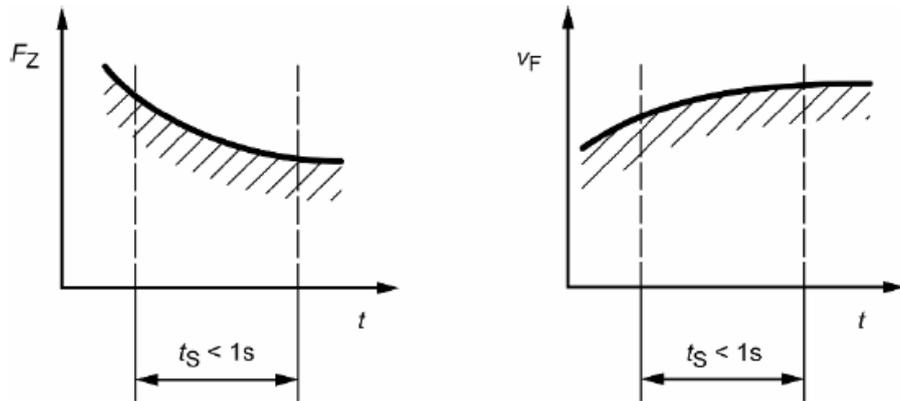


Figura 3.38-Diagramma qualitativo di forza e velocità quando si effettua il cambio marcia CVT[13]

3.4.6.1 Trasmissioni CVT meccaniche

Le trasmissioni CVT meccaniche, come dice la parola stessa, sono caratterizzate da un funzionamento totalmente meccanico, quindi privo di sistemi elettrici. Le categorie principali sono:

- *Friction Type CVT*: sono tutte le trasmissioni meccaniche in cui il trasferimento di potenza avviene per mezzo dell'attrito statico e non si verifica movimento relativo tra i componenti.
- *Traction Type CVT*: sono comprese tutte le trasmissioni che hanno bisogno del contatto di rotolamento tra due organi posti in rotazione.
- *Variable Geometry CVT*: tutti i rotismi non ordinari (rotismi epicicloidali) a geometria variabile. [23]

La nostra attenzione si focalizzerà sulle prime due categorie.

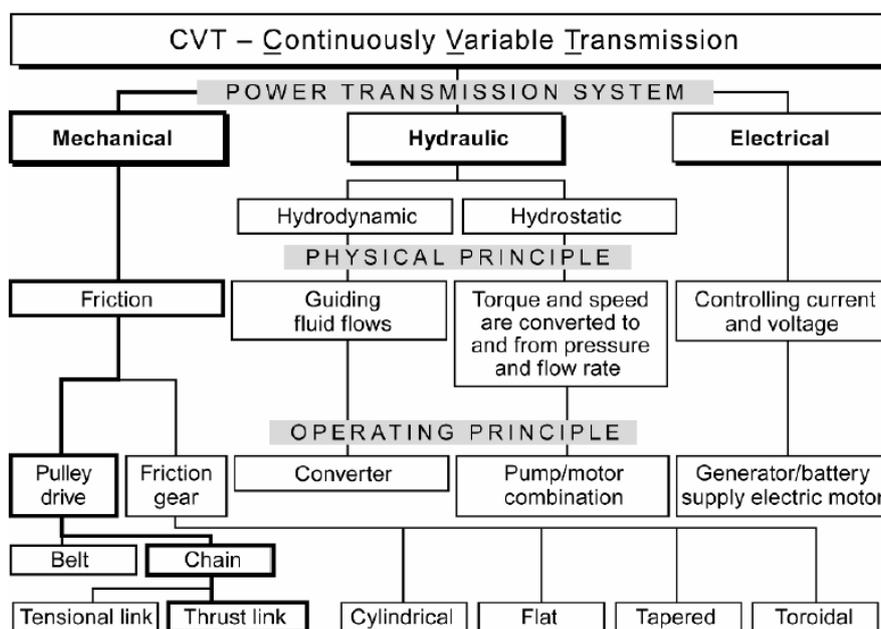


Figura 3.39-Tipologie di trasmissioni a variazione continua [13]

3.4.6.1.1 Trasmissione CVT a catena/cinghia

Le trasmissioni a variazione continua utilizzate nelle autovetture prodotte in serie sono trasmissioni costituite da due pulegge di diametro variabile. Il componente principale della trasmissione a puleggia è il variatore, il quale è costituito principalmente da due dischi conici e da una catena (o cinghia di gomma). La potenza viene trasmessa per attrito attraverso la catena (cinghia) che scorre tra due dischi conici regolabili assialmente. Attraverso la regolazione assiale dei dischi conici, la catena (cinghia) scorre su diametri variabili, variando all'infinito il rapporto tra due valori limite definiti. La pressione relativa tra la coppia di dischi conici sulla catena (cinghia) richiede molta attenzione, poiché una pressione eccessiva andrebbe a ridurre l'efficienza della catena, portando perdita di potenza da contatto. È, inoltre, fondamentale evitare lo slittamento della catena, poiché ciò porterebbe inevitabilmente alla distruzione della trasmissione.

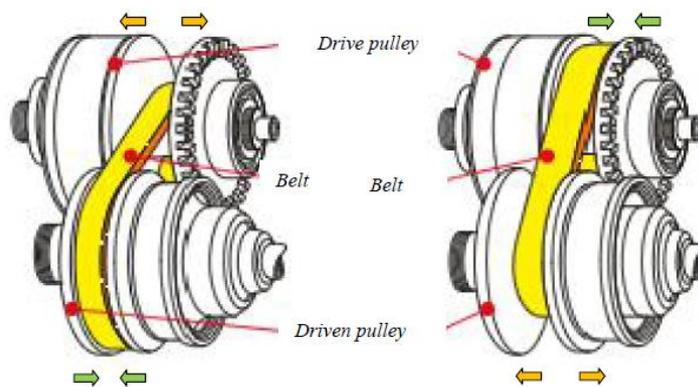


Figura 3.40-Configurazione di una trasmissione CVT a cinghia elastomerica [23]

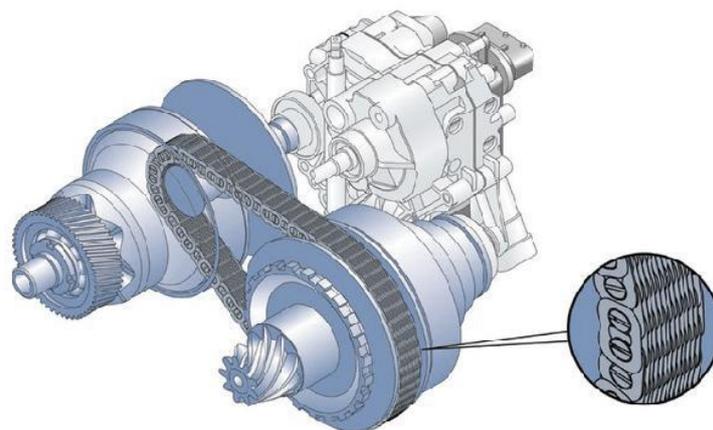
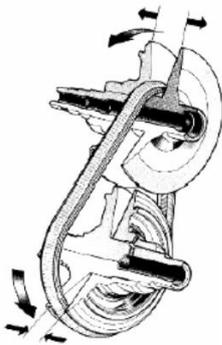


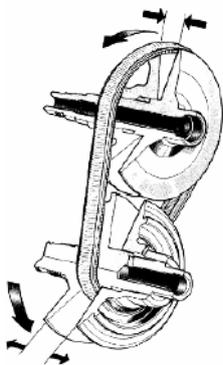
Figura 3.41-Trasmissioni CVT a catena metallica [23]

Il movimento relativo delle semi-puleggia fissa, rispetto a quella mobile, si può effettuare mediante un dispositivo meccanico e/o elettrico. Così facendo, si riesce a modificare il diametro apparente su cui si avvolge la catena (cinghia) e conseguentemente si riesce a variare il rapporto di trasmissione.

In seguito al movimento delle semi-pulegge, la gola sulla quale lavora la catena (cinghia) si può andare ad allargare o ad accorciare. Andiamo di seguito a spiegare meglio i due casi:



Se la gola aumenta, la cinghia va a lavorare in una posizione più vicina all'asse di rotazione e, conseguentemente, diminuisce il diametro utile della puleggia a causa della riduzione del raggio di avvolgimento.



Se la gola diminuisce, la cinghia va a lavorare in una posizione più lontana dall'asse di rotazione e, conseguentemente, aumenta il diametro utile della puleggia a causa dell'aumento del raggio di avvolgimento.

In entrambi i casi, la lunghezza della cinghia non varia e, conseguentemente ad una diminuzione del diametro utile di una puleggia, dovrà corrispondere un aumento proporzionale del diametro utile dell'altra. Il rapporto di trasmissione diventa più corto riducendo il diametro utile della puleggia conduttrice (e contemporaneamente aumentando quello della puleggia condotta).

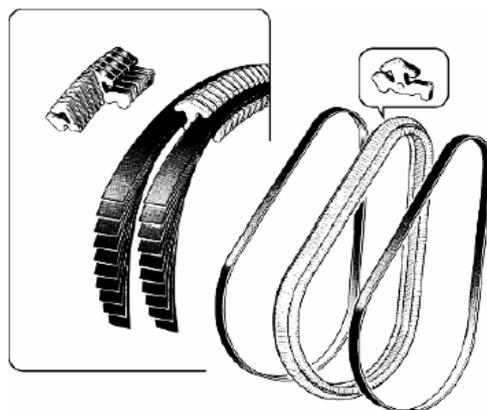


Figura 3.42-Esempio degli elementi costituenti la cinghia dei cambi CVT [13]

Facendo il contrario, esso invece si allunga; è come se si innestassero in sequenza tante marce sempre più alte, senza alcuno “stacco” tra l’una e l’altra. Le cinghie delle trasmissioni CVT con pulegge sono costituita da due anelli, ognuno dei quali è formato da una serie di fogli di acciaio sovrapposto e da

centinaia di piastrine trasversali aventi una forma particolare (Figura 3.42), le quali, anch'esse in acciaio, trasmettono il moto da una puleggia all'altra lavorando in compressione.

3.4.6.1.2 Trasmissioni CVT a coni

Rientrano in questa tipologia di *Traction Type CVT* i cambi, la cui geometria è costituita da uno o più corpi di forma conica che cooperano lungo le reciproche generatrici realizzando così la variazione di rapporto. Esistono trasmissioni CVT ad un cono soltanto dove un corpo volvente, spostandosi sulla generatrice del primo, realizza la variazione di rapporto tra diametro inferiore e diametro superiore del cono stesso. Vi sono poi CVT a due coni, posizionati in opposizione (ad eguale diametro inferiore dell'uno corrisponde il diametro maggiore dell'altro), in cui il contatto fra tutti i possibili diametri è realizzato da un anello interposto tra i coni stessi. La variazione del rapporto di trasmissione in questo caso si realizza movimentando l'anello lungo il mantello-generatore dei due coni. [23]

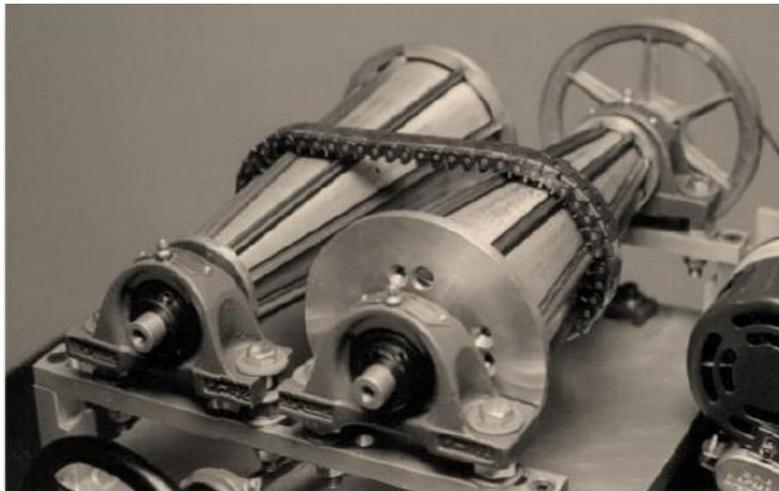


Figura 3.43-Tipo di trasmissione CVT- dual cone [23]

Tutte le trasmissioni CVT meccaniche trasmettono la coppia tramite attrito. Si dovrà quindi trovare un ottimo compromesso, in tutti i punti di funzionamento della trasmissione, tra garantire una pressione di contatto sufficiente e la giusta dimensione, più piccola possibile, per evitare troppe perdite durante il funzionamento. Inoltre, un altro aspetto che tutti i costruttori tengono in considerazione, è la garanzia di un controllo del rapporto di trasmissione, il quale, come ben noto, influenza l'handling e il consumo di combustibile.

3.4.6.2 Trasmissione CVT idrauliche

Delle trasmissioni idrauliche, che si dividono in idrodinamiche ed idrostatiche, andremo a considerare le trasmissioni idrostatiche. Una trasmissione idrostatica trasmette potenza mediante l'impiego di un fluido ad elevate pressioni, tipicamente un olio. Gli elementi principali di questo tipo di trasmissione sono:

- Un motore elettrico;
- Una pompa;
- Un motore idraulico di cui almeno uno a cilindrata variabile.

Questa configurazione è visibile dalla Figura 3.44. Tutti gli elementi sono collocati all'interno di un circuito idraulico ad anello chiuso, nel quale vengono posizionati gli elementi secondari come serbatoi, valvole di sicurezza, valvole di ritegno, etc. La pompa idraulica ha la funzione di convertire la potenza meccanica, proveniente dall'albero motore, in potenza idraulica del fluido e il motore idraulico, ricevendo il fluido, ha la funzione di trasformare a sua volta la potenza idraulica nuovamente in potenza meccanica per movimentare l'albero di uscita. In altri termini la pompa è in grado di generare pressione e portata di fluido, ed il motore idraulico genera coppia motrice e quindi velocità di rotazione. [23]

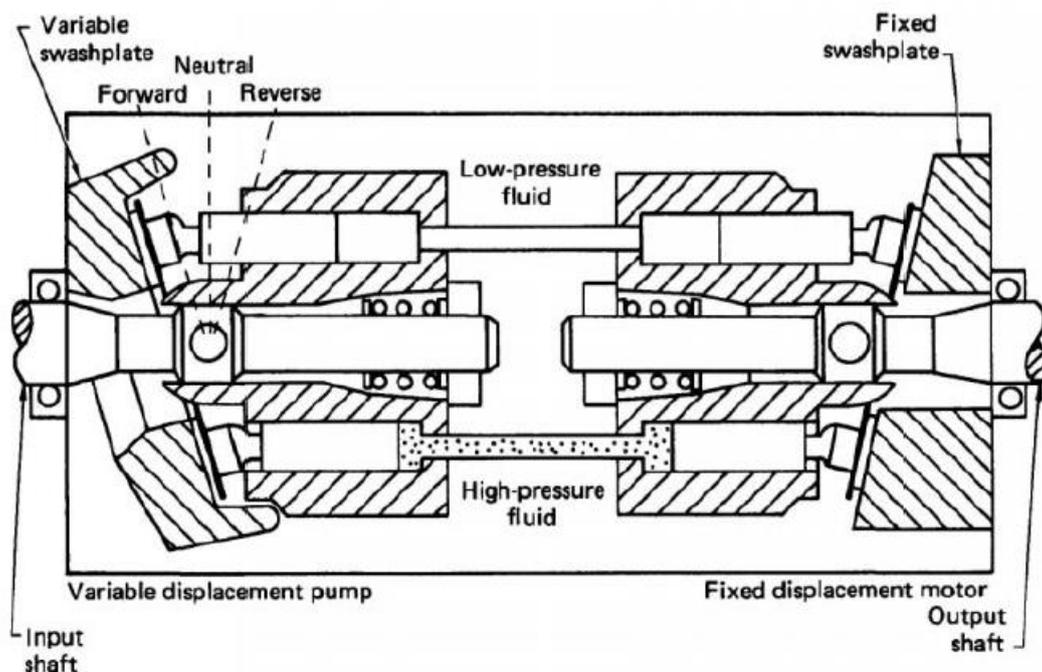


Figura 3.44-Schema di una trasmissione CVT idrostatica [23]

Le macchine idrauliche che vengono utilizzate generalmente in queste trasmissioni sono di tipo volumetrico a pistoni assiali, caratterizzate da un buon compromesso tra efficienza e costi rispetto, ad esempio, a pompe a palette o pompe a pistoni radiali. Il rapporto di trasmissione varia in modo continuo in virtù delle diverse inclinazioni che può assumere il piatto valvola (*swashplate*). La variabilità dell'intervallo, invece, dipende dalla scelta delle unità idrauliche: in numerose applicazioni vengono impiegati una pompa a cilindrata variabile e un motore a cilindrata fissa, ma si può ottenere un intervallo ancora più ampio impiegando anche il motore a cilindrata variabile. [23] La Figura 3.45, rappresenta gli andamenti della cilindrata al variare della velocità di uscita della trasmissione. Dal

grafico si può notare come la parzializzazione della pompa assume valori compresi tra 0 e 1. Il motore, invece, viene modulato a partire dalla cilindrata massima e si va via via riducendo raggiungendo un valore minimo α_{min} . La prima variazione di velocità (da A-A1 a B) si ottiene mantenendo il *swashplate* del motore ad inclinazione e cilindrata massima, variando solamente l'inclinazione della valvola della pompa. Nel punto B entrambe le cilindrata raggiungono il valore massimo; per ottenere la seconda variazione di velocità (da B a C-C1) si agisce sul motore riducendone la parzializzazione, mentre la pompa è mantenuta a cilindrata massima. La velocità massima all'albero di uscita la si ottiene nel momento in cui il motore assume il valore minimo di parzializzazione α_{min} . La trasmissione idrostatica permette anche di invertire il verso di rotazione del motore idraulico, permettendo così di effettuare la retromarcia.

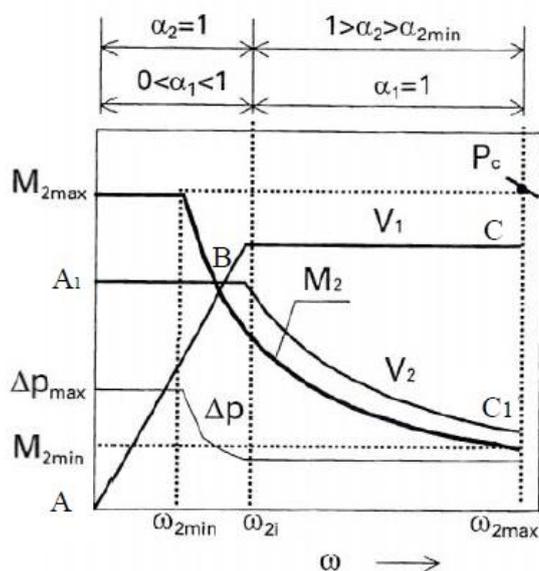


Figura 3.45-Tipici andamenti della cilindrata di pompa e motore e della pressione a seconda della velocità di rotazione in uscita dalla trasmissione idrostatica. [23]

Questa condizione si viene a verificare quando la pompa lavora con una parzializzazione inferiore a 0 e, quindi, con angolo di inclinazione negativo. Così facendo, si crea una circolazione del fluido di verso opposto e il ramo di bassa pressione diviene il ramo di alta pressione e viceversa. E' importante sottolineare un particolare punto di funzionamento chiamato *zero speed point*, in cui la trasmissione entra in arresto attivo. L'albero di uscita dalla trasmissione non genera moto in quanto la sua velocità di rotazione è nulla, ma il motore primo è comunque operoso. Si verifica lo *zero speed* nel momento in cui la cilindrata della pompa è nulla e quindi parzializzazione nulla [23]. Le trasmissioni idrostatiche CVT sono in grado di supportare elevate potenze specifiche, tuttavia, a causa della doppia conversione di energia, l'efficienza totale della trasmissione può essere ridotta. Questo si verifica quando le macchine idrauliche lavorano con forti parzializzazioni, pressioni elevate e basse velocità. A causa di ciò, queste trasmissioni vengono installate su macchine di cilindrata ridotta e potenza contenuta.

3.4.6.3 Trasmissioni CVT elettriche

Per quanto riguarda le trasmissioni CVT elettriche, andremo ad analizzare il caso della trasmissione power-split Toyota, utilizzata solitamente negli ibridi compressi, la quale prende anche il nome di e-CVT. Prima di fare ciò facciamo breve riassunto delle caratteristiche principali di questo tipo di ibridi:

- Si riesce a ripartire la potenza del motore a combustione interna sia in percorsi meccanici che elettrici;
- È necessaria la presenza di un riduttore epicicloidale per permettere l'interazione tra la potenza generata dal motore ICE e quella generata dal motore elettrico. Ciò permette una continua conversione di coppia e velocità;
- Sono necessarie almeno due macchine elettriche ad alte prestazioni, le quali, a causa dell'architettura del cambio con la loro alimentazione reciproca, non possono fornire la loro piena potenza nominale per i processi di boost o recupero.

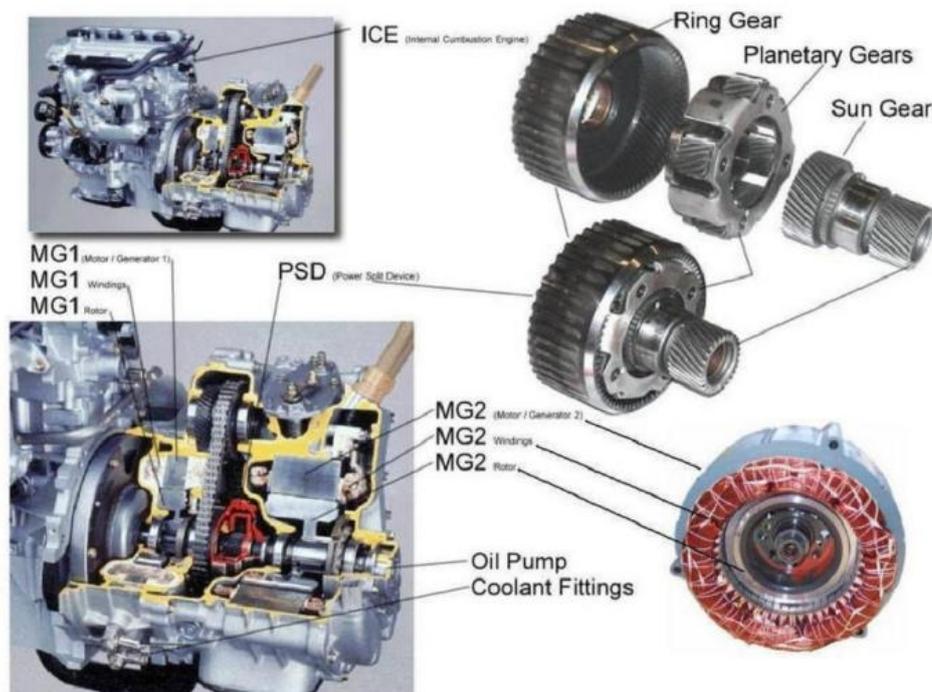


Figura 3.46-Esploso del sistema Toyota [5]

Il propulsore ibrido power-split, a differenza del cambio discusso nei paragrafi precedente, il quale di base è composto da una trasmissione automatica e da una macchina elettrica, è un gruppo progettato specificamente per le applicazioni ibride. Questa trasmissione ibrida con il differenziale integrato viene utilizzata nei veicoli con motori trasversali e trazione anteriore. In questo tipo di architettura, per effettuare la ripartizione della potenza, tra il motore ICE e il motore elettrico, si utilizza un rotismo

epicicloidale e un riduttore planetario denominato appunto power split device. Un tipico gruppo epicicloidale è costituito da un ingranaggio centrale (pignone solare) in presa con alcuni satelliti, ingranaggi montati sui perni di una gabbia porta satelliti che sono in presa anche con la corona a dentatura interna che racchiude il tutto. Si vengono così ad avere tre alberi coassiali, collegati rispettivamente con il pignone solare, la gabbia porta-satelliti e la corona. Il moto può essere trasmesso dunque sempre sullo stesso asse di rotazione, anche se con velocità (e coppie) differenti. Questo tipo di trasmissione consente tre diversi gradi di libertà che vengono selettivamente bloccati da una centralina elettronica in base allo stato di carica della batteria e alle fasi di guida. [5]

I 3 gradi di libertà sono così ripartiti:

1. Il 1° g.d.l. è occupato dal motore ICE e dal generatore secondario MG1;
2. Il 2° g.d.l. è occupato dal motore elettrico, adibito alla trazione, MG2;
3. Il 3° g.d.l. è occupato dalla dal differenziale e la trasmissione finale.

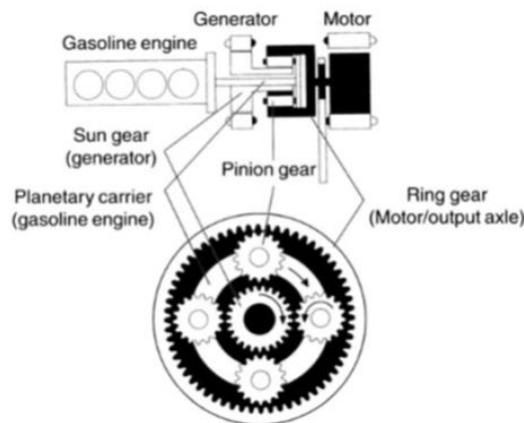


Figura 3.47-Ingrandimento del power split device [20]

Andando a bloccare continuamente i 3 gradi di libertà del rotismo, si riesce ad alternare costantemente le varie modalità di funzionamento del veicolo.

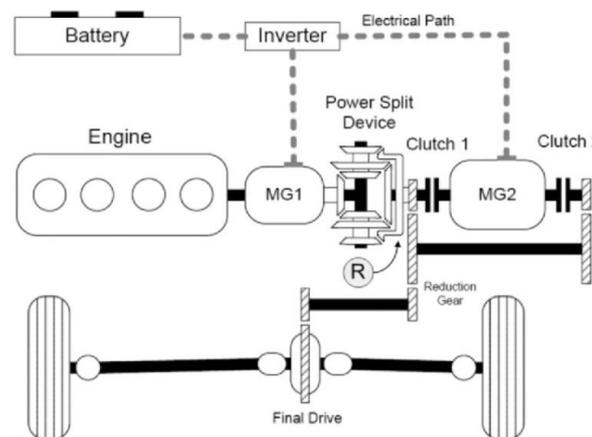


Figura 3.48-Configurazione della catena cinematica della trasmissione P310 [19]

Il gruppo epicicloidale dal lato del motore termico riceve il moto da quest'ultimo tramite la gabbia porta-satelliti, dalla quale la coppia viene ripartita: la maggior parte va alla corona, che la invia alla trasmissione finale, mentre una quota inferiore va al pignone solare e quindi al motore elettrico secondario. La corona è dentata esternamente e ciò le consente di trasmettere il moto al gruppo di riduzione finale e al differenziale ma ha anche una seconda dentatura interna, collegata al motore elettrico primario per mezzo dei satelliti. Il sistema HSD di Toyota sostituisce quindi il classico cambio automatico con una trasmissione definita elettromeccanica che si comporta come un CVT controllato elettronicamente che per similitudine la Toyota chiama e-CVT (electronic continuously variable transmission). [5] Il motore elettrico secondario funge anche da motorino di avviamento. Il motore elettrico MG2 funziona da fermo fino a quando viene richiesta una potenza medio/alta, durante la quale viene avviato il motore ICE, e in seguito funziona o in contemporanea, oppure con il solo motore termico. Inoltre, se il livello delle batterie è basso, la vettura si muove con l'ausilio del solo motore elettrico il quale, con l'aiuto del generatore MG1, provvede anche a ricaricare le batterie. Da quanto precedente detto, si capisce che gli eccessi di coppia generati (o le fasi di decelerazione), vanno a ricaricare le batterie mediante il generatore MG1 motrice. Lo svantaggio di questo tipo di ibrido è che non è adatto per un percorso autostradale, poiché tale sistema consuma come un veicolo con propulsione tradizionale. Da quanto detto, si capisce che il principale vantaggio è la possibilità di lavorare in due differenti modalità:

- a. Serie: mediante la connessione diretta tra il motore elettrico MG1 ed il motore ICE.
- b. Parallelo: mediante il motore elettrico MG2, che funziona da motore di propulsione.

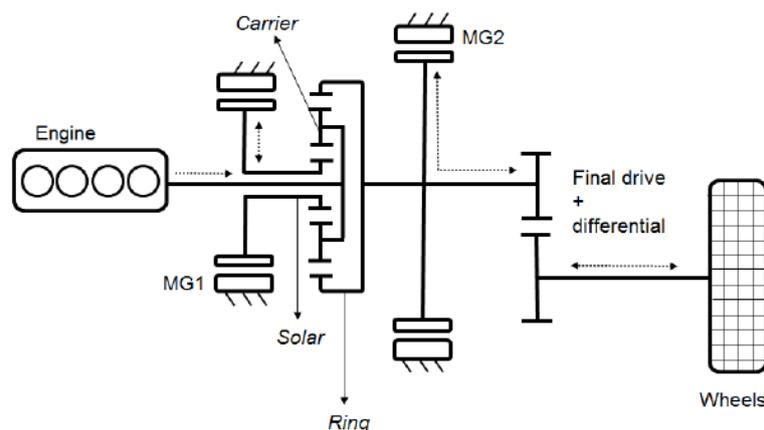


Figura 3.49-Diagramma della trasmissione ibrida power split con indicazione del flusso di energia [17]

In conclusione, la potenza del motore viene suddivisa in due rami (elettrico e meccanico) uno a rapporto variabile e l'altro a rapporto fisso. Le potenze delle diramazioni sono ricongiunte e sommate attraverso le due macchine elettriche ed alcuni riduttori epicicloidali meccanici. Quanto detto è visibile dalle frecce indicate nella figura seguente. Grazie ai due motori elettrici, si riesce a variare

continuamente il rapporto di velocità. Pertanto, la trasmissione ibrida power-split P310 consente una conversione continua di coppia e velocità che la rende una trasmissione con ripartizione della potenza a variazione continua. Nella Figura 3.50 viene indicata una sezione di un cambio P310, dal quale si possono ricavare alcune interessanti informazioni: sia il motore elettrico, che il generatore, sono motori sincroni trifase a magneti permanenti (PSM) contenuti all'interno del cambio. Le due macchine elettriche sono raffreddate sia tramite l'olio che gli passa davanti, il quale conduce il calore prodotto attraverso l'alloggiamento del cambio nelle aree esterne, sia tramite un sistema di tubazioni di raffreddamento (acqua) posizionato attorno agli statori che è alimentato dal sistema di raffreddamento del veicolo stesso. Nella zona centrale della trasmissione è presente il primo riduttore epicicloidale, il quale accoppia l'albero motore con l'uscita e il generatore. In questo modo, è possibile sfruttare la potenza del motore ICE sia meccanicamente, per azionare gli ingranaggi supportati, quando necessario, dal motore elettrico, sia elettricamente per azionare il generatore.

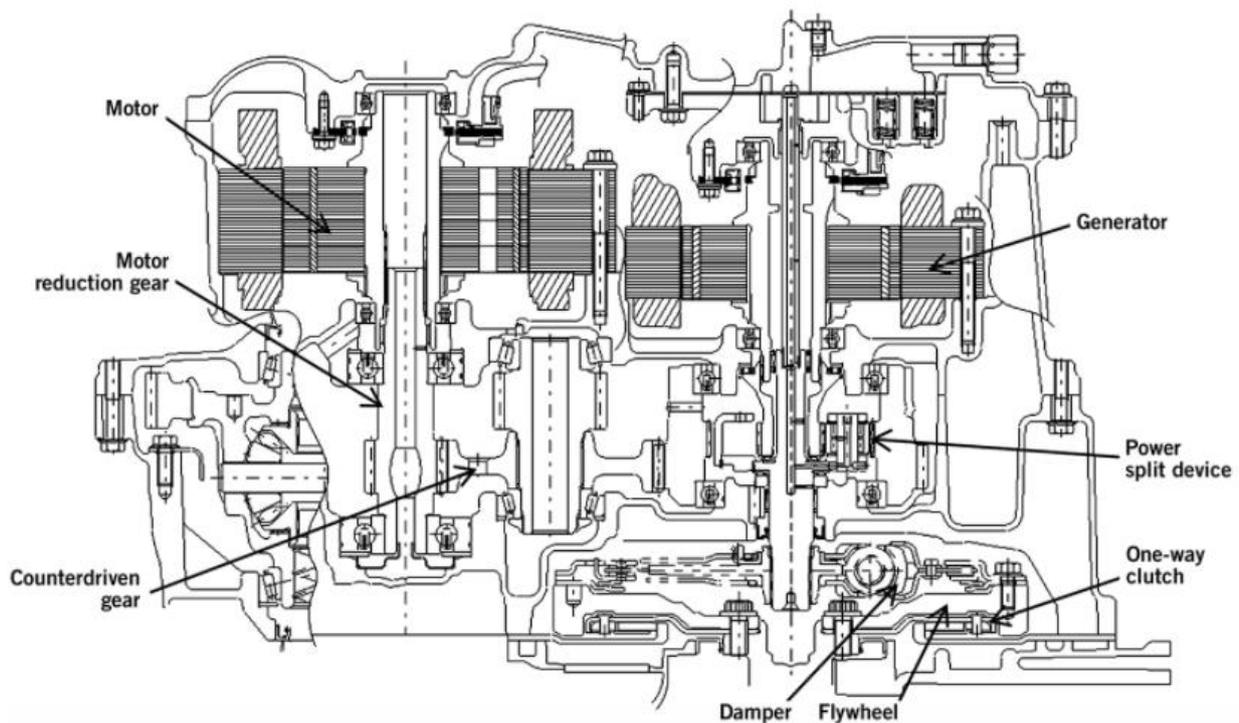


Figura 3.50-Schema trasversale della singola trasmissione [18]

Il secondo ingranaggio planetario, il riduttore, ha il compito di abbassare la velocità del motore elettrico nella direzione di uscita e di aumentare la coppia. Ciò consente di ridurre le dimensioni del motore elettrico. Il cambio ibrido ha una lunghezza di 417 mm e pesa, compreso l'olio, 125 kg.

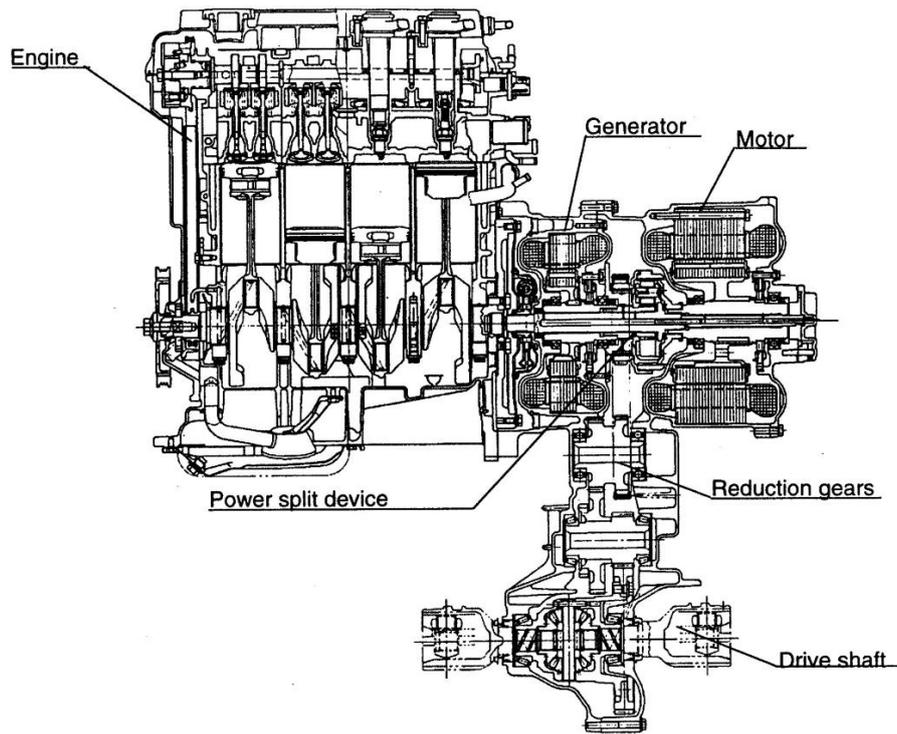


Figura 3.51-Sezione trasversale del motore e delle unità di trasmissione [16]

Capitolo 4

Overview sui componenti del powertrain elettrico

4.1 Introduzione e configurazione generale degli EV

In questo capitolo verranno approfonditi i diversi componenti che costituiscono i veicoli BEV, battery electric vehicles (1.2.2 e 1.3.3.5). Per veicolo elettrico si intende un veicolo nel quale l'unico sistema propulsione è di tipo elettrico. Nella figura 4.1 è rappresentata la configurazione generale di un veicolo elettrico, il quale è costituito da tre sottosistemi principali:

1. Sistema di propulsione elettrico: costituito dall'inverter, dal motore elettrico, dalla trasmissione meccanica e dalle ruote.
2. Sistema di accumulo dell'energia: costituito dagli accumulatori, dal sistema di gestione (EMS, Energy management system) e dal caricabatteria.
3. Sistema ausiliario: costituito dal servosterzo elettrico, dal gruppo clima e dagli altri organi ausiliari.

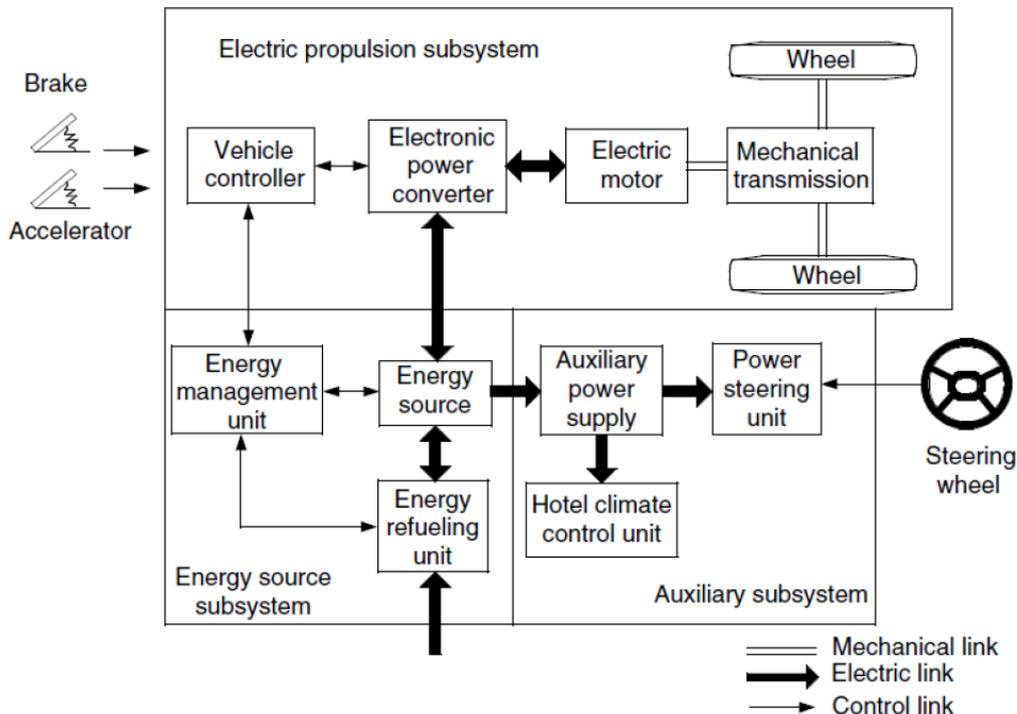


Figura 4.1-Configurazione generale dei veicoli elettrici [8]

I collegamenti elettrici, in figura 4.1, sono rappresentati dalle frecce grandi mentre i collegamenti di controllo dalle frecce piccole. Sulla base degli input forniti dai pedali del freno e dell'acceleratore, il controller elettronico fornisce i segnali atti alla gestione del convertitore di potenza, il quale ha la

funzione di regolare il flusso di potenza tra il motore elettrico e le batterie. L'EMS, invece, ha multiple funzioni tra le quali le più importanti sono:

- Collaborare con il controller elettronico, in modo da recuperare la massima quantità di energia in frenata.
- Interagire con la batteria per controllare la ricarica e monitorare l'usabilità del dispositivo di accumulo.

Infine, l'alimentazione ausiliaria fornisce la potenza a tutti i sistemi ausiliari come servosterzo e clima, con diversi livelli di tensione.

4.1.1 Variazione nel sistema di accumulo dell'energia negli EV

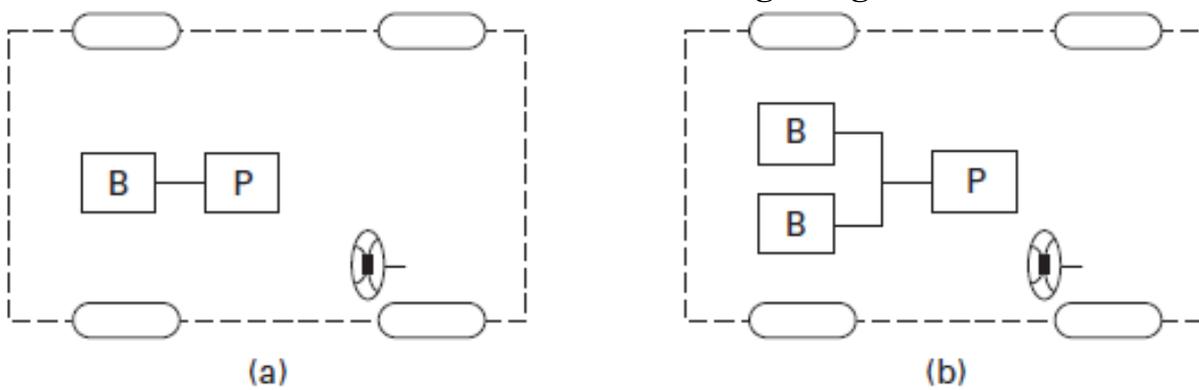


Figura 4.2-Configurazione dei veicoli elettrici dovuta alla variazione dei sistemi di stoccaggio dell'energia[31]

La Figura 4.2, mostra alcune delle diverse configurazioni possibili dei veicoli elettrici, in funzione delle disposizioni di accumulo dell'energia, dove B è la batteria, C è l'ultracondensatore, F il volano ad altissima velocità e P il convertitore di potenza. Ovviamente, le configurazioni di maggior interesse, nonché le più utilizzate nei veicoli elettrici, sono quelle alimentate con la sola batteria che può essere distribuita attorno al veicolo, imballata insieme sul retro del veicolo o posizionata sotto il telaio del veicolo. Per questo particolare tipo di configurazione si devono tenere in considerazione due tipi di batteria:

- a) Singola batteria;
- b) Due o più batterie.

Nel primo caso, la batteria dovrebbe essere in grado di offrire un buon compromesso tra un'elevata energia ed un'elevata potenza specifica, oltre ad essere in grado di gestire ed accumulare l'energia recuperata durante le fasi di degenerazione. Nel secondo caso, invece di utilizzare una singola batteria come compromesso tra elevata energia specifica ed elevata potenza specifica, si possono utilizzare contemporaneamente due differenti batterie per lo stesso veicolo.

4.1.2 Variazione nella disposizione nel sistema di propulsione degli EV



Figura 4.3- Configurazione dei veicoli elettrici dovuta alla variazione nella disposizione del sistema di propulsione

La Figura 4.3 mostra due possibili configurazioni del sistema EV con diverse disposizioni di propulsione elettrica, dove D è il cambio differenziale, G il riduttore a scatto fisso e M il motore elettrico:

- a) Configurazione longitudinale;
- b) Configurazione trasversale.

La configurazione longitudinale monomotore è del tutto simile a quella di un veicolo a combustione, sul quale viene sostituito il cambio e la frizione con un riduttore ad ingranaggi fissi. A differenza di un veicolo tradizionale, il veicolo elettrico non ha bisogno di impiegare il cambio variabile (anche se può utilizzare dei riduttori epicicloidali a più stadi), riducendo così in modo significativo la complessità, le dimensioni, il peso e il costo complessivi del cambio. Generalmente questo tipo di configurazione viene applicata su veicoli elettrici derivati da veicoli a combustione. Invece, nei BEV comunemente sviluppati su piattaforma specifica si utilizza la configurazione trasversale che, come visibile in figura 4.3 (b), è molto più compatta rispetto alla configurazione longitudinale.

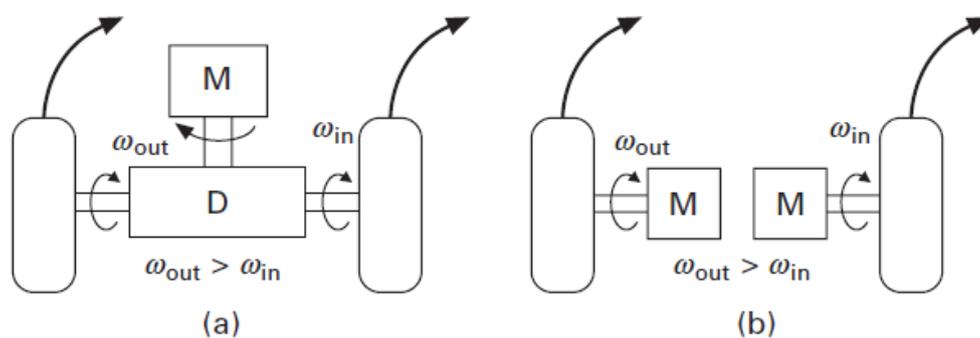


Figura 4.4- Configurazione dei veicoli elettrici dovuta alla variazione del tipo di differenziale, meccanico o elettrico[31]

Come qualsiasi veicolo, anche i veicoli elettrici hanno bisogno di un differenziale in quanto, durante la percorrenza di una curva, la ruota esterna di un veicolo si muove su un raggio maggiore rispetto alla ruota interna. Pertanto, mediante il differenziale, si riescono a regolare le velocità relative delle ruote. In assenza di un differenziale le ruote slitteranno causando usura dei pneumatici, difficoltà di

sterzata e scarsa tenuta di strada. La Figura 4.4 (a) mostra il principio del differenziale meccanico azionato da un motore elettrico M, in cui il differenziale D può consentire agli ingranaggi laterali dell'assale di girare a velocità diverse. Questi differenziali, oltre ad essere ingombranti, sono anche pesanti, costituendo uno svantaggio per i veicoli elettrici dove, a causa del peso delle batterie si cerca di ridurre il peso degli altri componenti. Per ovviare a ciò, nei veicoli elettrici è possibile fare a meno di un differenziale meccanico accoppiando separatamente due motori elettrici alle ruote motrici, facendo sì che la velocità di ciascuna ruota venga controllata indipendentemente e che l'azione differenziale sia ottenuta in curva elettronicamente. Nella figura 4.4 (b) viene mostrato il principio di funzionamento del differenziale elettronico, con l'ausilio di 2 motori elettrici (M). La scelta, tra un motore singolo con differenziale meccanico o due motori elettrici che formano un differenziale elettronico, risulta ancora molto complessa, in quanto ci sono degli svantaggi e dei vantaggi in entrambe le opzioni. La rimozione di un differenziale meccanico può ridurre l'ingombro e il peso complessivi, mentre il differenziale elettronico può controllare con precisione le velocità delle ruote in modo da ottenere prestazioni migliori in curva. Tuttavia, l'uso di un motore aggiuntivo e di un convertitore di potenza determina un aumento sostanziale del costo iniziale del veicolo.

4.1.3 Variazione nella trasmissione della potenza alle ruote negli EV

Per ridurre il percorso di trasmissione meccanica dal motore elettrico alle ruote motrici, il motore elettrico può essere posizionato all'interno della ruota stessa. Questa tipo di configurazione prende il nome di motore a ruota.



Figura 4.5- Configurazione dei veicoli elettrici dovuta alla variazione del tipo di trasmissione della potenza

La Figura 4.5 (a) mostra la configurazione di un veicolo con due motori con ingranaggi interni alla ruota, nella quale viene impiegata una trasmissione a riduzione fissa per ridurre la velocità del motore alla velocità della ruota. Eliminando gli ingranaggi meccanici, la trazione sulla ruota può essere realizzata installando un motore elettrico direttamente all'interno della ruota. Nella Figura 5 (b) viene mostrata la configurazione di due motori installati senza ingranaggi nella ruota in cui il rotore esterno è montato direttamente sul cerchione. In questo modo, il controllo della velocità del motore elettrico è equivalente al controllo della velocità della ruota e quindi della velocità del veicolo. Quanto appena detto è visibile in figura 4.6:

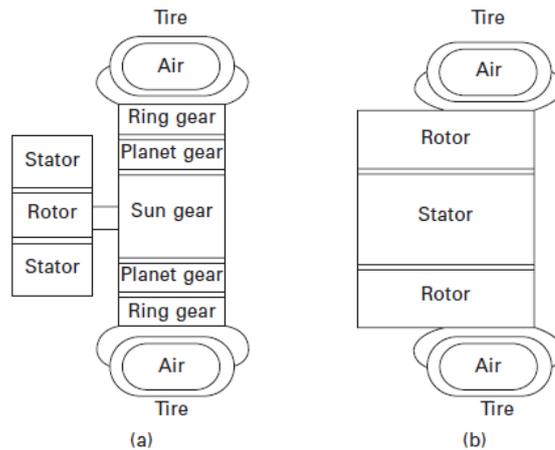


Figura 4.6-Rappresentazione delle differenti configurazioni per i motori a ruota:
 a) Rotore interno ad alta velocità; b) Rotore esterno a bassa velocità [31]

Nella configurazione con motore interno ad alta velocità, figura 4.6 (a), il motore è direttamente accoppiato al planetario interposto tra l'albero del motore ed il cerchione. Generalmente questa tipologia di motore è progettata per funzionare a più di 10000 giri/min in modo da fornire un'elevata densità di potenza. In questo modo il rapporto di trasmissione dell'ingranaggio planetario è di circa 10:1, così che si possa fornire una velocità sulla ruota compresa tra 0 e circa 1000 rpm. Inevitabilmente, l'uso di ingranaggi meccanici per la riduzione della velocità comporta differenti problemi relativi all'usura e alla lubrificazione dei componenti in gioco e, quindi, a tutti i fenomeni di attrito ad essi collegati. Nella figura 4.6 (b) è rappresentata la configurazione con il motore esterno a bassa velocità, senza ingranaggi. Questo motore presenta il vantaggio della semplicità, offrendo un'elevata efficienza di trasmissione e, quindi, consumi ridotti. Tuttavia, a causa dell'ovvia necessità da parte delle ruote (e quindi del veicolo) di ruotare alle basse velocità (tipicamente inferiore a 1000 rpm), il motore elettrico deve essere dimensionato coerentemente, comportando un aumento di dimensioni, peso e costi.

Prima di addentrarci nell'analisi del powertrain, è opportuno fornire le principali informazioni sulle batterie installate nei veicoli elettrici le quali, pur non facendo parte del PWT, sono fondamentali per la comprensione e la caratterizzazione degli stessi.

4.2 Le batterie negli EV

Seppur in commercio ci siano molti e differenti tipi di veicoli elettrici, in quasi tutti la batteria è un componente chiave. Rappresenta, infatti, il componente con maggior costo, peso e volume. Per comprendere a pieno le batterie per trazione, bisogna partire dalla loro nomenclatura. Infatti, a differenza del linguaggio comune, in cui si considerano pila e accumulatore sinonimi del termine batteria, la realtà fisica è molto diversa:

- La Pila è un generatore elettrochimico primario, non ricaricabile, ovvero una volta consumata l'energia al suo interno non può più tornare alle condizioni iniziali;
- L'accumulatore è un generatore elettrochimico secondario, ricaricabile, ovvero dopo il suo utilizzo può tornare nelle condizioni iniziali mediante l'utilizzo di un generatore di tensione continua.
- La batteria è composta da due o più celle elettriche unite tra loro. Le celle convertono l'energia chimica in energia elettrica e sono costituite da elettrodi positivi e negativi uniti da un elettrolita. È la reazione chimica tra gli elettrodi e l'elettrolita che genera l'energia elettrica.

Vi sono differenti tipologie di batterie utilizzabili nei veicoli:

- a) Piombo acido;
- b) Nichel - Cadmio (Ni - Cd);
- c) Nichel metallo idruri (Ni-Mh);
- d) Nichel - Zinco (Ni - Zn);
- e) Zinco - aria;
- f) Litio - Ioni (Li - ioni);
- g) Litio - Polimeri (Li - Pol);
- h) Nichel - Cloruro di sodio (Ni - NaCl; comunemente dette Z.E.B.R.A.).

Per la progettazione del veicolo elettrico, se questa avviene su piattaforme dedicate, si tende a partire dalla batteria (integrata nel pianale) e, intorno ad essa, si sviluppa l'architettura del veicolo. I parametri principali per comprendere il comportamento e le prestazioni di una batteria sono riportati nei paragrafi seguenti.

4.2.1 Tensione di cella e tensione nominale (V)

Le batterie, come detto precedentemente, sono composte da un numero di celle collegate in serie, che costituiscono un modulo della batteria. Tutte queste celle hanno una tensione nominale, che prende il nome di tensione di cella (tabella 4.1), che viene fornita quando la cella eroga energia elettrica. Di conseguenza i moduli composti dalle celle collegate tra loro hanno una tensione complessiva che, per i veicoli elettrici, varia tra 6-12V. A sua volta, il collegamento in serie di un numero n di moduli genera la tensione complessiva fornita dal pacco batterie.

Tabella 4.1-Valori tipici di tensione di cella per vari tipi di accumulatori elettrochimici [8]

TIPOLOGIA	VALORI TIPICI TENSIONE DI CELLA
Piombo-acido (Pb-acido)	2.0 V
Nichel-cadmio (Ni-Cd)	1.2 V

Nickel-metallo idruro (NiMH)	1.2 V
Litio-ioni (Li-ion)	3.4 V
Litio-Polimeri (Li-poly)	3.0 V
Zinco-aria (Zn-air)	1.2 V
Ni-Zn	1.7 V
ZEBRA (Ni-NaCl)	2.58 V

Quando viene erogata la corrente elettrica la tensione diminuisce, mentre, quando la batteria è in carica, la tensione aumenta. Per spiegare meglio questo concetto analizziamo la figura 4.7, nel quale è rappresentato il circuito equivalente di una batteria.

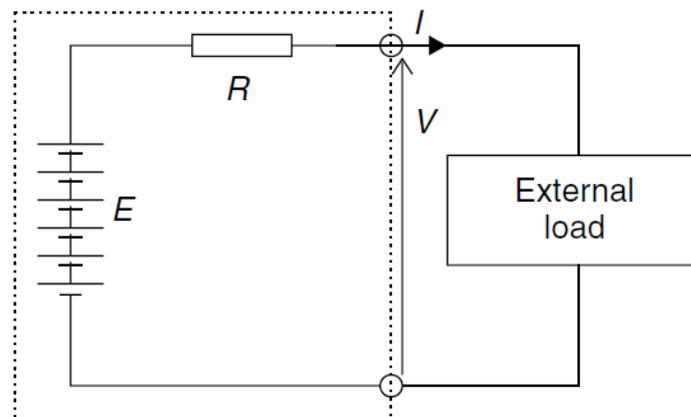


Figura 4.7-Circuito equivalente di una batteria a 6 celle [32]

Come si vede dall'immagine, la tensione fissa della batteria è E , invece, a causa della caduta di tensione sulla resistenza interna R , la tensione sui terminali della batteria è diversa e pari a:

$$V = E - I \cdot R \quad (4.1)$$

Se la corrente I è pari a 0, la tensione sui terminali della batteria è pari ad E , per questo motivo E viene definita tensione a circuito aperto. Questo ragionamento è del tutto analogo se ci trovassimo con una batteria in carica con l'unica differenza che la tensione E sarà pari a:

$$V = E + I \cdot R \quad (4.2)$$

Da quanto precedentemente detto, si può capire che la resistenza interna della batteria dovrebbe essere la più bassa possibile. Ovviamente, mediante le due equazioni precedentemente enunciate si riesce ad avere una buona approssimazione del valore della tensione E la quale, tuttavia, non è un parametro costante e risulta influenzata dal livello di carica e da altri fattori come la temperatura.

4.2.2 Capacità della batteria (Ah)

La capacità di una batteria, espressa in Ah corrisponde alla quantità di carica elettrica che viene fornita in condizioni nominali. Essa rappresenta il valore di corrente costante che può essere fornita per un determinato periodo di tempo. Andiamo a fare un esempio: consideriamo una batteria con una

capacità di 20Ah, ciò significa che la batteria suddetta è in grado di fornire 20A per 1 ora o 2A per 10 ore oppure 5A per 8 ore, ecc. Tuttavia, nella pratica, il funziona non è così lineare come espresso pocanzi, in quanto la capacità non è un parametro uniforme. Infatti, può accadere che se da una batteria avente una capacità di 20 Ah, vengono prelevati 20 A, la sua capacità di fornire questa corrente in maniera costante non sarà più di 1 ora ma molto meno. Per spiegare meglio il concetto possiamo considerare la figura 4.8, nella quale viene mostrata la variazione della capacità della batteria in funzione della velocità di scarica.

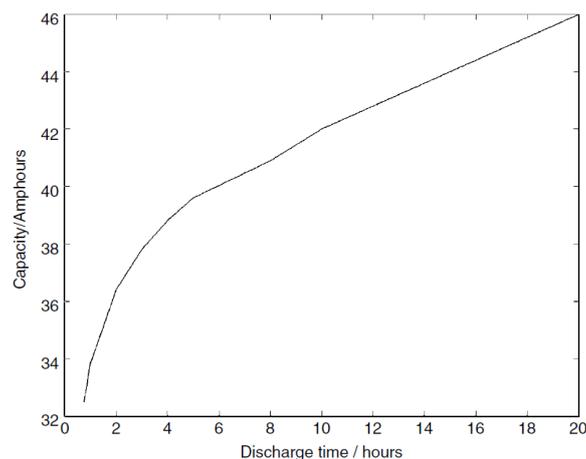


Figura 4.8-Variatione della capacità della carica di una batteria al piombo acido al variare della velocità di scarica[32]

Il diagramma è misurato su una batteria al piombo acido avente una capacità nominale di 42 Ah. Si noti che se la carica viene fornita in un'ora, la capacità scende a circa 33 Ah. D'altra parte, se la corrente viene prelevata lentamente, diciamo 20 ore, la capacità sale a circa 46 Ah. Questo cambiamento di capacità si verifica a causa di reazioni collaterali indesiderate all'interno delle celle che compongono le batterie. Quest'effetto è più evidente nella batteria al piombo ma si verifica in tutti i tipi di batterie, anche se con valori differenti. La capacità delle grandi batterie di trazione utilizzate nei veicoli elettrici è solitamente indicato per una scarica di 5 ore.

4.2.3 Energia immagazzinata (Wh)

Lo scopo della batteria è quello di immagazzinare energia e di fornirla quando viene richiesta. La quantità di energia immagazzinata in una batteria, espressa in Wh, dipende dalla sua tensione e dalla capacità della batteria, ovvero:

$$Energia [W_h] = Tensione\ nom.\ della\ batteria [V] \cdot Capacità\ della\ batteria [A_h] \quad (4.3)$$

Tuttavia, l'equazione deve essere utilizzata con grande cautela. Abbiamo precedentemente notato che sia la tensione della batteria che la sua capacità variano notevolmente a seconda di come viene utilizzata la batteria. Entrambi i parametri dipendono dalle condizioni di temperatura e si riducono se la corrente aumenta e la batteria si scarica rapidamente. L'energia immagazzinata è quindi una

quantità piuttosto variabile e si riduce se l'energia viene rilasciata rapidamente. Anche in questo caso il valore dell'energia immagazzinata nelle batterie di trazione è solitamente indicata per una scarica di 5 ore.

4.2.4 Energia specifica (Wh/Kg)

L'energia specifica è definita come la quantità di energia elettrica immagazzinata per ogni Kg di massa della batteria ossia, una volta nota l'energia immagazzinata dalla batteria, si può dividere per il peso totale della stessa per ottenere l'energia specifica, che infatti ha come unità di misura il Wh/Kg.

4.2.5 Densità di energia (Wh/m³)

La densità di energia è il rapporto tra la quantità di energia elettrica immagazzinata (Wh) e il volume della batteria. Ha come unità di Wh/m³. Il volume della batteria potrebbe avere un impatto considerevole sul design del veicolo. Come per l'energia specifica, la densità di energia è un valore nominale.

4.2.6 Potenza specifica (W/Kg)

La potenza specifica è definita come il rapporto tra la quantità di potenza massima ottenibile da una batteria (W) e la massa totale della batteria (Kg). È una quantità molto variabile e piuttosto anomala, poiché la potenza erogata dalla batteria dipende più dal carico ad essa collegato che dalla batteria stessa. Sebbene le batterie abbiano una potenza massima, non è opportuno farle lavorare alla potenza massima per più di pochi secondi poiché si avrebbe un'inefficienza molto elevata. L'unità di misura della potenza specifica è il W/Kg.

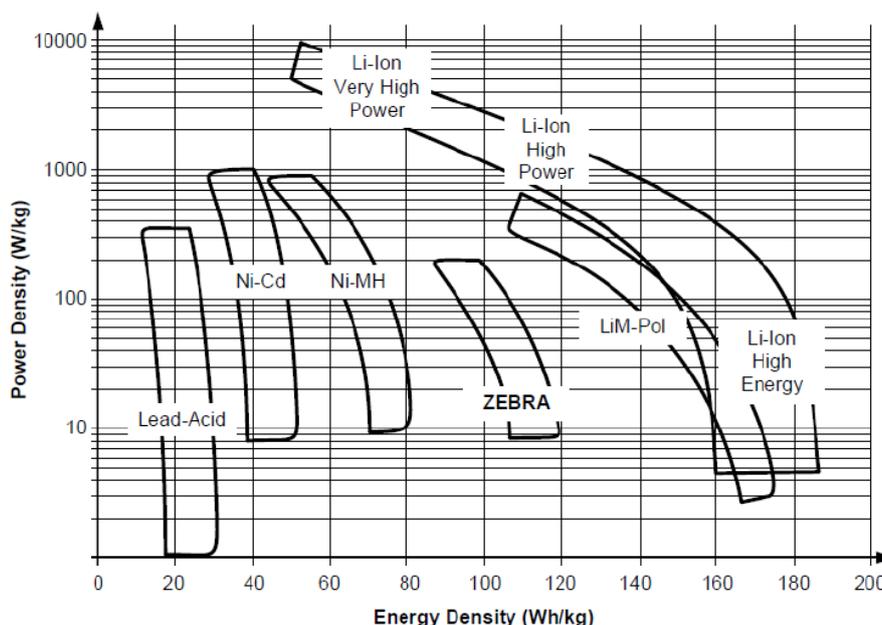


Figura 4.9-Diagramma di Ragone [8]

Alcune batterie hanno un'energia specifica molto buona, ma hanno una potenza specifica molto bassa, il che significa che riescono ad immagazzinare molta energia, ma riescono ad erogarla solo lentamente. In termini pratici possono guidare il veicolo molto lentamente su una lunga distanza. Una potenza specifica elevata si traduce in una bassa energia specifica per un particolare tipo di batteria. Per confrontare differenti tecnologie di stoccaggio dell'energia e/o celle di materiali differenti, viene utilizzato il diagramma di Ragone, il quale confronta la potenza specifica con l'energia specifica. Affinché si possa fare un confronto reale si utilizzano le scale logaritmiche, in quanto la potenza assorbita da una batteria può variare notevolmente in diverse applicazioni. Nella figura 4.9 possiamo vedere le diverse tecnologie di stoccaggio e, per ognuna di esse, si vede che all'aumentare della potenza specifica si riduce l'energia specifica.

4.2.7 Stato di carica (SOC)

Lo stato di carica (state of charge o SOC) è simile all'indicatore del livello di carburante in un veicolo tradizionale. Esso definisce, infatti, la percentuale di carica residua nella batteria fornendo così al driver le informazioni per pianificare i vari spostamenti e le conseguenti ricariche. Teoricamente il SOC della batteria è definito come il rapporto tra la capacità residua (C_r) e la capacità totale (C_t):

$$SOC = \frac{C_r}{C_t} \quad (4.4)$$

Dall'equazione 4.4 si capisce che il SOC è un valore compreso tra 0 e 1. In generale, C_t è influenzato in modo significativo dalla velocità di scarica della batteria, dalla temperatura e dall'invecchiamento della stessa. Si può stimare C_t mediante l'equazione di Peukert:

$$C_{tI} = K \cdot I \cdot (1 - n) \quad (4.5)$$

dove I è la corrente di scarica e K ed n sono costanti empiriche. Sebbene ci siano molti metodi per misurare C_r , l'unico pratico per l'applicazione agli EV è contare direttamente i wattora che sono stati estratti o introdotti all'interno della batteria. Questo metodo fornisce una ragionevole precisione per la stima a breve termine del SOC della batteria; tuttavia, tale metodo, è soggetto all'accumulo di errori quando la stima viene effettuata per un lungo periodo. D'altra parte, la misurazione della tensione del circuito aperto può riflettere direttamente il SOC per alcuni tipi di batterie come il Pb-acido e il Li-ion. L'inconveniente principale di questo metodo è dovuto al fatto che la tensione a circuito aperto, generalmente, necessita di un lungo periodo di stabilizzazione dopo la carica o la scarica. Poiché il metodo della capacità in wattora ha una precisione sufficiente nel funzionamento a breve termine, mentre il calcolo della tensione a circuito aperto ha un'elevata precisione dopo la stabilizzazione, si usa generalmente un approccio combinato.

4.2.8 Profondità di carica (DOD)

La profondità di carica (Depth of Discharge o DOD) è definita come la quantità di carica prelevata dalla batteria durante la scarica, rispetto alla capacità nominale. Viene espressa in percentuale della capacità, come:

$$DOD + SOC = 100\% \quad (4.6)$$

4.2.9 Efficienza energetica

Questo è un altro parametro molto importante ed è definito come il rapporto tra l'energia elettrica fornita da una batteria e la quantità di energia elettrica necessaria per riportare la batteria allo stato iniziale di carica. L'aumento dell'efficienza energetica, con le conseguenti riduzioni delle emissioni complessive è un argomento molto sentito per implementare la diffusione dei veicoli elettrici. Ovviamente, l'efficienza energetica varia notevolmente in funzione del modo in cui viene utilizzata una batteria. Se la batteria viene caricata e scaricata rapidamente, ad esempio, l'efficienza energetica diminuisce rapidamente. È importante notare che il parametro dell'efficienza energetica può fungere da guida per il confronto delle batterie, più o meno allo stesso modo del consumo di carburante nelle automobili tradizionali.

4.2.10 Temperatura di funzionamento della batteria

Le batterie hanno un range di temperatura di funzionamento ideale. Questo è un parametro importante da valutare quando si sceglie una tipologia di batteria rispetto ad un'altra, in quanto, oltre alla batteria, si deve considerare anche un sistema di climatizzazione più o meno performante. Infatti, in funzione della temperatura possono variare le prestazioni delle batterie. Vi sono alcune batterie che funzionano a temperature molto elevate (Z.E.B.R.A.) e che quindi consumano una certa quantità di energia solo per mantenere le condizioni standard di utilizzo. È proprio a causa di ciò che le batterie si scaricano quando non vengono usate, fenomeno noto come autoscarica. Altre batterie, invece, presentano un degrado delle prestazioni a basse temperature, in quanto si potrebbe congelare l'elettrolita con conseguente riduzione delle reazioni di ossidoriduzione.

4.2.11 Geometria della batteria

Le celle che compongono la batteria sono disponibili in molte forme: rotonde, rettangolari, prismatiche o esagonali. Normalmente sono confezionati in blocchi rettangolari. Alcune batterie possono essere fornite solo con una geometria fissa, altre in un'ampia variazione di altezze, larghezze e lunghezze. Come già discusso precedentemente sui veicoli EV si tende a distribuire le batterie su

tutta la superficie del pavimento, garantendo alla vettura un baricentro basso con conseguenti ottime doti di manovrabilità.

4.2.12 Durata della batteria

Per durata della batteria, si intende il numero di cicli di carica-scarica che una batteria è in grado di sostenere prima che la sua capacità si riduca sotto un valore soglia per il suo corretto funzionamento. Questo valore di solito varia tra il 70-80% della capacità nominale. Una batteria può considerarsi esaurita, e quindi da sostituire, se non riesce a sostenere una carica superiore all'80% della propria capacità nominale. La vita di una batteria è un parametro estremamente incerto e, quindi, difficilmente prevedibile, in quanto fortemente condizionato dalle varie condizioni di esercizio quali la temperatura di funzionamento, la profondità delle scariche, le modalità di ricarica, ecc. Come si può immaginare, la durata della batteria è, però, un parametro molto importante, in quanto si riflette direttamente sui costi di esercizio del veicolo elettrico. Per ovviare a ciò alcune case automobilistiche vendono il veicolo garantendo la sostituzione della batteria se non si è superato un certo numero di Km o se non è passato un certo numero di anni dalla vendita del veicolo.

4.3 Batterie al litio

Le batterie al Litio sono gli accumulatori più utilizzati nell'elettronica di consumo rappresentando la tipologia di batteria più diffusa sul mercato. Il motivo base dietro il loro ampio utilizzo è dovuto al materiale con il quale sono realizzate, il litio. Esso, è il più leggero dei metalli alcalini (densità 535 Kg/m³ ed un peso atomico di 6.941) avente il minore potenziale di riduzione -3.045 V rispetto all'elettrodo di idrogeno. Per questo le batterie al litio hanno un peso molto contenuto. Esistono 2 tipologie di batterie al litio:

- Le batterie agli ioni di litio;
- Le batterie ai polimeri di litio.

In entrambe le configurazioni, le batterie sono composte sempre da un catodo e un anodo immersi in un elettrolita liquido o polimerico, il quale funge da collegamento tra l'elettrodo positivo e l'elettrodo negativo, permettendo la conduzione degli ioni litio. Tra i due capi della cella, inoltre, vi è uno strato separatore costituito da materiale isolante (poliolefina) che divide a sua volta la cella in due semi celle.

4.3.1 Batterie agli ioni di litio

Le batterie agli ioni di litio sono costituite da un anodo in grafite e da un catodo costituito da un ossido litiato di un metallo di transizione (ossido di cobalto, fosfato di ferro), il quale garantisce una struttura

a tunnel o a strati che permette di inserire ed estrarre facilmente gli ioni di litio. Anodo e catodo sono immersi in un elettrolita liquido che permette la conduzione degli ioni tra di loro. Le celle con elettrolita liquido sono realizzati in contenitori metallici rigidi e possono avere una struttura cilindrica, prismatica o a bottone. I vantaggi delle batterie Li-ion sono:

1. Un'elevata densità di energia e di tensione;
2. Elevata leggerezza, a parità di caratteristiche, rispetto alle altre batterie in commercio;
3. Facilità di smaltimento grazie all'assenza di metalli pesanti come cadmio o mercurio;
4. Presenza pressoché trascurabile dell'effetto memoria;
5. Numero di cicli di carica-scarica molto elevato;
6. Rendimento energetico molto elevato (95%);
7. Auto-scarica ridotta al 10% al mese.

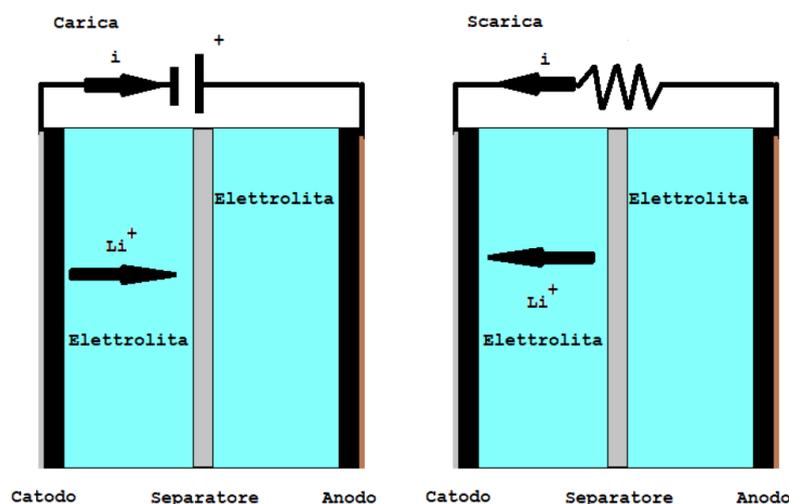
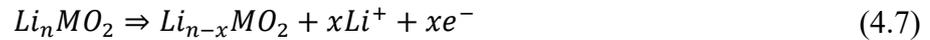


Figura 4.10-Funzionamento di una cella agli ioni di litio [33]

Nella figura 4.10 è rappresentata una cella agli ioni di litio in fase si carica (sinistra) e in fase di scarica (destra). Andiamo ad analizzare nel dettaglio le 2 fasi. Durante la carica si vede che, una volta imposta una d.d.p. a seguito dell'ossidazione dei metalli presenti sul catodo, vengono liberati gli elettroni i quali, dirigendosi verso il collettore di corrente, generano un accumulo di cariche positive nell'elettrodo bilanciate a loro volta dagli ioni Li^+ che attraversano l'interfaccia tra elettrodo ed elettrolita passando in soluzione. Gli elettroni attraversano il circuito elettrico esterno ed il conseguente utilizzatore collegato, raggiungono l'elettrodo negativo. Ovviamente, al fine di mantenere l'elettro-neutralità delle semi-celle gli ioni Li^+ , si muovono nell'elettrolita superando il separatore e raggiungendo la superficie dell'anodo. È importante notare che l'elettrolita ha il solo scopo di fungere da mezzo per la conduzione ionica senza partecipare alla reazione vera e propria. Una volta che gli elettroni si trovano sulla superficie dell'elettrodo negativo, gli ioni si diffondono nella semi-cella andando così a bilanciare l'eccesso delle cariche negative dovute agli elettroni provenienti dal circuito esterno. Per spiegare meglio le reazioni che avvengono in una cella agli ioni

di litio andiamo di seguito ad esprimere le semi reazioni e la reazione completa che si sviluppano nel catodo e nell'anodo. Per semplicità immaginiamo il catodo formato da un generico ossido metallico ($LiMO_2$) e un anodo in grafite (C_6). [33]

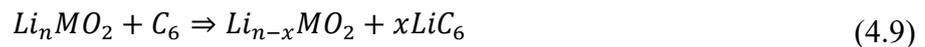
Semi-reazione al catodo:



Semi-reazione all'anodo:



Reazione completa:



Ovviamente, se si considera la fase di scarica bisogna il processo sarà inverso rispetto a quello spiegato precedentemente, l'equazione (4.9) sarà quella di partenza mentre le reazioni (4.7) e (4.8) saranno invertite. [33]

4.3.2 Batterie ai polimeri di litio

Gli accumulatori litio-polimeri possono essere definiti come un'evoluzione tecnologica rispetto alla tecnologia agli ioni di litio. Questi accumulatori sono caratterizzati dalla presenza di un elettrolita solido di tipo polimerico. Le celle polimeriche hanno una struttura a fogli flessibili formata da una serie di laminati polimerici. Grazie alla loro conformazione le batterie ai polimeri di litio hanno alcuni vantaggi non trascurabili:

1. Forma piatta, che permette l'adattamento a tutte le forme richieste per i vari dispositivi elettronici;
2. Non necessitano di un involucro metallico protettivo, riducendone le dimensioni;
3. Hanno uno spessore minore;
4. Hanno un grado di sicurezza maggiore per la presenza dell'elettrolita gelatinoso che non viene rilasciato in caso di incidente;
5. A parità di energia stoccata, hanno un peso ridotto.

Da quanto detto, si può intuire che questa particolare tipologia di batterie è molto compatta, con una densità energetica maggiore di oltre il 20% rispetto ad una agli ioni di litio e comunque migliore di tutte le batterie in commercio. Probabilmente le batterie ai polimeri di litio rappresentano il futuro per le applicazioni veicolari o stazionarie, dove gli spazi a disposizione sono molto ridotti. Vi sono molte aziende che lavorano sull'implementazione delle batteria per i veicoli elettrici, come la QuantumScape che ha dichiarato di aver sviluppato un prototipo che riesce a raggiungere i 400 Wh/Kg, efficiente a $-30^\circ C$, a cui occorrono solo 15 minuti per ricaricarlo dell'80% e che riesce a raggiungere un ciclo di vita di 800 cicli.

4.4 Elettronica di potenza

L'elettronica di potenza, a bordo veicolo, viene utilizzata per alimentare l'e-motor con i corretti valori di tensione e corrente. Essa funge anche da interfaccia tra il motore e la rete elettrica installata sul veicolo. Andremo di seguito ad analizzare gli inverter ed i convertitori DC/DC, necessari quando ci sono differenti valori di tensione sugli impianti del veicolo.

4.4.1 Inverter

La prima domanda che ci dobbiamo porre è perché si usano gli inverter. Per rispondere dobbiamo fare un passo indietro e ricordare con che tipo di corrente sono alimentati i componenti del powertrain elettrico. La batteria viene alimentata e, allo stesso tempo, fornisce corrente continua (CC). Mentre l'e-motor lavora (fornisce e riceve) corrente alternata (AC). L'inverter ha la funzione di effettuare la conversione da CC ad AC quando la macchina elettrica funziona da motore, mentre effettua la conversione da AC a CC quando il motore elettrico funziona da generatore.

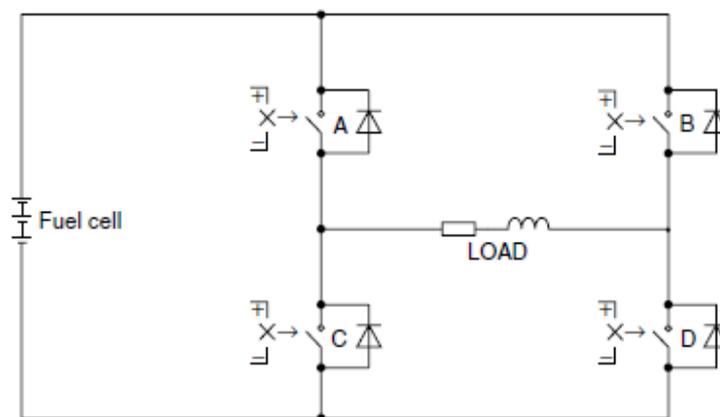


Figura 4.11-Circuito inverter a ponte H per la produzione di corrente alternata monofase [32]

Quindi, senza di esso, non sarebbe possibile far avvenire l'interazione tra la batteria e il motore. L'inverter è di solito integrato nell'alloggiamento della macchina elettrica. Ovviamente, non si ha la necessita dell'inverter in caso di utilizzo di un motore elettrico in corrente continua. Per comprendere a pieno il funzionamento dell'inverter trifase è opportuno spiegare il funzionamento dell'inverter monofase.

4.4.1.1 Inverter monofase

La disposizione dei componenti chiave dell'inverter monofase sono rappresentati in Figura 4.11. Ci sono quattro interruttori elettronici, etichettati come A-B-C-D, collegati in quello che viene chiamato un ponte H. Su ogni interruttore c'è un diodo e il carico attraverso il quale la corrente fluisce è

rappresentato da una resistenza e da un induttore. I primi interruttori A e D vengono attivati e una corrente scorre a destra attraverso il carico. Quando questi due interruttori vengono disattivati, il carico avrà sicuramente una certa induttanza¹, quindi la corrente non sarà in grado di arrestarsi immediatamente ma continuerà a fluire mediante i diodi nella stessa direzione, attraversando gli interruttori B e C di nuovo nella rete. Quando vengono attivati B e C, mediante essi scorre una corrente nella direzione opposta, a sinistra. Anche quando questi interruttori si spengono continua ad avvenire il passaggio di corrente nei diodi nella stessa direzione attraverso gli interruttori A e D. Ripetendo questa variazione di attivazione e disattivazione dei 4 interruttori per n volte, si genera la forma d'onda rappresentata nella figura 4.12:

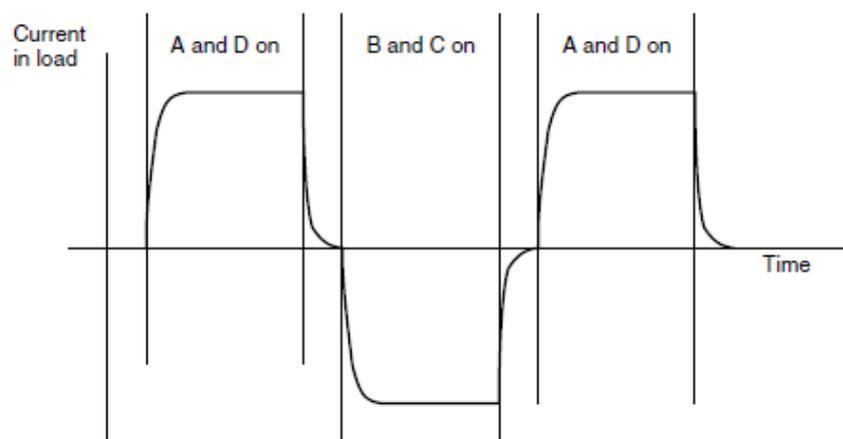


Figura 4.12-Grafico di un inverter monofase commutato a onda quadra [32]

Come si può vedere dall'immagine, la forma d'onda che si genera è molto diversa da un'onda sinusoidale pura. La differenza tra un'onda sinusoidale pura e qualsiasi altra forma d'onda viene espressa utilizzando le armoniche. Si tratta di oscillazioni sinusoidali di tensione o corrente la cui frequenza f è un numero intero multiplo della frequenza di oscillazione fondamentale. Si può dimostrare che qualsiasi forma d'onda periodica può essere rappresentata mediante l'aggiunta di armoniche a un'onda sinusoidale fondamentale. Il processo attraverso il quale si trovano le armoniche è l'analisi di Fourier. Ad esempio, si può dimostrare che un'onda quadra di frequenza f può essere espressa dall'equazione [32]:

$$v = \sin(\omega t) - \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{9} \sin(9\omega t) - \dots \quad (4.10)$$

con $\omega = 2\pi f t$

¹ L'induttanza è la proprietà dei circuiti elettrici che in seguito ad una corrente che li attraversa, induce una f.e.m. che è proporzionale alla variazione del flusso magnetico concatenato.

Quindi la differenza tra una forma d'onda di tensione o corrente e un'onda sinusoidale pura può essere espressa in termini di armoniche a frequenza più alta imposte alla frequenza fondamentale. Il problema principale che si riscontra nei motori sono le perdite dovute agli effetti magnetici a cui è soggetto il ferro nel motore che sono proporzionali alla frequenza con cui cambia il campo magnetico, ragion per cui una frequenza più alta si traduce in un aumento di:

- Perdite per isteresi: dovute alla maggiore magnetizzazione e smagnetizzazione;
- Perdite dovute alle correnti parassite indotte, dovute ad una maggiore velocità di variazione del flusso.

A causa dell'aumento delle perdite, il metodo di commutazione appena descritto non viene utilizzato, ma al suo posto viene applicato il metodo di modulazione della larghezza di impulso (Pulse Width Modulation o PWM), nel quale avviene una variazione più dolce e, quindi, meno dispersiva della corrente.

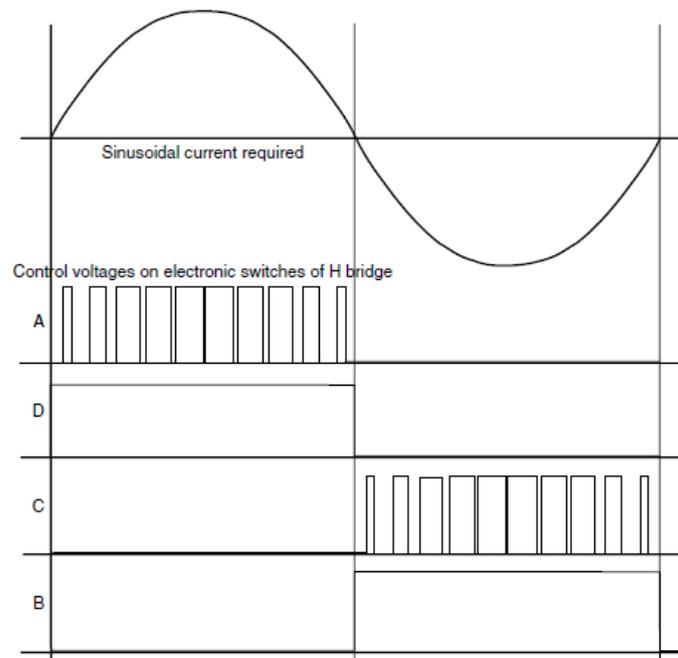


Figura 4.13-Sequenza di commutazione del metodo PWM per la produzione approssimativa di una corrente sinusoidale alternata [32]

Uno schema che rappresenta il principio della modulazione della larghezza d'impulso è mostrato nella Figura 4.13. Per spiegare questo metodo prendiamo in considerazione sempre il circuito rappresentato in figura 4.11. Nel ciclo positivo solo l'interruttore D è sempre acceso, mentre l'interruttore A è acceso in modo intermittente. Quando A è acceso la corrente si accumula nel carico, mentre quando è spento la corrente continua a fluire, a causa dell'induttanza del carico, attraverso l'interruttore D e il diodo presente su C. Nel ciclo negativo, invece, si verifica un processo simile, con l'interruttore B sempre acceso e l'interruttore C attivato ad intermittenza. Quando C è acceso, la corrente si accumula nel carico; quando invece è spento, la corrente continua a fluire, seppur in

maniera decrescente, attraverso l'anello superiore del circuito e il diodo in parallelo con l'interruttore A. La forma precisa della forma d'onda dipenderà dalla natura del carico (resistenza, induttanza, capacità). Un esempio di ciclo è mostrato nella Figura 4.14.

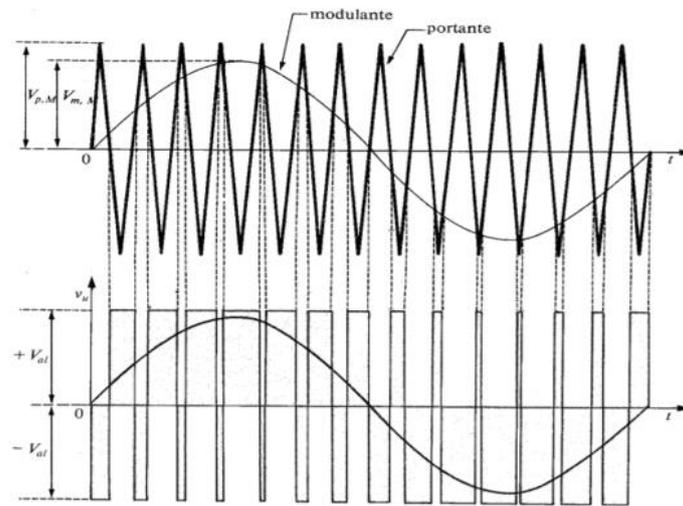


Figura 4.14-Generico grafico tensione/tempo per un inverter a modulazione di impulsi [35]

In Figura sono visibili due forme di oscillazione:

- Portante, di forma triangolare, con un valore maggiore a quello richiesto;
- Modulante, di forma sinusoidale, pari a quella richiesta con un valore massimo proporzionale alla tensione in uscita.

La forma d'onda finale è la somma delle due la quale non è ancora un'onda sinusoidale pura, ma sicuramente ne approssima meglio la forma rispetto a quanto visto nel caso precedente (Figura 4.12). Ovviamente, maggiore sarà il numero d'impulsi ad ogni ciclo tanto più la forma d'onda andrà ad approssimare meglio l'onda sinusoidale pura. Dodici impulsi per ciclo sono uno standard comunemente usato e attraverso cui si ottengono dei risultati soddisfacenti.

4.4.1.2 Inverter trifase

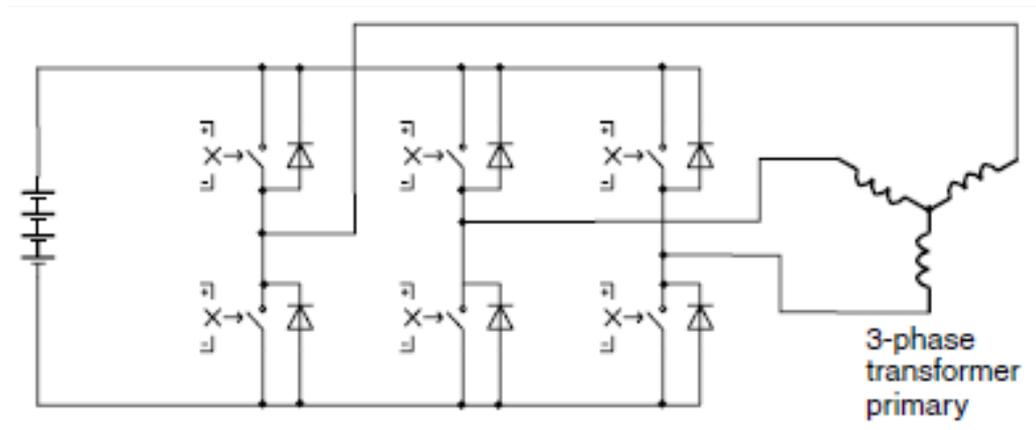


Figura 4.15-Circuito inverter trifase [32]

I motori di grandi dimensioni, come quelli installati sui veicoli elettrici, hanno 3 serie di bobine anziché 1 e, quindi, per questo tipo di sistemi è necessaria un'alimentazione a corrente alternata trifase. Il circuito di base è mostrato nella Figura 4.15, nel quale 6 interruttori con altrettanti diodi in parallelo, sono collegati al trasformatore trifase a destra. Il modo in cui questi interruttori vengono utilizzati per generare tre tensioni simili ma sfasate è mostrato nella Figura 4.16. Ogni ciclo può essere suddiviso in sei fasi. I grafici della Figura 4.17 mostrano come la corrente, in ciascuna delle tre fasi, cambia nel tempo usando questa semplice disposizione. Queste curve sono ovviamente lontane dalle onde sinusoidali quindi, anche in questo caso, la sequenza di commutazione viene modificata utilizzando la modulazione della larghezza di impulso.

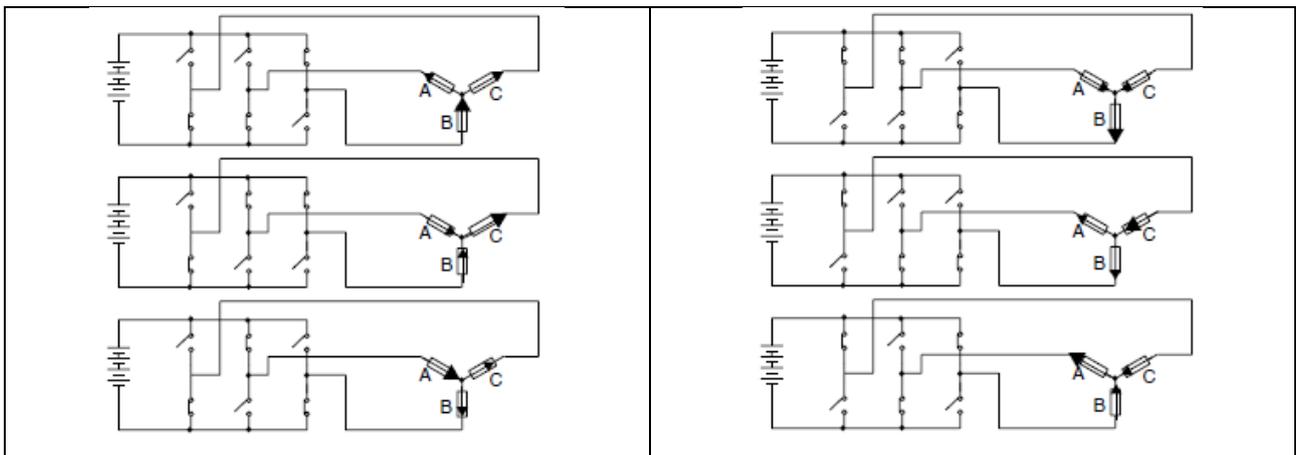


Figura 4.16-Schema di commutazione per generare corrente alternata trifase [32]

4.4.2 Convertitori DC/DC

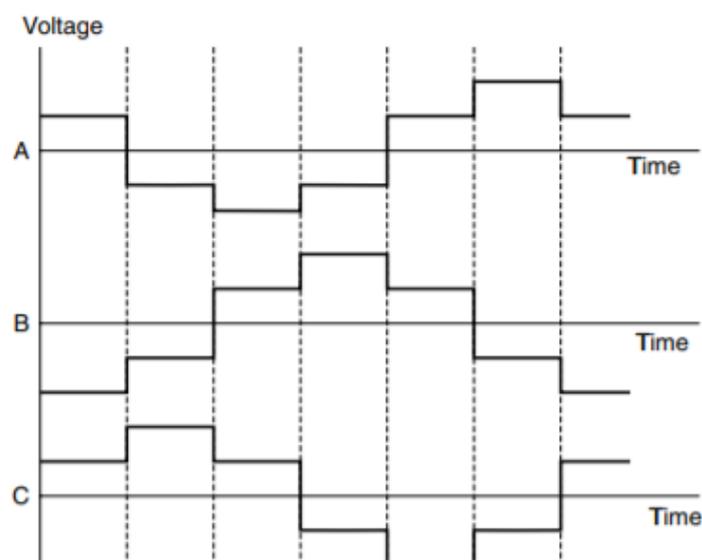


Figura 4.17-Grafico del ciclo completo della tensione in funzione del tempo per il sistema di generazione AC trifase ipotizzando un carico resistivo [32]

La tensione fornita dalle batterie, molte volte non è adatta ad alimentare i sotto circuiti che compongono i dispositivi, a causa della differente forma d'onda e della potenza. Inoltre, il valore di tensione fornito tende a diminuire al ridursi della potenza prelevata. Per questo motivo si rende necessario l'utilizzo dei convertitori. Il convertitore DC/DC è un circuito che riesce a convertire un livello di tensione continua non regolare in un valore di tensione continua regolare, più alto (boost) o più basso (duck) di quello in ingresso. Questo tipo di convertitore è utilizzato nell'elettronica di massa ma anche in ambito automobilistico, dove le strumentazioni di bordo necessitano di tensioni continue di alimentazione che potrebbero essere diverse dai 12V classici, oppure nel caso di veicoli elettrici/ibridi in cui vi siano delle batterie con voltaggi differenti tra le varie batterie di bordo. Questo tipo di dispositivi è bidirezionale, ossia si può variare la direzione della corrente anche quando il convertitore è già attivo. Esistono diversi tipi di convertitori DC/DC ma possiamo andare a considerare due macro categorie principali:

1. Lineari;
2. A commutazione (switching);

I convertitori lineari sono i più semplici dal punto di vista costruttivo, tuttavia hanno un basso rendimento che comporta un'elevata dissipazione di potenza con il conseguente aumento della temperatura al loro interno. Per questo motivo vengono usati in applicazioni con potenze molto basse. Invece, i convertitori a commutazione riescono ad immagazzinare temporaneamente l'energia e successivamente rilasciarla ad un valore di tensione differente. Ovviamente, questo tipo di convertitore è molto più performante dal punto di vista del rendimento e ciò comporta una maggiore complessità dei circuiti che lo compongono e quindi un costo maggiore.

Fino ad ora si è parlato di funzionamenti ideali, ma la realtà è molto diversa. Infatti, sia la tensione d'ingresso che quella d'uscita non è detto che siano costanti. La tensione d'ingresso molte volte è fornita da circuiti raddrizzatori e quindi può presentare una perturbazione del moto ondoso. Allo stesso modo la tensione di uscita si preleva da un load che ha in parallelo un condensatore, che ha la funzione di caricarsi e scaricarsi con una certa variazione temporale comportando una tensione di uscita non costante. Per sopperire a questo problemi, si introduce il controllo PWM tra la tensione di uscita e l'interruttore. La tensione di uscita media dipende dal tempo di apertura e chiusura dell'interruttore. Allora, data f la frequenza di commutazione del segnale che pilota l'interruttore, si ha:

$$T = \frac{1}{f} = t_{ON} + t_{OFF} \quad (4.11)$$

Dove:

t_{ON} è pari al tempo in cui l'interruttore è chiuso;

t_{OFF} è pari al tempo in cui l'interruttore è aperto;

Quindi regolando la durata di t_{ON} e t_{OFF} possiamo regolare la tensione di uscita. [36]

4.5 I motori elettrici

Esistono differenti tipologie di macchine elettriche, ognuna delle quali, come tutte le tecnologie, presenta dei vantaggi e degli svantaggi. Tuttavia, si cercherà di porre maggiore attenzione a 4 tipologie di macchine elettriche utilizzate per l'azionamento dei veicoli elettrici:

- Motori brushed a CC;
- Motori ad induzione;
- Motori a riluttanza commutata (SR);
- Motori brushless a magneti permanenti (PM).

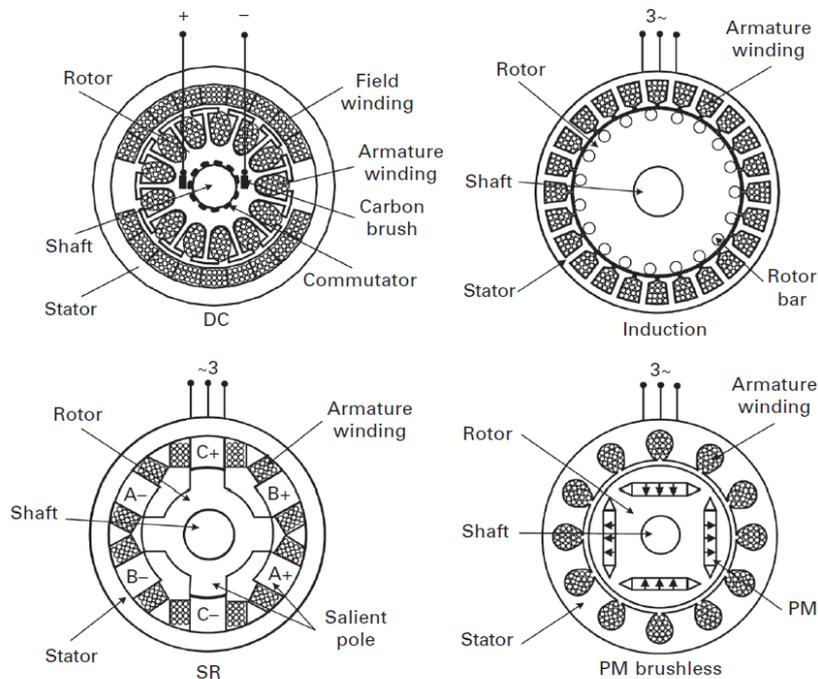


Figura 4.18-Principali tipologie di motore elettrici utilizzati per la trazione dei veicoli elettrici [31]

4.5.1 Motore brushed a CC

I motori brushed, sono i motori più usati nell'elettronica di consumo. Tuttavia, sebbene ne esistano altri tipi più performanti ed adatti a questo tipo di applicazioni, essi sono utilizzati anche come motori di trazione. Analizzando i motori brushed, si riesce a comprendere la maggior parte delle questioni relative ai sistemi di controllo dei motore elettrici. Un motore elettrico non è altro che una macchina che converte l'energia elettrica in energia meccanica. Per spiegare meglio il funzionamento consideriamo un motore elettrico semplificato, costituito solo da 2 componenti:

- Statore: è la parte fissa della motore, esso ha il compito di produrre il flusso magnetico necessario al funzionamento, è realizzato con materiale ferromagnetico ed ha la forma di un

cilindro cavo, sul quale sono fissati una serie di magneti permanenti aventi polarità alternate. Su questi magneti si fissano, a loro volta, le bobine.

- Rotore: è la parte mobile del motore, si trova all'interno dello statore ed è composto da una serie di avvolgimenti in rame attorno ad un nucleo di materiale ferromagnetico. La parte terminale del rotore è il commutatore, costituito da un'anima di ferro laminato. Quando il commutatore è alimentato in CC, nel rotore si genera un campo magnetico costante, il quale, mette in rotazione il rotore attorno al suo asse. Tale rotazione è possibile a causa del continuo cambiamento di posizione dei poli del campo magnetico rotante generato dagli avvolgimenti statotici. Infatti, i poli opposti generati dal campo magnetico del rotore saranno sempre attratti dai poli opposti generati dal campo magnetico rotante, innestando il movimento rotatorio.

Nella figura 4.19 è rappresentato un motore a corrente continua, dotato di magneti permanenti e spazzole.

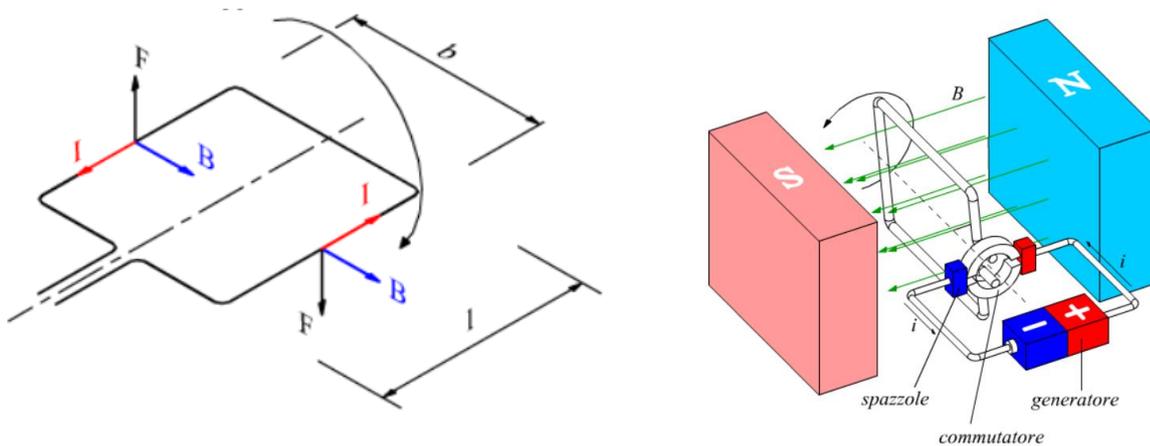


Figura 4.19-Esempio di motore Brushed a CC [38]

4.5.2 Caratteristiche principali motori dei motori a CC

Andiamo ora a spiegare le caratteristiche principali dei motori elettrici:

- Caratteristiche di velocità e di coppia;
- Sistemi di controllo del motore CC;
- Efficienza dei motori elettrici in CC;
- Funzionamento come freno dei motori elettrici.

4.5.2.1 Caratteristiche di velocità e di coppia

Se il filo di un motore elettrico ha una lunghezza di l metro, trasporta una corrente di intensità I (A) e si trova in un campo magnetico di forza B (Wb/m^2), la forza sul filo è:

$$F = BIl \quad (4.12)$$

Inoltre, se il raggio della bobina è pari ad r e l'armatura è composta da n spire, la coppia del motore sarà pari a:

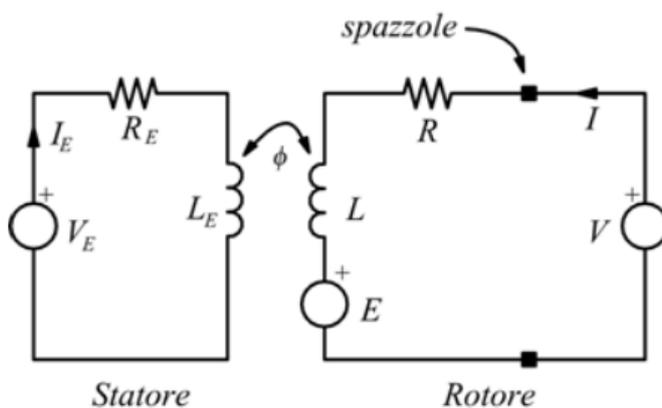
$$C = 2nrBIl \quad (4.13)$$

Il termine $2rl$ è pari all'area della bobina. Possiamo, quindi, andare a riscrivere la (4.13) in funzione del flusso magnetico totale che attraversa la bobina, ossia:

$$\Phi = BA \quad (4.14)$$

Quindi sostituendo la (4.14) nella (4.13) si ha:

$$C = n\Phi I \quad (4.15)$$



V_E = tensione di campo (di eccitazione)

I_E = corrente di campo

L_E = bobina (elettromagnete) di campo

I = corrente di armatura

R = resistenza di armatura

L = induttanza di armatura

V = tensione di alimentazione di armatura

E = forza controelettrica d'armatura

Φ = flusso di campo

Figura 4.20-Schema di un motore elettrico in CC [38]

Tuttavia, questa è la coppia massima, ossia quella che si genera quando il flusso è perfettamente radiale alla bobina. Nella realtà non sarà sempre così. Inoltre, la (4.15) non tiene conto della presenza di più coppie di poli magnetici (figura 4.19). Quindi, per collegare la coppia media erogata dal motore con la corrente e il flusso magnetico si usa una costante del motore definita come K_m . Il valore di K_m dipende da differenti fattori, come il numero di spire in ciascuna bobina o il numero di coppie di poli. È un parametro caratteristico e variabile per ogni tipo di motore, quindi in K_m sono raggruppate tutte le costanti costruttive della macchina. Da quanto detto si ottiene che la coppia media erogata dal motore è pari a:

$$C = K_m \Phi I \quad (4.16)$$

La coppia del motore è direttamente proporzionale alla corrente di armatura I (rotore). Ovviamente, la corrente di armatura dipende dalla tensione di alimentazione V al motore e dalla resistenza di armatura R . Quando il motore gira l'armatura si muoverà in un campo magnetico; ciò significa che funzionerà come generatore o come dinamo. Prendiamo il motore elettrico semplificato e su quest'ultimo consideriamo un lato della bobina, la tensione generata è espressa dall'equazione:

$$E = Blv \quad (4.17)$$

La tensione generata è solitamente chiamata f.e.m., la quale dipende dalla velocità v del filo che si muove attraverso il campo magnetico. Sappiamo, però, che la velocità del filo v dipende dalla velocità angolare e dal raggio, cioè:

$$v = r\omega \quad (4.18)$$

Inoltre, l'armatura ha due lati, quindi l'equazione (4.17) diventa:

$$E = 2Blv \quad (4.19)$$

Sostituendo la (4.18) nella (4.19) si ha, che la f.e.m. complessiva sarà pari a:

$$E = 2Blr\omega \quad (4.20)$$

Inoltre, considerando il numero di spire n , la (4.20) diventerà:

$$E = 2nBlr\omega \quad (4.21)$$

Visto che stiamo parlando dello stesso motore, si può considerare la stessa costante caratteristica K_m .

Quindi:

$$E = K_m\Phi\omega \quad (4.22)$$

Questa tensione si oppone alla tensione di alimentazione di armatura e agisce per ridurre la corrente nel motore. La tensione netta attraverso l'armatura è pari alla differenza tra la tensione di alimentazione V e la tensione E . La corrente di armatura sarà pari a:

$$I = \frac{V - E}{R} = \frac{V}{R} - \frac{E}{R} = \frac{V}{R} - \frac{K_m\Phi}{R}\omega \quad (4.23)$$

Da questa equazione si comprende che la corrente diminuisce con l'aumentare della velocità angolare. Sostituendo la (4.23) nella (4.16) si ottiene l'equazione che collega la coppia e la velocità di rotazione:

$$C = K_m\Phi I = K_m\Phi \left(\frac{V}{R} - \frac{K_m\Phi}{R}\omega \right) = K_m\Phi \frac{V}{R} - \frac{(K_m\Phi)^2}{R}\omega \quad (4.24)$$

Dall'equazione (4.24) si evince che la coppia di questo tipo di motore ha un valore massimo a velocità zero, quando è in stallo, e diminuisce costantemente con l'aumentare della velocità. In questa analisi abbiamo volontariamente ignorato le perdite sotto forma di coppia necessaria per superare gli attriti presenti sui cuscinetti e sul commutatore. Questa coppia è generalmente considerata costante, il che significa che la forma generale dell'equazione (4.23) è ancora valida e fornisce il grafico caratteristico della Figura 4.21. La relazione lineare tra velocità e coppia non rappresenta la realtà applicativa, tranne nel caso di motori molto piccoli. Infatti la coppia a bassa velocità viene ridotta sia dall'elettronica che dalla resistenza interna della batteria che alimenta il motore, altrimenti le correnti sarebbero estremamente alte e potrebbero andare a danneggiare il motore.

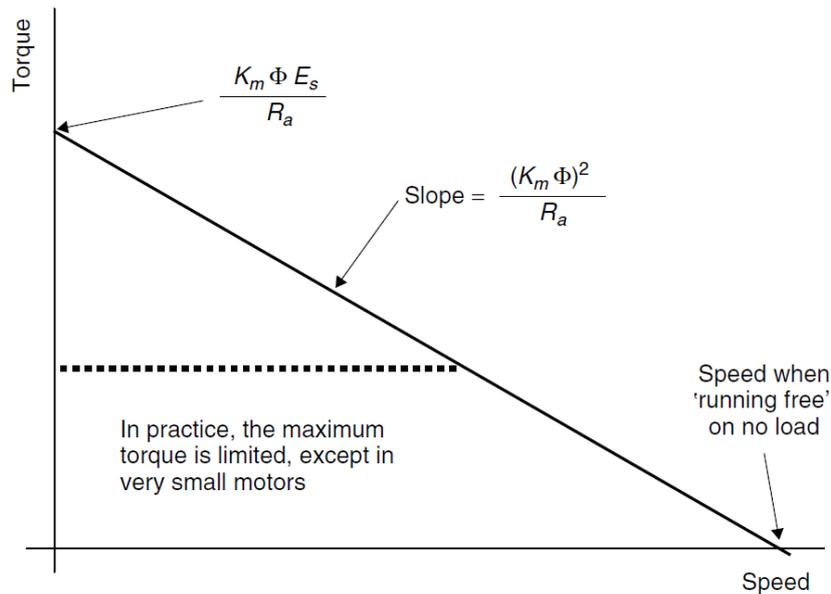


Figura 4.21-Diagramma coppia/velocità per un motore Brushed CC[32]

4.5.2.2 Sistemi di controllo del motore CC Brushed

La figura 4.21 e l'equazione 4.24 ci mostrano che il motore CC con spazzole può essere controllato molto facilmente. Se la tensione di alimentazione V viene ridotta, la coppia massima diminuisce in modo proporzionale e la pendenza del grafico coppia/velocità rimane invariata. In altre parole, qualsiasi coppia e velocità possono essere raggiunte al di sotto dei valori massimi. Andando ad agire sulla tensione di alimentazione, si riesce in maniera semplice ed efficiente ad effettuare un buon controllo su questo tipo di motore. Ovviamente, la riduzione della tensione di alimentazione non è l'unico modo per controllare questo tipo di motore. In alcuni casi possiamo anche ottenere il controllo modificando il flusso magnetico. Ciò è possibile solo se sono le bobine (attraversate da corrente) a fornire il campo magnetico invece che dei magneti permanenti. Questi avvolgimenti di campo sono posti nello statore del motore elettrico. Questo metodo, come qualsiasi sistema di controllo ha dei vantaggi e degli svantaggi.

I vantaggi sono:

- La possibilità di andare a variare l'intensità del campo magnetico, cambiano la corrente.
- Riduzione dei costi a parità di campo magnetico prodotto (questo vantaggio si va ad assottigliare all'aumentare dell'efficienza di produzione dei magneti permanenti).
- Maggiore efficienza, grazie alle maggiori possibilità di controllo motore.
- Funzionamento del motore in un'ampia gamma di coppia e velocità.

Gli svantaggi sono:

- Gli avvolgimenti di campo consumano corrente elettrica e generano calore.

Seppur presentando dei limiti non trascurabili, vi sono molti costruttori che utilizzano tutt'ora i motori CC brushed con gli avvolgimenti di campo come motori per la trazione dei veicoli elettrici.

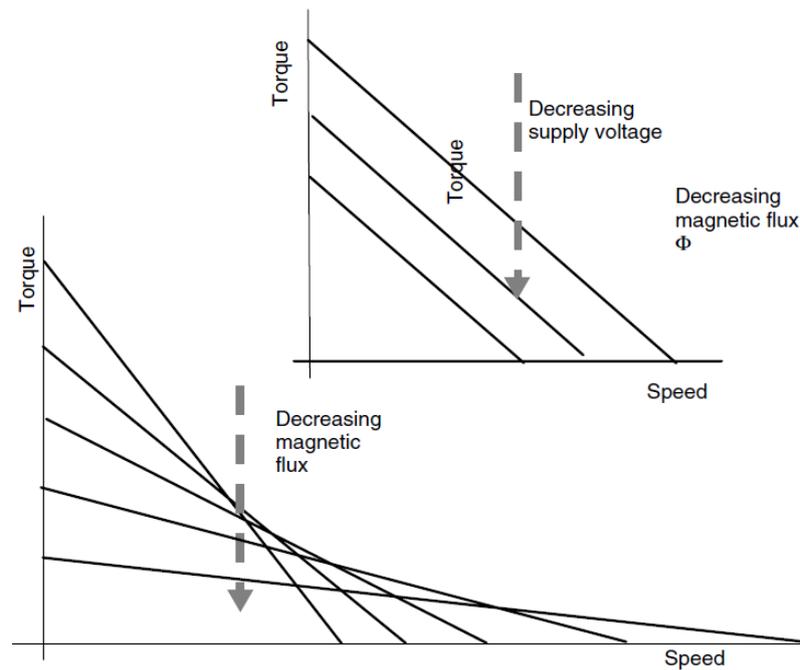


Figura 4.22-Rappresentazione della variazione della caratteristica coppia/velocità di un motore CC al variare della tensione e del flusso [32]

Andando ad analizzare la figura 4.22, è facile comprendere che se il flusso magnetico viene ridotto, la coppia massima diminuisce, ma la pendenza del grafico coppia/velocità diventa più piatta. Così facendo si riesce a far funzionare il motore con un'ampia gamma di coppia e velocità. Questo metodo a volte è migliore del semplice controllo della tensione, specialmente quando siamo nella situazione di alta velocità angolare e bassa coppia, che è una condizione abbastanza comune nei veicoli elettrici che viaggiano vicino alla loro velocità massima. Vi sono 3 tipi di motori a CC con spazzole ed avvolgimenti di campo:

- a) Serie;
- b) Shunt;
- c) Eccitato separatamente.

I primi due sono solo utilizzati in ambito teorico, mentre il motore CC eccitato separatamente ha un ampio uso in ambito automotive. Il motore eccitato separatamente permette di avere un controllo indipendente sia del flusso magnetico (controllando la tensione sull'avvolgimento di campo V_E) che della tensione di alimentazione V . Ciò consente di impostare con grande flessibilità la coppia richiesta a qualsiasi velocità angolare. Inoltre, esso consente di utilizzare entrambi i metodi di controllo analizzati precedentemente, riducendo la tensione di alimentazione dell'indotto V o riducendo il flusso magnetico. Per questi motivi il motore CC brushed eccitato separatamente è ampiamente utilizzato come motore di trazione nei veicoli elettrici.

4.5.2.3 Efficienza dei motori elettrici in CC

In questo paragrafo, tratteremo dell'efficienza dei motori elettrici CC. Le considerazioni che verranno enunciate possono essere estese, con le opportune considerazioni, a tutti i tipi di motori elettrici. Nel paragrafo 4.5.6 verrà approfondito questo argomento. Le principali fonti di perdita nei motori elettrici in CC brushed possono essere divise in 4 tipologie principali:

- 1) Perdite di rame, causate dalla resistenza elettrica dei fili (e delle spazzole) del motore. Ciò provoca il riscaldamento e, conseguentemente, una parte dell'energia elettrica fornita viene trasformata in energia termica (calore) anziché in lavoro elettrico. Il calore generato dal passaggio della corrente è proporzionale al quadrato della corrente stessa:

$$P = I^2 R \quad (4.25)$$

Tuttavia, sappiamo dalle equazioni (4.15) e (4.16) che la corrente è proporzionale alla coppia C fornita dal motore, quindi possiamo dire che:

$$\text{Perdite di rame} = K_c C^2 \quad (4.26)$$

Dove K_c è una costante che dipende dalla resistenza delle spazzole e della bobina e, anche, dal flusso magnetico. Queste perdite di rame sono probabilmente le più semplici da comprendere e, soprattutto nei motori più piccoli, sono la principale causa di inefficienza.

- 2) Perdite di ferro, esse sono causate da effetti magnetici nel ferro del motore, in particolare nel rotore. Le cause principali che generano questo tipo di perdite sono essenzialmente due, ma per comprenderle appieno bisogna tenere in considerazione il fatto che il campo magnetico nel rotore cambia continuamente. Consideriamo un osservatore che si trova sul bordo del rotore e, se facciamo compiere al rotore un giro completo, l'osservatore passerà dal polo nord al polo sud e, di nuovo, al polo nord e così via. Da ciò si può capire che, mentre il rotore ruota, il campo magnetico fornito dai magneti può rimanere invariato, a differenza del campo magnetico sul rotore in movimento, il quale cambia sempre. Quindi, qualsiasi pezzo di ferro sul rotore si troverà in un campo magnetico in continua evoluzione. Ciò causa 2 tipi di perdite:

- La prima si chiama perdita per isteresi, che non è altro che l'energia necessaria per magnetizzare e smagnetizzare continuamente il ferro, allineando e riallineando i dipoli magnetici del ferro. Nel ferro magneticamente dolce questo valore è molto piccolo, ma sicuramente non sarà mai zero.
- La seconda perdita di ferro, deriva dal fatto che il cambiamento del campo magnetico genererà una corrente nel ferro, la quale provocherà il riscaldamento del ferro. Poiché queste correnti fluiscono solo intorno e all'interno del rotore, vengono chiamate correnti parassite. Queste correnti parassite sono ridotte al minimo costruendo il rotore, non come un pezzo unico, ma bensì come un insieme di fogli sottili tutti

imbullonati o incollati tra di loro. Ogni foglio, è separato dal suo vicino grazie ad uno strato di vernice. Che riduce notevolmente le correnti parassite aumentando efficacemente la resistenza elettrica del ferro.

Le perdite di ferro sono proporzionali alla frequenza con cui cambia il campo magnetico. Infatti, una frequenza più alta si traduce in una maggiore magnetizzazione e smagnetizzazione e, quindi, maggiori perdite di isteresi. Inoltre, una frequenza più alta si traduce in una maggiore velocità di variazione del flusso e, quindi, in maggiori correnti parassite indotte. In conclusione, possiamo affermare che il tasso di variazione del flusso magnetico, e conseguentemente le perdite di ferro, è direttamente proporzionale alla velocità a cui sta girando il rotore, allora:

$$\text{Perdite di ferro} = K_i w \quad (4.27)$$

dove K_i in prima battuta può essere considerata una costante. Nella realtà, non sarà realmente costante, poiché il suo valore dipende dall'intensità del campo magnetico e dal modo in cui esso viene fornito. Quindi, esso si può considerare costante nel caso di motore a magneti permanenti rispetto a motori ad eccitazione separata.

3) La terza categoria di perdita è quella dovuta agli attriti e alla resistenza all'aria. Ovviamente ci saranno delle perdite per attrito nei cuscinetti e nelle spazzole del motore. Inoltre, il rotore avrà anche una resistenza all'aria che potrebbe essere molto elevata se viene utilizzata l'aria come fonte di raffreddamento per il motore stesso. La forza di attrito sarà direttamente proporzionale alla velocità del motore, mentre la resistenza all'aria aumenterà con il quadrato della velocità. Da quanto detto si può intuire che per ottenere la potenza dissipata da queste forze bisognerà moltiplicarle per la velocità, ossia:

$$\text{Perdite per attrito} = C_f w \quad (4.28)$$

$$\text{Perdite dovute alla resistenza dell'area} = K_w w^3 \quad (4.29)$$

dove C_f è la coppia di attrito presente nei cuscinetti e nelle spazzole, mentre K_w è una costante che dipende principalmente dalle dimensioni e dalla forma del rotore e dalla presenza o meno di un sistema di raffreddamento ad aria.

4) Infine, affrontiamo quelle perdite costanti che si verificano anche se il motore è completamente fermo e non variano né con la velocità né con la coppia. Nel caso del motore eccitato separatamente queste non sono sicuramente trascurabili, in quanto la corrente (e quindi la potenza) deve essere fornita alla bobina che genera il campo magnetico. Negli altri tipi di motore, che verranno descritti di seguito, l'alimentazione è necessaria per i circuiti elettronici di controllo che funzionano in ogni momento. L'unico tipo di motore per cui questo

tipo di perdite potrebbe essere trascurabile è il motore a magneti permanenti brushed. Questo tipo di perdite, essendo costanti e caratteristiche del tipo di motore, vengono rappresentate dalla lettera K.

Andando a sommare tutte le perdite precedentemente elencate si ottiene la perdita globale del motore.

$$Perdite\ totali = K_c C^2 + K_i \omega + K_w \omega^3 + K \quad (4.30)$$

Sebbene l'equazione (4.30) è stata derivata partendo da un motore CC brushed, è importante notare che questa equazione può essere applicata, con una buona approssimazione, a tutti i tipi di motore.

$$\eta_m = \frac{Output\ power}{input\ power} = \frac{Output\ power}{Output\ power + losses} = \frac{C\omega}{C\omega + K_c C^2 + K_i \omega + K_w \omega^3 + K} \quad (4.31)$$

I valori delle costanti presenti in questa equazione, possono essere trovati effettuando delle analisi sperimentali.

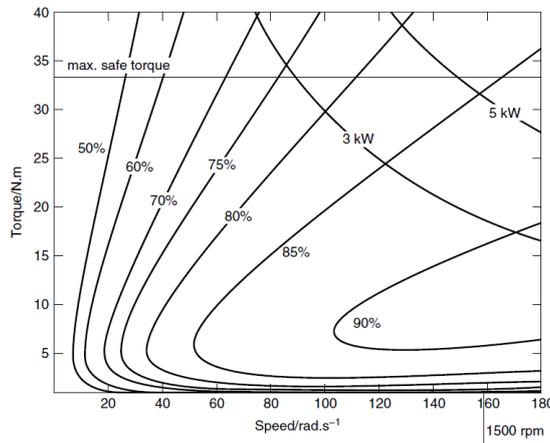


Figura 4.23-Mappa di efficienza di un tipico motore brushed CC a magneti permanenti [32]

Ad esempio, dei valori tipici per un motore a magneti permanenti di dimensioni ridotte, come per esempio quello che potrebbe essere montato su uno scooter elettrico, sono:

$$K_c = 0.8; K_i = 0.1; K_w = 10^{-5}; K = 20$$

Come si vede nella figura 4.23, è utile tracciare i valori di efficienza su un grafico coppia/velocità angolare, andando a generare quella che viene normalmente definita come la mappa di efficienza del motore. Questa fornisce un'idea dell'efficienza in ogni possibile condizione operativa.

Se è ovvio che le perdite in un motore influiscono sulla sua efficienza, non è così ovvio che le perdite abbiano anche un impatto cruciale sulla potenza massima che può essere ottenuta da un motore elettrico. Infatti, se si considera un motore CC brushed, la potenza prodotta potrebbe essere aumentata aumentando la tensione di alimentazione e, quindi, la coppia. Chiaramente, deve esistere un limite a questo, in quanto la potenza non può essere aumentata all'infinito. Un fattore limitante è la temperatura. Infatti, al di sopra di una certa potenza, il calore generato a seguito delle perdite (4.30) diventa troppo grande per essere dissipato e, conseguentemente, si ha il surriscaldamento del motore. Da quanto detto, si può capire che nei motori CC brushed tutte le perdite si verificano nel rotore e,

proprio a causa di ciò, si ha che il calore generato è molto più difficile da rimuovere. Invece, nei motori senza spazzole la quasi totalità delle perdite si verifica sullo statore, la parte esterna fissa del motore e, quindi, il calore può essere ridotto molto più facilmente anche se andiamo ad utilizzare il semplice raffreddamento ad aria. Da quanto detto, possiamo inoltre comprendere che i motori elettrici possono essere utilizzati in sicurezza ben oltre la loro potenza nominale per brevi periodi. Questo tipo di funzionamento è molto utilizzato nei veicoli elettrici, poiché sono richieste delle potenze di picco solo per brevi intervalli di tempo, come durante le brusche accelerazioni.

4.5.2.4 Funzionamento come freno dei motori elettrici

Una caratteristica fondamentale dei motori elettrici è la possibilità di riconvertire l'energia cinetica in energia elettrica. Per spiegare questa caratteristica andiamo a considerare un motore CC con spazzole, ma il principio generale si può applicare a tutti i tipi di motori elettrici. Consideriamo il motore CC in figura 4.24:

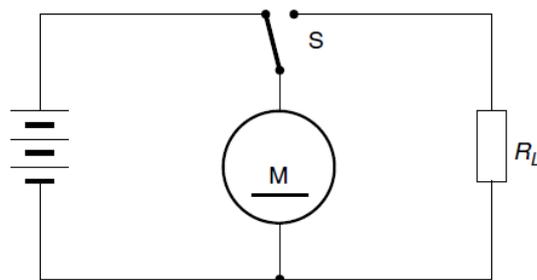


Figura 4.24-Schema di un motore elettrico Brushed da usare come freno dinamico [32]

Il motore è collegato a una batteria avente una resistenza interna trascurabile e una tensione V . Esso raggiunge uno stato stazionario, fornendo una coppia C ad una velocità ω . Queste variabili sono collegate tra di loro dall'equazione (4.24). Supponiamo che l'interruttore S si sposti a destra. Il motore continuerà a muoversi alla stessa velocità angolare ω . Ciò causerà la generazione di una tensione E , come indicato dall'equazione (4.22). Questa tensione sarà applicata al resistore R_L , con la corrente ulteriormente limitata dalla resistenza di armatura del rotore. Allora, la corrente sarà data dalla formula:

$$I = \frac{K_m \Phi \omega}{R_a + R_L} \quad (4.32)$$

Questa corrente uscirà dal motore e si tradurrà in una coppia negativa. Il valore di questa coppia sarà ancora dato dall'equazione della coppia (4.16). Quindi, sostituendo la (4.16) nella (4.32) si avrà la coppia negativa, che rallenterà il motore:

$$C = -K_m \Phi I = -K_m \Phi \frac{K_m \Phi \omega}{R_a + R_L} = -\frac{(K_m \Phi)^2 \omega}{R_a + R_L} \quad (4.33)$$

Si ha così una coppia negativa, il cui valore può essere controllato variando la resistenza R_L .

Andando ad analizzare l'equazione precedente capiamo che:

- a) La coppia diminuisce al diminuire della velocità ω ;
- b) Se R_l è costante, la velocità diminuirà in modo esponenziale fino a 0.

Questo modo di rallentare un motore elettrico, utilizzando una resistenza, è noto come frenata dinamica. Visto che nello schema indicato non è presente nessun accumulatore di energia elettrica, tutta l'energia cinetica del motore e del veicolo ad esso collegato, verrà convertita in calore. Se nella figura 4.24, al posto della resistenza, fosse presente una batteria, allora avremmo un sistema noto come frenata rigenerativa. Tuttavia, il semplice collegamento di una batteria al motore non è pratico. Supponendo, infatti, che la tensione della batteria sia V_b e che il motore giri alla velocità ω , la corrente che uscirà dal motore sarà data dalla seguente equazione:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{K_m \Phi \omega - V_b}{R_a} \quad (4.34)$$

La coppia di rallentamento sarà proporzionale a questa corrente. Una volta che viene raggiunto il valore della velocità angolare ω per cui si ha che la tensione generata dal motore è pari alla tensione della batteria, allora non ci sarà più effetto frenante. Ovviamente, se la tensione della batteria è bassa sarà molto difficile utilizzare l'energia immagazzinata in essa e l'effetto frenante potrebbe essere molto marcato alle alte velocità, con la corrente, calcolata mediante la (4.34), molto grande. Per risolvere questo problema, ossia avere una frenata proporzionale alla velocità, si può modificare lo schema rappresentato nella figura 4.24 con quello della figura 4.25. Ossia, introdurre un convertitore DC/DC il quale preleva la corrente dal motore I_m alla tensione V_m . Questa tensione V_m cambierà costantemente con la velocità del motore (e quindi del veicolo). Mentre la corrente I_m cambierà con la coppia frenante desiderata.

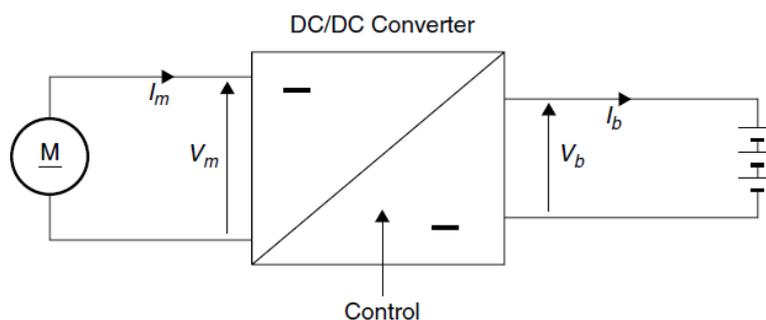


Figura 4.25-Sistema di frenata rigenerativa di un motore CC [32]

Il convertitore CC/CC prenderà questa energia elettrica (prodotto della tensione per la corrente) e la convertirà ad una tensione maggiore (e corrente ridotta) in modo che questa corrisponda alla tensione della batteria che sta immagazzinando l'energia. Il punto chiave è che la tensione del motore potrebbe essere notevolmente inferiore alla tensione della batteria, ma grazie al convertitore questa potrebbe comunque fornire carica alla batteria. Ciò è possibile grazie alla moderna elettronica di potenza.

Infatti, non stiamo producendo energia ma, bensì, stiamo scambiando un'energia a bassa tensione (ed alta corrente) con un'energia ad alta tensione (ed una corrente più bassa). Questo principio è lo stesso dei trasformatori nei circuiti a corrente alternata, con la possibilità aggiuntiva di poter variare continuamente il rapporto tra le tensioni di ingresso e di uscita. Sebbene sia possibile realizzare dei circuiti di potenza con dei convertitori di tensione, che riescano ad eseguire quanto precedentemente descritto, è ovvio che parte della potenza elettrica andrà persa e che quindi questi sistemi avranno dei rendimenti più o meno elevati. In conclusione possiamo dire che:

$$V_b \cdot I_b = \eta_c \cdot V_m \cdot I_m \quad (4.35)$$

Dove η_c è l'efficienza del circuito del convertitore. Abbiamo così visto che un motore può essere utilizzato sia per fornire una coppia controllabile su una gamma di velocità sia come freno. In questa configurazione non soltanto riesce a recuperare energia cinetica, ma riesce anche ad immagazzinarla in una batteria. Per avere questo range di controllo abbiamo bisogno di circuiti elettronici di potenza in grado di controllare e variare in maniera opportuna le tensioni prodotte.

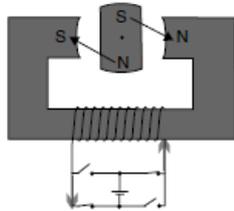
4.5.3 Motori elettrici brushless a magneti permanenti (PM)

Come visto precedentemente, i motori brushed presentano una serie di problemi:

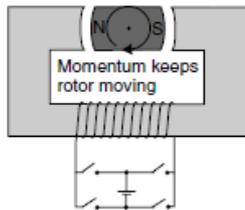
- Attrito tra le spazzole e il commutatore;
- La necessità di un'elevata manutenzione dovuta ai movimenti relativi tra gli organi;
- Una forte limitazione della potenza generabile a causa delle perdite dovute al calore generato nel rotore.

Da quanto detto, è ovvio che se il calore fosse generato nello statore esterno si potrebbe rimuovere il calore molto più facilmente e si avrebbero motori più piccoli a parità di potenza. Quindi è facile intuire che i motori brushed, seppur trovino ancora un ampio uso, non sono la migliore scelta come motori di trazione nei veicoli elettrici. Infatti, per quest'ultimi si privilegia l'uso dei motori brushless, o senza spazzole. I motori brushless più utilizzati sono i motori a magneti permanenti (PM), nei quali il campo magnetico è generato da magneti permanenti ad alta energia. Questo tipo di motori riesce a raggiungere un peso e un volume molto ridotti, generando allo stesso tempo una coppia e una densità di potenza molto elevate. Inoltre, a causa dell'assenza di perdite di rame dal rotore, la loro efficienza è intrinsecamente elevata, poiché le perdite di calore, avvenendo principalmente nello statore, dissipano nell'ambiente circostante. Tuttavia, i motori brushless PM soffrono degli svantaggi dovuti agli elevati costi del materiale dei magneti e del flusso prodotto incontrollabile. Sulla base delle forme d'onda che alimentano i terminali del motore, gli azionamenti brushless PM possono essere suddivisi in 2 tipologie principali:

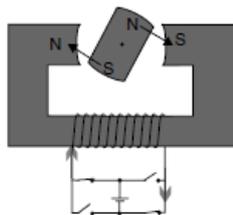
1. PM brushless AC (BLAC), alimentato da una corrente alternata sinusoidale, anche chiamato PM sincrónico²;
2. PM brushless DC (BLDC), alimentato da corrente alternata rettangolare.



La corrente scorre nella direzione che magnetizza lo statore in modo che il rotore (PM) venga ruotato in senso orario.



Il rotore (PM) passa tra i poli dello statore e la corrente dello statore viene interrotta.



La quantità di moto trasporta il rotore (PM) e la bobina dello statore viene riattivata, ma la corrente e quindi il campo magnetico sono invertiti. Quindi il rotore (PM) viene ruotato in senso orario.

Figura 4.26-Schema del funzionamento base del motore Brushless [32]

Andiamo di seguito a spiegare il funzionamento base del motore brushless DC (BLDC) rappresentato in fig.4.26. Mediante gli interruttori la corrente passa direttamente da una sorgente DC attraverso una bobina sullo statore.

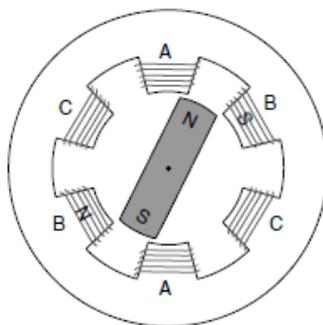


Figura 4.27-Schema di un motore BLDC con 3 bobine sullo statore [32]

Il processo continua con la corrente alternata nella bobina dello statore. Ovviamente la commutazione della corrente deve essere sincronizzata con la posizione del rotore. Questo viene fatto utilizzando o

² Nel motore sincrónico la velocità di rotazione dell'asse è rigidamente vincolata alla frequenza della tensione di alimentazione mentre nel motore asincrono la velocità di rotazione dell'asse è sempre minore della velocità di rotazione del campo rotante legata alla frequenza della tensione di alimentazione [40]

dei sensori ad effetto Hall³, che utilizzano il magnetismo del rotore per rilevare la sua posizione, oppure sensori ottici. Un problema con il semplice sistema a bobina singola della Figura 4.26 è che la coppia è molto instabile. Questa limitazione viene ridotta andando ad avere, come mostrato in figura 4.27, tre o più bobine sullo statore. In questo diagramma la bobina B è percorsa da corrente nella direzione che magnetizza lo statore, in modo che il rotore (PM) venga ruotato in senso orario. Una volta che il rotore si trova tra i poli della bobina B, la bobina C verrà eccitata e così via. Il circuito elettronico, utilizzato per pilotare e controllare le correnti della bobina, è un semplice inverter trifase. Una caratteristica di questi motori BLDC è che la coppia si ridurrà all'aumentare della velocità.

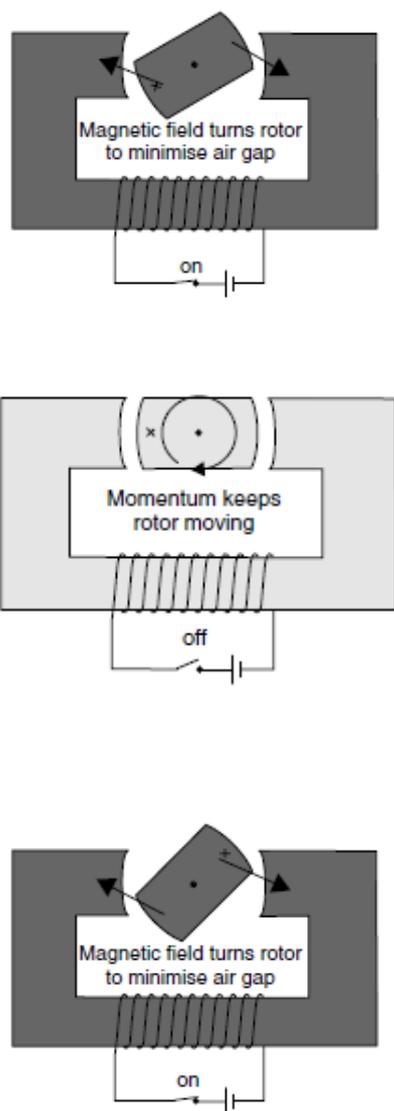


Figura 4.28-Motore Zytec BLDC da 100 kW raffreddato ad olio per applicazioni automobilistiche [32]

Il magnete, ruotando, genererà un f.e.m. di ritorno nella bobina a cui si sta avvicinando. Questa forza elettromotrice sarà proporzionale alla velocità di rotazione e ridurrà la corrente che scorre nella bobina. La riduzione della corrente avrà come conseguenza la diminuzione della forza del campo magnetico e quindi della coppia. Alla fine, il valore della f.e.m. indotto sarà uguale alla tensione di alimentazione e, proprio in quest'istante, si raggiungerà la velocità massima. Questo tipo di motore può essere utilizzato anche come generatore di elettricità o come motore per la frenata rigenerativa. Sebbene la corrente attraverso le bobine del motore sia alternata, deve esserci un'alimentazione CC; questo è il motivo per cui questi motori sono generalmente classificati come CC. Alcuni dei più sofisticati motori di trazione per veicoli elettrici sono di questo tipo, come quello mostrato nella figura 4.28. La presenza dei rotori costituiti da un magnete permanente ha il vantaggio che per generare il campo magnetico non è necessario indurre corrente nel rotore. Così facendo si ha un motore più efficace e che riesce a fornire una potenza specifica leggermente maggiore. Tuttavia, la presenza dei magneti può aumentare il costo finale del motore.

³ Un sensore ad effetto Hall è un trasduttore che varia la sua tensione di uscita in risposta ad un campo magnetico.

4.5.4 Motori a riluttanza commutata (SR)



Il campo magnetico viene generato dalla corrente che attraversa la bobina dello statore. Poiché il rotore non è allineato con il campo magnetico, verrà prodotta una coppia che tende a ridurre al minimo il traferro e cercare di rendere simmetrico il campo magnetico.

Questo tipo di rotore prende, quindi, il nome dalla riluttanza del campo magnetico di attraversare il traferro e per questo motivo esso cerca di ridurlo. Ora, si vede che il rotore è allineato con lo statore e la corrente che genera il campo magnetico viene interrotta.

La sua quantità di moto muove il rotore attorno al suo asse per un quarto di giro. A questo punto, viene riapplicata la corrente nell'avvolgimento statorico rigenerando il campo magnetico. Anche in questo caso, il campo esercita una coppia per ridurre il traferro e rendere il campo simmetrico, il che fa girare il rotore all'interno dello statore. Quando il rotore si allinea di nuovo con lo statore, la corrente verrà interrotta.

Figura 4.29-Schema del funzionamento base del motore a riluttanza di commutazione [32]

I motori a riluttanza o SR seppur negli ultimi anni sono stati meno utilizzati nei veicoli elettrici, rimangono una tecnologia molto apprezzata come motori di trazione. Infatti, essi offrono i vantaggi di una costruzione semplice, con bassi costi di produzione e con eccezionali caratteristiche di coppia e velocità. Andiamo di seguito a spiegarne il funzionamento prendendo in esame la figura 4.29. Su questo tipo di motori, il rotore è semplicemente un pezzo di ferro magneticamente dolce ed anisotropo. Inoltre, la corrente nella bobina non ha bisogno di alternarsi. Conseguentemente, questo è un motore molto semplice e dal costo non troppo elevato. La velocità può essere controllata variando il tempo in cui viene attivata la corrente in ogni impulso di potenza. Inoltre, poiché il rotore non è un magnete permanente, non si generano campi elettromagnetici di ritorno, come nei motori BLDC, il che significa che sono possibili velocità più elevate. Come si può immaginare, la principale difficoltà

dei motori SR è il sistema di controllo dei tempi di accensione e spegnimento delle correnti dello statore. Inoltre, se il rotore è sfasato di 90° e la bobina dello statore è magnetizzata, non verrà prodotta alcuna coppia poiché il campo magnetico sarebbe simmetrico. Da quanto detto, si intuisce che la coppia è molto variabile. Questa criticità può essere attenuata andando ad aggiungere più bobine sullo statore (figura 4.31). Prima di addentrarci nel funzionamento del motore elettrico ad induttanza di commutazione con più bobine sullo statore, specifichiamo quali possono essere le due differenti strutture dei rotori, rappresentate nella figura 4.30:

- A poli lisci, nel quale l'avvolgimento di campo è disposto lungo le cave distribuite alla periferia del rotore. Così facendo si genera uno spessore di traferro costante e il circuito magnetico è isotropo. [39]
- A poli salienti, nel quale l'avvolgimento di eccitazione è costituito da bobine avvolte sui corpi dei poli. Il traferro in questo caso ha spessore variabile e il circuito magnetico è anisotropo; in particolare vengono evidenziati l'asse polare, in cui il traferro è minimo e l'asse interpolare, in cui il traferro è massimo. [39]

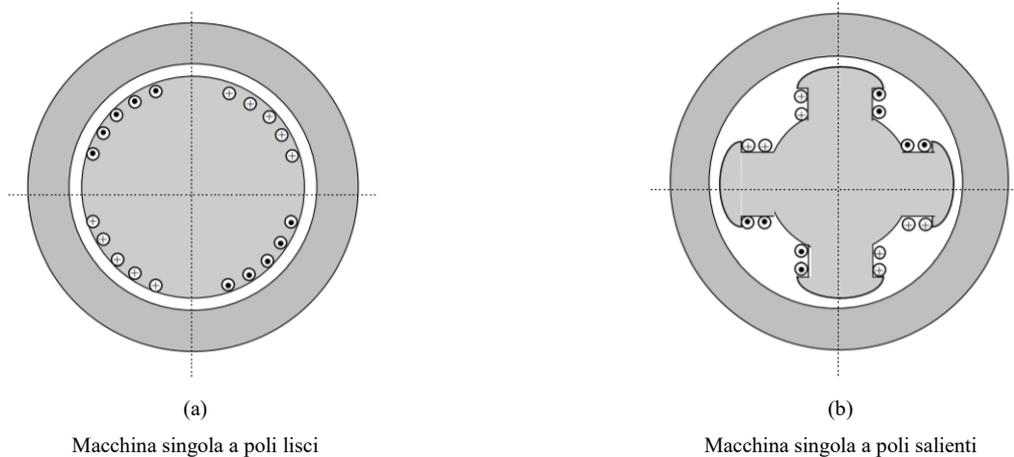


Figura 4.30-Possibili strutture dei rotori[39]

Dopo aver fatto questa puntualizzazione sulle differenti tipologie di poli, possiamo andare a considerare il motore SR a 4 poli salienti rotorici, rappresentato nella figura 4.31. Lo statore e il rotore presentano un numero differente di poli salienti tra rotore e statore sulla periferia affacciata al traferro. Di solito le configurazioni comuni hanno 2 poli nello statore rispetto al rotore. Nella figura 4.31 (a) la bobina A è magnetizzata ed essa esercita una forza in senso orario sul rotore. Quando i poli salienti del rotore stanno entrando in linea con la bobina A, la corrente in A viene interrotta. In questo momento, figura 4.31 (b), gli altri due poli salienti del rotore sono quasi in linea con la bobina C, che viene eccitata. Così facendo si riesce a mantenere la rotazione regolare del rotore. Ovviamente, affinché tutto funzioni in maniera perfetta, si deve conoscere la posizione del rotore, la quale viene dedotta, grazie ad opportuni sensori, mediante i valori di tensione e corrente negli avvolgimenti.

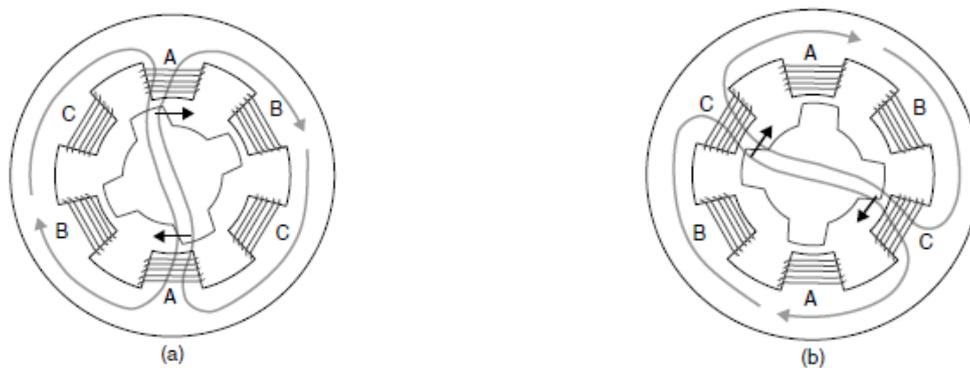


Figura 4.31-Schema di funzionamento di un motore SR con un rotore a quattro poli salienti [32]

Nella figura 4.32 è rappresentato un motore a riluttanza di commutazione; focalizzandosi sul rotore si vede che esso, rispetto agli altri tipi di motore, è molto semplice. Ovviamente, questa semplicità si traduce in un costo ridotto sia in termini di produzione che di manutenzione. Inoltre, grazie all'utilizzo di un nucleo ad alta permeabilità magnetica, la coppia che viene prodotta, a parità di dimensioni del motore, è maggiore sia dei motori ad induzione che dei motori BLDC. Andando a combinare quanto appena detto con la maggiore velocità raggiungibile, si intuisce che si ottiene una maggiore densità di potenza. Tuttavia, a causa della maggiore precisione dei sistemi di controllo della corrente nelle bobine, questi motori vengono utilizzati su prodotti molto sensibili ai costi, come le lavatrici o i robot da cucina. Sebbene l'efficienza massima del motore SR possa essere leggermente inferiore a quella del motore BLDC, essi mantengono la loro efficienza su una gamma più ampia di velocità e coppia rispetto a qualsiasi altro tipo di motore.



Figura 4.32-Esempio di rotore e statore in un motore SR [32]

4.5.5 Motori ad induzione

I motori ad induzione, grazie alla loro maturità tecnologica, sono una macchina elettrica molto affidabile. Per questo motivo vengono utilizzati in diverse applicazioni industriali tra cui i sistemi di propulsione per i veicoli elettrici. I motori ad induzione sono alimentati in corrente alternata e, quindi,

per essere alimentati da una fonte di energia a corrente continua si ha bisogno di un inverter. Principalmente ne esistono di 2 tipi:

1. Rotore avvolto;
2. Rotore a gabbia.

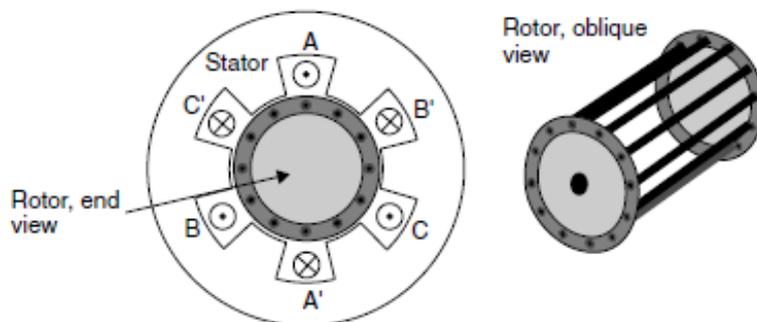


Figura 4.33-Schema di funzionamento di un motore ad induzione con rotore a gabbia [32]

Tuttavia, a causa del costo elevato e della maggiore necessità di manutenzione, l'azionamento a induzione a rotore avvolto sta andando sempre più in disuso a favore del rotore a gabbia. Andiamo di seguito a spiegare brevemente il funzionamento del motore ad induzione trifase, mostrato nella figura 4.33. Le tre bobine sono avvolte attorno allo statore. Il rotore, invece, è costituito da barre di rame o alluminio, cortocircuitate all'estremità, le quali formano una sorta di gabbia (da qui il nome). Bisogna tener presente che, sebbene nella figura il rotore risulti vuoto, nella realtà l'interno del rotore a gabbia sarà riempito con ferro laminato.

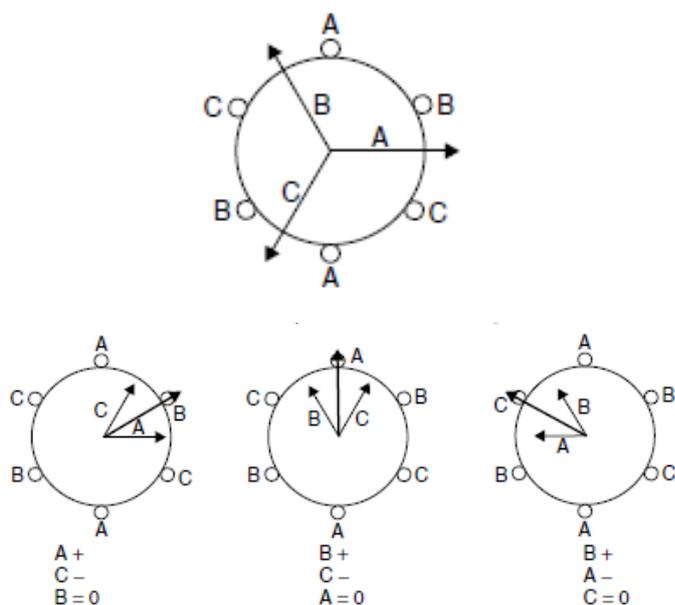


Figura 4.34-Rappresentazione di un campo magnetico rotante in un motore a induzione [32]

Le tre bobine (A,B,C) sono avvolte sullo statore. Esse, sono disposte in modo che una corrente positiva produca un campo magnetico nella direzione mostrata dalle frecce. La disposizione degli avvolgimenti è nota come bipolare.

Se queste tre bobine sono alimentate con una corrente alternata trifase, il campo magnetico ruoterà in senso antiorario.

Il campo magnetico passando attraverso i conduttori del rotore, genera così una corrente elettrica. Su questi conduttori, a causa del trasporto di corrente elettrica, si andrà a produrre una forza che causerà

la rotazione del rotore. Da questo è facile intuire che il rotore insegue il campo magnetico rotante. Infatti, se il rotore dovesse andare alla stessa velocità del campo magnetico, non ci sarebbe velocità relativa tra il campo rotante e i conduttori e, conseguentemente, nessuna coppia (non ci sarebbe corrente indotta). Quanto detto è immediatamente visibile nel grafico Coppia/velocità angolare del motore ad induzione (figura 4.35).

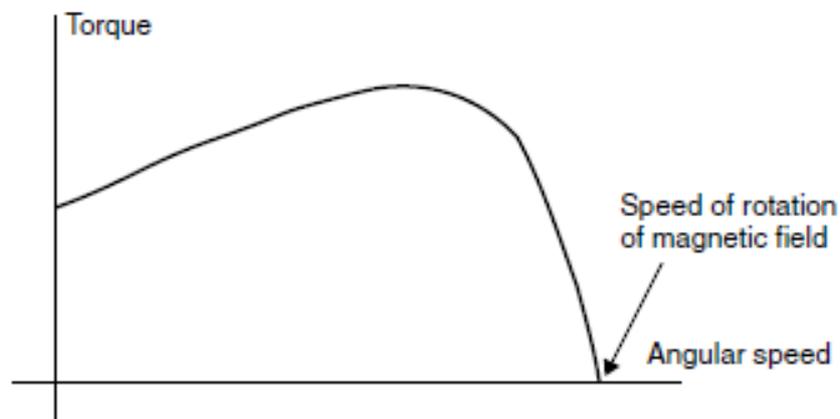


Figura 4.35-Curva coppia/velocità di un motore ad induzione [32]

La coppia aumenta man mano che la velocità angolare del rotore segue quella del campo magnetico fino a uno scorrimento ottimale, dopodiché la coppia diminuisce leggermente. È possibile avvolgere le bobine in modo che il campo magnetico abbia quattro, sei, otto o n-poli. La velocità di rotazione del campo magnetico è pari alla frequenza di alimentazione diviso il numero di poli. Quindi, un motore a quattro poli girerà alla metà della velocità di un motore a due poli, a parità di frequenza di alimentazione in CA. Su questo tipo di motori si può controllare la velocità andando a variare la frequenza di alimentazione trifase. Ovviamente, andando solo a variare la frequenza non si riuscirebbe ad avere un controllo preciso della velocità, in quanto vi è uno slittamento a seconda della coppia. Tuttavia, se dopo aver misurato la velocità angolare la si va ad incorporare in un sistema di controllo ad anello chiuso, si può regolare la frequenza per raggiungere la velocità desiderata. La coppia massima dipende dall'intensità del campo magnetico che si genera tra il rotore e le bobine dello statore. Quest'ultimo a sua volta dipende dalla corrente nelle bobine. Quindi, a parità di tensione, se si aumenta la frequenza si riduce la corrente a causa dell'induttanza delle bobine, le quali hanno un'impedenza proporzionale alla frequenza. Il risultato è che, se l'inverter è alimentato da una tensione fissa, la coppia massima sarà inversamente proporzionale alla velocità. Il fatto che una corrente debba essere indotta nel rotore genera delle perdite considerevoli. Seppur siano largamente impiegati, si può tranquillamente affermare che i motori a induzione tendono ad essere meno efficienti (1-2%) rispetto agli altri tipi di motore brushless a parità di condizioni.

4.5.6 L'efficienza dei motori elettrici

Si potrebbe erroneamente pensare che la miglior scelta, per ogni tipo di applicazione, sia quella di selezionare il motore elettrico avente una maggiore efficienza ma, in realtà, non è così. Infatti, il tipo di motore scelto è sì un fattore importante in funzione del tipo di applicazione, ma vi sono altri fattori molto più influenti. Un motore elettrico è, in termini energetici, abbastanza semplice. Infatti, l'energia elettrica è l'input e il lavoro meccanico è l'output desiderato, con una parte di energia elettrica convertita in calore a causa dell'attrito e delle perdite. Le potenze d'ingresso e di uscita sono semplici da misurare: il prodotto di tensione per corrente in ingresso e il prodotto tra la coppia e la velocità angolare in uscita. Detto ciò, non è così semplice misurare l'efficienza di un motore elettrico, in quanto essa può cambiare notevolmente al variare delle condizioni al contorno. A tal proposito, si può utilizzare la formula precedentemente calcolata per i motori a CC (4.31), come una formula generale per calcolare l'efficienza di ogni tipo di motore. Tuttavia, per comprendere a pieno come stimare l'efficienza dei motori elettrici e conseguentemente fornire uno strumento per la scelta di un particolare motore per le diverse applicazioni, andiamo ad evidenziare alcuni fattori generali sull'efficienza dei motori elettrici. Il primo fattore da tenere in considerazione quando si parla di efficienza dei motori elettrici è che questa aumenta all'aumentare delle dimensioni (potenza) del motore. Quando detto è visibile nella tabella 4.2 nella quale è mostrata l'efficienza di una gamma di motori a induzione trifase a quattro poli. Sebbene queste cifre si riferiscano ai motori a induzione, lo stesso effetto può essere visto con altri tipi di motore, inclusi BLDC e SR.

Tabella 4.2-Minima efficienza di un motore trifase ad induzione al variare della potenza [32]

Power [kW]	Minimum efficiency [%]
1.1	83.8
2.2	86.4
4	88.3
7.5	90.1
15	91.8
30	93.2
55	96.2
90	95

Il secondo fattore da tenere in considerazione quando si parla di efficienza è la velocità del motore. I motori che raggiungono le velocità elevate sono più efficienti di quelli che raggiungono le velocità più basse. La ragione di ciò è che le perdite più importanti in un motore sono proporzionali alla coppia, invece che alla potenza. Come abbiamo visto, un motore a velocità inferiore avrà una coppia maggiore a parità di potenza e, quindi, perdite maggiori. Un terzo fattore importante è il sistema di raffreddamento. I motori raffreddati a liquido raggiungono temperature più basse, il che riduce la

resistenza degli avvolgimenti e quindi migliora l'efficienza, sebbene ciò influisca solo per l'1% circa sull'efficienza totale. Questo è un parametro importante poiché è direttamente collegato alla massa del motore; ragione di ciò è che il motore deve essere abbastanza grande da smaltire le perdite di calore. Se il motore è raffreddato a liquido, le stesse perdite di calore possono essere rimosse da un motore più piccolo. Quindi, un motore più efficiente potrebbe essere più piccolo, poiché sarebbe necessario un minore smaltimento del calore.

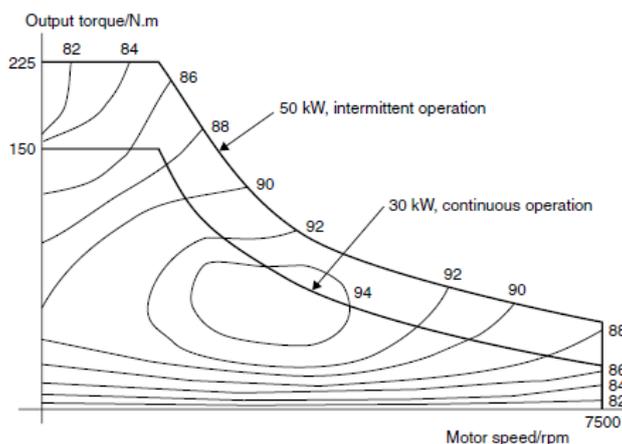


Figura 4.36-La mappa di efficienza per un motore BLDC da 30kW [32]

Un'altra considerazione importante è che l'efficienza di un motore elettrico potrebbe essere molto diversa da qualsiasi valore fornito nelle specifiche, se funziona ben lontano da valori di velocità e coppia ottimali. In alcuni casi può essere fornita una mappa dell'efficienza, come quella in Figura 4.36, che si basa su un vero motore BLDC.

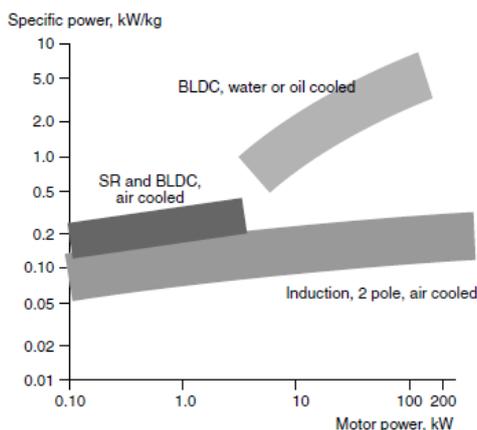


Figura 4.37-Grafico in scala logaritmica indicante la potenza specifica di differenti tipi di motore elettrico a diverse potenze (in continuo). Le potenze specifiche di picco saranno superiori di circa il 50% [32]

L'efficienza massima è del 94%, ma questa efficienza si ottiene solo per una gamma abbastanza ristretta di condizioni. Da qui ne viene che il motore può funzionare ad un'efficienza ben al di sotto del 90% (Figura 4.38). Concludendo, possiamo affermare, con le opportune approssimazioni, che il rendimento di un motore elettrico (anche per motori non ad induzione) sia molto vicino ai valori

presenti nella tabella 4.2. Probabilmente l'efficienza dei motori BLDC e SR è superiore dell'1-2% rispetto all'efficienza di un motore a induzione, poiché c'è meno perdita nel rotore. Inoltre, i motori SR mantengono un'efficienza maggiore su un range più ampio di valori coppia-velocità. Tutti i fattori precedentemente discussi, determinando una maggiore efficienza producono una maggiore potenza specifica (Figura 4.37).

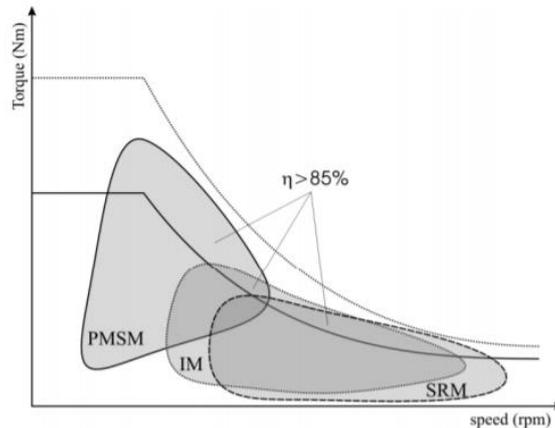


Figura 4.38-Grafico rappresentante il rendimento di differenti tipologie di motori elettrici [34]

4.5.7 Confronto tra i diversi motori elettrici

Invece di andare ad effettuare un ulteriore confronto tra le diverse tecnologie, per comprendere quale tipologia di motore sia più utilizzato come sistema di trazione dei veicoli elettrici, analizziamo la tabella 4.3, dove sono riportati alcuni modelli di veicolo.

Tabella 4.3-Differenti tipi di motore utilizzati nell'industria automobilistica

Tipi di motore	Modelli veicolo
DC	Fiat Panda Elettra, Citroen Berlingo Electricque
SR	Chloride Lucas
Induzione	GM EV1, BMW Mini E, Tesla Roadster, Audi E-Tron
Motore sincro a magneti permanenti	Nissan leaf, Mitsubishi i-MiEV, Ford Focus electric, Citroen C-Zero, Tesla model 3, S, X, Y, Porsche Taycan Turbo, Fiat 500 e, BMW i3, BMW i8, Peugeot 208, Ford Mustang mach-e, Volkswagen ID.4
PM BLDC	Smart Fortwo ED

L'applicazione dei motori CC come motori di trazione è ormai obsoleta o limitata a quelle versioni che aspirano alla semplicità. Invece, i veicoli equipaggiati con motori SR sono molto rari.

Attualmente, per i veicoli BEV, le applicazioni più utilizzate sono i motori ad induzione e i motori sincroni a magneti permanenti. La potenza di uscita di picco dei motori attualmente utilizzati varia da 13 kW a 225 kW, a seconda del peso e delle prestazioni del veicolo, mentre la media si aggira intorno a 47-80 kW.

4.6 Le trasmissioni nei veicoli elettrici

La trasmissione è una componente fondamentale nei veicoli. La sua funzione principale è quella di trasmettere la potenza dal motore alle ruote, permettendo di convertire la coppia e la velocità del motore in movimento del veicolo. Nel capitolo 3 si è discusso abbondantemente dei diversi tipi di cambio e dei componenti principali che compongono quest'ultimo. Per le sue caratteristiche e la sua importanza, il sistema drivetrain è intrinsecamente correlato al consumo di "carburante", o meglio di energia, all'affidabilità e alla facilità d'uso del veicolo. A differenza di quanto avviene nei veicoli ICE nei quali, al fine di erogare efficientemente coppia e velocità del motore, è necessaria una trasmissione con un numero di rapporti elevato, nei veicoli elettrici vengono montate trasmissioni con al massimo due differenti velocità, una per i bassi ed i medi regimi ed una per gli alti. Così facendo si cerca di ridurre le perdite di energia che si hanno attraverso il cambio.

4.6.1 Trasmissione a rapporto fisso e singola velocità

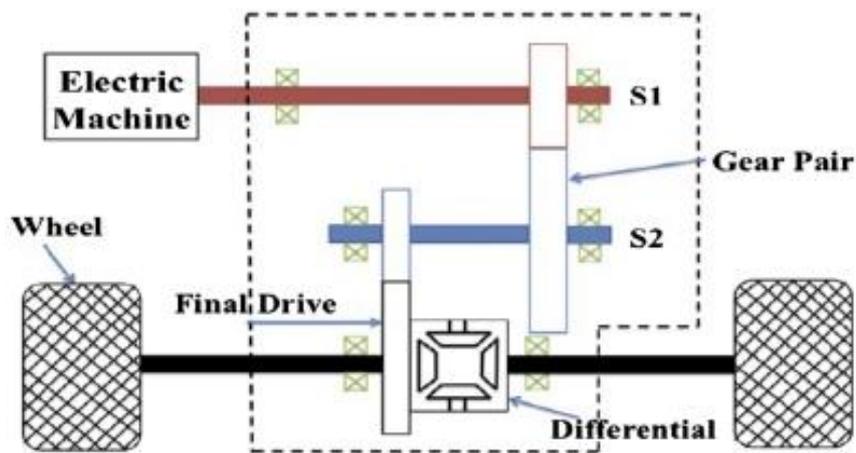


Figura 4.39-Single speed trasmission [34]

Questo tipo di trasmissione mostrato in figura 4.39, rappresenta il sistema più utilizzato nei veicoli BEV grazie alla notevole efficacia del motore elettrico rispetto ai motori a combustione, ossia l'elevata coppia di stallo (coppia che il motore produce a velocità di rotazione nulla e a potenza di uscita uguale a zero), e alla capacità di fornire potenza costante in un ampio range di velocità.

Ovviamente, avendo un unico rapporto di riduzione, si devono raggiungere dei compromessi affinché si possa usare il veicolo elettrico in tutti i tipi di percorso (cittadino, extracittadino ed autostradale).

4.6.2 Trasmissione a rapporto fisso e doppia velocità

Questa tipologia di cambio viene usato nei veicoli più performanti, sui quali non si vuole scendere a compromessi tra elevate prestazioni e possibilità di utilizzo quotidiano. Sebbene l'introduzione del doppio rapporto di trasmissione genera un normale ed ovvio aumento dei costi e del peso del drivetrain, la trasmissione a due velocità fornisce una coppia alla ruota più elevata a bassi regimi, quindi la coppia di stallo del motore elettrico può essere inferiore con la conseguente possibilità di installare motori più piccoli a parità di prestazioni. Quanto detto determina una maggiore efficienza globale del veicolo che genera, come vantaggio principale, una maggiore autonomia in termini di chilometri percorsi. Ovviamente, avendo una marcia "specificata" per le basse velocità, si ottengono delle accelerazioni maggiori e, grazie alla presenza della seconda marcia, si riescono a superare pendenze maggiori e a raggiungere velocità massime superiori.

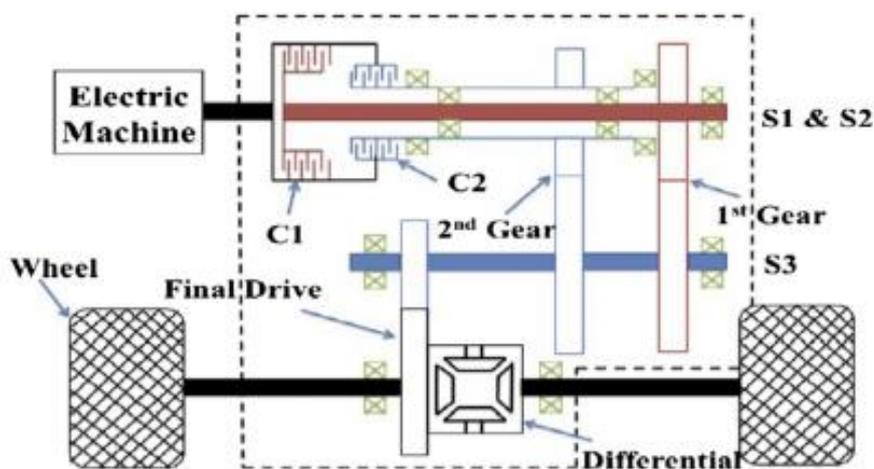


Figura 4.40-Two speed dual clutch trasmission [34]

Come si vede in Figura 4.40, in alcuni casi, per evitare l'annoso problema del buco di coppia che si verifica durante il cambio marcia, viene utilizzato un sistema a doppia frizione (collegate ognuna ad un riduttore). Analizzando la Figura 4.41 si possono vedere i componenti della trasmissione a doppia velocità:

- 2 riduttori epicicloidali integrati ①;
- 1 riduttore finale monostadio ②;
- 1 frizione a secco controllata ③;

- 1 frizione selezionabile ④;
- 1 differenziale ⑤.

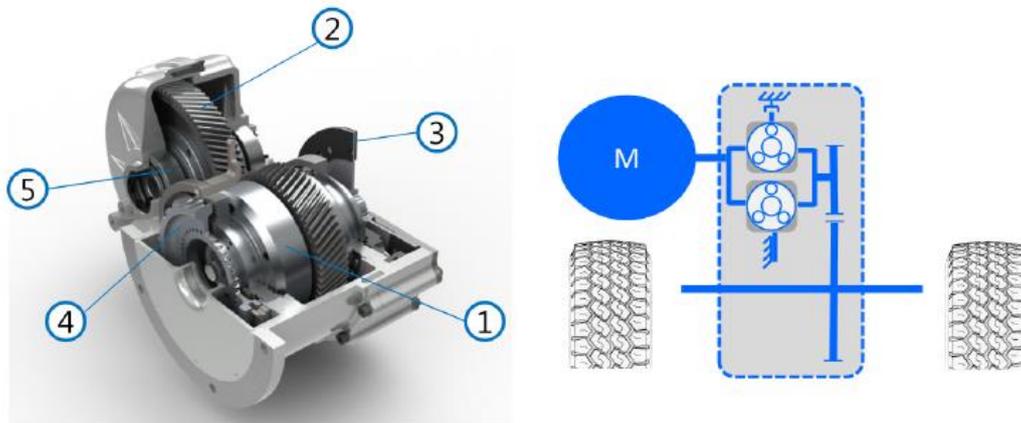


Figura 4.41-Twinspeed transmission with two planetary gear sets [34]

4.7 Esempio di veicolo elettrico- Audi E-tron 55

Per completare lo studio dei veicoli elettrici andiamo ad analizzare uno dei primi veicoli BEV in produzione dal 2019, l'Audi E-tron, esso rappresenta il primo modello full electric del famoso brand tedesco con piattaforma dedicata. Nella figura 4.42 si vede l'architettura del veicolo, la quale è costituita da 2 motori elettrici, uno nella parte posteriore (AKA 320) e uno nella parte anteriore (APA 250). Mentre, tutto l'underbody del veicolo è costituito dal pacco batteria. Entrambi i motori, i quali possono raggiungere durante il funzionamento del veicolo i 15000 rpm, utilizzano una trasmissione separata per trasferire la coppia su strada. Il motore APA250 ha una configurazione parallela con la trasmissione, mentre il motore AKA320 ha un design coassiale con la trasmissione.

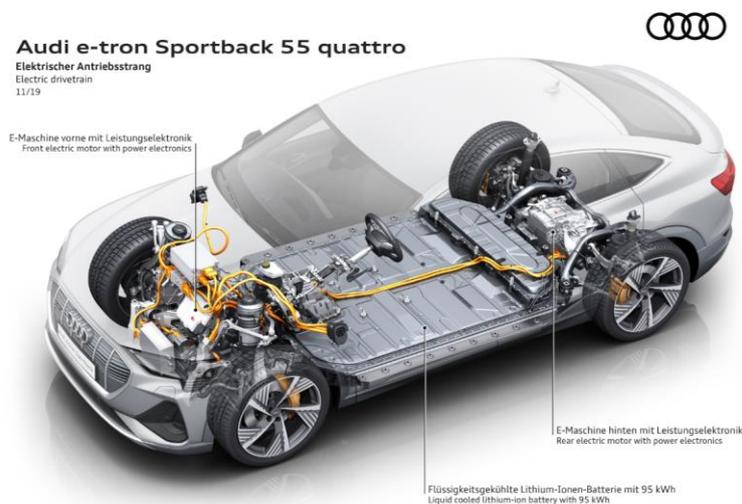


Figura 4.42-Architettura Audi E-tron 55 [42]

Ovviamente, questo veicolo si può considerare come un top di gamma delle vetture full electric, avendo delle soluzioni innovative in campo aerodinamico, come le sospensioni pneumatiche adattive che permettono di abbassare la vettura al suolo e ridurre la resistenza aerodinamica o gli specchietti virtuali che migliora notevolmente la resistenza all'avanzamento. Per evitare di sviare il discorso dall'argomento principale della tesi, si riporta una scheda tecnica completa del veicolo ed un'immagine esplosa del pacco batteria (fig.4.43).

Tabella 4.4-Scheda tecnica Audi E-tron 55 [42]

	Audi E-tron 55 quattro
Alimentazione	Full electric
N° motori	2
Tipo motori	Motore asincrono ad induzione
Potenza massima motore anteriore [CV]	170 (183,5)
Coppia massima motore anteriore [Nm]	247 (309)
Layout motore anteriore	Parallelo
Potenza massima motore posteriore [CV]	190
Coppia massima motore posteriore [Nm]	313
Layout motore posteriore	Coassiale
Potenza massima erogabile [CV]	360 (408)
Coppia massima erogabile [Nm]	561 (664)
Capacità batteria [KWh]	95
Tipi di batteria	Ioni di litio
Tensione di esercizio [V]	396
N° moduli della batteria	36
N° celle per moduli	12
Posizione batteria	Sotto pavimento
Peso batteria [Kg]	700
Trazione	Integrale 4 elettrica (AWD)
N° rapporti del cambio	Monomarcia (anteriore e posteriore)
Rapporto di trasmissione anteriore	9.203/1
Rapporto di trasmissione posteriore	9.084/1
Lunghezza/Larghezza/Altezza [cm]	490/194/162
Passo cm	293
Peso in ordine di marcia [Kg]	2490
Rapporto peso/potenza [Kg/Cv]	6.1
Coefficiente di resistenza aerodinamico [Cx]	0.25
Velocità massima [Km/h]	200
Accelerazione 0-100 [Km/h]	6.6
Consumo WLTP [KWh/100Km]	26.1-22.2
Consumo NEDC [KWh/100Km]	24.3-22.0

Autonomia [Km]	436
Costo in €	85950



Audi e-tron Sportback 55 quattro

Flüssigkeitsgekühlte Lithium-Ionen-Batterie
Liquid cooled lithium-ion battery
11/19

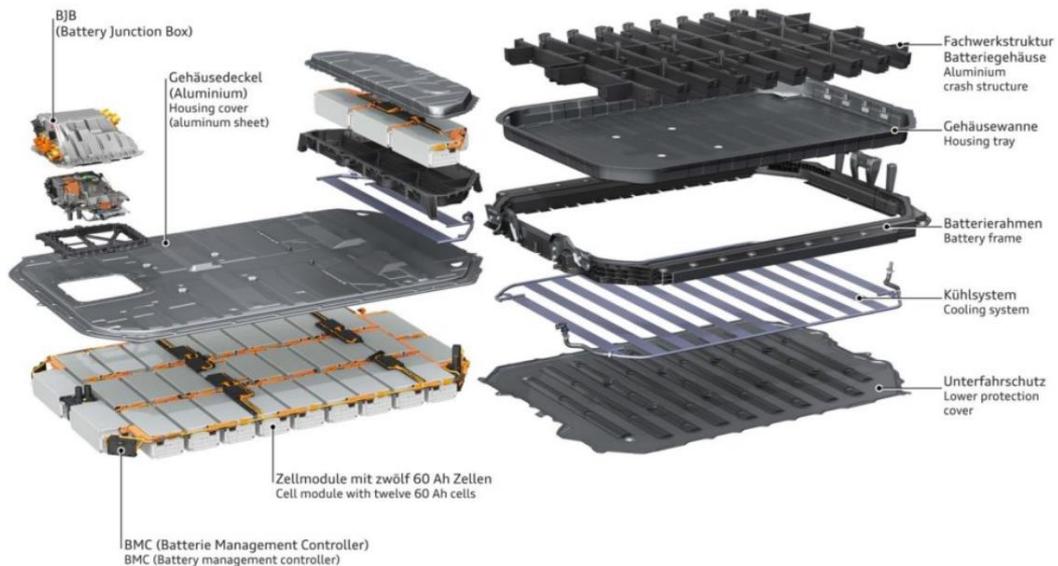


Figura 4.43-Esploso pacco batterie [42]

Dopo aver indicato i dati salienti del veicolo, ed aver fornito alcune informazioni sulle tecnologie presenti, entriamo nel dettaglio con l'analisi dei componenti principali che compongono il powertrain anteriore e posteriore.

4.7.1 Powertrain anteriore (APA 250)

front electric motor
axial parallel, approx. 250Nm (APA250)

Power: 125 kW [+10 kW boost mode]

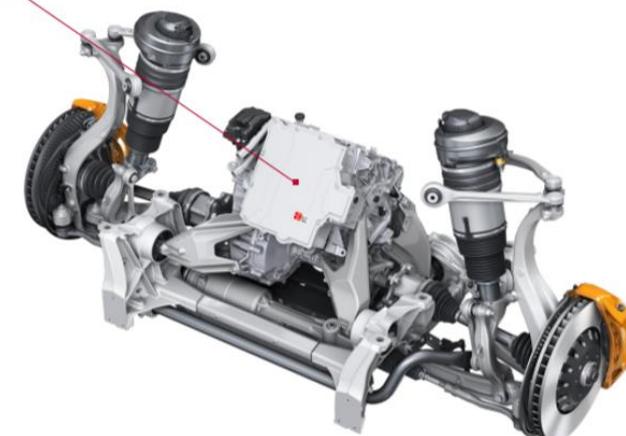


Figura 4.44-Posizione del motopropulsore elettrico sull'assale anteriore [42]

Il powertrain secondario è installato all'interno della culla delle sospensioni anteriori del veicolo, parallela all'assale anteriore. Esso è composto dal motore elettrico e da un cambio monomarcia con riduttore epicicloidale a due stadi con differenziale. Nella figura 4.45 è rappresentato un esploso del powertrain anteriore.



Audi e-tron Sportback 55 quattro

E-Motor vorne mit Leistungselektronik
Front electric motor with power electronics
11/19

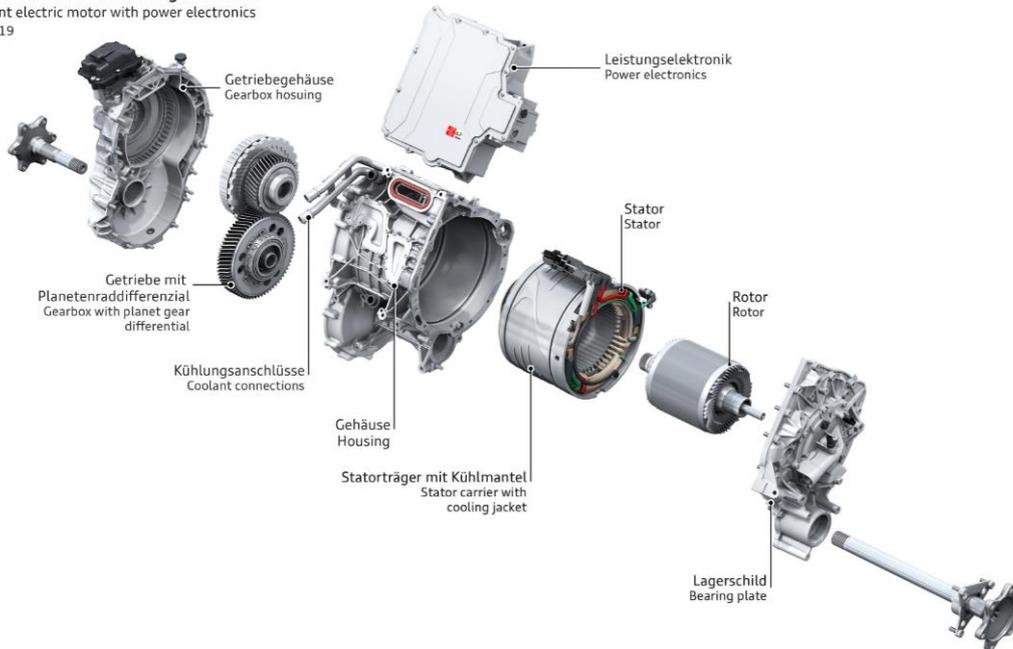


Figura 4.45-Esploso powertrain anteriore [42]

Nella figura 4.46 si vedono i 3 componenti principali del powertrain:

- Il motore elettrico (rosso);
- Il cambio con il differenziale (blu);
- L'elettronica di potenza (verde, non trattato).

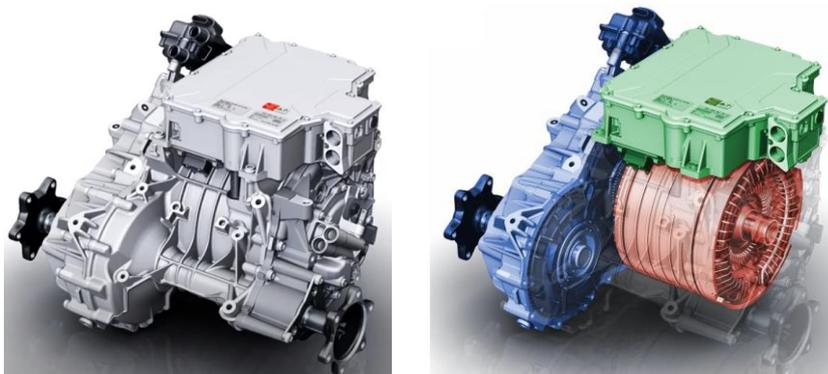


Figura 4.46-Powertrain anteriore Audi E-tron 55 [42]

$$P_{axle} = 125 \text{ KW (170 Cv)}$$

$$P_{axle_{boost}} = 135 \text{ KW (183,5 Cv)}$$

$$C_{axle} = 2200 \text{ Nm}$$

$$C_M = 247 \text{ Nm}$$

$$C_{axle_{boost}} = 2750 \text{ Nm}$$

$$C_{M_{boost}} = 309 \text{ Nm}$$

Andiamo ora ad analizzare i due componenti principali separatamente. Il motore elettrico è un motore ad induzione ad induzione a gabbia con 4 poli. Nella figura 4.47 sono indicate le due caratteristiche, di coppia e potenza, del motore elettrico. Una in condizioni di boost che può essere mantenuta per 10s ed una in condizioni di picco mantenuta per 60s. Come si vede da grafico, il range in cui si riesce ad ottenere la potenza massima, 183,5 Cv, è tra i 4000-8000 rpm nel caso della potenza di boost. Mentre la potenza di picco di 170 Cv si raggiunge attorno ai 5000 giri al minuto e viene mantenuta fino a circa 8500 rpm.

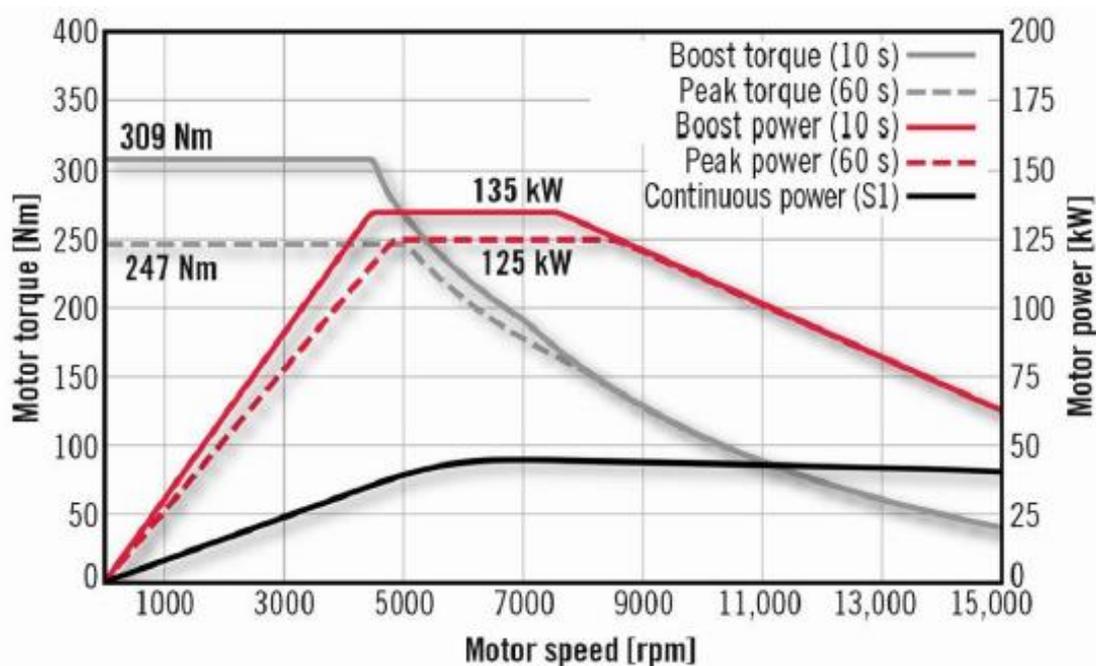


Figura 4.47-Caratteristiche di coppia e potenza motore anteriore Audi E-tron 55 [42]

Per quel che riguarda la coppia, invece, si ha una coppia massima in condizioni di boost di 309 Nm da 0 fino a 4000 giri al minuto. E la coppia di picco di 247 Nm si mantiene da 0 fino a circa 5000 rpm. Nella figura 4.48, 4.49 sono rappresentati rispettivamente lo rotore e lo statore del motore elettrico.

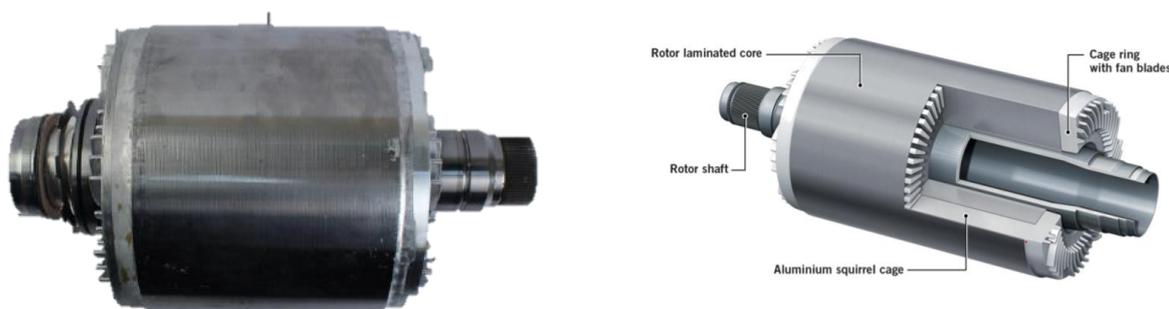


Figura 4.48-Rotore del motore anteriore (APA250) Audi E-tron

Le barre del rotore sono 58 e sono costituite da una lega di alluminio, lo spessore di laminazione è di 0.33mm ed il numero totale di lamine è di 371. Le dimensioni del rotore sono 122.5 mm x 155.9mm (LxD) per un peso complessivo di circa 15.3 Kg, mentre l'air gap tra rotore e statore è di 0.6mm. La massima temperatura di esercizio del rotore è 180°C. Lo statore, invece, è costituito da 48 slot e 364 lamine con uno spessore di laminazione di 0.35mm. Le dimensioni interne dello statore sono 120.1 mm x 156.8 mm (LxD) per un peso complessivo di circa 41.3 Kg.

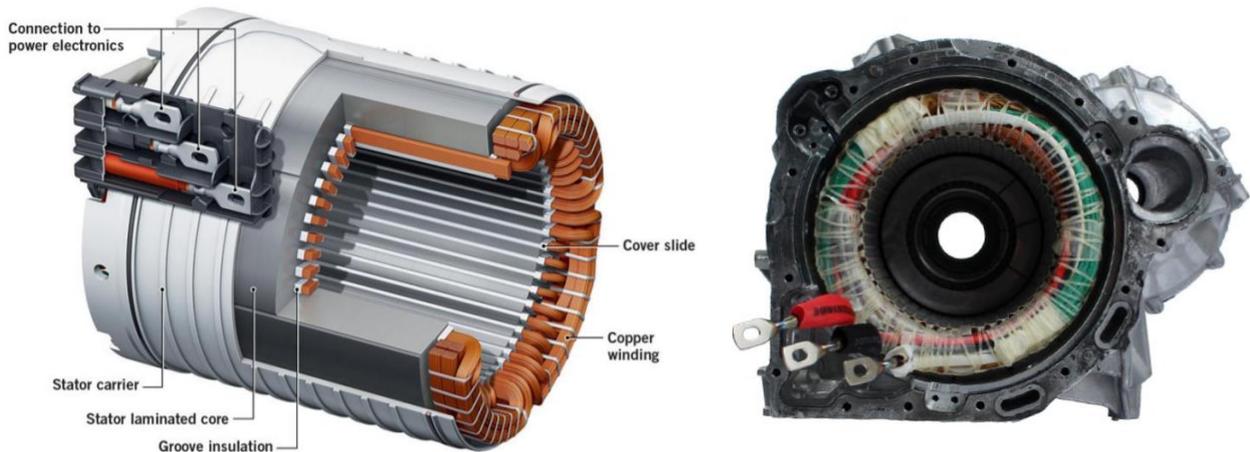


Figura 4.49-Statore del motore anteriore (APA 250) Audi E-tron [42]

Andiamo ora ad analizzare la trasmissione, la quale è visibile nella figura 4.50, nella quale sono rappresentati chiaramente i due stadi di riduzione.

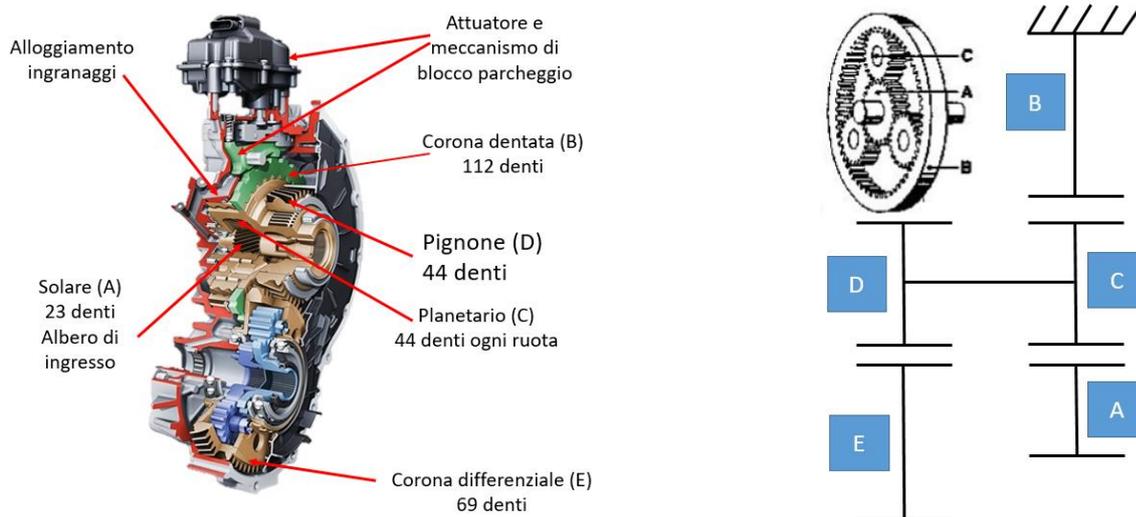


Figura 4.50-Sezione e schema esemplificativo Trasmissione anteriore (Schaeffler) [42]

Il primo stadio della trasmissione è costituito da 3 ruote planetarie (C) e da una corona dentata libera radialmente (B), le quali convertono la coppia provenienti dal solare (A) vincolato rigidamente

all'albero del motore elettrico tramite delle scanalature. Il solare (A) è supportato da un lato dal cuscinetto fisso dell'albero del rotore, e sul lato opposto è guidato assialmente da un cuscinetto a quattro punti. Il primo stadio di riduzione è pari a:

$$i_1 = 1 + \frac{Z_B}{Z_A} = 1 + \frac{112}{23} = 1 + 4.869 = 5.869 \quad (4.36)$$

Nel secondo stadio di riduzione, una ruota cilindrica (D) premuta sul supporto planetario del primo stadio dell'ingranaggio si collega con le scanalature esterne del supporto differenziale (E), ottenendo così il rapporto di riduzione seguente:

$$i_2 = \frac{Z_E}{Z_D} = \frac{69}{44} = 1.568 \quad (4.37)$$

Moltiplicando tra di loro la (4.36) e la (4.37) si ottiene il rapporto di riduzione totale della trasmissione anteriore pari a:

$$i_{tot} = i_1 \cdot i_2 = 5.869 \cdot 1.568 = 9.203 \quad (4.38)$$

Un nuovo differenziale epicicloidale leggero, installato in uno spazio molto ristretto, distribuisce la coppia dell'asse tramite due alberi flangiati plug-in alle due ruote. Il calore viene scaricato dagli ingranaggi per convezione e tramite le piastre dei cuscinetti raffreddate ad acqua del motore. Così facendo non si necessita di un sistema di raffreddamento separato.

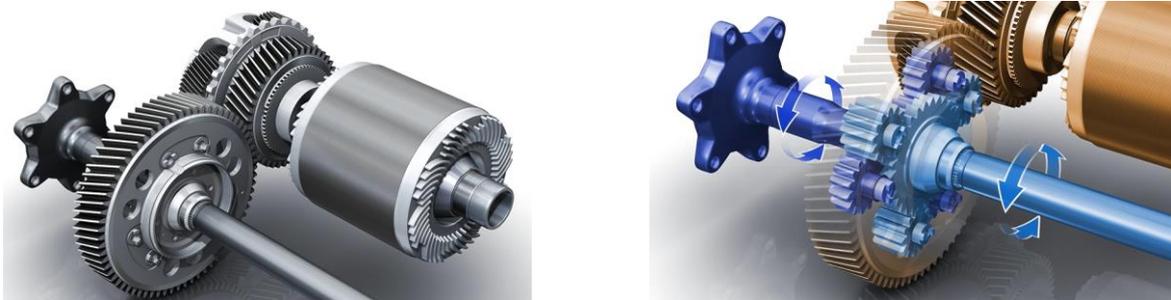


Figura 4.51-Schema e funzionamento PWT anteriore Audi E-tron 55 [42]

4.7.1 Powertrain posteriore (AKA 320)

rear electric motor
coaxial, approx. 320 Nm (AKA320)
Power: 140 kW [+25 kW boost mode]



Figura 4.52-Posizione del motopropulsore elettrico sull'assale posteriore [42]

Il powertrain primario è installato all'interno della culla delle sospensioni posteriori del veicolo, coassialmente all'assale posteriore. Esso è composto dal motore elettrico e da un cambio monomarcia con riduttore epicicloidale a due stadi con differenziale. Nella figura 4.53 è rappresentato un esploso del powertrain posteriore.

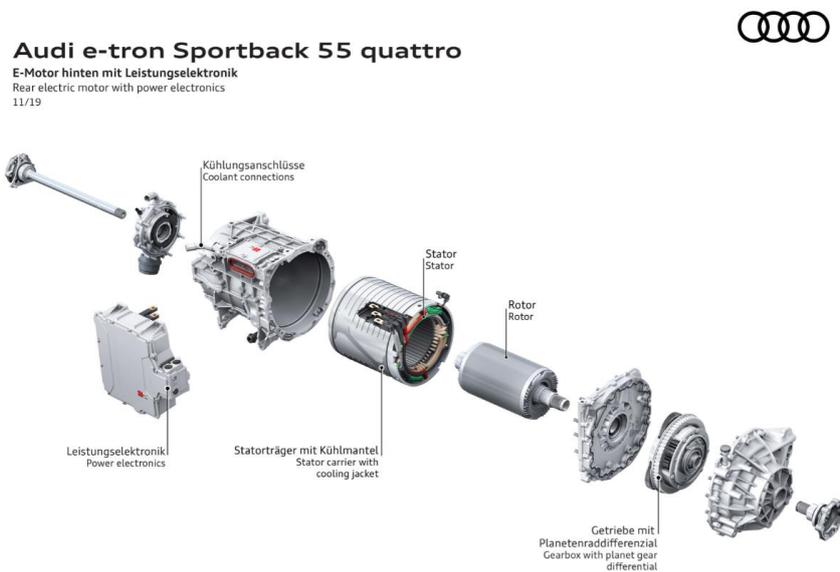


Figura 4.53-Esploso powertrain posteriore [42]

Nella figura 4.54 si vedono i 3 componenti principali del powertrain:

- Il motore elettrico (arancione);
- Il cambio con il differenziale (viola);
- L'elettronica di potenza (verde, non trattato).



$$P_{axle} = 140 \text{ KW (190 Cv)}$$

$$P_{axle_{boost}} = 165 \text{ KW (224.4 Cv)}$$

$$C_{axle} = 2800 \text{ Nm}$$

$$C_M = 314 \text{ Nm}$$

$$C_{axle_{boost}} = 3120 \text{ Nm}$$

$$C_{M_{boost}} = 355 \text{ Nm}$$

Figura 4.54-Esploso powertrain posteriore [42]

Andiamo ora ad analizzare i due componenti principali separatamente. Il motore elettrico è un motore ad induzione a gabbia con 4 poli. Nella figura 4.55 sono indicate le due caratteristiche, di coppia e potenza, del motore elettrico. Una in condizioni di boost che può essere mantenuta per 10s ed una in condizioni di picco mantenuta per 60s. Come si vede da grafico, il range in cui si riesce ad ottenere la potenza massima di 224,4 Cv, è tra i 4000-8000 rpm nel caso della potenza di boost.

Mentre la potenza di picco di 190 Cv si raggiunge attorno ai 3500 giri al minuto e viene mantenuta fino a circa i 10000 rpm.

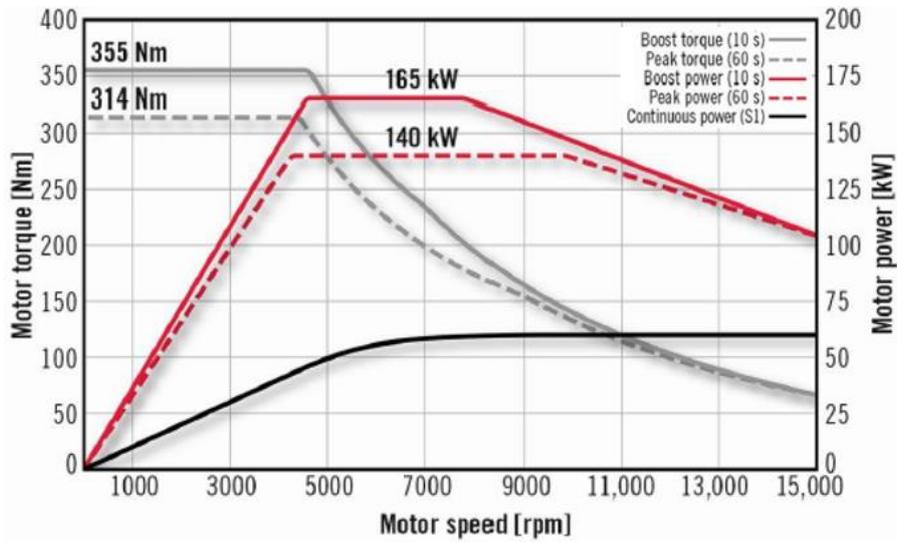


Figura 4.55-Caratteristiche di coppia e potenza motore posteriore Audi E-tron 55 [42]

Per quel che riguarda la coppia, invece, si ha una coppia massima in condizioni di boost di 355 Nm da 0 fino a 4750 giri al minuto. E la coppia di picco di 314 Nm si mantiene da 0 fino a 4500 rpm. Nella figura 4.56, 4.57 sono rappresentati rispettivamente il rotore e lo statore del motore elettrico.



Figura 4.56-Rotore del motore posteriore (AKA 320) Audi E-tron 55 [42]

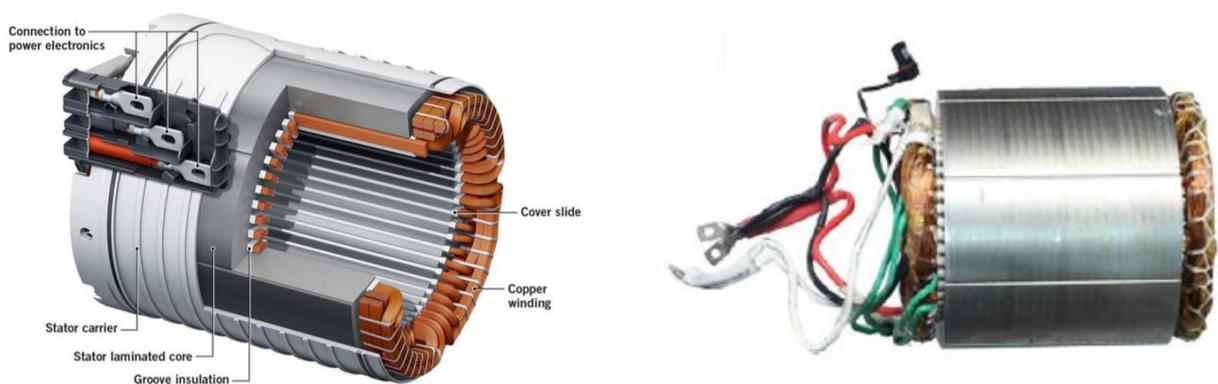


Figura 4.57-Statore del motore posteriore (AKA 320) Audi E-tron 55 [42]

Le barre del rotore sono 58 e sono costituite da una lega di alluminio, lo spessore di laminazione è di 0.33mm ed il numero totale di lamine è di 640. Le dimensioni del rotore sono 211.1 mm x 155.9mm (LxD) per un peso complessivo di circa 23.162 Kg, mentre l'air gap tra rotore e statore è di 0.6mm. La massima temperatura di esercizio del rotore è 180°C. Lo statore è costituito da 48 slot e 635 lamine con uno spessore di laminazione di 0.33mm. Le dimensioni interne dello statore sono 209.7 mm x 156.8 mm (LxD) per un peso complessivo di circa 44 Kg. Andiamo ora ad analizzare la trasmissione, la quale è visibile nella figura 4.58, nella quale sono rappresentati chiaramente i due stadi di riduzione.

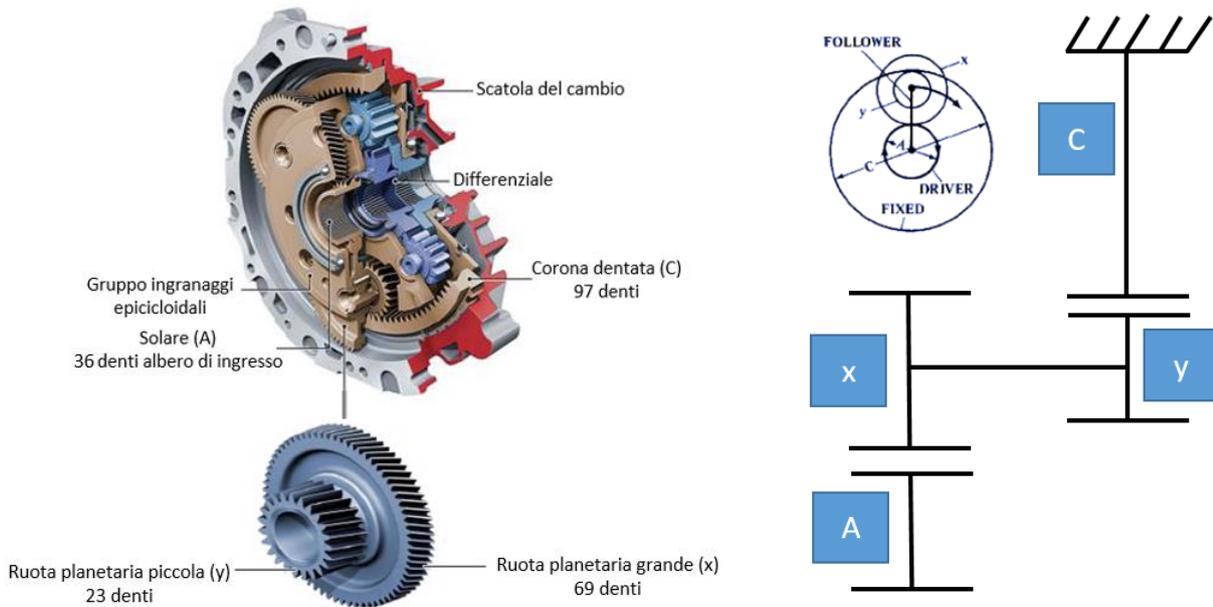


Figura 4.58-Sezione e schema esemplificativo Trasmissione posteriore (Schaeffler) [42]

Il primo stadio della trasmissione è costituito dal solare (A) vincolato rigidamente all'albero del motore elettrico tramite delle scanalature, esso si collega con la ruota planetaria grande (x) facente parte gruppo di ingranaggi epicicloidali i quali a loro volta, come si vede dalle immagini, sono costituiti da due ruote planetarie a gradini. Così facendo il primo stadio del rapporto di riduzione è pari a:

$$i_1 = \frac{Z_x}{Z_A} = \frac{69}{36} = 1.917 \quad (4.39)$$

La ruota planetaria piccola (y) coassiale con x, riceve la coppia da quest'ultima e grazie ad una corona dentata (C) montata su un cuscinetto flottante nell'alloggiamento fornisce il secondo stadio di riduzione, ossia:

$$i_2 = \frac{Z_C}{Z_y} = \frac{97}{23} = 4.217 \quad (4.40)$$

Combinando tra di loro la (4.39) e la (4.40) si ottiene il rapporto di riduzione totale della trasmissione posteriore pari a:

$$i_{tot} = 1 + (i_1 \cdot i_2) = 1 + (1.917 \cdot 4.217) = 9.084 \quad (4.41)$$

La coppia viene trasmessa direttamente al differenziale a ingranaggi epicicloidali tramite il portasatelliti. Il sapiente annidamento dei differenziali negli interstizi dei doppi ingranaggi planetari ha permesso di massimizzare le dimensioni complessive del riduttore. L'uscita alla ruota, come si vede dalla figura 4.59, è ancora effettuata da due alberi flangiati ad innesto. Il calore viene dissipato per convezione del flusso d'aria del veicolo e tramite una piastra portante raffreddata ad acqua sul motore elettrico. La trasmissione seppur è un'unità completa, non dispone di un alloggiamento autonomo. Solo quando è collegato all'alloggiamento del motore elettrico forma un'unità chiusa con un proprio sistema di lubrificazione.



Figura 4.59-Schema e funzionamento PWT posteriore Audi E-tron 55 [42]

Capitolo 5

Installazione, analisi e costo dei sistemi ibridi

5.1. Introduzione

Questo capitolo si concentrerà sulla trattazione dell'installazione dei vari sistemi ibridi su architetture di vetture pre-esistenti. Verranno riportati anche esempi concreti di vetture che hanno subito questo tipo di “trasformazione”, sempre focalizzando l'attenzione sul powertrain. Nell'ultima parte, invece, si effettuerà una breve analisi sui costi e sui vantaggi dell'introduzione dei sistemi ibridi su vetture non pensate per essi.

5.2. Descrizione dell'architettura MICRO-HYBRID

Considerando lo stato dell'arte, l'applicazione principale per il micro-hybrid è un P1F con un BiSG 12V il quale consente di migliorare sia la funzione S&S che il boost di coppia e la frenata rigenerativa. Prima di entrare nel dettaglio sulla funzionalità dei veicoli micro-ibridi, conviene spiegare il funzionamento dell'energia elettrica sui veicoli convenzionali. L'energia elettrica viene generata da un alternatore azionato da una cinghia sul FEAD. L'energia per l'azionamento viene fornita dalla rete elettrica di bordo DC 12 V tramite un ponte a diodi che converte corrente alternata (CA) in corrente continua (CC). Il ponte a diodi funziona in un'unica direzione e ciò implica che l'alternatore non può funzionare come motore e che è necessario l'utilizzo di un motorino per l'avviamento del motore. Con l'evoluzione delle tecnologie introdotte sui veicoli e a causa dell'aumento di potenza, gli OEM hanno dovuto apportare alcune modifiche alla rete elettrica di bordo. Una soluzione adottata per migliorare la CAN di bordo è stata quella di andare a rinforzare il motorino di avviamento e contemporaneamente andare ad introdurre una batteria specifica a sostituzione della batteria convenzionale da 12 V per far fronte al maggior numero di cicli di carica/scarica. Perciò, questo sistema è in grado di resistere a un numero elevato di avviamenti del motore (fino a 600.000) garantendo silenziosità e basse vibrazioni. La sua integrazione, inoltre, non richiede l'adattamento dei componenti del powertrain e il suo costo di industrializzazione è limitato. Tuttavia, mantenere il motorino di avviamento montato sul volano rende difficile il riavvio del motore quando questo sta ancora girando. Quindi, il motore può essere spento solo a veicolo fermo e, conseguentemente, è in grado di eseguire solo lo Start & Stop a motore fermo. Dopo questa breve introduzione sull'architettura elettrica di un veicolo tradizionale, nei paragrafi successivi ci addenteremo nei sistemi più semplici e più utilizzati di ibridazione.

5.2.1 Sistema P1F 12 V

Il layout P1F con un generatore di avviamento a cinghia 12V può essere considerato un secondo sviluppo del concetto di Start & Stop poiché il motore può essere spento anche quando il veicolo è ancora in movimento a bassa velocità. Tuttavia, è normale installare anche un dispositivo di avviamento convenzionale per permettere l'avviamento a freddo del motore. Ciò è necessario per la sua configurazione (macchina elettrica e motore ICE sono collegati meccanicamente tramite una cinghia) la quale richiede un'elevata coppia della macchina elettrica durante l'avvio che è limitata (per ovvie ragioni fisiche) dallo scorrimento della cinghia. Questa tipologia di sistema è in grado di eseguire funzioni di boost di coppia e frenata rigenerativa anche se con prestazioni modeste, a causa della potenza limitata. L'alternatore è sostituito da una macchina reversibile che funge sia da motorino di avviamento (condizione di veicolo caldo) che da alternatore, in quanto la sua elettronica di potenza adotta un dispositivo bidirezionale che consente di operare in entrambe le direzioni, ed è collegato al motore tramite un sistema di pulegge, analogamente a un alternatore convenzionale. Per rendere possibile la trasmissione della coppia in entrambe le direzioni, è necessario un sistema di tensionamento. Oltre alla batteria al piombo, è necessaria una batteria agli ioni di litio che ha una doppia funzione:

1. Assorbire i picchi di corrente e immagazzinare energia durante la frenata rigenerativa;
2. Fornire l'energia al motore elettrico, durante l'E-assist.

5.2.2 Impatto dell'installazione del sistema P1F 12 V su una vettura esistente

Di seguito andremo a spiegare cosa comporta l'introduzione del sistema P1F in un veicolo convenzionale. Ovviamente non sarà un'analisi completa, in quanto non si terrà conto di tutto il lavoro di progettazione necessario per far coesistere i sistemi carry-over del veicolo tradizionale con i nuovi sistemi (elettrico, motore, trasmissione, ecc).

Rispetto al sistema convenzionale, i nuovi veicoli subiscono le seguenti modifiche:

- Installazione di una macchina elettrica a cinghia su FEAD (Front End Accessory Drive);
- Posizionamento di una batteria agli ioni di litio;
- Modifica della rete elettrica di bordo;
- Downsizing del motore;
- Modifica della trasmissione (opzionale).

Come si può ben capire, l'integrazione di questi componenti su un sistema pre-esistente comporta una serie di operazioni:

1. L'alternatore convenzionale viene rimosso e sostituito dal generatore di avviamento a cinghia. Affinché si possa consentire il trasferimento di potenza meccanica tra i motori a combustione

e la macchina elettrica in entrambe le direzioni, il meccanismo di trasmissione sul FEAD deve essere modificato (pulegge, tenditori, ecc);

2. È necessario trovare la posizione ottimale della batteria agli ioni di litio, la quale deve rispettare sia i vincoli di Safety che quelli funzionali:
 - Non deve essere troppo lontano dalla macchina elettrica per evitare perdite rilevanti dovute all'effetto Joule ed alla caduta di tensione;
 - Deve soddisfare i requisiti di sicurezza durante i crash test;
 - Non può essere posizionato nel vano motore a causa dell'elevato rischio d'incendio, a temperature superiori ai 70 ° C e in caso di danni dovuti agli incidenti;
 - La posizione non deve influire sull'abitabilità del veicolo (questo dipende dal segmento di appartenenza del veicolo).
3. Sono stati installati nuovi cavi per collegare la macchina elettrica alla batteria agli ioni di litio;
4. La rete elettrica viene modificata perché il generatore di avviamento è collegato alla batteria al litio ma anche alla batteria al piombo;
5. Potrebbe essere necessario andare ad apportare alcune migliorie lato NVH per ridurre i rumori e/o le vibrazioni introdotte dalla nuova architettura;
6. Viene ridotta la cilindrata del motore e la riduzione di potenza che ne sussegue viene compensata dalla potenza fornita dall'e-motor;
7. In alcuni casi viene introdotto un nuovo sistema di trasmissione per permettere la miglior interazione possibile tra i due sistemi, con un conseguente abbattimento dei consumi e una migliore efficienza complessiva del veicolo.

Un parametro da tenere in considerazione, in quanto direttamente collegato al consumo di combustibile e quindi all'emissione di CO₂, è l'aumento di peso dovuto all'introduzione dei nuovi componenti. Per una semplicità espositiva viene riportata una tabella contenente una stima del delta peso dei componenti:

Tabella 5.1-Delta peso installazione di un sistema P1F 12V su un veicolo tradizionale

Componenti	Delta peso [kg]
Generatore di avviamento a cinghia	7÷10
Alternatore	-5÷-3
Batteria agli ioni di litio	5÷10
Staffette per il montaggio	0,5÷1
Cavi elettrici	1÷2
Starter alleggerito	-1÷-0,5
Totale	7,5÷19,5

5.2.3 Modifiche in dettaglio

Nell'immagine seguente è rappresentato l'azionamento degli accessori in un motore ICE:



Figura 5.1-Componenti FEAD [6]

Si può notare che tutti gli accessori sono azionati da una cinghia a V, la quale deve garantire una forza costante durante la sua durata e, per quanto possibile, evitare di raggiungere le condizioni limite di aderenza. Per raggiungere questo obiettivo, di solito si usano dei tenditori che permettono di mantenere sempre in tensione la cinghia. Sui veicoli convenzionali, la trasmissione a cinghia è caratterizzata da accessori che funzionano come carico, quindi la potenza viene sempre trasferita dall'albero di trasmissione all'accessorio. Sulle applicazioni BiSG, invece, la potenza viene trasferita anche dalla macchina elettrica al motore. Pertanto, al fine di consentire il trasferimento della coppia in entrambe le direzioni, spesso vengono utilizzati due tendi-cinghia meccanici. Nella Figura 5.2 si possono analizzare le due differenti modalità di utilizzo:

- L'alternatore che aziona il motore, ciò si verifica quando si accende il motore ICE o quando si richiede il boost di coppia;
- Il motore guida l'alternatore, ciò si verifica durante l'operazione di recupero dell'energia e la successiva ricarica della batteria.

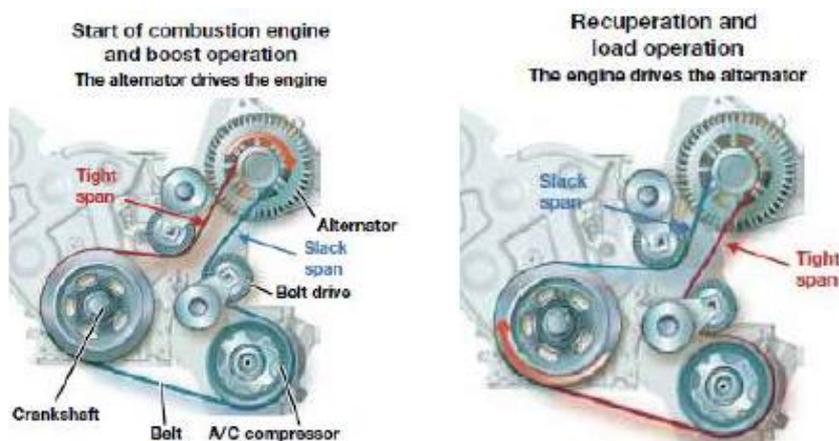


Figura 5.2-Nell'immagine di SX è il motore che guida l'alternatore, mentre nell'immagine di DX avviene il contrario [6]

Quando il motore è guidato dalla macchina elettronica, la potenza viene trasferita tramite il tenditore di sinistra; mentre, quando l'E-motor funziona come carico, la coppia viene trasferita attraverso il tenditore di destra. Il limite di questo metodo è legato alle situazioni di bassa velocità.

5.2.4 Esempio di installazione di un sistema P1F su una vettura esistente

Per spiegare meglio cosa cambia quando si introduce un sistema P1F in una vettura pre-esistente, trasformando quindi una vettura tradizionale in una vettura micro-hybrid, andiamo a fare un esempio. Per semplicità nel reperimento dei dati, andiamo ad utilizzare una city car del gruppo Stellantis, la Fiat 500 Hybrid. Affinché si possa andare a fare un confronto coerente, è opportuno prendere come riferimento il parametro della potenza; per far ciò andremo confrontare la 500 equipaggiata con un 4 cilindri fire da 1.2 L e da un cambio manuale a 5 rapporti con la nuova 500 Hybrid equipaggiata con un motore 3 cilindri da 1L coadiuvato da un piccolo motore elettrico da 4,9 CV e un nuovo cambio a 6 marce. Andiamo di seguito a riportare una serie di informazioni tecniche delle due differenti vetture, nel quale si evidenzia un aggiornamento completo del powertrain:

Tabella 5.2-Confronto scheda tecnica tra 500 hybrid e tradizionale

	500 ibrida Lounge	500 1.2 Lounge
Cilindrata [cm³]	999	1242
N° cilindri o disposizione	3 in linea	4 in linea
Potenza massima [kW(CV)/giri]	52 (70) /6000 giri	51 (69) /5500 giri
Coppia massima [Nm/giri]	92/3500	102/30000
Motore elettrico: Potenza massima [kW(CV)/giri]	3,6 (4,9) /n.d giri	N/A
Classe di omologazione	Euro 6D	Euro 6
Emissione di CO2 [gr/Km]	88	115
Distribuzione	2 valvole per cilindro	2 valvole per cilindro
N° rapporti del cambio	6+ retromarcia	5+ retromarcia
Trazione	Anteriore	Anteriore
Lunghezza/Larghezza/Altezza [cm]	357/163/149	355/163/149
Passo cm	230	230
Peso in ordine di marcia [Kg]	905	865
Velocità massima [Km/h]	167	163
Accelerazione 0-100 [Km/h]	13,8	12,9
Capacità serbatoio [L]	35	35
Consumo NEDC	25,6	15,6
Costo in €	16650	15100 (13/06/2016)

Dalle informazioni riportate in tabella si può notare che nonostante il downsizing, la potenza complessiva è praticamente invariata: 70 Cv per il nuovo 1000 cm³, contro i 69 del vecchio 1200 cm³. La coppia dei due motori è rispettivamente di 90 e 102 Nm, a 3.500rpm e a 3.000rpm. Diverso è il rapporto di compressione, che nella vettura ibrida è più elevato: 12,1 contro 11,1. Completamente differenti, infine, sono le emissioni di CO₂ e i consumi: la 500 hybrid ha emissioni di 88 g di CO₂ per Km con consumi di 3,9 l ogni 100 Km, la 500 “tradizionale” ha un consumo combinato di 4,9 l ed emissioni di 115 g per chilometro. Il motore montato sulla nuova 500 ibrida prende il nome di Firefly, che sostituisce il più noto motore Fire (oltre 30 milioni di esemplari prodotti). Il Firefly, si caratterizza per un’architettura modulare, infatti può essere costruito in 2 versioni da 999 Cm³ e da 1332 cm³, utilizzando una cubatura dei cilindri unitaria e pari a 333 cm³; questo permette la condivisione di bielle e pistoni e la possibilità di produzione sulla medesima linea. Il motore ha 2 valvole per cilindro e un singolo albero a camme con variatore continuo di fase. Inoltre, la camera di combustione compatta, i condotti di aspirazione “high-tumble” e la presenza della valvola EGR esterna hanno permesso l’innalzamento del rapporto di compressione a 12:1, contro gli 11,1, con il risultato di un’efficienza termica elevata. Inoltre, sia la testa che il basamento dei cilindri sono in lega d’alluminio pressofuso ad alta pressione con le canne dei cilindri in ghisa inglobate nella fusione, che hanno come vantaggio principale sia la riduzione dei tempi di warm-up sia il contenimento del peso, che si aggira intorno ai 77 kg. Inoltre, la massimizzazione dell’efficienza passa anche attraverso la riduzione degli attriti, ottenuta con un manovellismo caratterizzato da un rapporto alesaggio/corsa pari a 1,24 e un dispositivo biella-manovella con offset di 10 mm.[9]

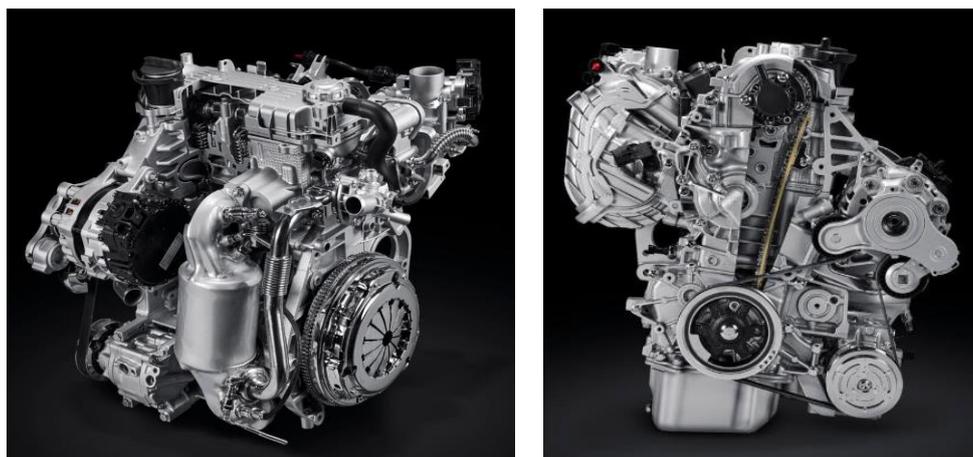


Figura 5.3-Immagini del nuovo sistema ibrido montato FCA

Oltre a quanto detto per il motore ICE, alla nuova 500 hybrid è stato aggiunto il sistema BiSG (Belt integrated Starter Generator) da 4,9 CV, il quale, come si può vedere dall’immagine precedente, è montato direttamente sul motore e agisce tramite la cinghia degli ausiliari. Tale sistema permette sia di recuperare energia in frenata e in decelerazione, sia di assistere il motore ICE durante l’accelerazione. Ciò è possibile grazie alla presenza, sotto il sedile del passeggero, di una batteria

agli ioni di litio a 12V avente una capacità di 11 Ah (0,13 KWh) e una potenza di picco di 3,6 KW. Grazie a questa tecnologia, seppur non permette di viaggiare in modalità puramente elettrica, è possibile spegnere il motore termico durante la marcia al di sotto dei 30 Km/h, semplicemente selezionando la posizione di folle del cambio. Nella modalità di coasting (veleggiamento) la batteria agli ioni di litio alimenta tutti i servizi richiesti dal driver. Per quel che riguarda il cambio è presente un'evoluzione del precedente cambio a 6° marcie di FCA il C 514, posizionato trasversalmente. Inoltre, per migliorare il comportamento stradale della vettura, il powertrain è stato abbassato di 45 mm, determinando così l'abbassamento del baricentro e migliorando l'handling. Tutto questo sistema, come si vede dalla tabella 2, comporta una riduzione dei consumi superiore al 20%, mantenendo pressoché inalterate le prestazioni.

5.3 Descrizione dell'architettura MILD HYBRID

La maggior parte delle case automobilistiche di tutto il mondo sviluppa ed utilizza i sistemi Mild-Hybrid a 48 V. Questi consentono di ottenere emissioni di CO₂ molto più ridotte rispetto ai sistemi Micro-Hybrid e, inoltre, migliorano l'esperienza di guida rendendo i veicoli più attraenti per i consumatori finali. Inoltre, il loro costo è relativamente basso in quanto non sono soggetti ai requisiti di sicurezza dei sistemi ad alta tensione (>60 V), come l'isolamento galvanico richiesto tra i sistemi elettrici ad alta e bassa tensione e il telaio del veicolo. Offrono un vantaggio significativo in termini di riduzione dei consumi senza aggiungere eccessiva complessità e costi dei sistemi ad alta tensione. Sicuramente, oggi, i sistemi a 48 V sembrano un compromesso ottimale tra la riduzione delle emissioni di CO₂ e i costi di implementazione del sistema. Il vantaggio principale, introdotto dall'aumento di tensione da 12 V a 48 V, è la possibilità di supportare maggiori richieste di energia senza un eccessivo aumento della corrente elettrica e, di conseguenza, delle perdite di potenza. I sistemi MHEV a 48 V possono essere suddivisi essenzialmente in due categorie a seconda del posizionamento della macchina elettrica:

- P1F 48 V (non coassiale montato su FEAD);
- P2 48 V (coassiale montato sul lato trasmissione).

I primi riducono al minimo i costi d'integrazione perché richiedono il minor numero di modifiche sull'architettura del veicolo esistente, mentre i secondi offrono la massima flessibilità in termini di funzionalità, come la guida in modalità completamente elettrica. Un generico sistema Mild-Hybrid a 48 V è costituito essenzialmente dai seguenti componenti aggiuntivi:

- Macchina elettrica (con inverter integrato);
- Convertitore CC/CC;
- Batteria agli ioni di litio 48 V.

5.3.1 Sistema P1F 48 V

Il sistema P1F 48V, visibile nella Figura 5.4, può essere considerato un'evoluzione del P1F 12 V. Questo, infatti, offre un layout pressoché identico con un miglioramento delle prestazioni ibride grazie alla maggiore potenza dei componenti. L'introduzione di un circuito di tensione superiore a 48 V richiede l'introduzione di un convertitore CC/CC che funziona come interfaccia con la rete 12 V già esistente sul veicolo. Il convertitore CC/CC può funzionare in modalità buck, quando converte da 48 a 12 V, o in modalità boost, quando converte da 12 V a 48 V.

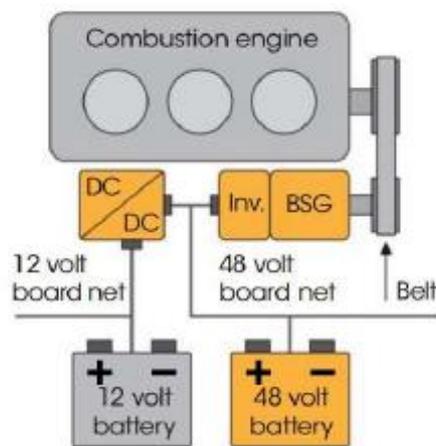


Figura 5.4-Esempio di sistema P1F MHEV a 48 V [2]

I principali vincoli relativi alla sua installazione sono praticamente uguali al caso del P1F 12V per quanto riguarda il rischio d'incendio, mentre l'effetto della lunghezza del cavo sulle perdite è meno rilevante a causa del valore di tensione più alto.

5.3.2 Impatto dell'installazione del sistema P1F 48 V su una vettura esistente

L'impatto di un sistema P1F 48 V sull'architettura del veicolo condivide molti aspetti con il sistema P1F 12V già descritto. In questo paragrafo ne verrà fatta una descrizione completa, anche se alcune considerazioni potrebbe sembrare ridondanti. In generale questo sistema modifica l'architettura del veicolo convenzionale, poiché:

- 1) L'alternatore convenzionale viene rimosso e sostituito dal generatore di avviamento a cinghia. Per consentire il trasferimento di potenza meccanica tra i motori a combustione e la macchina elettrica in entrambe le direzioni, il meccanismo di trasmissione sul FEAD deve essere modificato (puleggie, tenditori, ecc);
- 2) È necessario trovare la posizione ottimale della batteria agli ioni di litio, che per questo tipo di applicazione ha un case di dimensioni maggiori rispetto al caso precedente. Tuttavia, la sua installazione in vettura deve rispettare sempre sia i vincoli di Safety che di funzionalità:

- Non deve essere troppo lontano dalla macchina elettrica per evitare perdite rilevanti dovute all'effetto Joule ed alla caduta di tensione;
 - Deve soddisfare i requisiti di sicurezza durante i crash test;
 - Non può essere posizionato nel vano motore a causa dell'elevato rischio di incendio, a temperature superiori a 70 ° C e in caso di danni da incidente;
 - La posizione non deve influire l'abitabilità del veicolo (questo dipende sempre dal tipo di macchina);
 - Deve essere assicurata la corretta refrigerazione.
- 3) Introduzione di un convertitore CC/CC, la cui posizione deve essere scelta in base ai seguenti vincoli:
- Deve soddisfare i requisiti di sicurezza durante i crash test;
 - La posizione non deve influire l'abitabilità del veicolo (questo dipende sempre dal tipo di macchina);
 - Deve essere assicurata una corretta refrigerazione;
 - Non deve essere troppo lontano dalla batteria al piombo, per evitare perdite rilevanti dovute all'effetto Joule ed alla caduta di tensione.
- 4) Sono stati installati nuovi cavi, per collegare la macchina elettrica alla batteria agli ioni di litio e per collegare i due differenti sistemi elettrici di bordo con il convertitore C/C;
- 5) Potrebbe essere necessario andare ad apportare alcune migliorie lato NVH per ridurre i rumori e/o le vibrazioni introdotte dalla nuova architettura;
- 6) Viene ridotta la cilindrata del motore, e la riduzione di potenza che ne sussegue viene compensata dalla potenza fornita dall'e-motor e/o dall'introduzione di un turbo compressore elettrico;
- 7) In alcuni casi, viene introdotta una trasmissione più performante, per permettere la miglior interazione possibile tra i due sistemi, con un conseguente abbattimento dei consumi ed una migliore efficienza complessiva del veicolo.

Un parametro da tenere in considerazione, in quanto direttamente collegato al consumo di combustibile e quindi all'emissione di CO₂ è l'aumento di peso dovuto all'introduzione dei nuovi componenti, per una semplicità espositiva viene riportata una tabella contenente una stima del delta peso dei componenti:

Tabella 5.3- Delta peso installazione di un sistema P1F 48V su un veicolo tradizionale

Componenti	Delta peso [kg]
Generatore di avviamento a cinghia	7÷10
Alternatore	-5÷-3

Convertitore DC/DC	1÷3
Batteria agli ioni di litio	5÷10
Staffette per il montaggio	1,5÷3
Cavi elettrici	2÷5
Starter alleggerito	-1÷-0,5
Altri componenti elettrici ed elettronici	3÷5
Totale	13,5÷32,5

5.3.3 Esempio di installazione di un sistema P1F 48V su una vettura esistente

Per spiegare meglio cosa cambia quando si passa da una vettura tradizionale ad una vettura mild-hybrid con architettura P1F, andiamo a fare un esempio concreto. Per semplicità nel reperimento dei dati, andiamo ad utilizzare una vettura premium del gruppo Stellantis, la Ghibli Hybrid. Affinché si possa fare un confronto coerente, è opportuno prendere come riferimento il parametro della potenza, per fare ciò confrontiamo la Ghibli V6 da 350 CV e la Ghibli hybrid da 330 CV. La Ghibli tradizionale è equipaggiata con un motore V6 a 60° da 2979 cm³ equipaggiato con un cambio ZF a 8 rapporti (HP70), mentre la versione ibrida è equipaggiata con un motore 4 cilindri di derivazione Alfa Romeo, coadiuvato da un sistema BiSG a 48 V e da un turbo compressore elettrico, il cambio è sempre uno ZF a 8 rapporti (HP 75). Andiamo di seguito a riportare una serie di informazioni tecniche delle due differenti vetture, nel quale verranno evidenziate le differenze dei due powertrain:

Tabella 5.4-Rapporti di trasmissione per i due differenti cambi ZF (HP 70 Vs HP 75)

Tipo di cambio	ZF 8 AT HP 70	ZF 8 AT HP 75
1° marcia	4,71	5
2° marcia	3,14	3,2
3° marcia	2,11	2,143
4° marcia	1,67	1,72
5° marcia	1,28	1,314
6° marcia	1	1
7° marcia	0,84	0,822
8° marcia	0,67	0,64
Riduzione finale	3,31	2,8
Retromarcia	-3,32	-3,456

Come si può vedere dalla tabella precedente, i due cambi rimangono pressoché invariati, tuttavia se si va nello specifico del componente si vede un incremento della coppia massima trasmessa a fronte di una riduzione di peso.

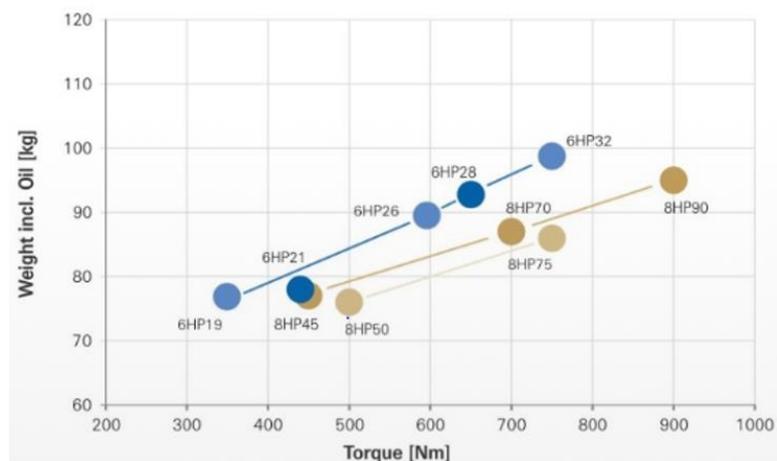


Figura 5.5-Peso della trasmissione in funzione della coppia trasmessa dei diversi cambi ZF [11]

Tabella 5.5-Confronto scheda tecnica tra Ghibli Hybrid e tradizionale

	Ghibli V6	Ghibli MHEV
Cilindrata [cm³]	2979	1998
N° cilindri o disposizione	6 a V di 60°	4 in linea
Potenza massima [kW(CV)/giri]	257 (350) /5750 giri	243 (330) /5750 giri
Coppia massima [Nm/giri]	500/4500	450/2250
Alesaggio X Corsa [mm]	86,5 X 84,5	84 X 90
Rapporto di compressione	9,7:1	9,5:1
Sistema di sovralimentazione	Turbocompressore	Turbocompressore+E-compressor
Motore elettrico: (36-52V)	N/A	Peak power:10.3 kW (10s)
Pmax [kW] e coppia (Nm)		Peak torque 54 Nm (1s)
Capacità batteria 48 V(37-51V)	N/A	350Whr
Classe di omologazione	Euro 6D	Euro 6D
Emissione di CO2 [gr/Km]	266	192
N° rapporti del cambio	8+ retromarcia	8+ retromarcia
Trazione	Posteriore	Posteriore
Lunghezza/Larghezza/Altezza [cm]	497/194/146	497/194/146
Passo cm	300	300
Peso in ordine di marcia [Kg]	1810	1885
Velocità massima [Km/h]	267	255
Accelerazione 0-100 [Km/h]	5,5	5,7
Capacità serbatoio [L]	80	80
Consumo WLTP [L/100Km]	9,5	8,5
Costo in €	77939	74145

Il sistema ibrido P1F 48 V Maserati è costituito da un motore elettrico, installato sul FEAD del motore, il quale svolge la funzione di alternatore e permette di recuperare l'energia in frenata e in

decelerazione. Questo va a caricare la batteria 48 V, presente nel baule posteriore, che serve per alimentare l'e-booster. Quest'ultimo lavora in serie con il turbocompressore classico e serve per ridurre i buchi di coppia ai bassi regimi. Il motore passa da un V6 da 3000 cc ad un 2000 cc, ma grazie alla presenza dell'architettura ibrida si riesce ad avere una ripresa paragonabile alla versione diesel e una potenza e un'accelerazione pressoché invariate. Il tutto contenendo anche l'aumento di peso che è leggermente al di sopra dei 70 kg. Questo mix di fattori, porta a una notevole riduzione dei consumi e conseguentemente delle emissioni di CO₂, che si aggirano nell'ordine del 25% sul ciclo WLTP.



Figura 5.6-Immagine del sistema ibrido Maserati

5.3.4 Sistema P2 48 V

Le configurazioni viste fino ad ora P0 e P1, presentano entrambe la macchina elettrica sul lato motore, senza avere la possibilità di una disconnessione tra motore ICE ed e-motor. Così facendo, sia il recupero di energia che il boost di coppia risultano poco efficienti, per questo motivo viene utilizzata sulla maggior parte dei modelli (top di gamma) di tutte le case automobilistiche un'architettura P2 48V.

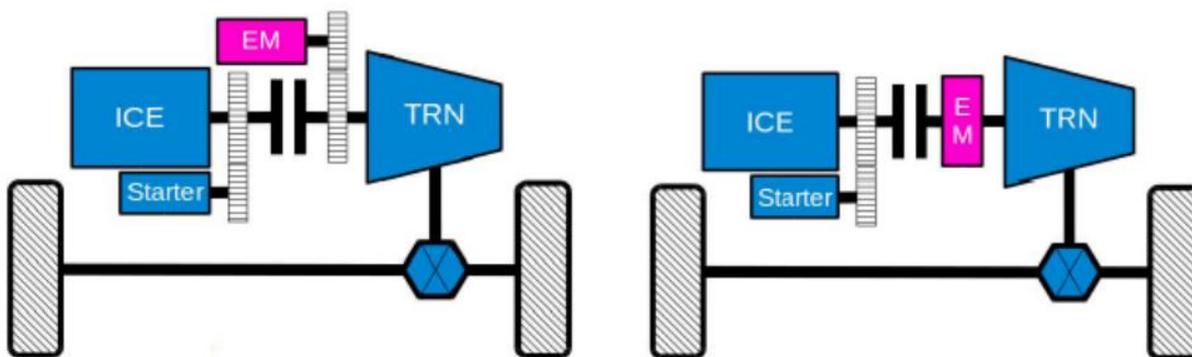


Figura 5.7-Due differenti configurazione del sistema MHEV P2 48V [2]

Il sistema P2 48V è costituito da una macchina elettrica montata coassialmente all'albero motore, tra motore e cambio. In questo caso, tuttavia, oltre ai componenti presenti nell'architettura P1F 48 V (convertitore CC/CC e batteria agli ioni di litio) è presente una frizione tra il motore endotermico e l'E-motor, attraverso la quale si può disaccoppiare il motore ICE dalla macchina elettrica. La possibilità di disaccoppiare i due motori porta a due grandi vantaggi:

- 1) Si riescono a percorrere delle brevi distanze (circa 2÷5 km) in modalità puramente elettrica;
- 2) Durante la frenata rigenerativa si aumenta l'efficienza di recupero dell'energia eliminando le perdite dovute al trascinamento del motore ICE (spento).

Inoltre, avendo una macchina elettrica più potente, si ha un maggiore boost di coppia. Proprio per la posizione della macchina elettrica sul lato trasmissione, affinché si riesca ad avviare e arrestare il motore è necessaria l'introduzione di un'altra macchina elettrica. Ciò può avvenire con un avviatore standard rinforzato (12 V) oppure con un generatore di avviamento integrato nella cinghia (12 V o 48 V). [12] Per sfruttare al meglio questa architettura e andare ad aumentare l'autonomia in puro elettrico, le case automobilistiche stanno sviluppando delle vetture ibride Plug-in, ossia delle vetture che permettono di caricare le batterie agli ioni di litio (sviluppate per il sistema ibrido) anche da una presa di corrente esterna. Tutto ciò ha come vantaggio la possibilità di guidare in modalità puramente elettrica per 50 ÷ 70 km. Tuttavia, ciò comporta un ulteriore complessità del veicolo con il conseguente aumento di costo finale.

5.3.5 Impatto dell'installazione del sistema P2 48 V su una vettura esistente

Questa tipologia di sistema modifica l'architettura del veicolo convenzionale in quanto richiede:

- 1) Installazione di una macchina elettrica montata coassialmente all'albero motore tra il motore ed il cambio. Affinché possa avvenire ciò si deve fare un'analisi packaging che permetta di mantenere opportune luci tra il vano motore e le dimensioni del nuovo powertrain. Ciò è importante, in quanto si cerca di evitare possibili modifiche all'underbody per problemi sia di costo, ma soprattutto di omologazione e safety;
- 2) È necessario trovare la posizione ottimale della batteria agli ioni di litio, che per questo tipo di applicazione ha un case di dimensioni maggiori rispetto al caso precedente. Tuttavia, la sua installazione in vettura deve rispettare sempre sia i vincoli di Safety che di funzionalità:
 - Non deve essere troppo lontano dalla macchina elettrica per evitare perdite rilevanti dovute all'effetto Joule ed alla caduta di tensione;
 - Deve soddisfare i requisiti di sicurezza durante i crash test;
 - Non può essere posizionato nel vano motore a causa dell'elevato rischio di incendio, a temperature superiori a 70 ° C e in caso di danni da incidente;

- La posizione non deve influire con l'abitabilità del veicolo (questo dipende sempre dal tipo di macchina);
 - Deve essere assicurata la corretta refrigerazione.
- 3) Introduzione di un convertitore CC/CC, la cui posizione deve essere scelta in base ai seguenti vincoli:
- Deve soddisfare i requisiti di sicurezza durante i crash test;
 - La posizione non deve influire con l'abitabilità del veicolo (questo dipende sempre dal tipo di macchina);
 - Deve essere assicurata una corretta refrigerazione;
 - Non deve essere troppo lontano dalla batteria al piombo, per evitare perdite rilevanti dovute all'effetto Joule ed alla caduta di tensione.
- 4) Sono stati installati nuovi cavi, per collegare la macchina elettrica alla batteria agli ioni di litio e per collegare i due differenti sistemi elettrici di bordo con il convertitore CC/CC;
- 5) Potrebbe essere necessario andare ad apportare alcune migliorie lato NVH per ridurre i rumori e/o le vibrazioni introdotte dalla nuova architettura;
- 6) Viene ridotta la cilindrata del motore e la riduzione di potenza che ne sussegue viene compensata dalla potenza fornita dall'E-motor e/o dall'introduzione di un turbo compressore elettrico;
- 7) In alcuni casi, viene introdotto un cambio più performante, per permettere la miglior interazione possibile tra i due sistemi, con un conseguente abbattimento dei consumi e una migliore efficienza complessiva del veicolo. Vi sono alcune aziende (3.4.5.2) che hanno sviluppando dei cambi già contenenti un motore elettrico integrato, in modo da riuscire a semplificare l'ibridazione di un veicolo elettrico tradizionale.

Un parametro da tenere in considerazione, in quanto direttamente collegato al consumo di combustibile e quindi all'emissione di CO₂, è l'aumento di peso dovuto all'introduzione dei nuovi componenti, per una semplicità espositiva viene riportata una tabella contenente una stima del delta peso dei componenti:

Tabella 5.6-Delta peso installazione di un sistema P2F 48V (no plug-in) su un veicolo tradizionale

Componenti	Delta peso [kg]
Macchina elettrica	20÷35
Convertitore DC/DC	1÷3
Batteria agli ioni di litio	10÷20
Staffette per il montaggio	2÷5
Cavi elettrici	3÷6
Starter alleggerito	-3÷-1

Altri componenti elettrici ed elettronici	5÷8
Totale	38÷82

Il delta negativo presente nello starter è dovuto all'assenza, in questo sistema, del motorino di avviamento a causa dell'albero a gomiti.

5.3.6 Esempio di installazione di un sistema P2 48V su una vettura esistente

Ora andiamo a fare un esempio di sistema P2 a 48V. A differenza degli esempi precedenti, andiamo ad analizzare vettura ibrida plug-in, la Mercedes-Benz 250e. Affinché si possa andare a fare un confronto coerente, è opportuno prendere come riferimento il parametro della potenza; per far ciò andremo a fare un confronto tra la Mercedes 250 da 224 CV e la 250e da 218 CV.

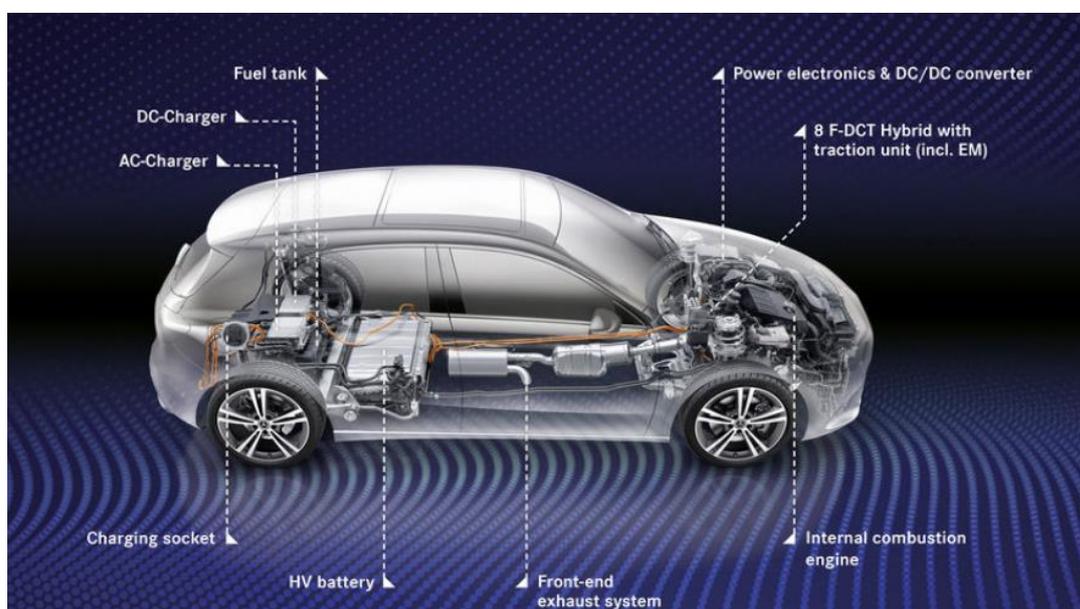


Figura 5.8-Schema del sistema Mercedes EQ Power [27]

Il sistema ibrido plug-in della Mercedes Classe A (Figura 5.8) è composto da un motore elettrico da 75 kW di potenza accoppiato ad un quattro cilindri da 1300cc a benzina. A causa dell'architettura del veicolo, la potenza totale non è pari alla somma delle singole potenze che i due motori sono in grado di erogare (262 Cv), ma bensì è pari a 218 CV e genera una coppia massima di 450 Nm, il tutto gestito da un cambio automatico a doppia frizione e 8 rapporti 8F-DCT (Figura 5.9). Il motore elettrico, da 102 Cv, sincrono a magneti permanenti è stato inserito all'interno del gruppo cambio/frizione: lo statore è integrato nella scatola del gruppo di trasmissione, mentre nel rotore del motore elettrico è collocata la frizione d'innesto del motore. Con questa nuova architettura, si è potuto eliminare del tutto il motorino di avviamento (starter), consentendo al solo E-motor di avviare il motore ICE. Il motore elettrico è alimentato da una batteria agli ioni di litio da 15,6 kWh che è una

batteria ad alto voltaggio (>100 V) che pesa circa 150 kg. Con la spinta del solo motore elettrico si possono raggiungere velocità prossime ai 140 km/h e viaggiare in modalità puramente elettrica per 50/60 km.

Tabella 5.7-Confronto scheda tecnica tra Mercedes-Benz 250 e 250e Plug-in Hybrid

	250	250e
Cilindrata [cm³]	1991	1332
N° cilindri o disposizione	4 cilindri in linea	4 cilindri in linea
Potenza massima [kW(CV)/giri]	165 (224)/5500	160 (218)/5500
Coppia massima [Nm/giri]	350/1800	230/1620
Alesaggio X Corsa [mm]	83x92	72,2x81,4
Rapporto di compressione	9,8:1	10,6:1
Motore elettrico:	N/A	75 (102)
Potenza massima [kW(CV)/giri]		
E-boost kW(CV)	N/A	N/A
Capacità batteria 48 V	N/A	15 KWh (Ioni di litio)
Classe di omologazione	EURO 6D	EURO 6D
Emissione di CO2 [g/km]	139	32
N° rapporti del cambio	7 + retromarcia (DCT)	8+retromarcia (DCT)
Trazione	Anteriore	Anteriore
Lunghezza/Larghezza/Altezza [cm]	442/178/145	442/180/146
Passo [cm]	273	273
Peso in ordine di marcia [kg]	1455	1680
Velocità massima [km/h]	250	235
Accelerazione 0-100 [km/h]	6,2	6,6
Capacità serbatoio [l]	51	51
Consumo WLTP [l/100 km]	6,6	
Costo in €	39200	42400



Figura 5.9-Cambio a doppia frizione 8F-DCT [27]

Nella tabella 5.7, sono indicate le caratteristiche principali dei due veicoli esaminati. Da questo possiamo vedere che l'integrazione della nuova architettura ibrida ha costretto gli ingegneri Mercedes a effettuare molte modifiche sia sul telaio che sulla posizione di altri sistemi importanti come il serbatoio, il bocchettone e lo scarico. Quindi, in funzione della tecnologia ibrida che si vuole adottare, non sempre si riesce a introdurre nuove motorizzazioni con poco sforzo.

5.4 Introduzione analisi dei costi

Al fine di capire i vantaggi dell'introdurre una tecnologia rispetto ad un'altra, è opportuno effettuare una breve analisi dei costi. Quanto riportato di seguito, non vuole e non può essere un'analisi completa, ma soltanto una sensitivity che possa fornire un'idea di massima del perché si è propensi a scegliere una tecnologia piuttosto che un'altra. Per approfondire questo argomento è possibile prendere come riferimento alcuni articoli quali: "Cost-optimized design of a dual-mode diesel parallel hybrid electric vehicle for several driving missions and market scenarios" di Roberto Finesso et al. Considerando l'intento principale di questa tesi, per semplicità, sono stati estrapolati i dati presenti all'interno della tesi "Adaptation of low cost hybrid architecture to a general purpose platform" di Gabriele Ferlito.

Di seguito, vengono riportate le ipotesi usate durante le varie simulazioni computerizzate:

- 1) E' stato mantenuto lo stesso propulsore in termini di motore e cambio, stesso rapporto di trasmissione finale e raggio di rotolamento dello pneumatico, con l'obiettivo di rendere coerente l'analisi comparativa;
- 2) Il consumo di carburante e le emissioni di CO2 sono calcolate simulando i veicoli appartenenti ai diversi segmenti sul ciclo NEDC;
- 3) I segmenti usati per l'analisi sono:
 - Hatchback 5 porte (es. Fiat tipo Hatchback);
 - SUV (es. Jeep Renegade);
 - Veicoli commerciali leggeri (es. Fiat doblò)

Tabella 5.8-Massa di riferimento media per ogni segmento

Tipologia di veicolo	Massa [kg]
Hatchback 5 porte	1275
SUV	1395
Veicoli commerciali leggeri	1490

Tabella 5.9-Emissioni di CO₂ medie per ogni segmento

Tipologia di veicolo	CO ₂ [g/km]
Hatchback 5 porte	130
SUV	150
Veicoli commerciali leggeri	180

Tabella 5.10-Caratteristiche tecniche motore 1.4 T-jet 120 CV

Engine 1.4 T-jet 120 CV	
Combustibile	Benzina
N°cilindri	4
Alesaggio x corsa [mm]	72x84
Cilindrata [cm ³]	1368
Rapporto di compressione	9,8:1
Classe di emissione	Euro 6
Coppia massima [Nm]	206@2000 rpm
Potenza massima [kW]	88 @5000 rpm

Tabella 5.11-Caratteristiche tecniche cambio C514

Cambio a 6 rapporti	
Rapporto di trasmissione finale	4,133
Marcia	Rapporto di trasmissione
1°	4,154
2°	2,118
3°	2,486
4°	1,116
5°	0,897
6°	0,767

5.4.1 Analisi dei costi

Un parametro molto importante che permette alle varie OEM di scegliere quale tecnologia è la più conveniente è il rapporto costi benefici espressi come €/gCO₂:

$$\text{Rapporto costi benefici} = \frac{\text{Costi variabili}}{\text{g di CO}_2 \text{ non emessa}}$$

Per costo variabile, si intende quello relativo all'hardware del sistema (componentistica), senza tuttavia tener conto degli investimenti necessari, come l'adattare di una linea di produzione esistente. Il vantaggio ottenuto, invece, è inteso come grammi di CO₂ non emessi. Infatti, come già discusso durante la prefazione, se i valori medi (sulla flotta) di CO₂ del produttore superano dal 2020 i 95 g/CO₂, verrà applicata una multa di 95 € per ogni g/km in eccesso per il numero totale di vetture

vendute. Da quanto detto, si intuisce che il rapporto costi/benefici di qualsiasi tecnologia introdotta deve essere inferiore ai 95 €/g.

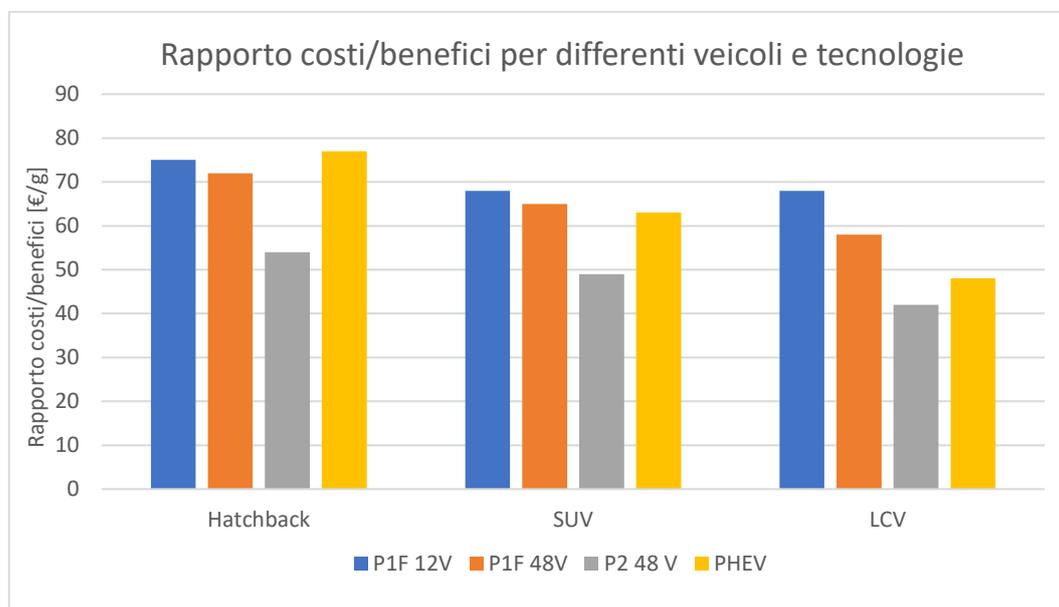


Figura 5.10-Rapporti costi/benefici per differenti veicoli e tecnologie

I dati riportati nella Figura 5.10 rappresentano un'approssimazione lineare in termini di riduzione del rapporto costi-benefici; ovviamente vi sono altri parametri da tenere in considerazione, ma già con questo semplice grafico si riesce a capire che una data tecnologia applicata su differenti tipologie di veicolo porta a risultati differenti in termini di abbattimento di emissioni di CO₂ a parità di costi. Quindi, il grado di ibridazione deve essere adattato in base al segmento del veicolo. Come si può vedere, non si è tenuto conto del grado di ibridazione P0, in quanto quest'ultimo non può essere considerato un vero e proprio ibrido, ma più che altro un improvement di una tecnologia pre-esistente. Dal grafico precedente è chiaramente evidenziato che su entrambi i sistemi P1F (12V e 48V) si ha un rapporto costi-benefici tra 55 ed i 75 €/g, mentre per i sistemi P2 48V il rapporto si riduce tra i 40 e i 55 €/g. Per avere un quadro più generale si è confrontato il tutto anche con le applicazioni Full Hybrid (PHEV), sui quali si evidenzia un rapporto tra 45 ed i 75 €/g. Quest'ultima tipologia di architettura ha un elevato vantaggio applicativo soprattutto su veicoli molto inquinanti, ossia quelli con un elevato valore iniziale di CO₂, come SUV e LCV. I dati precedentemente illustrati sono del tutto in linea con quanto atteso poiché, essendo l'indice costi-benefici derivato da un rapporto tra il costo necessario e il quantitativo non emesso di CO₂ (calcolato sul ciclo NEDC), si intuisce che, seppur i sistemi P1F (12-48V) permettano una riduzione all'incirca della stessa quantità assoluta di CO₂, questo contributo risulta meno rilevante in percentuale quando si vanno a considerare veicoli con dimensioni maggiori e quindi con emissioni maggiori di CO₂. La controprova di quanto detto si ottiene andando a

considerare il valore emerso dai sistemi P2 48V, che raggiungeranno un beneficio di CO₂ superiore rispetto ai sistemi BiSG, in quanto la guida puramente elettrica permette di spegnere il motore a bassi carichi e a bassi regimi di rotazione (quest'ultimi generalmente associati a valori elevati di consumi specifici di carburante). Per completare la nostra analisi, andiamo a considerare l'influenza delle tecnologie applicate sul costo del veicolo all'utilizzatore finale. Nella tabella 5.12 sono rappresentati i prezzi medi per le diverse tipologie di veicolo, i quali, ovviamente, non tengono conto di tutte le variabili che possono far lievitare il prezzo, come optional ecc., e nemmeno dei possibili sconti applicati dai concessionari e/o ecoincentivi statali che possono far ridurre il prezzo finale. Dal grafico presente in Figura 5.11, emerge che l'impatto dell'architettura adottata sul prezzo finale del veicolo è:

- Inferiore al 5% per i sistemi P1F 12V;
- Tra il 6 e il 9% per i sistemi P1F 48V;
- Tra il 13 ed il 17% per i sistemi P2 48V;
- Tra il 50-60 % per i sistemi PHEV.

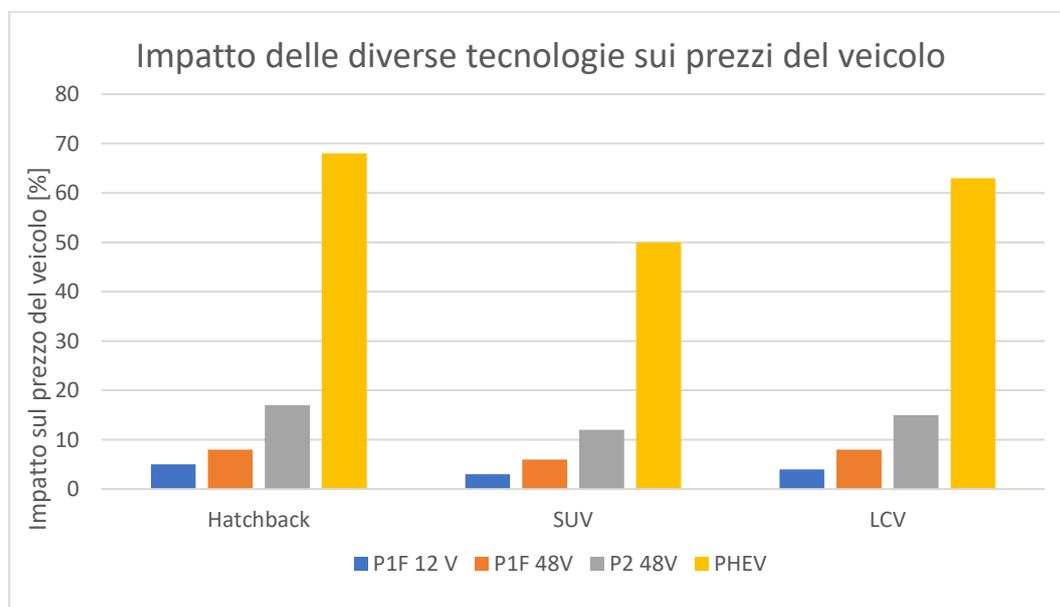


Figura 5.11-Impatto delle diverse tecnologie sui prezzi del veicolo

I sistemi P1 e P2, hanno un maggiore vantaggio in termini di costi-benefici mantenendo comunque un prezzo finale contenuto. Invece, i veicoli PHEV hanno sicuramente un elevato rapporto costi-benefici (emissioni di CO₂, inferiore a 50 g/km) e questo si ripercuote sul prezzo finale del veicolo. Per questo motivo i veicoli plug-in, se non inizialmente progettati per questo tipo di architettura, tendono ad essere introdotti su veicoli costosi, facenti parte dei segmenti SUV e/o Luxury.

Tabella 5.12-Prezzo medio indicativo per le differenti categorie di veicoli

Tipologia di veicolo	Prezzo medio [€]
Hatchback 5 porte	19000
SUV	25000
Veicoli commerciali leggeri	20000

5.4.2. Analisi comparativa e conclusioni

Tutto lo studio sulle varie architetture ibride è stato condotto analizzando la loro installazione su veicoli pre-esistenti, con il conseguente effetto su prestazioni, emissioni e costi. Come si poteva immaginare, i sistemi più semplici, come i micro-ibridi, seppur abbiano un'implementazione molto semplice sui veicoli esistenti, offrono un modesto contributo alle prestazioni e alle emissioni, a causa della loro potenza limitata. Il discorso è diverso per i Mild Hybrid, i quali, seppur presentino delle problematiche maggiori dovute all'integrazione con l'architettura esistente e ai maggiori costi in termini di investimenti (i componenti richiesti sono più grandi e costosi), hanno un vantaggio consistente in termini di prestazioni ed emissioni.

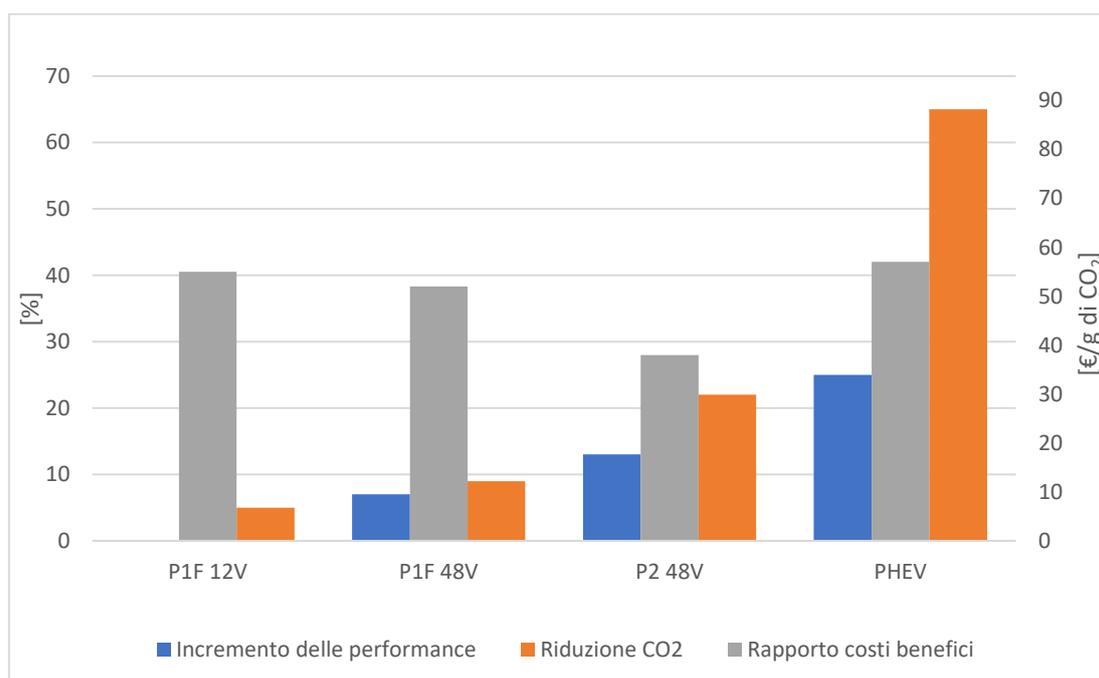


Figura 5.12-Analisi comparativa dei sistemi

Nell'analisi precedentemente svolta non si è parlato dell'incremento delle prestazioni, le quali, a parità di tecnologia, variano in funzione del tipo di veicolo. Avendo considerato sia il motore ICE che il cambio uguale per tutta l'analisi, gli aumenti di prestazioni ottenuti da ciascun sistema sono dovuti principalmente a 3 fattori:

- 1) Tipo di motore elettrico e/o booster installato;

- 2) Caratteristiche di potenza dell'E-motor;
- 3) Campo di funzionamento della macchina elettrica e dell'interazione di quest'ultima con il motore all'ICE.

Infine, si deve tener in considerazione che il sistema P2 48V offre prestazioni migliori rispetto ai sistemi P1F, non solo per la differenza di potenza ma anche per la sua duttilità di funzionamento che gli permette di eseguire il boost di coppia su tutto il range di funzionamento di ICE.

Nel grafico in Figura 5.12 vengono messe a confronto le diverse architetture precedentemente analizzate rispetto 3 parametri caratteristici: l'incremento delle performance, la riduzione delle emissioni di CO₂ ed il rapporto costi-benefici. Da questo possiamo intuire che:

- Il sistema P1F 12V non offre vantaggi significativi, in termini d'incremento delle prestazioni (< 0,5%) ed emissioni di CO₂ (< 5%), e presenta un rapporto costi-benefici relativamente elevato. Essenzialmente esegue la funzione S&S, mentre le funzioni relative all'integrazione dei vari sistemi hanno un'efficacia limitata a causa dei limiti di potenza. Questo tipo di ibrido si può considerare come una vettura tradizionale e, quindi, risulta difficile giustificare al cliente finale l'aumento di prezzo. La sua commerciabilità è principalmente legata alla possibilità di omologazione dell'ibrido, che in alcuni stati e in alcune città implica una tassa minore sull'automobile (riduzione del bollo o assenza del pagamento di quest'ultimo per un determinato periodo di tempo) e accesso gratuito a parcheggi e ZTL;
- Il sistema P1F 48V influenza maggiormente sia le prestazioni, con un delta tra il 6 e l'8% che le emissioni approssimativamente con una riduzione di circa l'8%. Il rapporto costi-benefici è paragonabile ai sistemi P1F 12V. Nonostante i valori di potenza più elevati gestiti, esso risulta tuttavia penalizzato dal collegamento meccanico mediante la cinghia sull'unità ausiliaria del motore ICE (FEAD). In effetti, a causa di ciò, sono impediti le funzioni ibride come la guida in puro elettrico, la quale genera un importante risparmio di carburante, soprattutto sui cicli omologativi;
- P2 48V rappresenta l'ibrido più usato da tutte le case automobilistiche. Questo riduce le emissioni di circa il 25% e aumenta le prestazioni di un 10-15% rispetto al veicolo originario. Ciò è possibile grazie alla presenza di un hardware molto potente e alla possibilità (seppur per pochi km) di muoversi in modalità puramente elettrica. Il rapporto costi-benefici è chiaramente molto favorevole rispetto ai sistemi precedenti, tuttavia questo comporta un aumento del prezzo finale del veicolo, il quale risulta anche maggiore (seppur di poco) a quello della versione diesel;
- Mediante i sistemi PHEV, si ottengono riduzioni di CO₂ decisamente superiore rispetto agli ibridi a basso costo ma analogo rapporto costi-benefici. Inoltre si riesce ad assicurare un

eccellente miglioramento delle prestazioni. Il suo impatto sul prezzo del veicolo rende questa architettura più adatta a segmenti come SUV o brand luxury, dove il prezzo di base del veicolo è già alto.

Conclusioni

In questo lavoro di tesi si è cercato di effettuare un confronto tecnico, il più imparziale possibile, tra i veicoli equipaggiati con powertrain tradizionale e quelli equipaggiati con powertrain ibrido/elettrico. È assodato ormai che il duopolio Diesel/Benzina dei veicoli a combustione è sulla via del tramonto, tuttavia bisogna capire se le tecnologie utilizzate nei veicoli HEV e BEV possano risolvere il sempre più pressante problema dell'impatto ambientale del settore trasporti, responsabile del 32% delle emissioni totali di CO₂ in Europa.

Possiamo considerare la figura seguente:

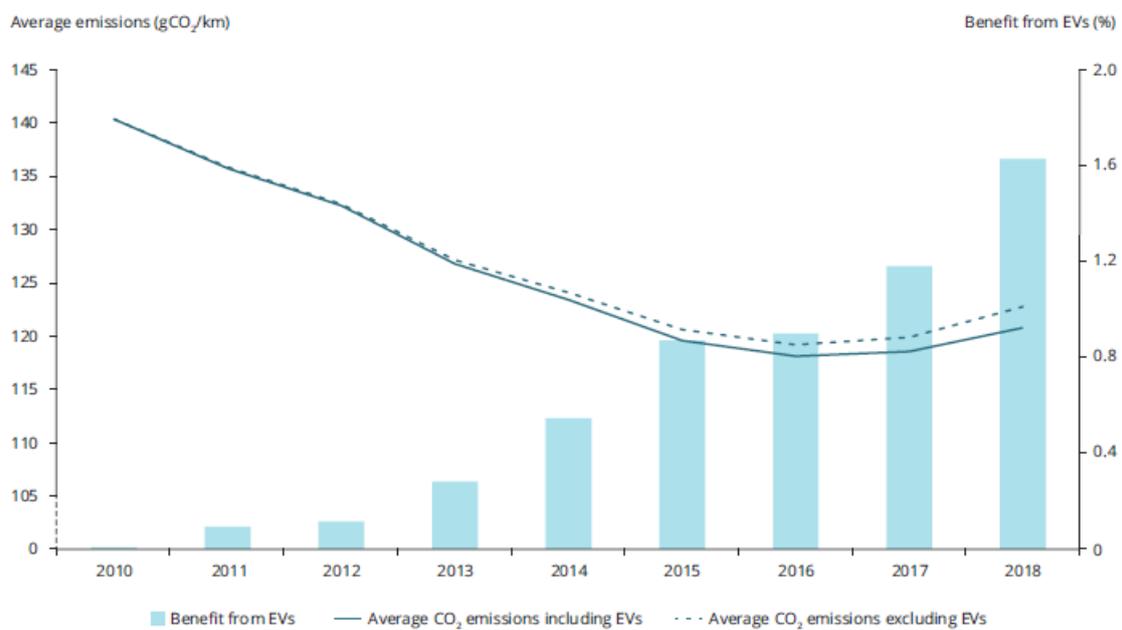


Figura C.1--Emissione media di CO₂ nei veicoli elettrici e non elettrici [66]

Viene rappresentato l'andamento medio della CO₂ emessa dai veicoli venduti in Europa dal 2010 al 2018 calcolata mediante i dati forniti dai vari car makers. Dal grafico possiamo vedere che dal 2010 al 2018 le emissioni di CO₂ sono effettivamente ridotte. Questa riduzione può essere attribuita all'introduzione di misure e tecnologie che hanno migliorato l'efficienza energetica delle auto, nonché a un cambiamento nel mix di modelli di auto immatricolati con propulsioni ibride/elettriche e tecnologie più efficienti. Tuttavia, le emissioni medie di CO₂ hanno raggiunto un minimo intorno al 2016 e da allora sono tornate ad aumentare sia nel 2017 che nel 2018. Questo aumento è dovuto ad un mix di fattori tra i quali i più importanti sono:

- Passaggio da auto alimentate con trazione diesel ad auto alimentate a benzina;
- Aumento delle vendite di SUV e crossover.

Contestualmente sono state analizzate le vendite in Europa di Toyota, leader nel settore delle auto a trazione alternativa.

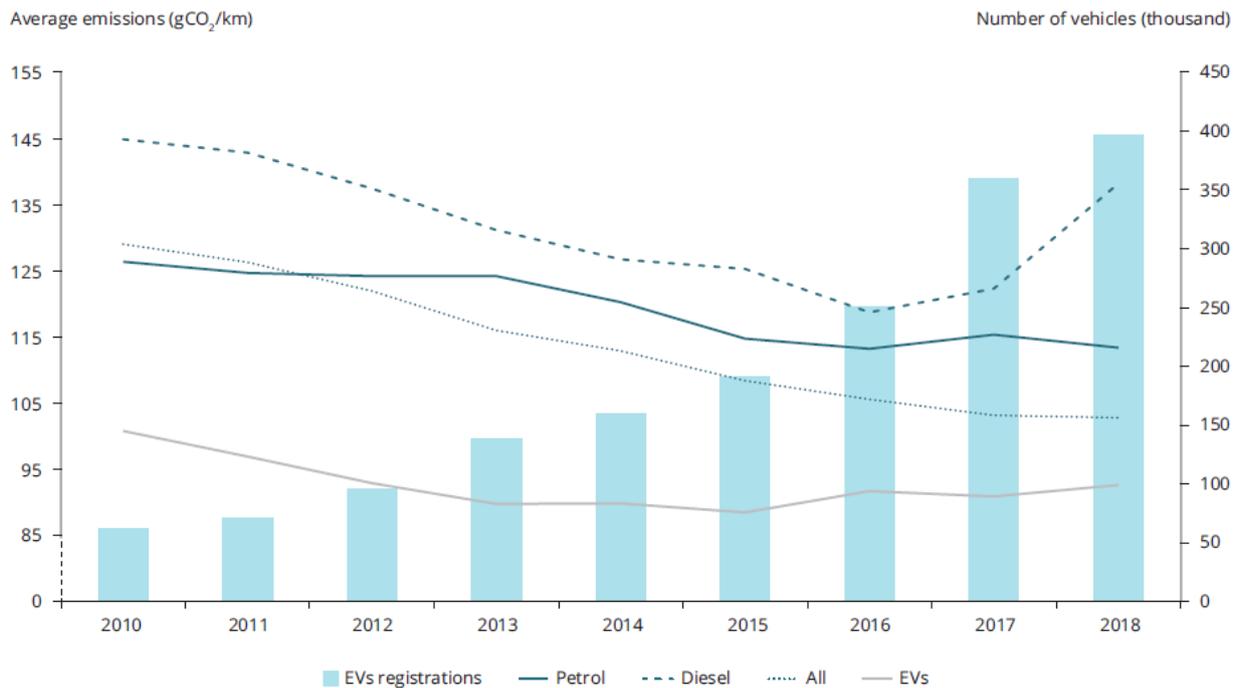


Figura C.2-Emissione media di CO₂ di vetture Toyota [66]

Dalla figura possiamo vedere come Toyota abbia costantemente aumentato le vendite di veicoli elettrici ogni anno, puntando molto su questo settore. Tuttavia Akio Toyoda, CEO di Toyota e presidente della Japan Automobile Manufacturers association, ha recentemente affermato che i veicoli elettrici sono sopravvalutati e che tale settore collasserà. Questo perché non si stanno tenendo in considerazione le emissioni prodotte durante la produzione del veicolo elettrico e di tutto il suo life cycle. Una più corretta strategia sarebbe lasciare maggiore libertà alle case automobilistiche nella possibilità di scelta della tecnologia propulsiva per il raggiungimento della carbon neutrality entro il 2050 (utilizzo di idrogeno, etc.).

Indice delle figure

CAPITOLO 1 - Powertrain: definizione e classificazione

Figura 1.1-Esempio di powertrain tradizionale [1]	1
Figura 1.2-Tre differenti tipologie di architettura del gruppo motopropulsore [1]	2
Figura 1.3-Differenti opzioni di componenti all'interno del gruppo PWT [1]	3
Figura 1.4-Illustrazione dei diversi tipi di veicoli ibridi [1].....	6
Figura 1.5-Schema ibrido serie [1]	9
Figura 1.6-Schema ibrido parallelo [1].....	10
Figura 1.7-Schema veicolo ibrido parallelo single shaft [63]	10
Figura 1.8-Schema veicolo ibrido parallelo double shaft [63].....	11
Figura 1.9-Schema veicolo ibrido double drive (Through The Road o TTR) [63].....	12
Figura 1.10-Schema di un veicolo ibrido Serie-Parallelo [63].....	14
Figura 1.11-Schema ibrido complesso, power-split [1]	15
Figura 1.12-Classificazione dei veicoli ibridi in base alla posizione della macchina elettrica [63].....	15
Figura 1.13-Architettura P1F	16
Figura 1.14-Architettura P1R	17
Figura 1.15-Layout veicolo ibrido P2.....	18
Figura 1.16-Layout veicolo ibrido P2 plug-in	19
Figura 1.17-Layout veicolo ibrido P3	19
Figura 1.18-Layout veicolo REEV	21
Figura 1.19-Esempio di installazione P4	21
Figura 1.20-Layout veicolo ibrido P1F+P4	22
Figura 1.21-Confronto tra le caratteristiche principali di un motore ICE ed uno elettrico [13].....	23
Figura 1.22-Posizione del PWT all'interno del veicolo [64].....	24

CAPITOLO 2 - Motore ICE e tecnologie ad esso associate

Figura 2.1-Rappresentazione in sezione di un motore alternato a ciclo Otto [55].....	27
Figura 2.2-Diagramma circolare rappresentante le fasature delle valvole [46]	28
Figura 2.3-Ciclo Otto ideale	34
Figura 2.4-Ciclo Otto limite.....	35
Figura 2.5-Ciclo Otto indicato	35
Figura 2.6-Rappresentazione del ciclo teorico ed indicato sul piano p-V [55].....	36
Figura 2.7-Andamento del ciclo limite in funzione della dosatura	37
Figura 2.8-Andamento del rendimento termo-fluidodinamico interno in funzione della velocità del motore.....	38
Figura 2.9-Andamento del rendimento termo-fluidodinamico interno in funzione della dosatura.....	39
Figura 2.10-Andamento del rendimento indicato in funzione della dosatura	39
Figura 2.11-Andamento del rendimento organico al variare della velocità media del pistone [56]	40

Figura 2.12-Andamento di pmi, pme e pv al variare della dosatura	41
Figura 2.13-Andamento del rendimento organico al variare della dosatura	42
Figura 2.14-Andamento del rendimento utile al variare della dosatura	43
Figura 2.15-Andamento della coppia e della potenza effettiva al variare della velocità di rotazione [56]	43
Figura 2.16-Piano quotato dei consumi specifici [56]	45
Figura 2.17-Compressore rotativo azionato dall'albero motore [46]	47
Figura 2.18-Esempio di funzionamento di un gruppo turbocompresso [58]	48
Figura 2.19-Gruppo turbocompressore alimentato a pressione costante [46].....	48
Figura 2.20-Andamento delle pressioni in un turbocompressore a pressione costante [47]	49
Figura 2.21-Gruppo turbocompressore alimentato a impulsi [46].....	49
Figura 2.22-Andamento delle pressioni in un turbocompressore ad impulsi [47]	49
Figura 2.23-Schema a blocchi di un turbocompressore azionato elettricamente [48]	50
Figura 2.24-Limiti sulla caratteristica massima ottenibile in un motore turbocompresso [46].....	52
Figura 2.25-Andamento della coppia per un Alfa Romeo 147 1.9 16V JTD in seconda marcia[46]	53
Figura 2.26-Andamento della pressione di sovralimentazione per un Alfa Romeo 147 1.9 16V JTD in seconda marcia[46]	54
Figura 2.27-Schema esemplificativo di un sistema sovralimentazione con intercooler [58].....	55
Figura 2.28-Effetto dell'interrefrigerazione sulla massa volumica della carica inviata al motore [56]	55
Figura 2.29-Influenza della riduzione dell'area della sezione di ingresso in turbina, sulle prestazioni di un motore sovralimentato [56].....	57
Figura 2.30-Esempio di valvola waste gate [46].....	58
Figura 2.31-Sistema twin turbo [46].....	59
Figura 2.32-Schema di funzionamento sistema Twin Stage Serie [47]	60
Figura 2.33-Schema di funzionamento Sistema Twin Stage Sequenziale parallelo [46].....	61
Figura 2.34-Turbocompressore elettrico[49]	62
Figura 2.35-Schema di funzionamento di un turbocompressore elettrico [49].....	63
Figura 2.36-Diagramma di alzata delle valvole	64
Figura 2.37-Principio di funzionamento del sistema di fasatura variabile VVT [59]	65
Figura 2.38-Esempio delle varie strategie di alzata mediante un sistema VVA in funzione della caratteristica motore [46]	66
Figura 2.39-Perdite di pompaggio per un motore ICE senza convenzionali [46]	66
Figura 2.40-Perdite di pompaggio mediante sistemi VVA e strategia EIVC [46].....	67
Figura 2.41-Rappresentazione del ciclo di pompaggio a basse carico [46]	67
Figura 2.42-Perdite per pompaggio con e senza EGR [46]	68
Figura 2.43-EGR interna motori ad accensione comandata [46].....	68
Figura 2.44-Confronto della pressione dei cilindri tra la modalità di funzionamento standard e quella funzionamento parziale [60].....	69
Figura 2.45-Confronto tra le mappe motore con e senza CDA [46]	69
Figura 2.46-Pulsazioni di coppia con disattivazione del cilindro, rispetto alla modalità a 10 cilindri [60]	70
Figura 2.47-Confronto tra i lavori di pompaggio per un motore 1600 cm3, 4 cilindri @2000 rpm - 2bar [46]	71

Figura 2.48-Riduzione dei consumi con le diverse tecnologie applicate su un motore 1600 cm ³ , 4 cilindri @2000 rpm – 2 e 3 bar [46].....	71
Figura 2.49-Confronto tra un ciclo tradizionale ed un ciclo Miller per un motore 4T [52].....	72
Figura 2.50-Profilo di fasatura delle valvole del ciclo Miller di EIVC o LIVC [53].....	73
Figura 2.51-Confronto tra un motore 3.0 V6 aspirato @200 CV Vs motore 2.0 L4 turbo @200 CV [57]	74
Figura 2.52-Confronto tra le caratteristiche di coppia tra 1.4TC Vs 1.8NA [46]	75
Figura 2.53-Piano quotato motore 1.8 NA (MPFI, Multipoint Port Fuel Injection) [46]	76
Figura 2.54-Piano quotato motore 1.4 TC [46].....	77
Figura 2.55-Confronto tra le mappe motore dei due motori a parità di coppia e velocità angolare [46]	77
Figura 2.56-Impatto del DSF sulla riduzione dei consumi [46].....	78

CAPITOLO 3 -Trasmissione nei veicoli tradizionali ed ibridi

Figura 3.1-Forze che agiscono sul veicolo che viaggia in salita [13]	80
Figura 3.2-Forza e Potenza richieste in funzione della velocità per un veicolo di medie dimensioni [13].....	83
Figura 3.3-Iperbole di trazione ideale [15]	84
Figura 3.4-Iperbole di trazione ideale con la caratteristica del motore [15]	85
Figura 3.5-Iperbole di trazione ideale e reale con la caratteristica del motore[13].....	85
Figura 3.6-Iperbole di trazione ideale con un motore ICE ed un cambio di velocità a 4 rapporti[13].....	86
Figura 3.7-Richiesta della coppia massima alle ruote Vs Mappa motore con consumi specifici[14]	86
Figura 3.8-Schema del sincronizzatore [21]	88
Figura 3.9-Confronto tra volano singolo e bi-massa.....	89
Figura 3.10-Esempio di frizione monodisco a secco con molla a diaframma [21].....	91
Figura 3.11-Differenti tipi di frizione usate negli autoveicoli [20].....	91
Figura 3.12-Esempio di una frizione multidisco [21]	92
Figura 3.13-Esempio di frizione a dischi multipli [21].....	92
Figura 3.14-Immagine di innesco e disinnesco della frizione [21]	93
Figura 3.15-Frizione automatica ad azione elettromagnetica di tipo Ferlec [21].....	94
Figura 3.16-Sezione di un giunto idraulico ed esempio di circolazione dell'olio all'interno di esso [21].....	95
Figura 3.17-Schema semplificato di un convertitore di coppia	96
Figura 3.18-Ciclo di flusso nel convertitore [20].....	96
Figura 3.19-Schema costruttivo di un convertitore di coppia [23]	97
Figura 3.20-Comparazione tra comfort e consumi per differenti tipi di trasmissioni [65]	99
Figura 3.21-Diagramma qualitativo di forza e velocità quando si effettua il cambio marcia manualmente[13]	99
Figura 3.22-Rappresentazione di un cambio a 4 marce nelle 3 varianti: in cascata, a contralbero e a doppio contralbero [13]	100
Figura 3.23-Esempio di un cambio manuale a 5 rapporti a contralbero o two stage [21].....	101
Figura 3.24-Cambio dual stage ZF -7MT	102
Figura 3.25-Esempio di cambio robotizzato con attuatori elettroidraulici [21]	103
Figura 3.26-Two-stage 7-speed AMT (Getrag) [13].....	104
Figura 3.27-7-speed passenger car AMT Getrag 247 [13]	105
Figura 3.28-Schema semplificato di un riduttore epicicloidale [23].....	106

Figura 3.29-Esempio di un rotismo epicicloidale di Ravigneaux [13]	107
Figura 3.30-Schema esemplificato del cambio ZF HP26 [13].....	107
Figura 3.31-Rappresentazione della trasmissione ZF HP26	108
Figura 3.32-Diagramma qualitativo di forza e velocità quando si effettua il cambio marcia automatico[13]	109
Figura 3.33-Schema semplificato di un cambio DCT con 7 marce [21].....	109
Figura 3.34-Esempio della trasmissione della coppia in un cambio DCT	110
Figura 3.35-Sezione principale con flussi di potenza di un cambio a 6 velocità DSG VW [13]	111
Figura 3.36-Schema semplificato della trasmissione automatica utilizzata sui veicoli ibridi paralleli [13]	113
Figura 3.37-Sezione costruttiva del cambio ZF HP 26 [13]	115
Figura 3.38-Diagramma qualitativo di forza e velocità quando si effettua il cambio marcia CVT[13].....	116
Figura 3.39-Tipologie di trasmissioni a variazione continua [13]	116
Figura 3.40-Configurazione di una trasmissione CVT a cinghia elastomerica [23]	117
Figura 3.41-Trasmissioni CVT a catena metallica [23].....	117
Figura 3.42-Esempio degli elementi costituenti la cinghia dei cambi CVT [13].....	118
Figura 3.43-Tipo di trasmissione CVT- dual cone [23].....	119
Figura 3.44-Schema di una trasmissione CVT idrostatica [23]	120
Figura 3.45-Tipici andamenti della cilindrata di pompa e motore e della pressione a seconda della velocità di rotazione in uscita dalla trasmissione idrostatica. [23]	121
Figura 3.46-Esploso del sistema Toyota [5]	122
Figura 3.47-Ingrandimento del power split device [20].....	123
Figura 3.48-Configurazione della catena cinematica della trasmissione P310 [19]	123
Figura 3.49-Diagramma della trasmissione ibrida power split con indicazione del flusso di energia [17].....	124
Figura 3.50-Schema trasversale della singola trasmissione [18]	125
Figura 3.51-Sezione trasversale del motore e delle unità di trasmissione [16]	126

CAPITOLO 4 - Overview sui componenti del powertrain elettrico

Figura 4.1-Configurazione generale dei veicoli elettrici [8]	127
Figura 4.2-Configurazione dei veicoli elettrici dovuta alla variazione dei sistemi di stoccaggio dell'energia[31]	128
Figura 4.3- Configurazione dei veicoli elettrici dovuta alla variazione nella disposizione del sistema di propulsione..	129
Figura 4.4- Configurazione dei veicoli elettrici dovuta alla variazione del tipo di differenziale, meccanico o elettrico[31]	129
Figura 4.5- Configurazione dei veicoli elettrici dovuta alla variazione del tipo di trasmissione della potenza	130
Figura 4.6-Rappresentazione delle differenti configurazioni per i motori a ruota:	131
Figura 4.7-Circuito equivalente di una batteria a 6 celle [32].....	133
Figura 4.8-Variazione della capacità della carica di una batteria al piombo acido al variare della velocità di scarica[32]	134
Figura 4.9-Diagramma di Ragone [8].....	135
Figura 4.10-Funzionamento di una cella agli ioni di litio [33]	139
Figura 4.11-Circuito inverter a ponte H per la produzione di corrente alternata monofase [32]	141
Figura 4.12-Grafico di un inverter monofase commutato a onda quadra [32].....	142

Figura 4.13-Sequenza di commutazione del metodo PWM per la produzione approssimativa di una corrente sinusoidale alternata [32].....	143
Figura 4.14-Generico grafico tensione/tempo per un inverter a modulazione di impulsi [35]	144
Figura 4.15-Circuito inverter trifase [32].....	144
Figura 4.16-Schema di commutazione per generare corrente alternata trifase [32].....	145
Figura 4.17-Grafico del ciclo completo della tensione in funzione del tempo per il sistema di generazione AC trifase ipotizzando un carico resistivo [32].....	145
Figura 4.18-Principali tipologie di motore elettrici utilizzati per la trazione dei veicoli elettrici [31].....	147
Figura 4.19-Esempio di motore Brushed a CC [38]	148
Figura 4.20-Schema di un motore elettrico in CC [38].....	149
Figura 4.21-Diagramma coppia/velocità per un motore Brushed CC[32]	151
Figura 4.22-Rappresentazione della variazione della caratteristica coppia/velocità di un motore CC al variare della tensione e del flusso [32]	152
Figura 4.23-Mappa di efficienza di un tipico motore brushed CC a magneti permanenti [32].....	155
Figura 4.24-Schema di un motore elettrico Brushed da usare come freno dinamico [32]	156
Figura 4.25-Sistema di frenata rigenerativa di un motore CC [32].....	157
Figura 4.26-Schema del funzionamento base del motore Brushless [32]	159
Figura 4.27-Schema di un motore BLDC con 3 bobine sullo statore [32].....	159
Figura 4.28-Motore Zytec BLDC da 100 kW raffreddato ad olio per applicazioni automobilistiche [32]	160
Figura 4.29-Schema del funzionamento base del motore a riluttanza di commutazione [32]	161
Figura 4.30-Possibili strutture dei rotori[39]	162
Figura 4.31-Schema di funzionamento di un motore SR con un rotore a quattro poli salienti [32].....	163
Figura 4.32-Esempio di rotore e statore in un motore SR [32]	163
Figura 4.33-Schema di funzionamento di un motore ad induzione con rotore a gabbia [32]	164
Figura 4.34-Rappresentazione di un campo magnetico rotante in un motore a induzione [32]	164
Figura 4.35-Curva coppia/velocità di un motore ad induzione [32]	165
Figura 4.36-La mappa di efficienza per un motore BLDC da 30kW [32]	167
Figura 4.37-Grafico in scala logaritmica indicante la potenza specifica di differenti tipi di motore elettrico a diverse potenze (in continuo). Le potenze specifiche di picco saranno superiori di circa il 50% [32].....	167
Figura 4.38-Grafico rappresentante il rendimento di differenti tipologie di motori elettrici [34].....	168
Figura 4.39-Single speed transmission [34].....	169
Figura 4.40-Two speed dual clutch transmission [34]	170
Figura 4.41-Twinspeed transmission with two planetary gear sets [34].....	171
Figura 4.42-Architettura Audi E-tron 55 [42].....	171
Figura 4.43-Esploso pacco batterie [42]	173
Figura 4.44-Posizione del motopropulsore elettrico sull'assale anteriore [42]	173
Figura 4.45-Esploso powertrain anteriore [42].....	174
Figura 4.46-Powertrain anteriore Audi E-tron 55 [42]	174
Figura 4.47-Caratteristiche di coppia e potenza motore anteriore Audi E-tron 55 [42].....	175
Figura 4.48-Rotore del motore anteriore (APA250) Audi E-tron.....	175
Figura 4.49-Statore del motore anteriore (APA 250) Audi E-tron [42].....	176

Figura 4.50-Sezione e schema esemplificativo Trasmissione anteriore (Schaeffler) [42]	176
Figura 4.51-Schema e funzionamento PWT anteriore Audi E-tron 55 [42]	177
Figura 4.52-Posizione del motopropulsore elettrico sull'assale posteriore [42].....	177
Figura 4.53-Esploso powertrain posteriore [42]	178
Figura 4.54-Esploso powertrain posteriore [42]	178
Figura 4.55-Caratteristiche di coppia e potenza motore posteriore Audi E-tron 55 [42].....	179
Figura 4.56-Rotore del motore posteriore (AKA 320) Audi E-tron 55 [42].....	179
Figura 4.57-Statore del motore posteriore (AKA 320) Audi E-tron 55 [42]	179
Figura 4.58-Sezione e schema esemplificativo Trasmissione posteriore (Schaeffler) [42]	180
Figura 4.59-Schema e funzionamento PWT posteriore Audi E-tron 55 [42]	181

CAPITOLO 5 - Installazione, analisi e costo dei sistemi ibridi

Figura 5.1-Componenti FEAD [6].....	185
Figura 5.2-Nell'immagine di SX è il motore che guida l'alternatore, mentre nell'immagine di DX avviene il contrario [6]	185
Figura 5.3-Immagine del nuovo sistema ibrido montato FCA	187
Figura 5.4-Esempio di sistema P1F MHEV a 48 V [2]	189
Figura 5.5-Peso della trasmissione in funzione della coppia trasmessa dei diversi cambi ZF [11]	192
Figura 5.6-Immagine del sistema ibrido Maserati	193
Figura 5.7-Due differenti configurazioni del sistema MHEV P2 48V [2]	193
Figura 5.8-Schema del sistema Mercedes EQ Power [27].....	196
Figura 5.9-Cambio a doppia frizione 8F-DCT [27].....	197
Figura 5.10-Rapporti costi/benefici per differenti veicoli e tecnologie	200
Figura 5.11-Impatto delle diverse tecnologie sui prezzi del veicolo.....	201
Figura 5.12-Analisi comparativa dei sistemi	202

Indice delle tabelle

CAPITOLO 1 - Powertrain: definizione e classificazione

Tabella 1.1-Riassunto caratteristiche veicoli ibridi.....	7
Tabella 1.2-Modalità operativa di un veicolo serie.....	8
Tabella 1.3-Modalità operative di un veicolo parallelo	11
Tabella 1.4-Modalità operative di un veicolo serie-parallelo	13
Tabella 1.5-Modalità operative di un veicolo ibrido complesso.....	14
Tabella 1.6-Caratteristiche principali P1F	17
Tabella 1.7-Caratteristiche principali P1R.....	17
Tabella 1.8-Caratteristiche principali P2	17
Tabella 1.9-Caratteristiche principali layout P3	20
Tabella 1.10-Caratteristiche principali veicolo BEV P4.....	20
Tabella 1.11-Caratteristiche principali veicolo P1F+P4	22

CAPITOLO 2 - Motore ICE e tecnologie ad esso associate

Tabella 2.1-Differenti valori di potere calorifico e dosatura per i diversi combustibili [46]	32
---	----

CAPITOLO 3 -Trasmissione nei veicoli tradizionali ed ibridi

CAPITOLO 4 - Overview sui componenti del powertrain elettrico

Tabella 4.1-Valori tipici di tensione di cella per vari tipi di accumulatori elettrochimici [8].....	132
Tabella 4.2-Minima efficienza di un motore trifase ad induzione al variare della potenza [32].....	166
Tabella 4.3-Differenti tipi di motore utilizzati nell'industria automobilistica.....	168
Tabella 4.4- Scheda tecnica Audi E-tron 55 [42].....	172

CAPITOLO 5 - Installazione, analisi e costo dei sistemi ibridi

Tabella 5.1-Delta peso installazione di un sistema P1F 12V su un veicolo tradizionale	184
Tabella 5.2-Confronto scheda tecnica tra 500 hybrid e tradizionale.....	186
Tabella 5.3- Delta peso installazione di un sistema P1F 48V su un veicolo tradizionale	190
Tabella 5.4-Rapporti di trasmissione per i due differenti cambi ZF (HP 70 Vs HP 75)	191
Tabella 5.5-Confronto scheda tecnica tra Ghibli Hybrid e tradizionale.....	192
Tabella 5.6-Delta peso installazione di un sistema P2F 48V (no plug-in) su un veicolo tradizionale	195
Tabella 5.7-Confronto scheda tecnica tra Mercedes-Benz 250 e 250e Plug-in Hybrid	197
Tabella 5.8-Massa di riferimento media per ogni segmento	198
Tabella 5.9-Emissioni di CO ₂ medie per ogni segmento	199
Tabella 5.10-Caratteristiche tecniche motore 1.4 T-jet 120 CV	199

Tabella 5.11-Caratteristiche tecniche cambio C514	199
Tabella 5.12-Prezzo medio indicativo per le differenti categorie di veicoli	202

Bibliografia

- [1] Eriksson, Lars, and Lars Nielsen. Automotive: Modeling and Control of Engines and Drivelines, John Wiley & Sons, Incorporated, 2014.
- [2] <https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/hybrid/mild-hybrid-electric-vehicle-mhev-introduction/>
- [3] Turco, Massimiliano. Powertrain ibride da competizione: sicurezza, controllo e automatizzazione, Tesi di dottorato, Politecnico di Torino, 2013.
- [4] Zoppello, Michele. Power management nei veicoli elettrici ibridi, Tesi di laurea, università degli studi di Padova, 2011
- [5] <https://www.autotecnica.org/toyota-hybrid-synergy-drive-eccellenza-giapponese/>
- [6] Gabriele Ferlito, Adaptation of low cost hybrid architecture to a general purpose platform, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2017
- [7] N° 775/2020 Quattroruote
- [8] Vincenzo Graziano Bertucci, Un modello analitico per la stima dei consumi di veicoli per trasporto merci con propulsione diesel o trazione elettrica. Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, 2013
- [9] <https://www.newsauto.it/flat/motore-fiat-ibrido-mhev-firefly-cambio-6-marce-nuovo-2020-238641/>
- [10] <https://www.motori.it/gallerie/motore-1-0-3-cilindri-firefly-mild-hybrid-per-fiat-500-hybrid-e-panda-hybrid-immagini-ufficiali/>
- [11] https://www.zf.com/products/en/cars/products_29289.html
- [12] Luigi D'addario, Studio di differenti architetture per veicoli a propulsione ibrida al variare della taglia del powertrain diesel e della macchina elettrica. Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2019
- [13] Naunheimer, Harald; Bertsche, Bernd; Ryborz Joachim; Novak, Wolfgang: Automotive Transmissions-Fundamentals, Selection, Design and Application, Second Edition. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [14] Peng Dong, Optimized Shift Control in Automatic Transmissions with respect to Spontaneity, Comfort, and Shift Loads, Tesi di laurea, Ruhr-Universität Bochum, 2015
- [15] <https://x-engineer.org/automotive-engineering/drivetrain/transmissions/why-do-we-need-gears/>
- [16] <https://global.toyota/en/download/8596127>

- [17] Ivan M. Trindade, Agenor de Toledo Fleury, Modelling, simulation and analysis of operation modes in a series-parallel powertrain with torque-split device, Polytechnic School of the University of Sao Paulo, 2014
- [18] <https://autotechreview.com/technology/plug-in-hybrid-system-in-the-toyota-prius-phv>
- [19] <https://www.semanticscholar.org/paper/Dual-Mode-Power-Split-Transmission-for-Hybrid-Mashadi-Emadi/8a9f742ce9de3595caf4648ed23b741a045c0f17#paper-header>
- [20] David A. Crolla; Automotive Engineering Powertrain, Chassis System and Vehicle Body, Elsevier, First edition 2009
- [21] Lorenzo Angelini, Valutazione della massa equivalente per i veicoli da trasporto pubblico urbano: effetti della trasmissione, tesi di laurea, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, 2015
- [22] <https://www.quattroruote.it/guide/componenti-auto/volano.html>
- [23] Martina Scamperle, sviluppo di un modello previsionale del rumore di unita' cvt idrauliche ed applicazione al caso di una trasmissione idromeccanica dual-stage per autobus urbano, tesi di laurea, Università degli studi di Padova, 2013
- [24] https://www.alvolante.it/da_sapere/abc-del-cambio-automatico-convertitore-coppia-347273
- [25] <https://vehiclecue.it/convertitore-coppia/11583/>
- [26] Koos Van Berkel, Theo Hofman, Alex Serrarens, Maarten Steinbuch, Fast and smooth clutch engagement control for dual-clutch transmissions, Department of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, 2013
- [27] <https://www.newsauto.it/mercedes-benz/mercedes-classe-a-ibrida-plug-in-elettrico-benzina-autonomia-prezzo-2019-213345/#foto-14>
- [28] <https://www.alvolante.it/news/mercedes-e-b-versioni-ibride-364495>
- [29] <https://www.motorionline.com/2020/06/11/mercedes-classe-a-250e-ibrida-plug-in-caratteristiche-dimensioni-motore-prezzo-consumi-2020/>
- [30] <https://www.autoappassionati.it/mercedes-classe-a-ibrida-plug-in-info/>
- [31] Pure electric vehicles, K. T. Chau, The University of Hong Kong, People's Republic of China, Woodhead Publishing Limited, 2014
- [32] Electric Vehicle Technology Explained, James Larminie, John Lowry, John Wiley & Sons Ltd, 2003

- [33] Emanuele Milo, Modellazione dinamica di celle a 5 [V] e realizzazione di celle ad alta potenza. Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2018
- [34] Carlos Daniel Pires Rodrigues, Design of a high-speed transmission for an electric vehicle. Master in ingegneria meccanica, Unidade de Tribologia, Vibrações e Manutenção Industrial-Departamento de Engenharia Mecânica-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2018.
- [35] <http://www.elettrotecnica.unina.it/files/rubinacci/upload/Convertitori.pdf>
- [36] Claudio Menin, Convertitori dc/dc push-pull, tesi di laurea, Università degli studi di Padova, 2013
- [37] <https://shop.jonathan.it/it/blog/post/differenze-motore-a-spazzole-brushed-e-senza-spazzole-brushless>
- [38] <http://www.edutecnica.it/elettrotecnica/motoredc/motoredc.htm>
- [39] <http://www.die.ing.unibo.it/pers/cristofo/didattica/dispense/13sinc.pdf>
- [40] <https://www.newsauto.it/guide/motore-auto-elettrica-2020-251237/>
- [41] <https://www.gripdetective.it/news/audi-e-tron-110-chilometri-autonomia-in-10-minuti-di-ricarica>
- [42] <https://www.audi-mediacycenter.com/en/search?query=e-tron%2055%20quattro&type=image&utf8=%E2%9C%93>
- [43] <https://www.youtube.com/watch?v=qTf-rHQjkU>
- [44] J. Liebl (Hrsg.), Der antrieb von morgen 2019, Springer Vieweg, 2019
- [45] <https://static.nhtsa.gov/odi/tsbs/2019/MC-10155750-9999.pdf>
- [46] Appunti corso di propulsione dei veicoli terrestri prof. Federico Millo, Politecnico di Torino
- [47] Dalila Bellomare, Analisi critica di strategie innovative di engine downsizing mediante simulazione 1D, Università degli studi di Modena e Reggio Emilia, 2013
- [48] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315018911#cebibsec1>
- [49] Manrico Baccaro, Valutazione delle efficienze in powertrain equipaggiate con turbocompressori elettrici, Tesi di laurea, Politecnico di torino, 2019
- [50] <https://www.autotecnica.org/ciclo-atkinson-ciclo-miller-e-motore-hcci/>

- [51] <https://www.giornalemotori.com/2019/02/22/il-motore-endotermico-il-ciclo-atkinson-miller-ed-i-propulsori-che-li-utilizzano/?cn-reloaded=1>
- [52] <https://www.formulapassion.it/automoto/tech/motore-ciclo-miller-460195.html>
- [53] Tengku Nordayana Akma, Miller cycle combustion strategy for downsized gasoline engines, Loughborough University, Tesi di laurea, 2017
- [54] Carmelina Abagnale, Sviluppo di un sistema di attuazione variabile VVA elettroidraulico per motori pluricilindrici, Università degli Studi di Napoli Federico II, Tesi di dottorato, 2009
- [55] Luca Scaggion, Analisi fluidodinamica tramite CFD e ottimizzazione del processo di riempimento nei motori di formula SAE, Tesi di laurea, Università degli studi di Padova, 2019
- [56] Giancarlo Ferrari, Motori a combustione interna, Esculapio Editore, 2° edizione, 2016
- [57] Chinmay Patil, Sanjyot Varade and Swapnil Wadkar, A Review of Engine Downsizing and its Effects, International Journal of Current Engineering and Technology, INPRESSCO, 2017
- [58] http://www.arturo.derisi.unisalento.it/Downloads/Propulsione_Automobilistica/risonanza%20e%20sovralimentazione.pdf
- [59] <http://www.ffl.it/primapagina/tecnica/valvole/fasatura.htm>
- [60] Giuseppe Musicco, Development of simulation methodologies and analysis of advanced VVA and Cylinder Deactivation strategies for Diesel engines, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2019
- [61] <https://www.ipcc.ch/>
- [62] <https://www.robeco.com/it/approfondimenti/2018/11/electric-vehicles-coming-of-age.html>
- [63] Luca Cominelli, Sviluppo di un modello per la simulazione di veicoli convenzionali e ibridi: validazione ed implementazione di una strategia di controllo rule-based, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2018
- [64] David A. Crolla, Automotive Engineering-Powertrain, Chassis System and Vehicle Body, Elsevier Inc., 2009
- [65] Andrea Pozzi, Study on the lubrication control of a Wet Dual Clutch Transmission, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, 2019
- [66] EEA Report N° 02/2020, Monitoring CO2 emissions from passenger cars and vans in 2018, 2020

[67] EEA Report N° 13/2018, Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives, TERM 2018: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report, 2018