

# POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

## **Studio numerico di architetture ibride per un trattore specializzato**



**Politecnico  
di Torino**

### **Relatori**

Aurelio Somà  
Francesco Mocera

### **Candidato**

Valerio Martini

Anno accademico 2020-2021

# Introduzione

Negli ultimi anni l'inquinamento atmosferico è divenuto uno dei temi più discussi, soprattutto per l'impatto che esso ha sulla salute umana e sull'ambiente. Questo tipo di inquinamento, che comprende tutti gli agenti chimici, biologici e fisici che modificano la naturale composizione dell'atmosfera, ha come cause principali sia fonti naturali, sia fonti antropiche. Tra le fonti antropiche è importante il contributo all'inquinamento dovuto a veicoli, sia stradali che da lavoro, pertanto, in ragione della crescente preoccupazione per la qualità dell'aria, in molti paesi sono state introdotte una serie di norme che limitano la quantità di inquinanti che possono essere prodotti da un veicolo. In linea generale tali norme operano una distinzione in base al tipo di veicolo, al tipo di motore e alla sua taglia. Dal momento che il processo di elettrificazione dei veicoli stradali ha dimostrato di poter ridurre le emissioni prodotte localmente e allo stesso tempo di poter realizzare veicoli molto efficienti, anche nel settore delle macchine mobili non stradali, denominate *NRMM*, acronimo inglese di *Non Road Mobile Machinerics*, tale processo sta iniziando a prendere piede. Il presente studio si concentra su una particolare tipologia di veicolo, ovvero un trattore da frutteto, e si prefigge l'obiettivo di fare un confronto tra una architettura di tipo tradizionale ed una serie di alternative ibride. Nel capitolo 1 viene proposta una panoramica generale delle principali tipologie di inquinanti prodotte dai motori a combustione interna, in seguito si introduce brevemente la norma europea sulle emissioni dedicata ai veicoli appartenenti alla categoria NRMM. Dal momento che i trattori tradizionali montano motori Diesel, è importante elencare quali siano i principali sistemi di controllo degli inquinanti per tali motori e come essi impattino sulla progettazione e sulla realizzazione del veicolo. Le macchine da lavoro dotate di motore a combustione interna sono dimensionate in base alle condizioni di lavoro più estreme, pertanto risultano sovradimensionate per la maggior parte delle missioni che dovranno portare a termine durante la loro vita utile. Questo sovradimensionamento implica che, per tutte le operazioni a carico relativamente basso, il motore lavorerà in punti a bassa efficienza. Un'unità termica più grande, come si può evincere dalla normativa sulle emissioni, necessiterà inoltre di sistemi di trattamento dei gas di scarico più elaborati e, di conseguenza, più costosi ed ingombranti. Da qui nasce l'idea di realizzare un powertrain ibrido, il quale permette un downsizing dell'ICE, ciò consente di operare a maggiori efficienze, con conseguente riduzione dei consumi, ed inoltre permette di rientrare in una categoria, secondo normativa, con vincoli meno stringenti sulle emissioni. Nella parte finale del primo capitolo vengono infine forniti alcuni cenni storici relativi al processo di elettrificazione dei veicoli. Il capitolo 2 si concentra sulle principali tipologie di veicoli ibridi e sulle sole differenze, passando successivamente all'elenco dei sistemi di stoccaggio dell'energia elettrica a bordo e delle caratteristiche costruttive delle macchine elettriche più usate nel settore. A titolo di esempio, si forniscono infine alcuni esempi di macchine da lavoro ibride realizzate negli ultimi anni. Nel capitolo 3 vengono illustrati e spiegati i modelli usati nelle simulazioni, le quali sono state realizzate nell'ambiente Simulink. Per ogni powertrain sono state modellate le sorgenti di potenza (unità termiche ed unità elettriche), la trasmissione, la dinamica longitudinale del veicolo e l'eventuale ESS. Per le architetture ibride si è scelto, come sistema di stoccaggio dell'energia elettrica, un pacco batterie con capacità pari a 16 kWh. Lo scopo delle simulazioni non è fornire dei valori esatti dei consumi o delle prestazioni, quanto invece consentire di confrontare le varie alternative in maniera affidabile. Il capitolo 4 si focalizza sulle simulazioni effettuate, illustrando le condizioni di prova, le logiche di controllo adottate e i risultati ottenuti. Per ciascun powertrain sono state valutate le prestazioni in

accelerazione, le prestazioni in pendenza con partenza fermo, i consumi orari relativi ad alcune lavorazioni e i consumi di gasolio su alcuni cicli ipotetici di lavoro giornaliero. Nell'ultimo capitolo infine vengono valutati e commentati i risultati ottenuti, ultimando il confronto tra le varie alternative. Dove possibile, sono state infine proposte alcune possibili soluzioni per superare le criticità delle varie architetture.



# Indice

<b>PROCESSO DI ELETTRIFICAZIONE DEI VEICOLI DA LAVORO .....</b>	<b>1</b>
EMISSIONI DEGLI INQUINANTI NEI VEICOLI .....	1
NORMATIVA SULLE EMISSIONI DI INQUINANTI PER NON ROAD MOBILE MACHINERIES .....	4
CONTROLLO DELLE EMISSIONI DI INQUINANTI NEI VEICOLI AD ACCENSIONE PER COMPRESSIONE .....	8
IL PROCESSO DI ELETTRIFICAZIONE DEI VEICOLI: CENNI STORICI, MOTIVAZIONI E IMPATTO SULLE EMISSIONI ...	12
<b>ARCHITETTURE IBRIDE PER APPLICAZIONI DA LAVORO .....</b>	<b>15</b>
PRINCIPALI TIPOLOGIE DI ARCHITETTURE IBRIDE .....	15
FATTORE DI IBRIDIZZAZIONE DI UN POWERTRAIN IBRIDO .....	19
SISTEMI DI STOCCAGGIO ENERGIA A BORDO VEICOLO .....	20
TIPOLOGIE DI MACCHINE ELETTRICHE PER APPLICAZIONI VEICOLISTICHE .....	25
ESEMPI DI MACCHINE DA LAVORO IBRIDE PRODOTTE .....	33
<b>MODELLAZIONE DI POWERTRAIN IBRIDI PER UN TRATTORE DA FRUTTETO.....</b>	<b>37</b>
PANORAMICA GENERALE SUI TRATTORI DA FRUTTETO .....	37
MODELLAZIONE DELLA DINAMICA LONGITUDINALE .....	39
MODELLAZIONE DELLA PTO .....	41
MODELLAZIONE POWERTRAIN CONVENZIONALE .....	42
MODELLAZIONE DEL POWERTRAIN SERIE.....	44
MODELLAZIONE DEL POWERTRAIN PARALLELO .....	46
MODELLAZIONE DEL POWERTRAIN CON TRASMISSIONE IDROSTATICA.....	47
MODELLAZIONE DEI CONSUMI .....	49
<b>SIMULAZIONE E CONFRONTO DELLE PRESTAZIONI E DEI CONSUMI DELLE VARIE ARCHITETTURE .....</b>	<b>51</b>
STRATEGIE DI CONTROLLO DEI POWERTRAIN IBRIDI .....	51
PRESTAZIONI IN ACCELERAZIONE E IN PENDENZA .....	54
PRESTAZIONI SUI CONSUMI ORARI CON ATTREZZATURE E RIMORCHI.....	55
CONFRONTO DEI CONSUMI DI GASOLIO SU CICLI DI LAVORO .....	62
<b>VALUTAZIONI E CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI OTTENUTI NELLE SIMULAZIONI .....</b>	<b>64</b>
VALUTAZIONE DEI RISULTATI NELLE PROVE IN ACCELERAZIONE E PENDENZA .....	64
VALUTAZIONE DEI CONSUMI ORARI CON ATTREZZATURE E RIMORCHI IN MODALITÀ CHARGE DEPLETING .....	67
VALUTAZIONE DEI CONSUMI DI GASOLIO SU CICLI DI LAVORO .....	68
AUTONOMIA IN MODALITÀ FULL ELECTRIC E RECUPERO ENERGIA IN FRENATA RIGENERATIVA PER IL POWERTRAIN SERIE II .....	69
<b>RIFERIMENTI E BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>73</b>
CAPITOLO 1.....	73
CAPITOLO 2.....	73
CAPITOLO 3.....	74

CAPITOLO 4.....	75
CAPITOLO 5.....	75



# Indice delle figure

FIGURA 1.1: CONTRIBUTO DELLE VARIE ATTIVITÀ UMANE ALLA PRESENZA DI INQUINANTI NELL'ATMOSFERA .....	3
FIGURA 1.2: MORTI A CAUSA DELL'INQUINAMENTO DELL'ARIA SECONDO LA WHO .....	4
FIGURA 1.3: CICLO NRTC .....	7
FIGURA 1.4: FUNZIONAMENTO DEL DOC .....	9
FIGURA 1.5: RENDIMENTO DI CONVERSIONE DEL DOC IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA .....	9
FIGURA 1.6: FILTRAGGIO DEL DPF .....	10
FIGURA 1.7: PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DELL'SCR.....	10
FIGURA 1.8: LAYOUT DI UN SISTEMA CON SCR .....	11
FIGURA 1.9: SCHEMA DI UNA TRAPPOLA LNT .....	11
FIGURA 1.10: PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DI UNA TRAPPOLA LNT .....	12
FIGURA 1.11: LE JAMAIS CONTENUTE IN ESPOSIZIONE .....	13
FIGURA 1.12: SCHEMA DELLA PALA CARICATRICE IBRIDA JOHN DEERE 644K .....	14
FIGURA 2.1: SCHEMA A BLOCCHI DI UN SHEV .....	15
FIGURA 2.2: SCHEMA DEI FLUSSI DI POTENZA IN UN POWERTRAIN IBRIDO SERIE .....	16
FIGURA 2.3: SCHEMA A BLOCCHI DI UN PHEV .....	17
FIGURA 2.4: SCHEMA DEI FLUSSI DI POTENZA IN UN PHEV.....	17
FIGURA 2.5: CLASSIFICAZIONE DEI PHEVS IN BASE ALLA POSIZIONE DELL'UNITÀ ELETTRICA .....	18
FIGURA 2.6: SCHEMA DI UN IBRIDO POWER SPLIT .....	19
FIGURA 2.7: CONFRONTO TRA ALCUNI ESS.....	21
FIGURA 2.8: CELLA ELETTROCHIMICA .....	21
FIGURA 2.9: FENOMENI DI DETERIORAMENTO DI UNA CELLA ELETTROCHIMICA .....	22
FIGURA 2.10: PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DI UNA FUEL CELL .....	24
FIGURA 2.11: SCHEMA DI UN FLYWHEEL ENERGY STORAGE SYSTEM.....	25
FIGURA 2.12: SCHEMA RAPPRESENTATE DEI CONDUTTORI PERCORSI DA CORRENTE E ATTRAVERSATI DA UN CAMPO MAGNETICO.....	25
FIGURA 2.13: AVVOLGIMENTI DISTRIBUITI.....	27
FIGURA 2.14: AVVOLGIMENTI DISTRIBUITI A PIATTINA .....	28
FIGURA 2.15: AVVOLGIMENTI CONCENTRATI.....	28
FIGURA 2.16: SEZIONE DI UN FILO LITZ.....	29
FIGURA 2.17: PERMEABILITÀ MAGNETICA SUL PIANO B-H PER MATERIALI FERROMAGNETICI.....	31
FIGURA 2.18: CICLO DI ISTERESI MAGNETICA.....	31
FIGURA 2.19: PROPRIETÀ DI ALCUNI MATERIALI USATI COME MAGNETI PERMANENTI .....	32
FIGURA 2.20: ESPLOSO DI UNA MACCHINA ELETTRICA SINCRONA A MAGNETI PERMANENTI INTERNI .....	32
FIGURA 2.21: SCHEMA DI UN ESCAVATORE IBRIDO SERIE-PARALLELO.....	33
FIGURA 2.22: SCHEMA DEL POWERTRAIN IBRIDO PARALLELO VOLVO L220F .....	34
FIGURA 2.23: SCHEMA DEL POWERTRAIN IBRIDO DELLA PALA CARICATRICE VOLVO LX1 .....	34
FIGURA 2.24: SCHEMA DEL POWERTRAIN MONTATO SUL SOLLEVATORE TELESCOPICO SVILUPPATO DALL'AZIENDA MERLO .....	35
FIGURA 2.25: SCHEMA DEL POWERTRAIN IBRIDO DEL TRATTORE AGRICOLO BELARUS 3022E .....	35
FIGURA 2.26: SCHEMA DEL POWERTRAIN DEL TRATTORE AGRICOLO RIGITRAC EWD 120.....	36
FIGURA 3.1: RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DI UNO STERZO PER TRATTORE AGRICOLO DA FRUTTETO.....	37
FIGURA 3.2: TRATTORE DA FRUTTETO MENTRE PASSA TRA I FILARI DI UN VIGNETO.....	38
FIGURA 3.3: TRATTORE DA FRUTTETO MENTRE ESEGUE UNA MANOVRA IN UNO SPAZIO RISTRETTO .....	39
FIGURA 3.4: MODELLO DELLA DINAMICA LONGITUDINALE DEL VEICOLO .....	40
FIGURA 3.5: PRESA DI POTENZA POSTERIORE SU UN TRATTORE .....	41
FIGURA 3.6: DALL'ALTO VERSO IL BASSO: CURVA DI COPPIA, CURVA DI POTENZA, CURVA DEI CONSUMI SPECIFICI DELL'UNITÀ TERMICA DEL CASO CONVENZIONALE.....	42
FIGURA 3.7: MODELLO SIMULINK PER LA SIMULAZIONE DEL POWERTRAIN CONVENZIONALE.....	43

FIGURA 3.8: DALL'ALTO VERSO IL BASSO: CURVA DI COPPIA, CURVA DI POTENZA, CURVA DEI CONSUMI SPECIFICI DELL'UNITÀ TERMICA IMPIEGATA NEI POWERTRAIN IBRIDI IN ESAME .....	44
FIGURA 3.9: MODELLO SIMULINK DEL POWERTRAIN SERIE .....	45
FIGURA 3.10: MODELLO SIMULINK DEL POWERTRAIN PARALLELO .....	46
FIGURA 3.11: MODELLO SIMULINK DEL POWERTRAIN CON TRASMISSIONE IDROSTATICA .....	47
FIGURA 3.12: MODELLO DELLA TRASMISSIONE IDROSTATICA .....	48
FIGURA 3.13: RENDIMENTO DEL GRUPPO IDROSTATICO A 1500 RPM .....	49
FIGURA 4.1: SCHEMA SEMPLIFICATO DELLA STRATEGIA DI CONTROLLO DEL PARALLELO E DELL'ELETTRICO-IDRAULICO.....	52
FIGURA 4.2: ANDAMENTO DEL SOC.....	52
FIGURA 4.3: DIAGRAMMA AD ALBERO SEMPLIFICATO DELLA STRATEGIA DI CONTROLLO DEL GENERATORE PER L'ARCHITETTURA SERIE .....	53
FIGURA 4.4: CONSUMI ORARI MOVIMENTAZIONE RIMORCHIO 6 T AL VARIARE DEL PUNTO DI LAVORO DELL'ICE .....	58
FIGURA 4.5: CONSUMI ORARI MOVIMENTAZIONE RIMORCHIO 10 T AL VARIARE DEL PUNTO DI LAVORO DELL'ICE .....	58
FIGURA 4.6: VARIAZIONE DELL'AUTONOMIA DEL POWERTRAIN SERIE IN MODALITÀ CD, NEL CASO MOVIMENTAZIONE RIMORCHIO 6 T, CON IL PUNTO DI LAVORO DELL'ICE .....	59
FIGURA 4.7: VARIAZIONE DELL'AUTONOMIA DEL POWERTRAIN SERIE IN MODALITÀ CD, NEL CASO MOVIMENTAZIONE RIMORCHIO 10 T, CON IL PUNTO DI LAVORO DELL'ICE .....	59
FIGURA 4.8: AUTONOMIA IN MODALITÀ CHARGE DEPLETING CON TRITURATORE.....	60
FIGURA 4.9: AUTONOMIA IN MODALITÀ CHARGE DEPLETING CON ATOMIZZATORE .....	60
FIGURA 4.10: AUTONOMIA IN MODALITÀ CHARGE DEPLETING CON ERPICE.....	61
FIGURA 4.11: AUTONOMIA IN MODALITÀ CHARGE DEPLETING DURANTE LA MOVIMENTAZIONE DI UN RIMORCHIO DA 6000 KG .....	61
FIGURA 4.12: AUTONOMIA IN MODALITÀ CHARGE DEPLETING DURANTE LA MOVIMENTAZIONE DI UN RIMORCHIO DA 10000 KG .....	62
FIGURA 5.1: CONFRONTO TRA LE PRESTAZIONI IN ACCELERAZIONE 0-40 KM/H CON RIMORCHIO DI 10000 KG E LA PRESENZA DI COMPONENTISTICA MECCANICA NELLA TRASMISSIONE (RAPPRESENTATA FUORI SCALA) .....	65
FIGURA 5.2: ANDAMENTO DEL TEMPO DI ACCELERAZIONE 0-40 KM/H CON RIMORCHIO DI 10000 KG IN FUNZIONE DEL COEFFICIENTE DI SOVRACCARICO DEL MOTORE ELETTRICO NEL CASO DEL SERIE II.....	67
FIGURA 5.3: SCHEMA DI UN POWERTRAIN POWER SPLIT IDRAULICO .....	67
FIGURA 5.4: VARIAZIONE DELLA DIMENSIONE DELL'ESS AL VARIARE DELLA POTENZA DELL'UNITÀ TERMICA IN UN POWERTRAIN IBRIDO.....	68



# Indice delle tabelle

TABELLA 1.1: PRINCIPALI INQUINANTI PRIMARI EMESSI DAI MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA .....	2
TABELLA 1.2: CATEGORIE DI MOTORI PREVISTE DALLA NORMATIVA NRMM .....	5
TABELLA 1.3: NRSC 8-MODE CYCLE .....	6
TABELLA 1.4: LIMITI DI EMISSIONE DELLA FASE V PER VEICOLI DELLA CATEGORIA NRE .....	8
TABELLA 2.1: VALORI TIPICI DI ALCUNI PARAMETRI DI DIMENSIONAMENTO IN FUNZIONE DEL TIPO DI RAFFREDDAMENTO .....	26
TABELLA 2.2: CONFRONTO TRA RAME E ALLUMINIO SU ALCUNE PROPRIETÀ .....	29
TABELLA 2.3: RIGIDITÀ DIELETTRICA DI ALCUNI MATERIALI .....	30
TABELLA 2.4: CLASSI DI ISOLAMENTO SECONDO NORMA CEI 60085 .....	30
TABELLA 3.1: CARATTERISTICHE PRINCIPALI DELLA DINAMICA LONGITUDINALE .....	43
TABELLA 3.2: CARATTERISTICHE PRINCIPALI DELL'ICE E DEL CAMBIO .....	43
TABELLA 3.3: PARAMETRI DEL SERIE I .....	45
TABELLA 3.4: PARAMETRI DEL SERIE II .....	45
TABELLA 3.5: PROPRIETÀ DEL PACCO BATTERIE .....	46
TABELLA 3.6: PARAMETRI PARALLELO I .....	46
TABELLA 3.7: PARAMETRI PARALLELO II .....	47
TABELLA 3.8: CARATTERISTICHE DEL CIRCUITO IDRAULICO .....	48
TABELLA 4.1: RISULTATI DELLE PROVE IN ACCELERAZIONE .....	54
TABELLA 4.2: RISULTATI DELLE PROVE RELATIVE ALLE PRESTAZIONI IN PENDENZA .....	55
TABELLA 4.3: POTENZA ASSORBITA DALLE VARIE ATTREZZATURE CONSIDERATE .....	57
TABELLA 4.4: CONFRONTO SUI CONSUMI ORARI TOTALI IN MODALITÀ CD .....	57
TABELLA 4.5: RISULTATI DEI CONSUMI DI GASOLIO SUI CICLI DI LAVORO GIORNALIERI .....	63
TABELLA 5.1: CONFRONTO TRA LE PRESTAZIONI DEL SERIE II SENZA SOVRACCARICO, DEL SERIE II CON SOVRACCARICO E DEL POWERTRAIN CONVENZIONALE .....	66
TABELLA 5.2: AUTONOMIA IN MODALITÀ FULL ELECTRIC .....	70
TABELLA 5.3: PENDENZE AFFRONTABILI IN MODALITÀ FULL ELECTRIC .....	70
TABELLA 5.4: RISULTATI DELLE PROVE DI FRENATA RIGENERATIVA TOTALE .....	70



# Capitolo 1

## Processo di elettrificazione dei veicoli da lavoro

### Emissioni degli inquinanti nei veicoli

Uno dei temi più affrontati e discussi degli ultimi anni è quello riguardante la qualità dell'aria, soprattutto nelle grandi città e nelle grandi metropoli. Con il progressivo aumento dei veicoli in circolazione e la presa di coscienza delle conseguenze ambientali, sono state introdotte col tempo norme sempre più severe sulle emissioni dei motori a combustione interna. L'introduzione di vincoli più stringenti ha impegnato con sforzi via via più improbi le aziende produttrici di veicoli, le quali hanno iniziato un importante lavoro di elettrificazione di powertrain al fine di poter soddisfare sia le richieste prestazionali, sia i vincoli sulle emissioni. Per affrontare il tema dell'elettrificazione del parco veicoli delle aziende è necessario in primis conoscere quali sono i principali inquinanti prodotti dai motori a combustione interna, i quali sono riportati in tabella 1.1. Essendo l'aria una miscela eterogenea formata una particella di varia natura e dimensione, essa si considera inquinata quando la sua composizione eccede i limiti previsti dalla legge.

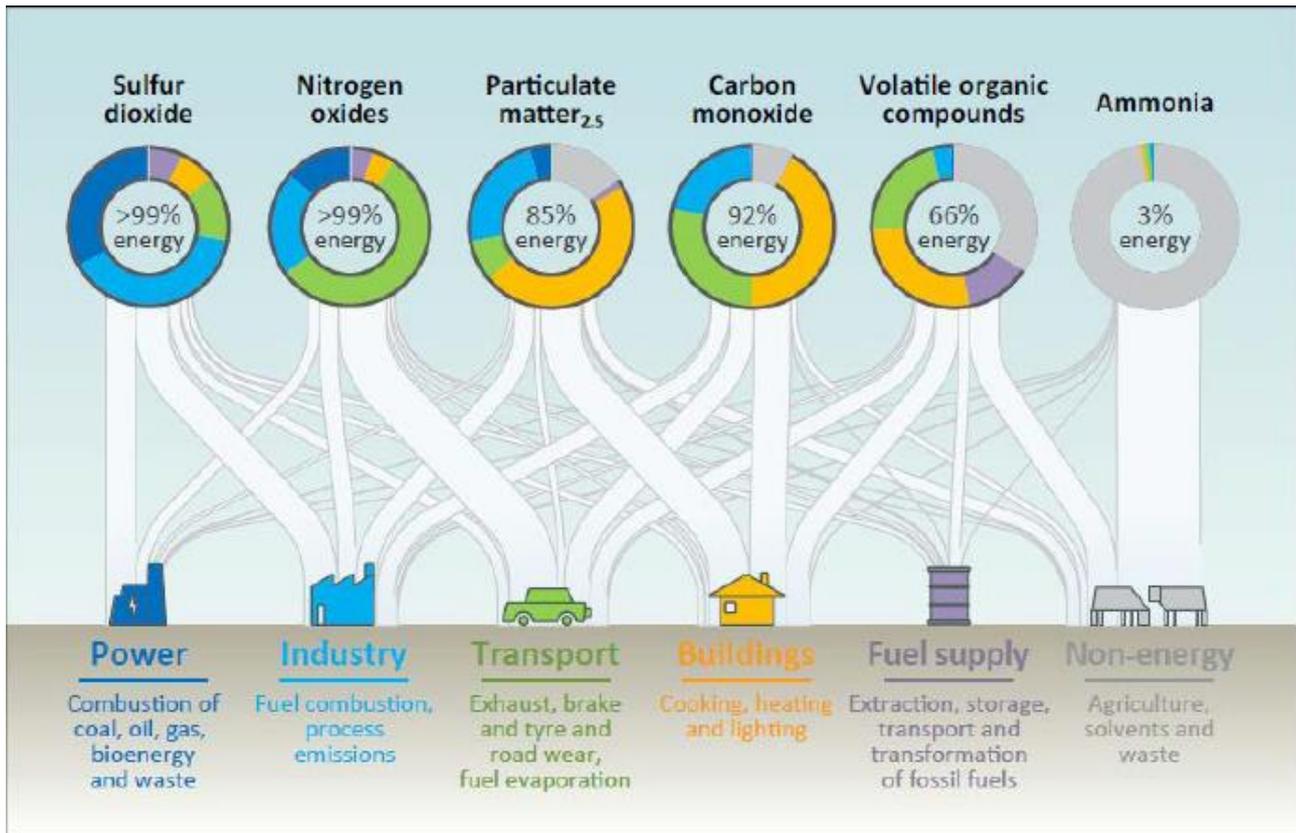
Inquinante	Descrizione	Effetti
Ossidi di azoto NO <sub>x</sub>	Le alte temperature in camera di combustione ( $T > 2000$ K) possono decomporre le molecole di ossigeno e azoto in O ed N, le quali si combinano dando luogo a molecole di NO e NO <sub>2</sub> .	Gli NO <sub>x</sub> hanno impatto negativo sulla salute degli esseri umani e sull'ambiente.
Idrocarburi incombusti HC	La presenza di idrocarburi incombusti o solo parzialmente combust è causata dalla incompleta combustione della carica, dovuta, per esempio, alla presenza di interstizi, di olio lubrificante, di fenomeni di spegnimento della fiamma, di undermixing etc.	Gli HC, in particolare quelli non metanici, hanno un effetto negativo sull'ambiente poiché possono dare origine all'effetto noto come <i>smog fotochimico</i> . Gli HC metanici invece concorrono all'effetto serra. In ultimo gli idrocarburi incombusti sono altamente dannosi per la salute umana.

Inquinante	Descrizione	Effetti
Monossido di carbonio CO	La CO è emessa principalmente dai motori ad accensione comandata, dal momento che è causata dall'incompleta combustione in miscele ricche. La CO può anche derivare dalla dissociazione di CO <sub>2</sub> che può avvenire ad alte temperature ( $T > 1900$ K).	Il monossido di carbonio è una emotosina, pertanto risulta pericoloso per la salute umana.
Particolato PM	Il particolato è sostanzialmente un aerosol costituito da una serie di particelle solide, come le particelle carboniose o le ceneri, da idrocarburi condensati o assorbiti e infine da solfati. Le particelle possono avere dimensioni e composizione differenti.	Il PM ha un impatto negativo sia sul clima che sulla salute umana. In particolar modo le particelle molto fini (nanoparticelle, dimensioni dell'ordine delle decine di nm) risultano molto pericolose.

**Tabella 1.1: Principali inquinanti primari emessi dai motori a combustione interna**

Gli inquinanti generati direttamente dall'attività umana sono denominati *inquinanti primari*, mentre si parla di *inquinanti secondari* quando essi sono prodotti dalla reazione tra gli inquinanti primari, la luce del sole e altri componenti presenti nell'aria. Tra gli inquinanti secondari più importanti si annoverano l'ozono troposferico, derivato da processi fotochimici che coinvolgono gli NO<sub>x</sub> e i composti organici volatili, lo smog fotochimico (del quale l'ozono è uno dei principali componenti) e le piogge acide.

Nella figura 1.1 sono rappresentati i più importanti inquinanti prodotti dall'uomo e i contributi alla loro presenza nell'atmosfera dovuti alle varie attività umane.



**Figura 1.1: Contributo delle varie attività umane alla presenza di inquinanti nell'atmosfera**

L'inquinamento dell'aria è pericoloso per la salute dell'uomo, in particolare può essere causa di ictus, problemi cardiaci e malattie dei polmoni. Come si può evincere dalla figura 1.2, secondo la *World Health Organization*, ogni anno nel mondo circa 7 milioni di persone muoiono a causa dell'inquinamento dell'aria, di queste circa 500 mila morti avvengono in Europa. Oltre ad impattare negativamente sulla salute umana, l'inquinamento ha degli effetti perniciosi anche sull'economia. Essi sono legati in particolare alla perdita di produttività, causata dai decessi dovuti all'inquinamento, ai costi sanitari, agli effetti sull'agricoltura e di altra natura, in particolare il problema è particolarmente accentuato nei paesi in via di sviluppo.



**Figura 1.2: Morti a causa dell'inquinamento dell'aria secondo la WHO**

Per tutte queste ragioni, il tema dell'inquinamento dell'aria è finito alla ribalta negli anni '70 e da lì non ha mai smesso di essere sotto i riflettori. Nel 1992 ebbe luogo nella città di Rio de Janeiro la prima conferenza mondiale dei capi di stato sull'ambiente, nota con l'acronimo *UNCED (United Nations Conferenze on Environment and Development)*. La conseguenza di questa conferenza furono gli *Accordi di Rio*, che a loro volta portarono, alcuni anni dopo, alla stesura del celebre *Protocollo di Kyoto*. Col protocollo di Kyoto le nazioni che firmarono divennero legalmente vincolate a contenere il loro impatto ambientale per quanto riguarda le emissioni nell'atmosfera. In ultimo si cita l'*Accordi di Parigi*, firmato nel 2015 e valido a partire dalla fine del 2020, il cui obiettivo è quello di contenere l'aumento della temperatura globale media.

## **Normativa sulle emissioni di inquinanti per Non Road Mobile Machinerics**

La normativa definisce *macchina mobile non stradale* qualsiasi macchina mobile, apparecchiatura trasportabile o veicolo, con o senza carrozzeria o ruote, non destinato al trasporto di passeggeri o merci su strada, comprese le macchine installate sul telaio dei veicoli destinati al trasporto di

passaggeri o merci su strada. La definizione stessa comprende una vasta gamma di veicoli, tra i quali possiamo annoverare:

- macchine da piccolo giardinaggio (es: tagliaerba);
- macchine da cantiere (es: bulldozer, ruspe, scavatrici);
- macchine agricole;
- locomotive;
- automotrici;
- navi per navigazione interna;
- altro;

Il regolamento prevede la definizione di 10 categorie di veicoli, principalmente determinate dal tipo di applicazione della macchina e dalla sua potenza. La tabella 1.2 riporta le diverse categorie e le loro caratteristiche.

<b>Categoria</b>	<b>Descrizione</b>
NRE	Motori per macchine mobili non stradali, non escluse a norma dell'articolo 2, paragrafo 2, e non incluse in nessun'altra categoria. Sono compresi in questa categoria anche i motori con una potenza di riferimento inferiore a 560 kW utilizzati al posto di quelli rispondenti alla fase V delle categorie IWP, IWA, RLL o RLR.
NRG	Motori con una potenza di riferimento superiore a 560 kW, destinati esclusivamente a essere utilizzati in gruppi elettrogeni; i motori per gruppi elettrogeni diversi da quelli che presentano tali caratteristiche sono inclusi nelle categorie NRE o NRS a seconda delle relative caratteristiche.
NRSh	Motori portatili ad accensione comandata con una potenza di riferimento inferiore a 19 kW, destinati esclusivamente a essere utilizzati in macchine portatili.
NRS	Motori ad accensione comandata con una potenza di riferimento inferiore a 56 kW e non inclusi nella categoria NRSh.
IWP	Motori destinati esclusivamente a essere utilizzati su navi per la navigazione interna, per la loro propulsione diretta o indiretta, o destinati alla loro propulsione diretta o indiretta, con una potenza di riferimento pari o superiore a 19 kW; motori utilizzati al posto dei motori della categoria IWA purché rispettino l'articolo 24, paragrafo 8.
IWA	Motori ausiliari da utilizzare esclusivamente su navi della navigazione interna e con una potenza di riferimento pari o superiore a 19 kW.
RLL	Motori da utilizzare esclusivamente nelle locomotive, per la loro propulsione o destinati alla loro propulsione.
RLR	Motori da utilizzare esclusivamente nelle automotrici, per la loro propulsione o destinati alla loro propulsione; motori utilizzati al posto dei motori della fase V della categoria RLL.
SMB	Motori ad accensione comandata destinati esclusivamente a essere utilizzati in motoslitte; i motori per motoslitte diversi dai motori ad accensione comandata sono inclusi nella categoria NRE.
ATS	Motori ad accensione comandata destinati esclusivamente a essere utilizzati in ATV e SbS; i motori per ATV e SbS diversi dai motori ad accensione comandata sono inclusi nella categoria NRE.

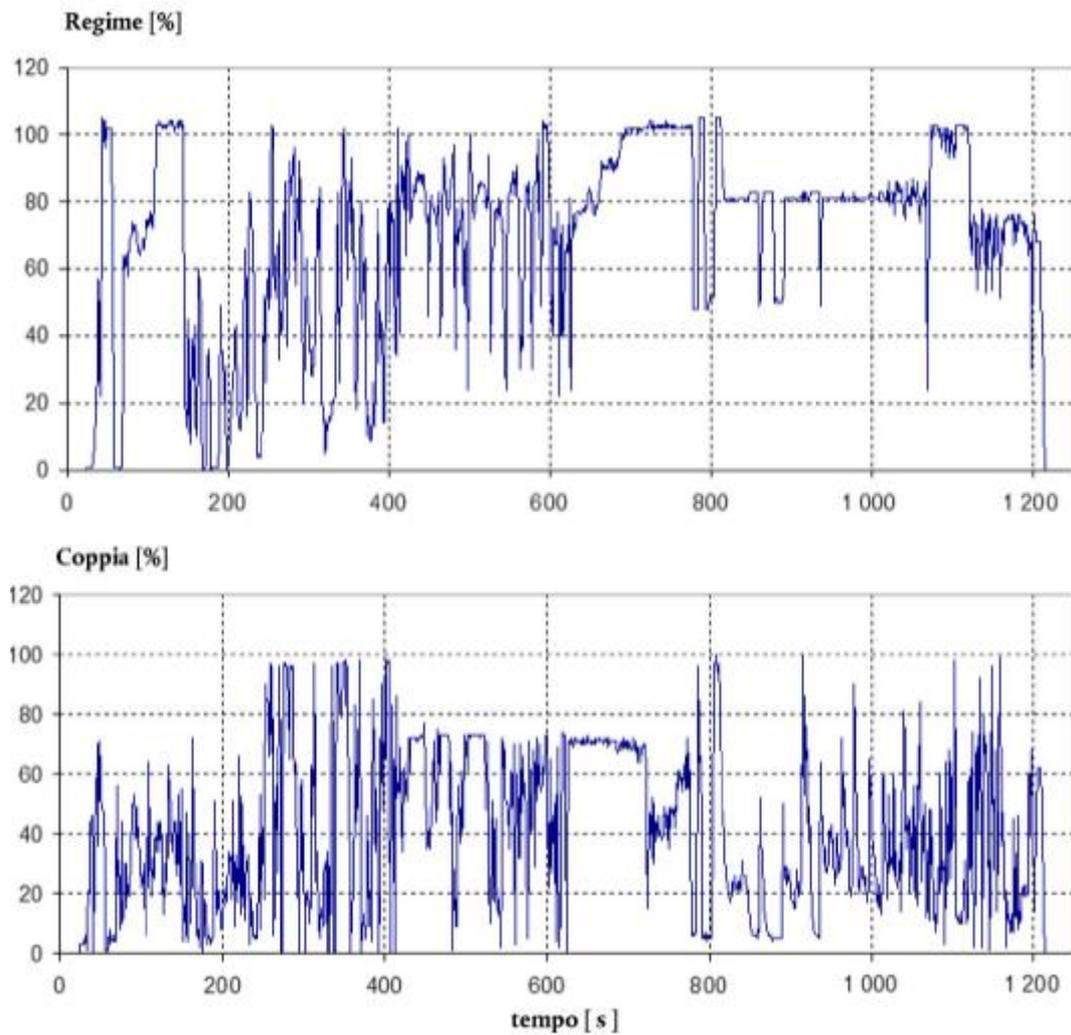
**Tabella 1.2: Categorie di motori previste dalla normativa NRMM**

Da un punto di vista legislativo vengono definiti inquinanti gassosi gli inquinanti CO, HC totali ed NOx emessi dal motore, mentre si definisce particolato la massa di qualsiasi materiale presente nel gas emesso dal motore e raccolto su un determinato materiale filtrante previa diluizione del gas con aria filtrata e pulita in modo che la temperatura non superi i 325 K. La normativa NRMM stabilisce i limiti di emissione per i motori di macchine mobili non stradali per le diverse gamme di potenza e applicazioni. Esso stabilisce inoltre le procedure che i costruttori di motori devono seguire al fine di ottenere l'omologazione dei loro motori, prerequisito necessario per l'immissione sul mercato dell'Unione Europea. Le modalità di determinazione delle emissioni di inquinanti gassosi e particolato inquinante prodotte dal motore sottoposto a prova prevedono l'applicazione di due cicli di prova:

- Ciclo NRSC (ciclo stazionario non stradale): il motore a caldo viene fatto lavorare a diversi punti combinazione di velocità angolare e carico, le emissioni vengono misurate nelle varie condizioni stazionarie. Per ogni inquinante la combinazione dei valori misurati e di fattori di peso per ciascun punto di lavoro deve soddisfare i limiti imposti dalla normativa.
- Ciclo NRTC (ciclo transitorio non stradale): il motore viene sottoposto ad un profilo di carico dinamico. Il test viene eseguito due volte, una prima volta con il motore a freddo e la seconda con il motore a caldo, le emissioni misurate nei due casi vengono combinate a dei fattori di peso (10% a freddo, 90% a caldo) e devono soddisfare i limiti imposti dalla normativa.

<b>Mode</b>	<b>Engine speed</b>	<b>Engine load</b>	<b>Weight factor</b>
1	Rated speed	100	0,15
2	Rated speed	75	0,15
3	Rated speed	50	0,15
4	Rated speed	10	0,1
5	Intermediate speed	100	0,1
6	Intermediate speed	75	0,1
7	Intermediate speed	50	0,1
8	Idle	-	0,15

**Tabella 1.3: NRSC 8-mode cycle**



**Figura 1.3: Ciclo NRTC**

E' importante evidenziare come i limiti sulle emissioni siano particolarmente stringenti per motori superiori ai 56 kW, dal momento che motori di taglia inferiore in genere sono montati su macchine il cui costo diventerebbe troppo elevato se fosse necessario implementare un dispendioso sistema di after treatment. In tabella 1.4 sono riportati i limiti di emissione della fase V per motori della categoria NRE. Da tale tabella appare evidente come i limiti di emissione per gli HC e gli NO<sub>x</sub>, nel caso di veicoli con motori termici di taglia ridotta, siano molto meno vincolanti. Ne consegue che, adottando unità termiche con potenza inferiore ai 56 kW, è possibile risparmiare sugli ingombri e sui costi relativi ai sistemi di after treatment dedicati a tali inquinanti.

Fase di emissioni	Sottocategoria di motori	Intervallo di potenza	Tipo di accensione	CO	HC	NO <sub>x</sub>	Massa del particolato	PN	A
		kW		g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	#/kWh	
Fase V	NRE-v-1 NRE-c-1	0 < P < 8	accensione spontanea	8,00	(HC + NO <sub>x</sub> ≤ 7,50)		0,40 <sup>(1)</sup>	—	1,10
Fase V	NRE-v-2 NRE-c-2	8 ≤ P < 19	accensione spontanea	6,60	(HC + NO <sub>x</sub> ≤ 7,50)		0,40	—	1,10
Fase V	NRE-v-3 NRE-c-3	19 ≤ P < 37	accensione spontanea	5,00	(HC + NO <sub>x</sub> ≤ 4,70)		0,015	1 × 10 <sup>12</sup>	1,10
Fase V	NRE-v-4 NRE-c-4	37 ≤ P < 56	accensione spontanea	5,00	(HC + NO <sub>x</sub> ≤ 4,70)		0,015	1 × 10 <sup>12</sup>	1,10
Fase V	NRE-v-5 NRE-c-5	56 ≤ P < 130	tutti	5,00	0,19	0,40	0,015	1 × 10 <sup>12</sup>	1,10
Fase V	NRE-v-6 NRE-c-6	130 ≤ P < 560	tutti	3,50	0,19	0,40	0,015	1 × 10 <sup>12</sup>	1,10
Fase V	NRE-v-7 NRE-c-7	P > 560	tutti	3,50	0,19	3,50	0,045	—	6,00

<sup>(1)</sup> 0,6 per motori a iniezione diretta, raffreddati ad aria, con avviamento a mano.

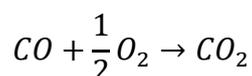
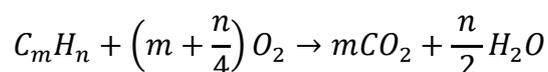
**Tabella 1.4: Limiti di emissione della fase V per veicoli della categoria NRE**

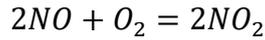
## Controllo delle emissioni di inquinanti nei veicoli ad accensione per compressione

Dal momento che il presente studio si concentra su un trattore da frutteto, il cui powertrain convenzionale prevede generalmente l'impiego di un'unità termica ad accensione per compressione alimentata a gasolio, è importante porre l'attenzione su quali siano i sistemi di controllo delle emissioni di inquinanti per questa specifica tipologia di veicoli. Il trattamento delle emissioni allo scarico nei motori Diesel avviene grazie ai seguenti sistemi:

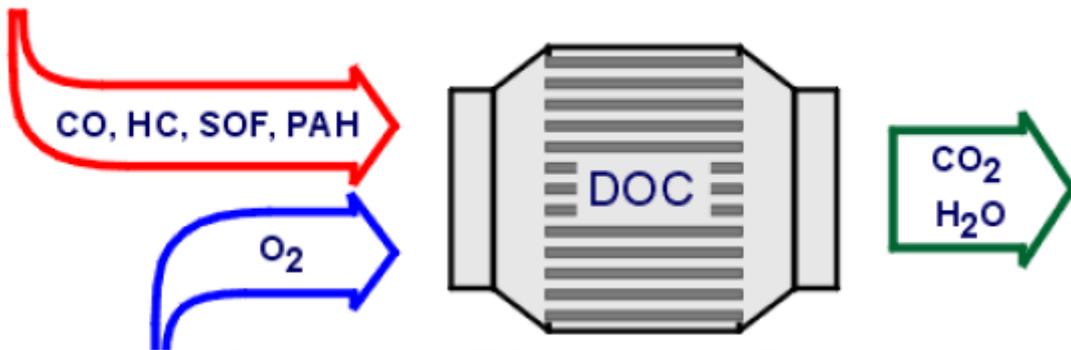
- *Catalizzatori ossidanti (DOC);*
- *Catalizzatori riducenti (SCR, DeNO<sub>x</sub>, LNC e LNT);*
- *Filtri per il particolato (DPF)*

I *catalizzatori ossidanti* hanno lo scopo di promuovere le reazioni di ossidazione di HC, CO, della frazione solubile del precursore del particolato e l'ossidazione di NO in NO<sub>2</sub>.



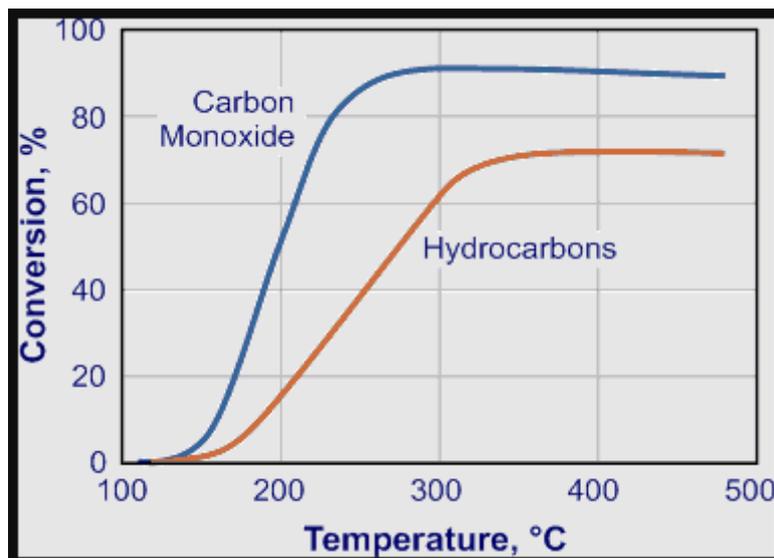


L'ossidazione della NO in NO<sub>2</sub> trova motivazione nel fatto che un opportuno controllo del loro rapporto permette di massimizzare l'efficienza di ulteriori catalizzatori posti a valle del DOC, in particolare l'*SCR* e il *DPF* lavorano in maniera ottimale se il rapporto NO<sub>2</sub>/NO è pari a circa il 40%, mentre in un Diesel in genere tale rapporto è compreso tra l'1% e il 30%. Una ulteriore reazione che possiamo avere nel DOC è l'ossidazione dello zolfo, tale reazione è indesiderata in quanto può portare ad un incremento delle emissioni di PM allo scarico. Tra i più importanti di questi processi vale la pena citare l'ossidazione del biossido di zolfo in triossido di zolfo con successiva formazione di acido solforico, il quale a sua volta allo scarico può aumentare la frazione di solfati del particolato.



**Figura 1.4: Funzionamento del DOC**

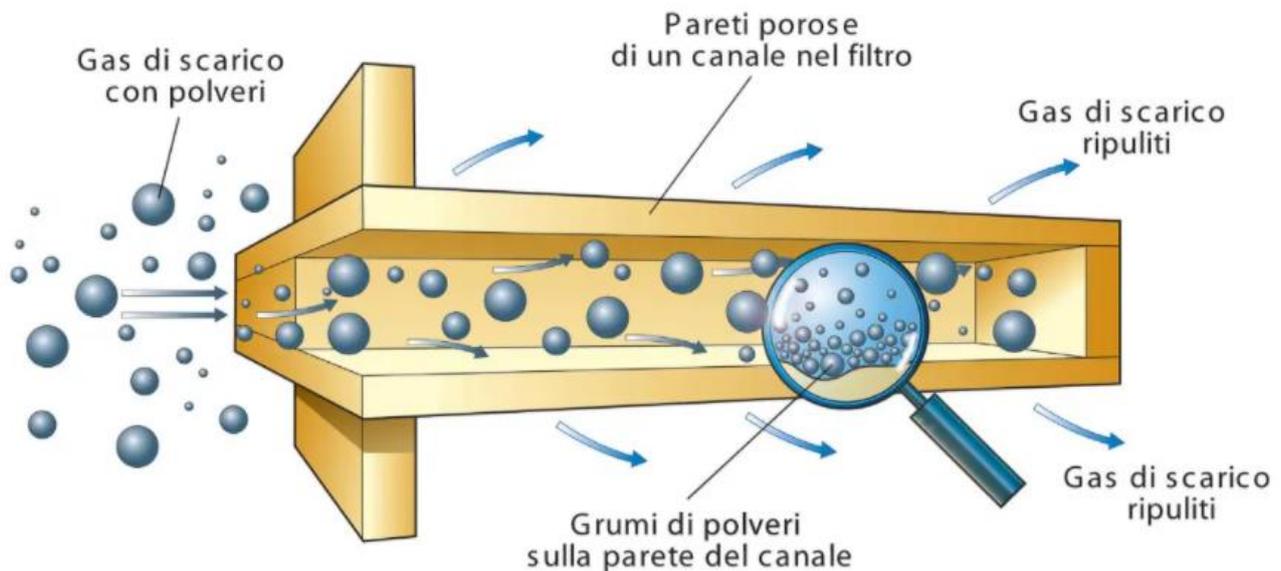
L'andamento del rendimento di conversione del DOC in funzione della temperatura è rappresentato nella figura 1.5, si definisce temperatura di light off la temperatura a cui si raggiunge un rendimento di conversione pari al 50%.



**Figura 1.5: Rendimento di conversione del DOC in funzione della temperatura**

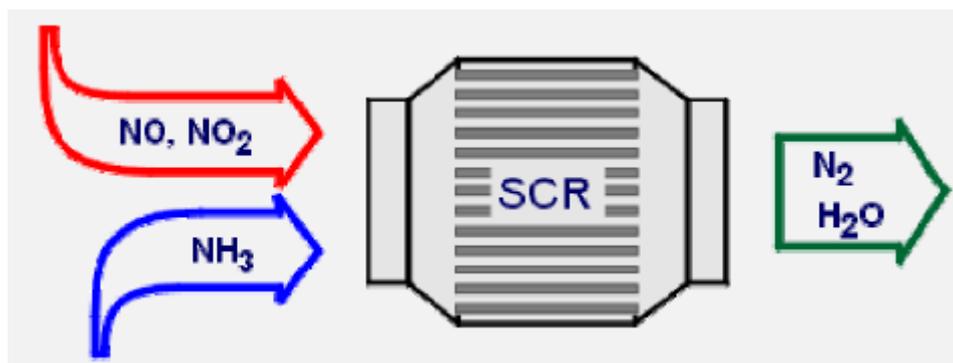
Il *filtro antiparticolato (DPF)* invece è un dispositivo in grado di catturare il particolato tramite filtraggio, come evidenziato dalla figura 1.6. Tale operazione di filtraggio avviene durante il passaggio dei gas attraverso una barriera ceramica porosa. Il DPF necessita di una operazione di

rimozione delle particelle di particolato raccolte, tale operazione è nota come *rigenerazione del filtro antiparticolato*, la quale può avvenire in maniera continua oppure periodicamente e si basa sull'ossidazione del PM. Per assicurare una adeguata velocità di ossidazione, il filtro deve essere ad una temperatura sufficientemente elevata e deve essere attraversato da gas reagenti, normalmente  $O_2$  oppure  $NO_2$ .



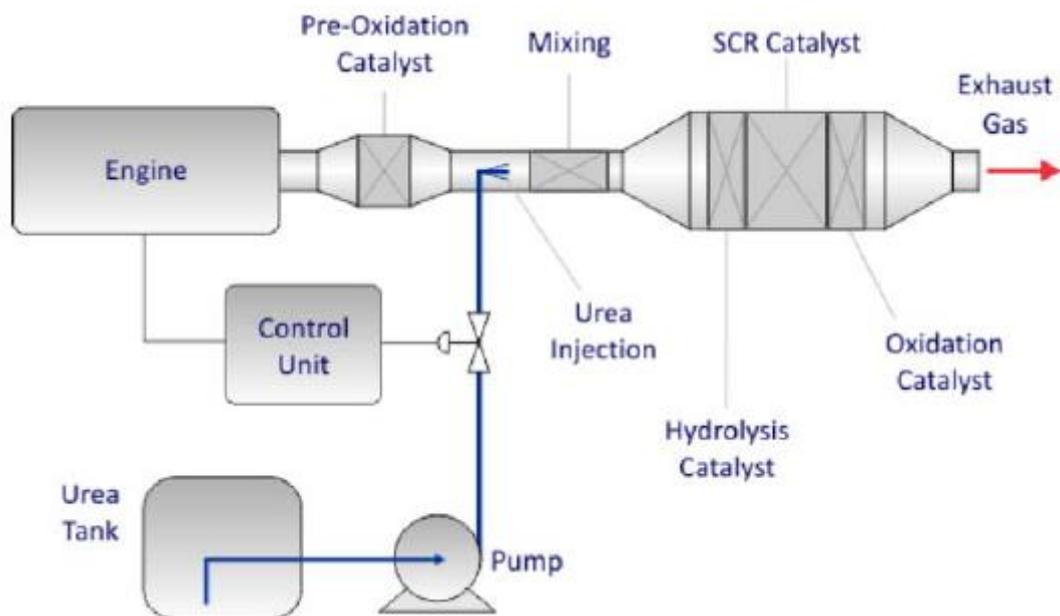
**Figura 1.6: Filtraggio del DPF**

I *catalizzatori riducenti* invece devono favorire la reazione di riduzione della  $NO$ , la quale viene decomposta in  $N_2$  ed  $O_2$ . Una possibile tipologia di questi sistemi di after treatment è costituita dagli *SCR (Selective Catalytic Reduction)*, dove l'idea principale è quella di sfruttare l'ammoniaca, la quale reagisce selettivamente con gli  $NO_x$ .



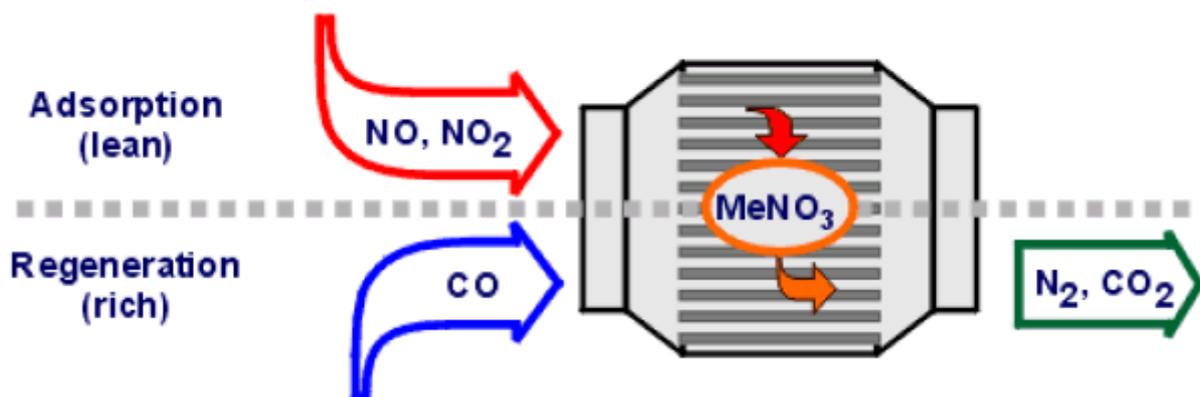
**Figura 1.7: Principio di funzionamento dell'SCR**

E' importante introdurre nell'SCR le giuste proporzioni di  $NO_2$  ed ammoniaca, qualora vi sia un eccesso o un difetto di tali reagenti si potrebbero ottenere dei prodotti indesiderati, come l' $N_2O$ . Al posto dell'ammoniaca si possono usare delle soluzioni urea-acqua, infatti l'urea in presenza di calore reagisce e diventa ammoniaca. I sistemi con SCR hanno l'inconveniente di essere ingombranti, richiede infatti un impianto apposito che fornisca l' $NH_3$ , un possibile layout è quello riportato in figura 1.8. La presenza di un catalizzatore ossidante a valle dell'SCR è dovuta al fatto che si vuole evitare la presenza di ammoniaca allo scarico (fenomeno noto come *ammonia slip*).



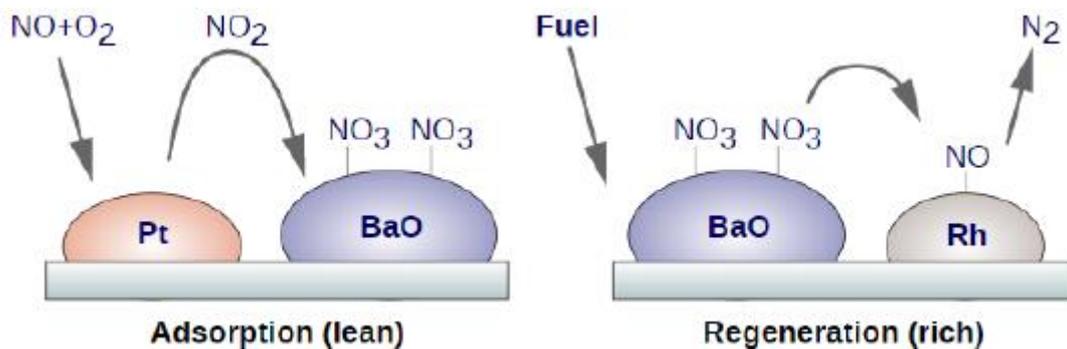
**Figura 1.8: Layout di un sistema con SCR**

Un sistema diverso per il controllo degli  $\text{NO}_x$  allo scarico si basa sulle *trappole per gli  $\text{NO}_x$  (LNT)*, le quali sono trappole chimiche con all'interno composti metallici come ossidi e carbonati. Questi composti, reagendo con gli ossidi di azoto, diventano dei nitrati metallici e vengono stoccati durante i periodi di funzionamento del motore con miscela povera. Queste trappole, proprio in funzione del loro sistema di stoccaggio dei nitrati, possono saturare, pertanto si devono prevedere delle fasi di rigenerazione. La rigenerazione si può ottenere facendo funzionare il motore con dosatura ricca. Durante il funzionamento con miscela ricca i nitrati reagiscono con la  $\text{CO}_2$  prodotta dalla combustione, liberando  $\text{NO}_x$  che a questo punto si riducono. In figura 1.9 è riportato lo schema di una trappola LNT. Come per gli altri sistemi precedentemente descritti, anche in questo caso possono avvenire reazioni indesiderate, in particolare l'ossidazione della  $\text{SO}_2$  in  $\text{SO}_3$ , il quale forma dei composti che risultano particolarmente ostici da rimuovere durante la rigenerazione (si deve infatti eseguire una *desolforazione*).



**Figura 1.9: Schema di una trappola LNT**

In figura 1.10 è invece rappresentato il principio di funzionamento del sistema LNT, in cui è possibile osservare le fasi di assorbimento e poi di rigenerazione.



**Figura 1.10: Principio di funzionamento di una trappola LNT**

Sia l'SCR che la trappola LNT hanno una finestra di temperatura in cui il loro funzionamento è con un rendimento di conversione elevato.

In ultima istanza vale la pena citare il sistema *DPNR* (*Diesel particulate NO<sub>x</sub> reduction*), il quale è un sistema compatto per la riduzione contemporanea del particolato e degli ossidi di azoto. Esso è costituito da un monolita ceramico poroso, i cui pori permettono l'intrappolamento del PM, mentre un materiale in grado di intrappolare gli NO<sub>x</sub> è depositato sulla superficie del monolita e all'interno dei pori.

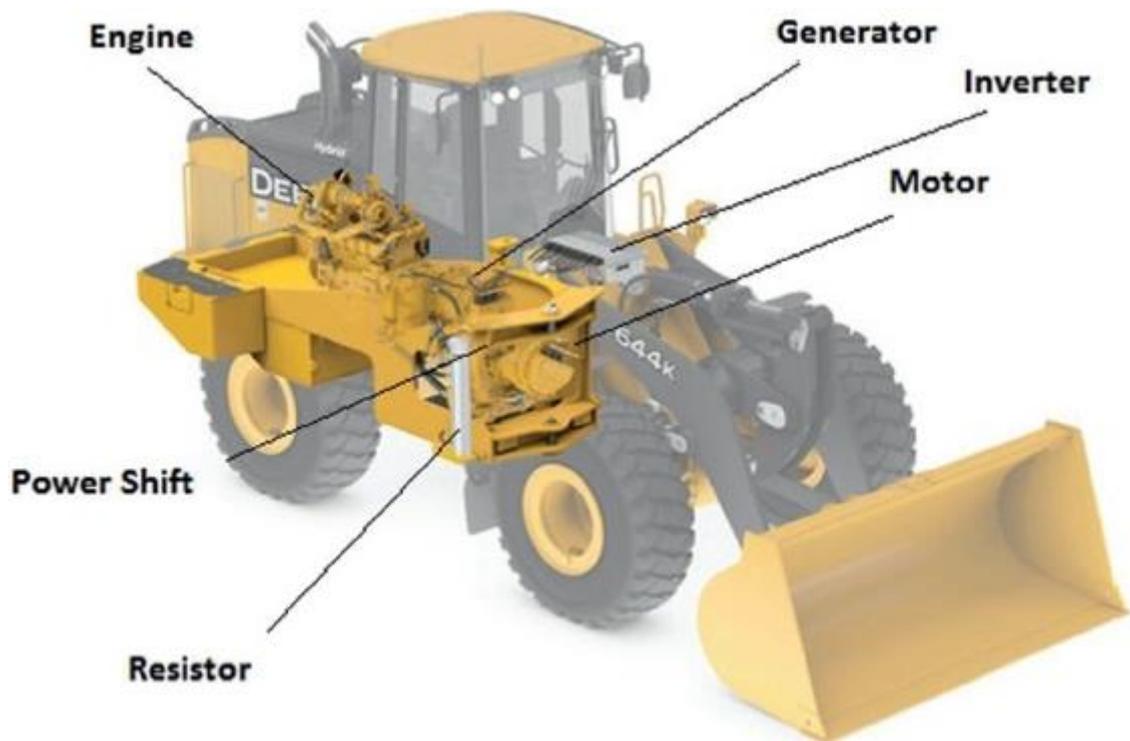
## **Il processo di elettrificazione dei veicoli: cenni storici, motivazioni e impatto sulle emissioni**

L'idea di usare come sorgenti di potenza per la trazione le macchine elettriche non nasce negli ultimi anni, ma fu già sperimentata verso la fine del 1800. Più precisamente, nel 1880 l'ingegnere e inventore francese Gustave Pierre Trouvé (1839 – 1902) montò un piccolo motore elettrico con una batteria ricaricabile su un triciclo, inventando di fatto il primo veicolo elettrico al mondo. Nel 1882, a partire dal veicolo di Trouvé, William Ayrton (1847 – 1908) e John Perry (1850 – 1920) costruirono un triciclo elettrico migliorato capace di una velocità massima di 15 km/h e di una autonomia pari a 30-50 km/h. Tra la fine del 1800 e gli albori del Novecento le auto elettriche detenevano molti record di velocità e per un certo numero di anni vendettero più dei veicoli con motori a combustione interna. Tra le più importanti imprese compiute dai veicoli elettrici di quel periodo si annovera l'infrangere la barriera dei 100 km/h di velocità, raggiunta e superata il 29 aprile del 1899 da Camille Jenatzy a bordo del veicolo *Le Jamais Contente*.



**Figura 1.11: Le Jamais Contente in esposizione**

I veicoli elettrici manifestavano però limiti legati alla poca autonomia, alla poco sviluppata tecnologia riguardante il controllo del motore, a problemi di ricarica e ai costi. Già verso l'inizio del Novecento iniziarono a diffondersi i veicoli ibridi, il cui scopo era quello di sfruttare i vantaggi dei motori a combustione interna e dei motori elettrici per limitare i rispettivi svantaggi. Lo stesso Jenatzy presentò nel 1901 al salone dell'Auto di Parigi un veicolo ibrido, mentre nel 1900 Ferdinand Porsche aveva esposto la sua *Semper Vivus Lohner-Porsche*, veicolo ibrido dotato di trazione integrale dove le unità elettriche erano poste a livello dei mozzi delle ruote. Nonostante i progressi nel campo della trazione ibrida ed elettrica, il motore a combustione presto divenne il più diffuso grazie alla sua capacità di rispondere all'esigenza di avere un mezzo con molta autonomia e con la possibilità di essere rapidamente rifornito di energia a bordo. Verso la fine del XX secolo però, con l'evoluzione di concetti quali mobilità sostenibile e energia rinnovabile, oltre alla presa di coscienza del problema dell'inquinamento dell'aria, i veicoli elettrici ed ibridi, anche grazie allo sviluppo della tecnologia durante tutto il 1900, tornarono in auge. Le motivazioni che hanno portato ad una rinascita di tali tecnologie sono molteplici: ridurre la dipendenza dai combustibili fossili, migliorare l'efficienza globale del veicolo, ridurre le emissioni tank-to-wheel per poter soddisfare le stringenti normative sugli inquinanti prodotti dai veicoli etc. I powertrain ibridi, soprattutto per i veicoli da lavoro, permettono all'unità termica di lavorare alla massima efficienza e di ridurre le emissioni locali. Tipicamente i veicoli convenzionali sono dimensionati sulla base della massima potenza richiesta, questo comporta che, per gran parte della loro vita, il motore a combustione interna lavorerà a carico relativamente basso. Questo implica che le efficienze a cui opererà saranno ridotte e sensibilmente inferiori ai valori massimi che il powertrain può garantire. L'affiancamento all'unità termica di una unità elettrica per la propulsione permette di poter realizzare il downsizing del motore, con sensibile aumento dell'efficienza e riduzione dei consumi. L'introduzione di una sorgente elettrica permette inoltre funzionalità ulteriori quali la frenata rigenerativa e la modalità full electric.



**Figura 1.12: Schema della pala caricatrice ibrida John Deere 644K**

# Capitolo 2

## Architetture ibride per applicazioni da lavoro

### Principali tipologie di architetture ibride

La definizione generica di powertrain ibrido corrisponde a quella di un sistema di propulsione che ha a bordo due sorgenti diverse di potenza per la trazione. Nel nostro caso di studio si tratta di una sorgente termica e una sorgente elettrica. Se un powertrain convenzionale per la maggior parte della sua vita opererà a basso carico, ovvero a basso rendimento, un sistema ibrido consente invece di andare a lavorare in punti più ottimali. L'ibrido può inoltre consentire la frenata rigenerativa, rimuovere il funzionamento al minimo, realizzare il downsizing dell'ICE, permettere funzionalità aggiuntive nella gestione della trazione etc. I powertrain ibridi si dividono sostanzialmente in tre grandi categorie:

- *Ibrido serie (SHEV);*
- *Ibrido parallelo (PHEV);*
- *Ibrido complesso*

#### 1. Ibrido serie

In figura 2.1 è rappresentato lo schema a blocchi di un powertrain ibrido serie.

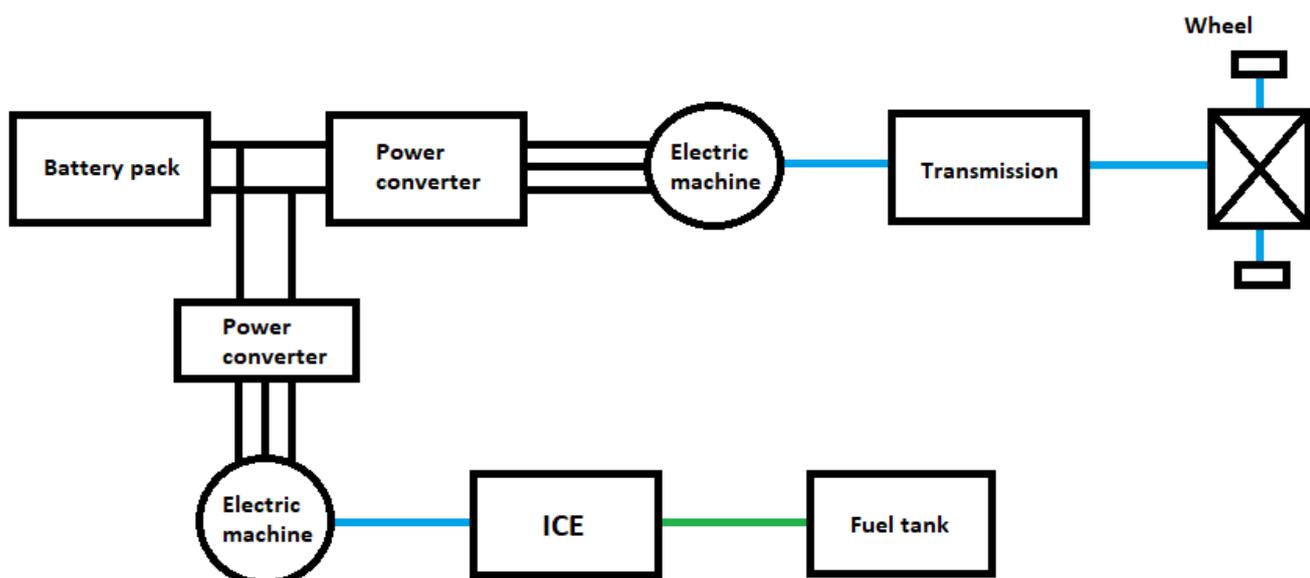
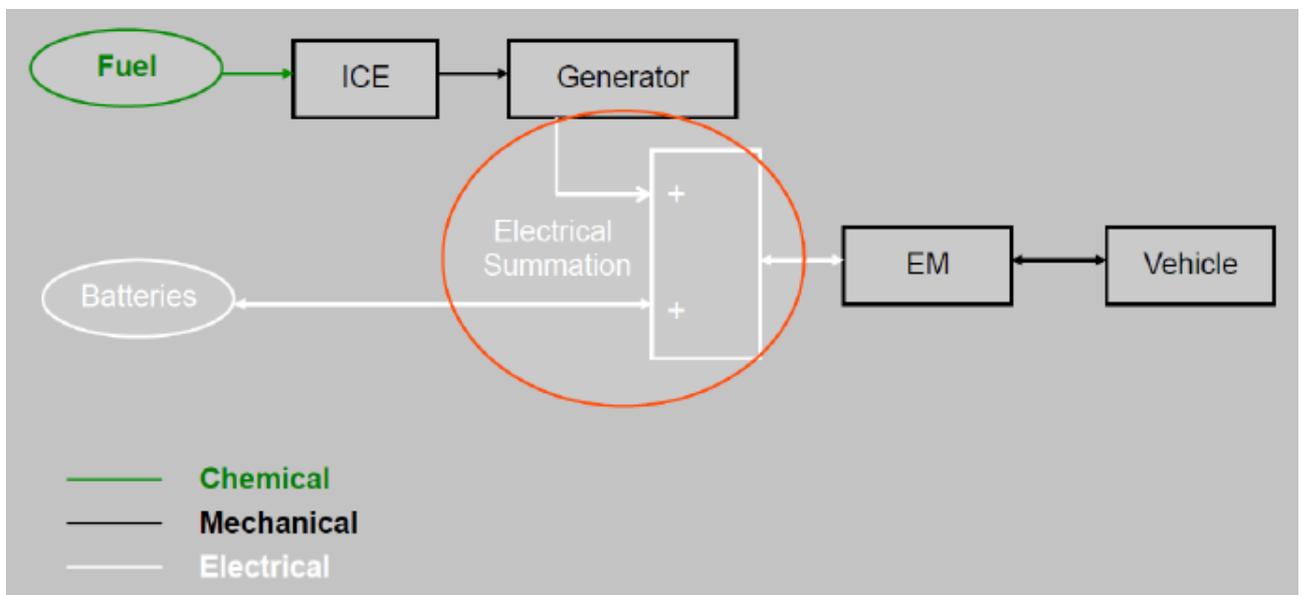


Figura 2.13: Schema a blocchi di un SHEV

I componenti principali di questo powertrain sono: il pacco batterie, una macchina elettrica di trazione (motore), una seconda macchina elettrica (generatore), dei convertitori elettronici di potenza, il motore termico, il serbatoio e la trasmissione. Come si evince dalla figura 2.1, non vi è un collegamento meccanico tra l'unità termica e le ruote. Questo essere svincolato dalla velocità del veicolo consente al motore termico di poter funzionare sempre nel punto ottimale, con conseguente miglior gestione del combustibile e miglior rendimento. L'unità termica trasferisce potenza meccanica al generatore, il quale la converte in potenza elettrica. Tale potenza elettrica può essere usata per ricaricare le batterie oppure per andare ad alimentare il motore elettrico di trazione, il quale la converte nuovamente in energia meccanica. A valle del motore elettrico vi sono la trasmissione e infine le ruote. Un ulteriore vantaggio degli SHEVs è quello di permettere alla trasmissione di essere molto semplice, infatti normalmente possono bastare una o due marce. Le prestazioni in accelerazione e velocità del veicolo dipendono esclusivamente dalle prestazioni del motore elettrico. Sia il generatore che il motore di trazione possono essere macchine reversibili.



**Figura 2.14: Schema dei flussi di potenza in un powertrain ibrido serie**

La figura 2.2 mostra come la potenza proveniente dal generatore e la potenza proveniente dalle batterie si sommano a monte del motore elettrico. Il motore elettrico di trazione, qualora fosse reversibile, consente un flusso di potenza dalle ruote alle batterie, pertanto permette di realizzare la frenata rigenerativa.

## 2. Ibrido parallelo

In figura 2.3 è riportato lo schema a blocchi di un powertrain ibrido parallelo.

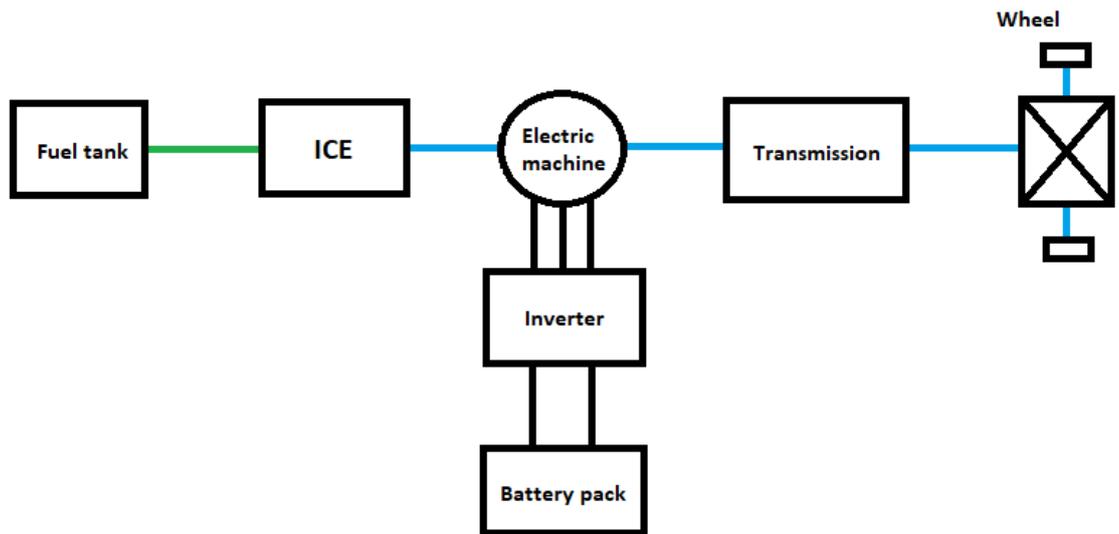


Figura 2.15: Schema a blocchi di un PHEV

Diversamente dall'ibrido serie, l'ibrido parallelo ha una configurazione con una sola macchina elettrica, in cui sia essa che l'unità termica sono collegate meccanicamente alle ruote. Le potenze di trazione fornite dalle due unità si sommano meccanicamente, come evidenzia la figura 2.4.

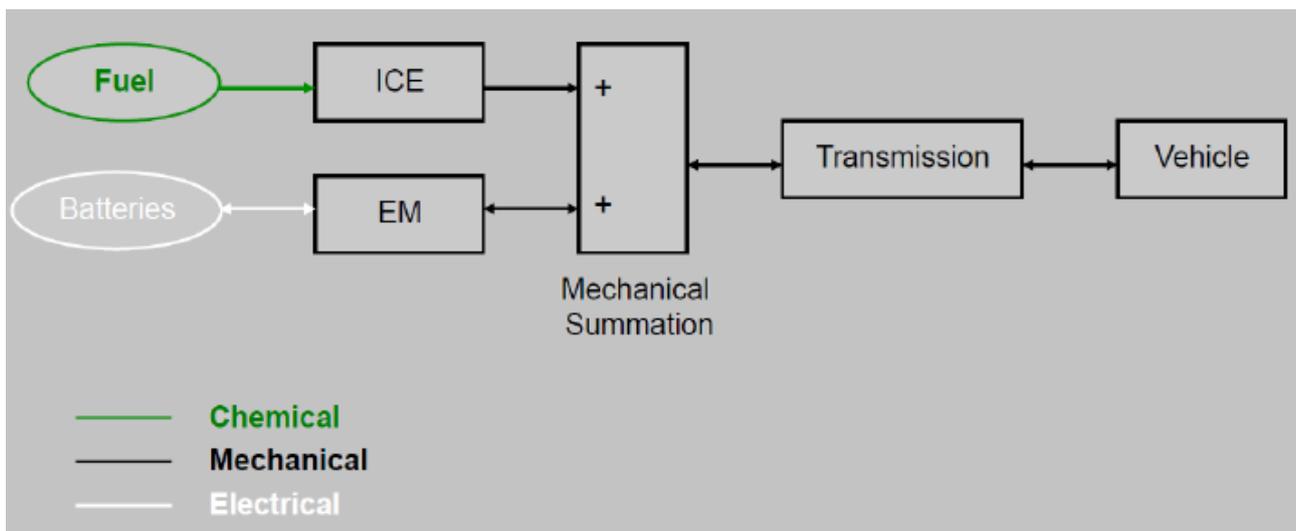
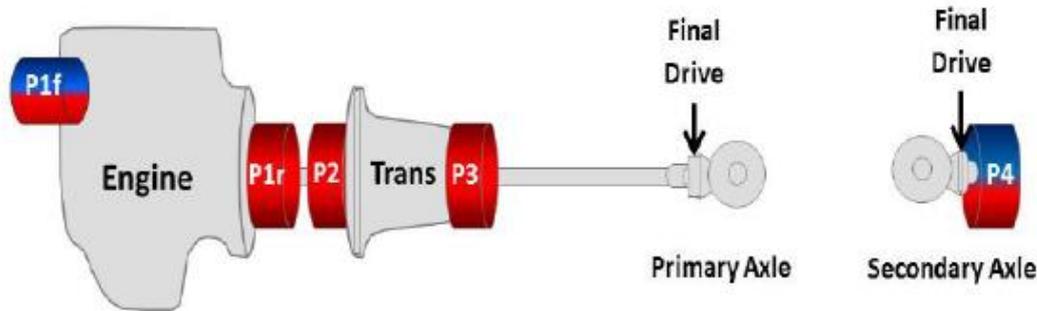


Figura 2.16: Schema dei flussi di potenza in un PHEV

Questa architettura è molto flessibile, di contro il motore termico ha un vincolo cinematico con le ruote. La macchina elettrica è una sola, la quale può essere reversibile e dunque può funzionare da generatore. L'ICE, tramite la macchina elettrica, è in grado di ricaricare le batterie qualora sia necessario. Rispetto all'ibrido serie la trasmissione è in genere più complessa. In base alla collocazione della macchina elettrica, gli ibridi parallelo vengono catalogati in diverse categorie come mostrato in figura 2.5.



- P1:** e-machine always connected to the engine (f = front and r = rear considering a longitudinal engine layout)
- P2:** e-machine in between of the engine-transmission unit with capability to decouple it also from the engine through a devoted clutch
- P3:** e-machine between transmission and differential unit (sometimes, mainly in transversal engine layout, with a devoted ratio from e-machine shaft and transmission secondary shaft)
- P4:** e-machine on the secondary axle (engine on the primary axle). It is typically linked to the differential through a devoted transmission

**Figura 2.17: Classificazione dei PHEVs in base alla posizione dell'unità elettrica**

### 3. Ibrido complesso

Un ibrido complesso si può ottenere sostanzialmente nei seguenti modi: aumentando il numero di macchine elettrico e/o unità termiche; aumentando le sorgenti di energia e potenza; realizzando un powertrain che può funzionare sia in modalità serie che in modalità parallelo. Un esempio di ibrido complesso è il sistema che prende il nome di *power split*, in esso la potenza è sempre divisa tra un percorso serie e un percorso parallelo, dove la combinazione di funzionamento è realizzata da un rotismo epicicloidale. La corona del rotismo è collegata al motore elettrico ed alle ruote, il solare è connesso ad un generatore elettrico ed infine il carrier è collegato all'ICE. La divisione di potenza è realizzata modificando la velocità delle componenti: infatti vi sono tre variabili, pertanto è possibile agire su due di esse per ottenere la terza. In figura 2.6 è rappresentato un esempio schematico di una architettura power split.

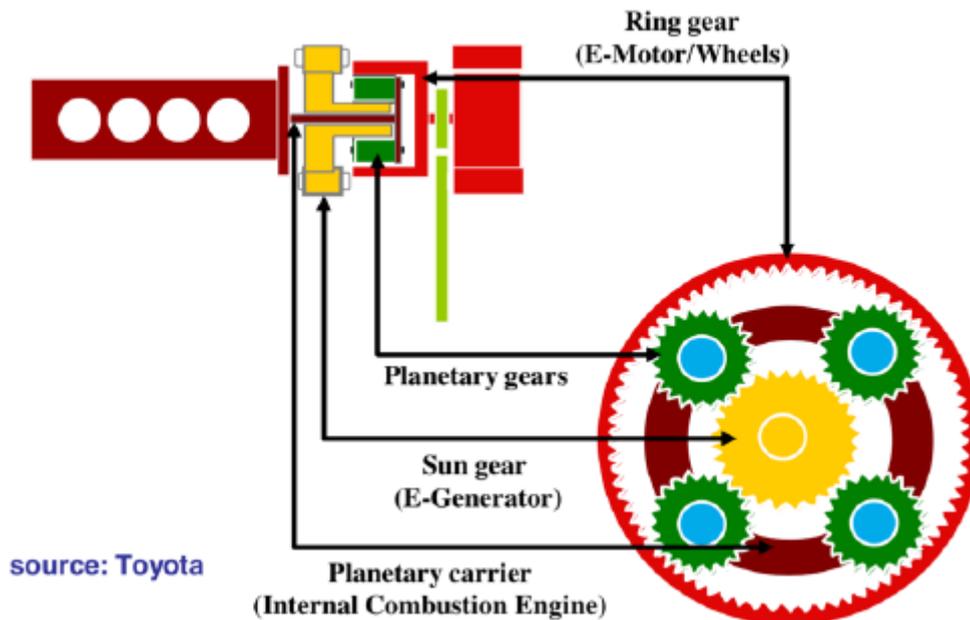


Figura 2.18: Schema di un ibrido power split

## Fattore di ibridizzazione di un powertrain ibrido

Nei powertrain ibridi il concetto di base è quello di aggiungere una sorgente di potenza secondaria che interviene al posto della primaria, o insieme ad essa, per migliorare l'efficienza e i consumi del veicolo. Un metodo per classificare gli ibridi si basa su un indicatore definito *fattore di ibridizzazione*. Tale fattore è definito come il rapporto tra la potenza del motore elettrico di trazione e la somma tra essa e la potenza del motore termico:

$$HF = \frac{P_{em}}{P_{em} + P_{ICE}} \quad (2.1)$$

Nel caso di powertrain convenzionale tale rapporto è chiaramente pari a 0, mentre nel caso di veicolo puramente elettrico è pari a 1. Tra questi due estremi è possibile ottenere una grande varietà di sistemi ibridi. In base al valore del fattore di ibridizzazione, una possibile classificazione dei powertrain ibridi è la seguente:

- *Full hybrid* ( $0,5 < HF < 0,7$ ): il sistema elettrico è in grado da solo di movimentare il veicolo sui principali cicli guida standard;
- *Mild hybrid* ( $0,25 < HF < 0,5$ ): il sistema elettrico non è in grado di compiere un ciclo guida da solo;
- *Minimal hybrid* ( $0 < HF < 0,1$ ): in questi sistemi l'unità elettrica in genere è un elemento ausiliario che aiuta l'unità principale termica in alcune specifiche operazioni (es: start&stop operations)

Un importante aspetto da evidenziare è come, contrariamente a quanto accade per i veicoli da strada, come le automobili, un veicolo da lavoro è dotato di attrezzature che devono essere attivate dal

powertrain. Nel caso di un trattore il sistema dovrà, oltre a garantire la movimentazione del veicolo e di un eventuale rimorchio, anche azionare una presa di potenza (PTO, in inglese *power take off*) a cui si collegano le varie attrezzature. Nonostante non ci sia una classificazione ben definita dei powertrain ibridi per macchine da lavoro, un possibile approccio è quello di definire un apposito fattore di ibridizzazione  $HF_{wv}$ . Tale fattore è dato dalla combinazione di due rapporti, il primo legato alla potenza di trazione e il secondo alla potenza di azionamento delle attrezzature.

$$HF_{wv,drive} = \frac{P_{em,drive}}{P_{em,drive} + P_{ICE}} \quad (2.2)$$

$$HF_{wv,load} = \frac{P_{em,load}}{P_{em,load} + P_{ICE}} \quad (2.3)$$

$$HF_{wv} = \frac{1}{2} (HF_{wv,drive} + HF_{wv,load}) \quad (2.4)$$

## Sistemi di stoccaggio energia a bordo veicolo

Un elemento estremamente importante in un veicolo ibrido o elettrico è il sistema di stoccaggio energia a bordo veicolo. Per quanto concerne la parte elettrica, tra i sistemi più utilizzati vi sono:

- *Accumulatori elettrochimici;*
- *Supercondensatori;*
- *Celle a combustibile;*
- *Flywheel energy storage system*

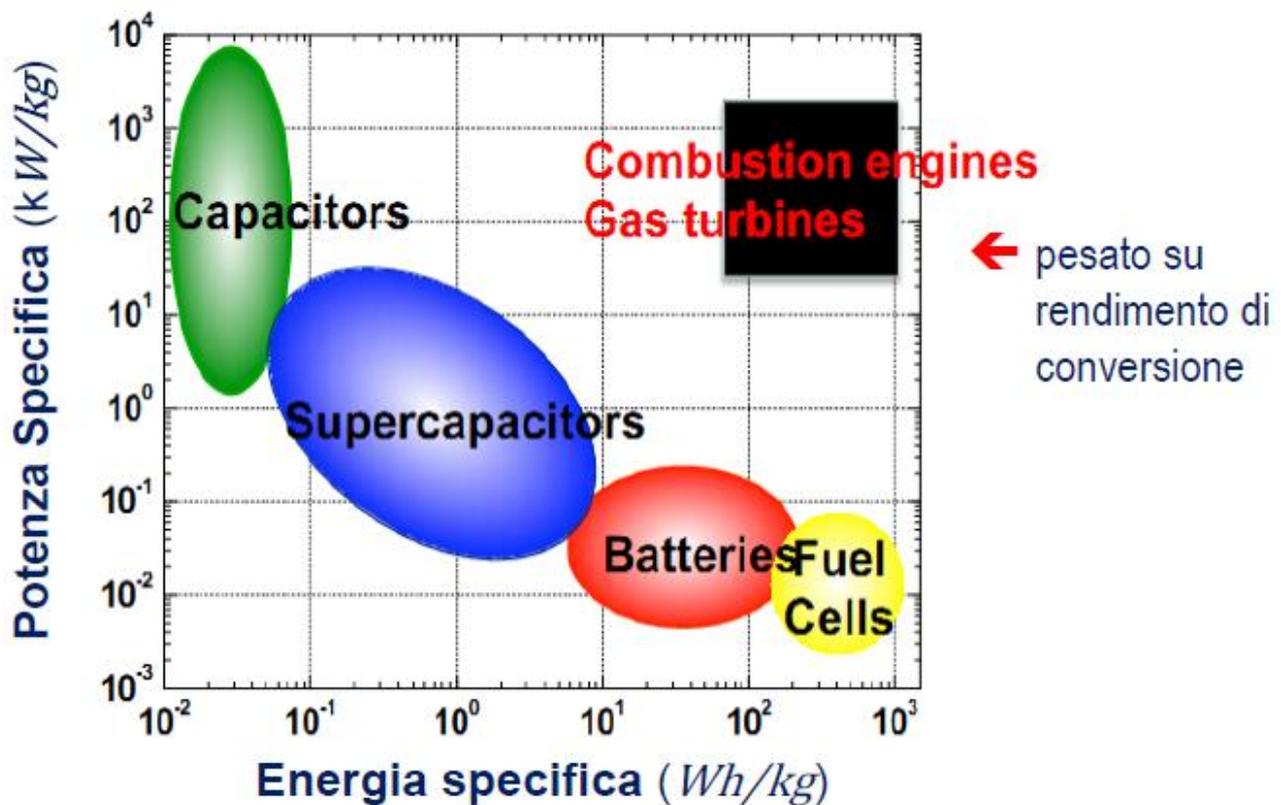


Figura 2.19: Confronto tra alcuni ESS

### 1. Accumulatori elettrochimici

Gli accumulatori elettrochimici sono in grado di trasformare energia chimica in energia elettrica. L'elemento di base è noto come *cella elettrochimica*, la quale è in grado di generare una tensione in corrente continua, che può essere combinata in serie e/o in parallelo per ottenere un accumulatore di dimensioni maggiori, noto col nome di batteria. All'interno della cella avvengono delle reazioni chimiche di ossido-riduzione, in cui vi è il passaggio di elettroni, attraverso un conduttore, dalla specie che si ossida a quella che si riduce. E' presente un materiale conduttore, detto elettrolita, che permette il passaggio di ioni ma non di elettroni. Le batterie al giorno d'oggi più usate sono le Li-ioni, ma il settore è in forte sviluppo.

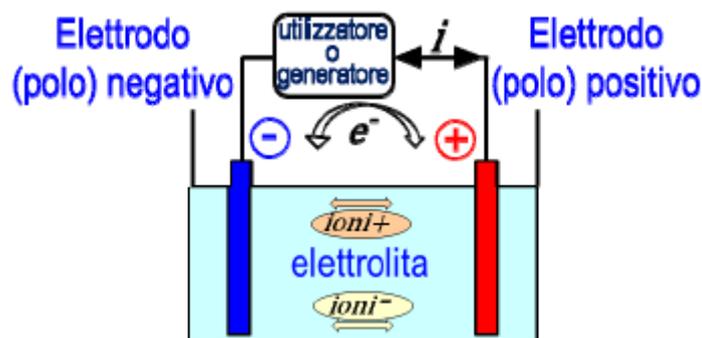


Figura 2.20: Cella elettrochimica

Durante il processo di scarica della batteria, le reazioni che avvengono sono di ossido-riduzione spontanea, mentre durante il processo di carica sono di ossido-riduzione non spontanea. Si definisce capacità reale della cella la carica che essa è in grado di erogare nel corso di una scarica parziale (fino

ad una tensione minima a cui interrompere la scarica) ad una data intensità di scarica. In genere la capacità di una cella è misurata in Ah.

$$Q_{reale} = \int_0^t i_{cell} dt \quad (2.5)$$

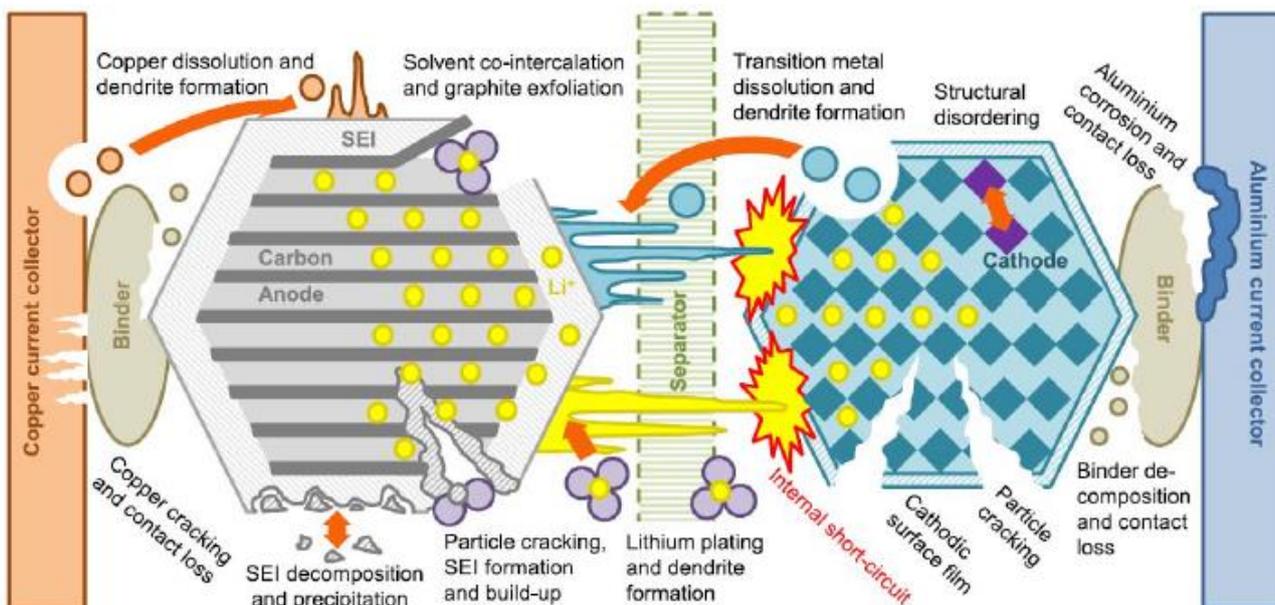
L'energia reale è invece definita come segue:

$$W_{reale} = \int_0^t V_{cell} i_{cell} dt \quad (2.6)$$

Una ulteriore grandezza di interesse è lo stato di carica, definito come il rapporto tra la capacità residua e la capacità totale:

$$SOC = \frac{Q_{nom} - \int_0^t i_{cell} dt}{Q_{nom}} \quad (2.7)$$

L'invecchiamento delle batterie, causato dai fenomeni di carica-scarica, di gestione termica, di condizioni di stoccaggio e via dicendo, comporta una riduzione della capacità massima. A tal proposito, è necessario usare un *battery management system (BMS)*, le cui funzioni sono molteplici e riguardano la gestione della temperatura delle celle, il rispetto dei limiti di tensione e corrente, l'ottimizzazione dello sfruttamento energetico della batteria etc. Un ulteriore aspetto importante di cui si deve occupare il BMS è l'equalizzazione delle celle, ovvero la tensione, la temperatura e lo state of charge di ogni cella devono essere uguali. In figura 2.9 è riportata una rappresentazione dei principali fenomeni di deterioramento di una cella elettrochimica:



**Figura 2.21: Fenomeni di deterioramento di una cella elettrochimica**

## 2. Supercondensatori

I supercondensatori sono caratterizzati dalla capacità di gestire improvvisi picchi di potenza, sono in grado di essere ricaricati a scaricati molto velocemente e sono insensibili alla temperatura. I supercondensatori sono infatti dei condensatori che hanno la peculiarità di poter accumulare una

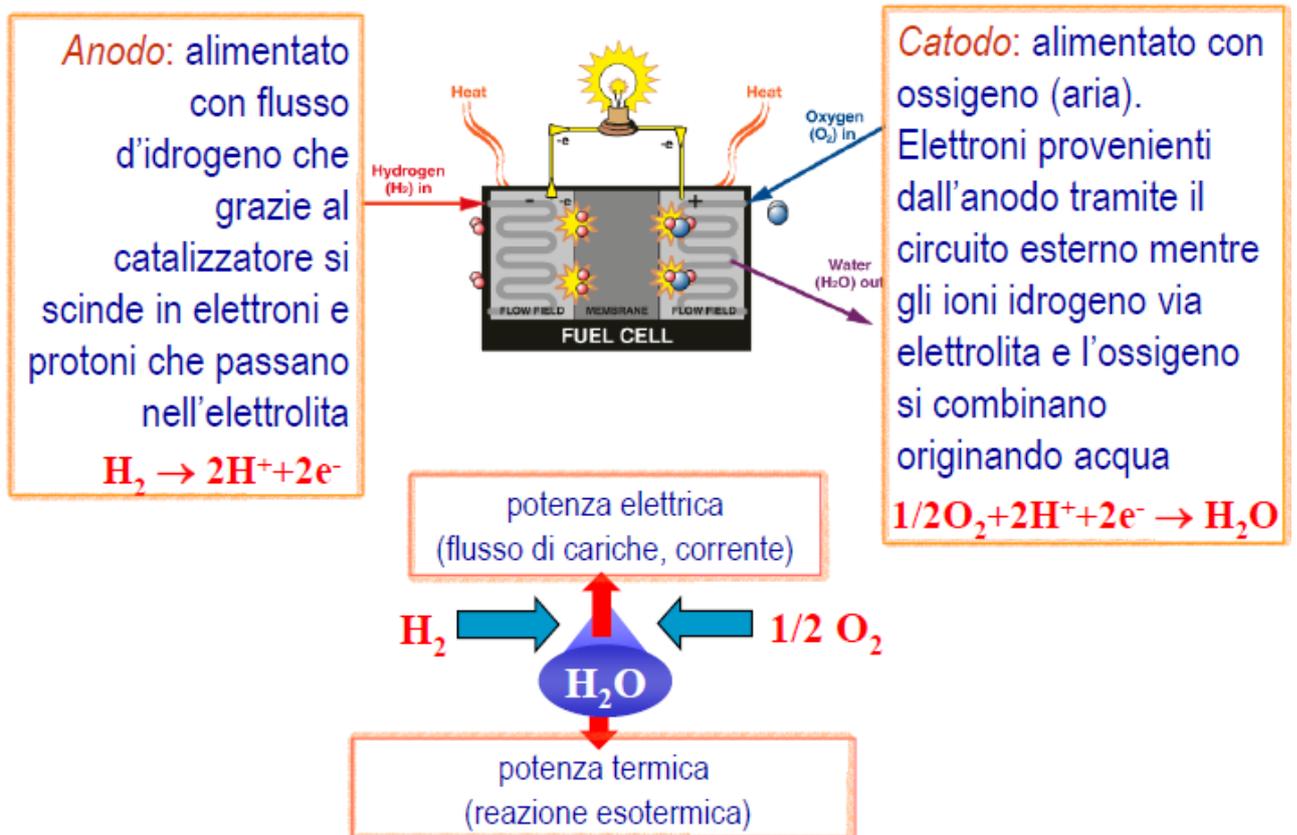
quantità di carica estremamente grande rispetto ai condensatori tradizionali, e sono caratterizzati da una elevata potenza specifica. Generalmente sono costituiti da due elettrodi ad elevata area superficiale, un separatore ed un elettrolita (a differenza degli accumulatori elettrochimici non vi è passaggio di cariche dall'elettrolita all'elettrodo). Dal momento che si cerca di massimizzare le superfici degli elettrodi, essi vengono realizzati con materiali porosi come il carbone attivo. Come per le celle elettrochimiche, anche questo sistema di stoccaggio viene realizzato connettendo più elementi in serie, pertanto è necessario una equalizzazione. La tensione di un supercondensatore è una funzione lineare della carica accumulata, pertanto per conoscere lo state of charge basta misurare la tensione ai suoi capi:

$$SOC = \frac{1/2 C * V^2}{1/2 C * V_{max}^2} = \left( \frac{V}{V_{max}} \right)^2 \quad (2.8)$$

Alcuni limiti di questa tecnologia risiedono nel fatto che non tutta l'energia può essere sfruttata (vi è un limite pratico indicativo sulla tensione minima), nella elevata autoscarica e nella ridotta densità di energia.

### 3. Celle a combustibile

Le celle a combustibile sono dei dispositivi elettrochimici dove però i reagenti non sono immagazzinati all'interno della cella stessa, ma lo sono all'esterno. I gas reagenti vengono addotti all'interno della cella mediante un apposito impianto, pertanto la cella è di per sé soltanto un convertitore e non contiene alcuna energia. Le celle a combustibile più diffuse sono le *Proton exchange membrane fuel cells (PEMFC)*. Il principio di funzionamento è il seguente: all'anodo viene fornito idrogeno, il quale grazie ad un catalizzatore (es: Pt) si scinde in protoni ed elettroni; i protoni attraversano un elettrolita e viaggiano verso il catodo, il quale viene alimentato tipicamente con ossigeno (aria ambiente); i protoni, provenienti dall'anodo, si ricombinano con l'ossigeno e con gli elettroni, i quali hanno percorso un circuito chiuso esterno, producendo acqua. Gli elettrodi in genere hanno una struttura porosa ad elevata superficie specifica, dal momento che devono garantire rapida diffusione del reagente. In figura 2.10 è riportato lo schema di funzionamento di una cella a combustibile:



**Figura 2.22: Principio di funzionamento di una fuel cell**

Come per i precedenti sistemi, è necessario connettere più celle in serie, dal momento che la tensione di ognuna è dell'ordine del volt. Il sistema di adduzione dei reagenti dovrà pertanto alimentare in parallelo le varie celle. L'idrogeno può essere stoccato a bordo veicolo in forma gassosa con bombole in pressione (250 ÷ 700 bar), oppure sotto forma di liquido con serbatoi criogenici a -253 °C. Per quanto riguarda l'ossigeno invece si preleva, tramite un compressore, aria ambiente dall'esterno, non è pertanto necessario stoccarlo a bordo del mezzo. Per il loro principio di funzionamento, non ha senso parlare di state of charge di una fuel cell.

#### 4. Flywheel energy storage system

L'idea di base di questi dispositivi è quella di accumulare energia ponendo in rotazione un volano, ovvero sotto forma di energia cinetica, realizzando quella che potrebbe essere definita una batteria inerziale. Ha il vantaggio di poter immagazzinare una elevata energia in un dispositivo dalle ridotte dimensioni. In fase di scarica, il volano mette in rotazione il generatore, convertendo l'energia cinetica in energia elettrica.

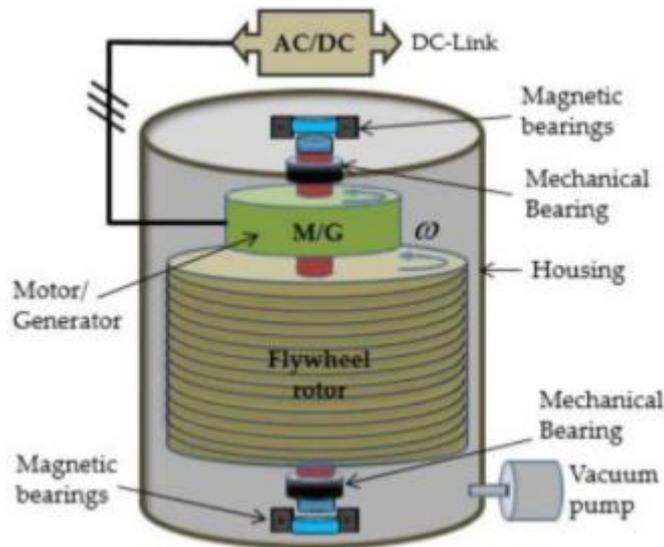


Figura 2.23: Schema di un flywheel energy storage system

## Tipologie di macchine elettriche per applicazioni veicolistiche

Un aspetto fondamentale da considerare quando si progetta un veicolo è valutare gli ingombri dei vari componenti. E' possibile, in prima istanza, effettuare una analisi semplificata relative dimensioni delle macchine elettriche implementate a bordo veicolo. Queste macchine, quando funzionano come motori, trasformano l'energia elettrica in ingresso in energia meccanica disponibile all'albero in uscita, mentre accade l'opposto quando funzionano come generatori. Esse si fondano sull'interazione tra un campo magnetico e un sistema di correnti. Si consideri il seguente schema:

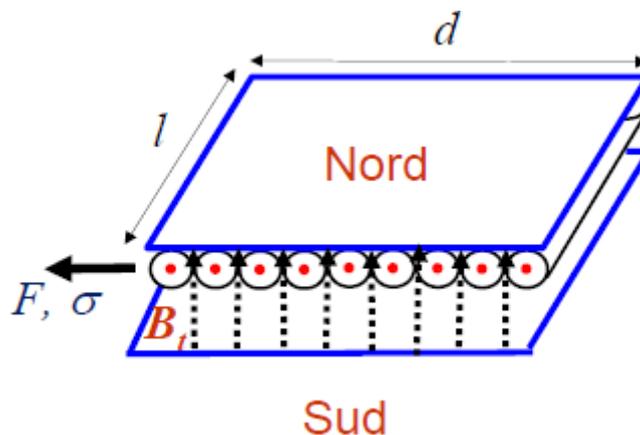


Figura 2.24: Schema rappresentate dei conduttori percorsi da corrente e attraversati da un campo magnetico

La relazione fondamentale che lega la forza che si genera su un conduttore, attraversato da corrente ed immerso in un campo magnetico, è la seguente:

$$F = i * B * L \quad (2.9)$$

Dove B è il flusso magnetico, i è la corrente nel conduttore e L è la lunghezza del conduttore. Si può definire lo sforzo per unità di superficie, dimensionalmente corrispondente a  $N/m^2$ , come segue:

$$\sigma = \frac{F}{\text{Superficie}} \quad (2.10)$$

Nel caso di una moltitudine di conduttori, tale parametro è espresso dalla relazione:

$$\sigma = \frac{N * B_t * i * L}{l * d} = B_t * A_l \quad (2.11)$$

Dove:

- N è il numero di conduttori;
- $B_t$  è la densità di flusso al traferro espressa in Wb/m<sup>2</sup>;
- $A_l$  è la densità lineare di corrente di statore espressa in A/m

Si può esprimere la coppia generata dalla macchina elettrica mediante l'equazione di seguito riportata:

$$C = 2 * \sigma * V_r \quad (2.12)$$

Dove  $V_r$  è il volume del rotore. Ne consegue che il volume della macchina  $V_m$  è proporzionale alla coppia secondo la seguente relazione:

$$V_m \propto \frac{C}{B * \delta} \quad (2.13)$$

Dove B è la densità di flusso magnetico espressa in Wb/m<sup>2</sup> e  $\delta$  è la densità di corrente in A/m<sup>2</sup>. Sia B che  $\delta$  sono indici di sfruttamento dei materiali della macchina elettrica, pertanto dipendono dalle proprietà dei materiali stessi, dalle temperature ammissibili, dalle perdite specifiche, dal sistema di raffreddamento. Le densità di coppia e di potenza sono esprimibili come segue:

$$\frac{C}{V} \propto B * \delta \quad (2.14)$$

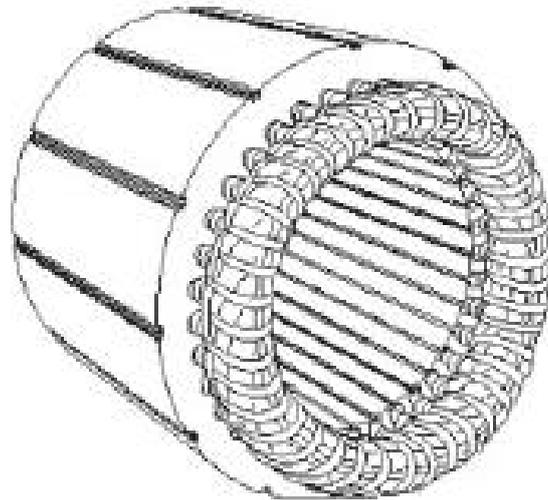
$$\frac{P}{V} \propto B * \delta * \omega \quad (2.15)$$

Dal momento che i coefficienti di sfruttamento diminuiscono con la velocità a causa delle perdite nel ferro, per effetto Joule e per correnti parassite, la densità di potenza cresce con  $\omega$  ma non linearmente. Un'altra caratteristica che impatta in maniera importante sulle dimensioni della macchina elettrica è il numero di coppie polari, infatti al crescere di esso si riducono l'altezza del giogo di statore e la lunghezza delle testate. In linea generale è possibile asserire che la taglia della macchina elettrica è funzione della coppia erogabile.

	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\delta$ [A/mm <sup>2</sup> ]
Raffreddamento ad aria naturale	2 - 20	1 - 5
Raffreddamento con ventilazione forzata	20 - 50	5 - 10
Raffreddamento ad acqua	50 - 100	10 - 30

**Tabella 2.5: Valori tipici di alcuni parametri di dimensionamento in funzione del tipo di raffreddamento**

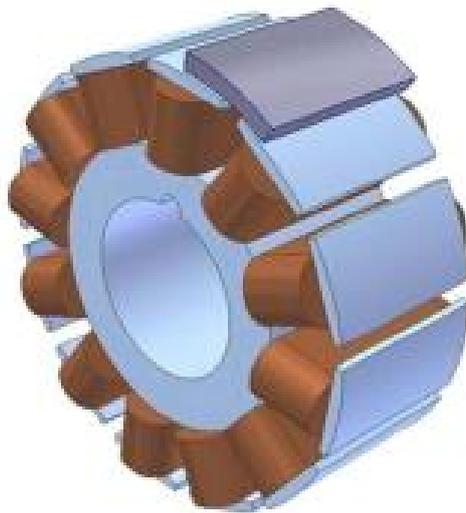
Gli avvolgimenti sono un altro elemento che influenza le dimensioni della macchina. Essi possono essere sostanzialmente distribuiti oppure concentrati, e devono essere isolati gli uni dagli altri e rispetto al ferro di statore. Nel caso degli avvolgimenti distribuiti il fattore di riempimento è in genere pari a 30-40%, che può salire fino a 60-80% nel caso di avvolgimenti distribuiti a piattina. Gli avvolgimenti a piattina permettono dunque di avere minor ingombro, però possono presentare perdite addizionali alle alte frequenze per effetto pelle sulle piattine. Per quanto concerne invece gli avvolgimenti concentrati, essi hanno sono caratterizzati da fattori di riempimento simili agli avvolgimenti distribuiti a piattina ma presentano dei vantaggi legati al minor ingombro assiale della testata, miglior tolleranza dei guasti, facilità di realizzazione. Di contro, gli avvolgimenti concentrati possono comportare ripple di coppia e vibrazioni maggiori. Per quanto concerne il sistema di raffreddamento, esso è necessario poiché all'interno delle cave, dove sono presenti gli avvolgimenti, si possono raggiungere temperature elevate, fino a 150 °C. Tali temperature possono risultare problematiche per i materiali isolanti sui conduttori. I sistemi di raffreddamento possono essere ad aria naturale, con ventilazione forzata ed infine con liquido (acqua, spray di olio etc.). La potenza spesa per il circuito di raffreddamento non è in genere trascurabile.



**Figura 2.25: Avvolgimenti distribuiti**



**Figura 2.26: Avvolgimenti distribuiti a piattina**



**Figura 2.27: Avvolgimenti concentrati**

I materiali usati nelle macchine elettriche si possono classificare come segue:

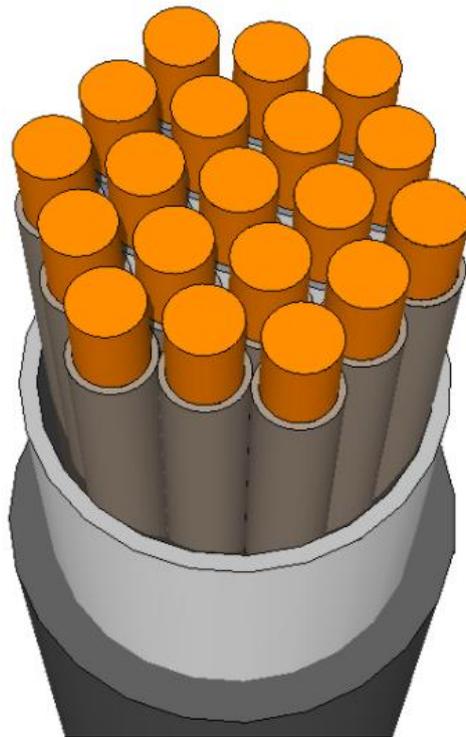
- materiali conduttori;
- materiali isolanti;
- materiali magnetici;
- materiali strutturali

I materiali conduttori devono essere caratterizzati da alta conducibilità, ovvero devono permettere il passaggio di corrente con basse cadute di tensione e basse perdite. I materiali più usati sono il rame e l'alluminio, il primo è caratterizzato da una conducibilità più elevata, il secondo invece presenta resistività più alta ma è meno pesante e meno costoso.

	<b>Rame</b>	<b>Alluminio</b>
Peso specifico	$8900 \text{ kg/m}^3$	$2700 \text{ kg/m}^3$
Resistività a 0 °C	$1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$	$2,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$
Temperatura critica	$-234,5 \text{ }^\circ\text{C}$	$-230 \text{ }^\circ\text{C}$

**Tabella 2.6: Confronto tra rame e alluminio su alcune proprietà**

Nei conduttori si verificano delle perdite attribuibili a vari effetti. Un primo effetto è l'effetto Joule, per cui un conduttore attraversato da corrente dissipa una parte di potenza sotto forma di calore. Nel caso di corrente alternata, un ulteriore effetto che causa perdite è l'effetto pelle. Tale effetto è causato dal fatto che gli strati interni del conduttore sono caratterizzati da impedenze maggiori, pertanto la corrente non è distribuita in maniera uniforme sul conduttore, ma tenderà ad addensarsi verso la superficie. La disuniformità della densità di corrente causa perdite addizionali rispetto al caso di densità uniforme. In ultimo vi è un effetto di prossimità, ovvero un conduttore percorso da corrente alternata produce correnti parassite nei conduttori adiacenti. Per contenere le perdite per correnti parassite di fraziona la sezione del conduttore in più sezioni parallele, un esempio ad alte frequenze è il filo Litz. Tale filo è costituito da una moltitudine di trefoli di fili sottili, isolati singolarmente, attorcigliati e intrecciati insieme.



**Figura 2.28: Sezione di un filo Litz**

I materiali isolanti invece hanno il compito di isolare elettricamente le parti in tensione dalle altre parti della macchina, di isolare tra loro avvolgimenti diversi e infine di isolare tra loro le singole spire di uno stesso avvolgimento. I materiali isolanti hanno alta resistività e vengono classificati in base alla rigidità dielettrica, definita come il valore limite del campo elettrico oltre il quale si produce una conduzione di elettricità attraverso un materiale dielettrico.

<b>Materiale</b>	<b>Rigidità dielettrica [kV/mm]</b>
Acqua distillata	15
Gomma naturale	20 – 40
Politetrafluoroetilene	65
Mica	50 – 120
Olio minerale	12 – 20
Bachelite	10

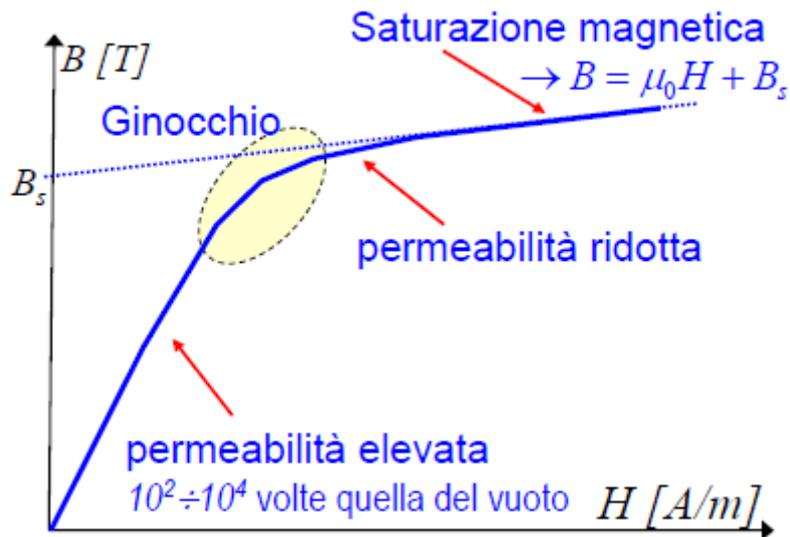
**Tabella 2.7: Rigidità dielettrica di alcuni materiali**

I materiali isolanti sono la parte più sensibile alle sollecitazioni termiche, dielettriche e meccaniche nelle macchine elettriche. Il loro invecchiamento è legato a fattori quali umidità, agenti chimici, vibrazioni, gradienti di tensione e temperatura di esercizio. In base alle proprietà di resistenza alla temperatura vengono classificati in classi di isolamento.

<b>Classe di isolamento</b>	<b>Temperatura massima [°C]</b>
Y	95
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
N	200
R	220

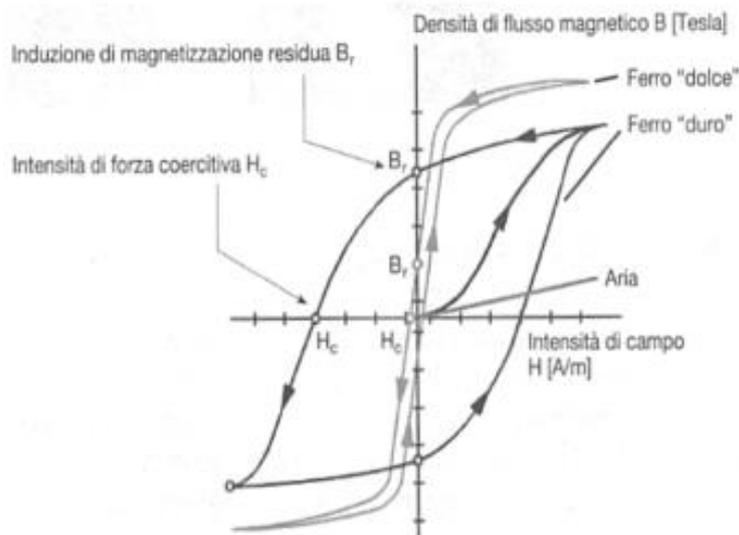
**Tabella 2.8: Classi di isolamento secondo norma CEI 60085**

Per quanto riguarda invece i materiali magnetici, essi sono classificati in funzione del valore della loro permeabilità magnetica relativa  $\mu_r$  e si dividono in diamagnetici, paramagnetici e ferromagnetici. I materiali di nostro interesse in questo campo sono i materiali ferromagnetici, caratterizzati da  $\mu_r = 10^2 - 10^4$ , tra i quali rientrano ferro, cobalto, nichel, le ferriti. La permeabilità è funzione del punto di lavoro nel piano B-H, come raffigurato in figura 2.17.



**Figura 2.29: Permeabilità magnetica sul piano B-H per materiali ferromagnetici**

Sottoponendo il materiale ad un lento ciclo simmetrico di magnetizzazione, si ottiene un comportamento isteretico. I materiali ferromagnetici si dividono in *dolci*, caratterizzati da un ciclo di isteresi stretto e da elevata permeabilità, sono usati nelle macchine elettriche sotto forma di lamierini con lo scopo di realizzare nuclei magnetici, mentre i materiali ferromagnetici duri, caratterizzati da un ciclo di isteresi largo e valori di induzione residua e campo coercitivo elevati, sono usati per la realizzazione dei magneti permanenti.



**Figura 2.30: Ciclo di isteresi magnetica**

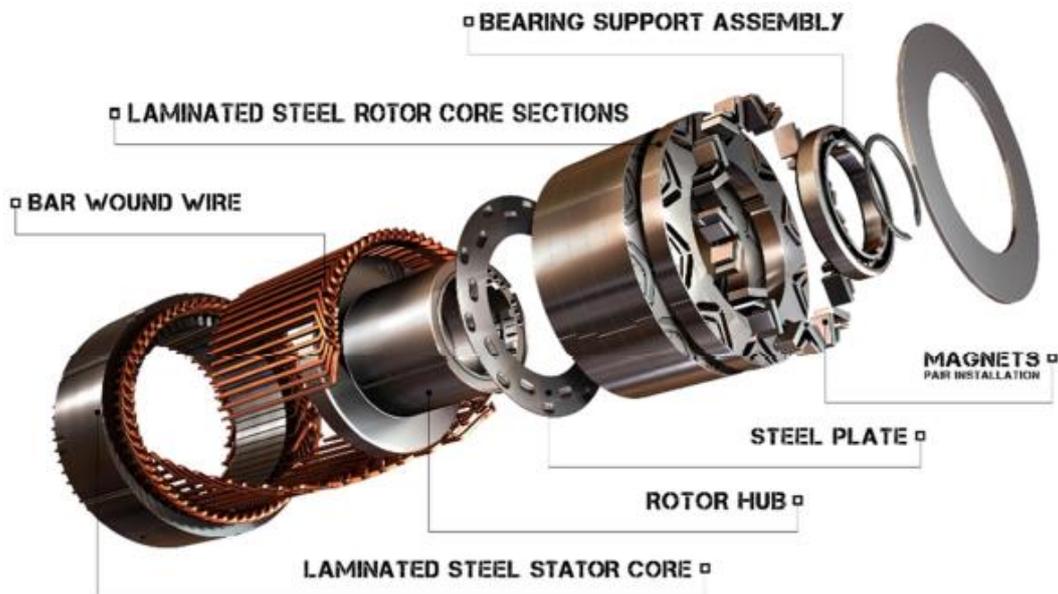
In caso di magnetizzazione con campo magnetico alternato di un materiale ferromagnetico, si verificano delle perdite di potenza per isteresi magnetica e per correnti parassite. Le perdite per isteresi sono associate all'energia dissipata dall'unità di volume del materiale per descrivere un ciclo di isteresi completo, e dipendono linearmente dalla frequenza di magnetizzazione. Le perdite per correnti parassite invece si verificano poiché il flusso magnetico variabile nel materiale ferromagnetico induce in esso delle f.e.m. che tendono a contrastare la variazione di flusso che le ha generate. Per contrastare le perdite per correnti parassite si orientano i lamierini dei nuclei magnetici

parallelamente al flusso magnetico. I magneti permanenti possono subire, in certe condizioni operative, una smagnetizzazione parziale o totale (per esempio ad alte temperature), pertanto è opportuno adottare dei sistemi di controllo per prevenire tale problema.

	$B_r$ [T]	$H_c$ [A/m]	$B_r/H_c$ [H/m]	$(BH)_{max}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	$T_{max}$ [°C]
<b>NdFeB</b>	1.28	978803	1.30772E-06	400	150
<b>SmCo</b>	1.05	732113	1.43421E-06	260	300
<b>NdFeB</b>	0.68	459958	1.4784E-06	100	150
<b>Alnico</b>	1.25	50930	2.45437E-05	55	540
<b>Ceramic</b>	0.39	254648	1.53153E-06	35	300
<b>Flexible</b>	0.16	109021	1.46761E-06	6	100

**Figura 2.31: Proprietà di alcuni materiali usati come magneti permanenti**

I materiali strutturali invece sono usati per costruire le varie parti meccaniche della macchina, come l'albero e la carcassa. In genere i più usati sono l'alluminio, la ghisa e l'acciaio. Attualmente, il trend del mercato vede un ampio utilizzo nel settore veicolistico di macchine sincrone a magneti permanenti interni e macchine sincrone a magneti permanenti superficiali ad avvolgimenti concentrati, anche se ultimamente si stanno sviluppando soluzioni magnetless. Nel caso di magneti permanenti superficiali, i magneti sono incollati sul giogo di rotore e sono posizionati al traferro della macchina, mentre nel caso di magneti interni essi sono inseriti all'interno di tasche dentro al rotore. In ambito veicolistico vengono usate anche macchine a flusso assiale.



**Figura 2.32: Esploso di una macchina elettrica sincrona a magneti permanenti interni**

## Esempi di macchine da lavoro ibride prodotte

La necessità di realizzare veicoli da lavoro più efficienti e meno inquinanti ha spinto l'industria e la ricerca scientifica verso lo studio di powertrain ibridi. L'introduzione di macchinari ibridi ha avuto come primo settore interessato quella della costruzione (escavatori, pale cariatrici etc.), passando poi per i sollevatori telescopici e infine per il settore delle macchine agricole. In questo capitolo vengono menzionati e brevemente descritti alcuni dei modelli che sono stati realizzati in questi settori.

### 1. *Escavatori*

Questa tipologia di macchinari è principalmente utilizzata per la rimozione di porzioni di terreno durante le operazioni di scavo. Alcuni tra i maggiori produttori mondiali di questa categoria di macchine hanno aggiunto al loro parco veicoli degli escavatori con powertrain ibridi, tra questi si annoverano Kobelco, Hitachi, Komatsu e Doosan. Una delle soluzioni più promettenti prevede un powertrain serie-parallelo, dove l'ICE alimenta direttamente un generatore, il quale alimenta secondo una configurazione serie delle pompe idrauliche, mentre il motore di rotazione (swing motor) è alimentato in configurazione parallelo dal generatore e dall'ESS (figura 2.21). Sono tuttavia stati realizzati anche degli escavatori serie e degli escavatori parallelo.

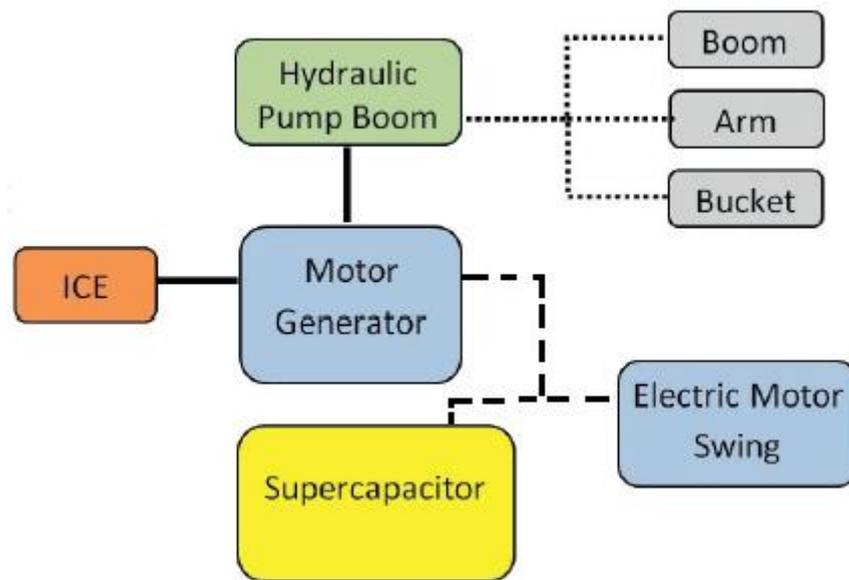


Figura 2.33: Schema di un escavatore ibrido serie-parallelo

### 2. *Pale cariatrici*

Le pale cariatrici sono veicoli da lavoro utilizzati per la movimentazione di materiale sciolto, al fine di spostarlo e caricarlo su altri veicoli che provvederanno a portarlo ad una opportuna destinazione. Queste macchine possono anche svolgere dei piccoli lavori di scavo. Tra i principali produttori di pale cariatrici, Volvo, John Deere e Hitachi hanno sviluppato delle alternative ibride. Volvo ha realizzato un veicolo ibrido parallelo, denominato Volvo L220F, il cui schema del powertrain è rappresentato in figura 2.22. L'idea di fondo è quella di fornire potenza elettrica addizionale quando richiesta, rigenerando la macchina durante le normali operazioni. A partire da tale veicolo, Volvo ha realizzato anche i veicoli LX1 e LX2. Anche l'azienda John Deere ha sviluppato una pala caricatrice con powertrain ibrido, il nome del modello in questione è John Deere 944K. Tale architettura è simile a quella del Volvo LX1, per cui l'ICE è collegato al

generatore, il quale è elettricamente collegato a 4 motori elettrici posti a livello delle ruote. La differenza principale è che nel John Deere 944K non vi è un sistema di stoccaggio dell'energia elettrica a bordo veicolo.

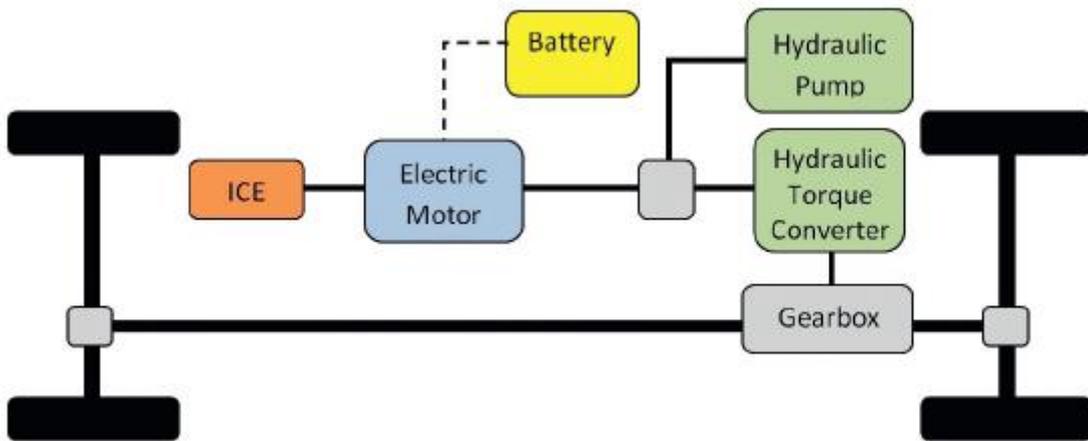


Figura 2.34: Schema del powertrain ibrido parallelo Volvo L220F

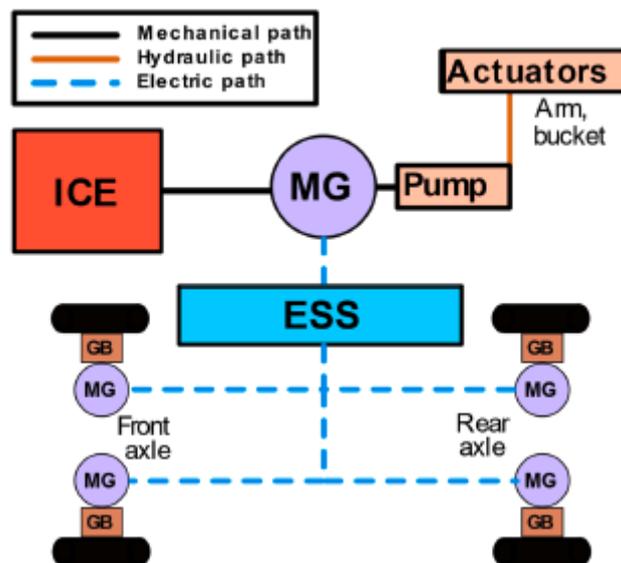


Figura 2.35: Schema del powertrain ibrido della pala caricatrice Volvo LX1

### 3. *Sollevatori telescopici*

Questa tipologia di veicoli viene usata per sollevare cariche mediante un elemento telescopico, il quale può essere dotato, per esempio, di forche regolabili. In questo campo architetture ibride sono state sviluppate da Merlo, Liebherr e Manitou. In figura 2.24 è rappresentato lo schema del powertrain serie-parallelo presentato dall'azienda italiana Merlo. Tale configurazione si presenta come un ibrido serie per quanto concerne la trazione, mentre si comporta come un ibrido parallelo per l'azionamento della pompa idraulica.

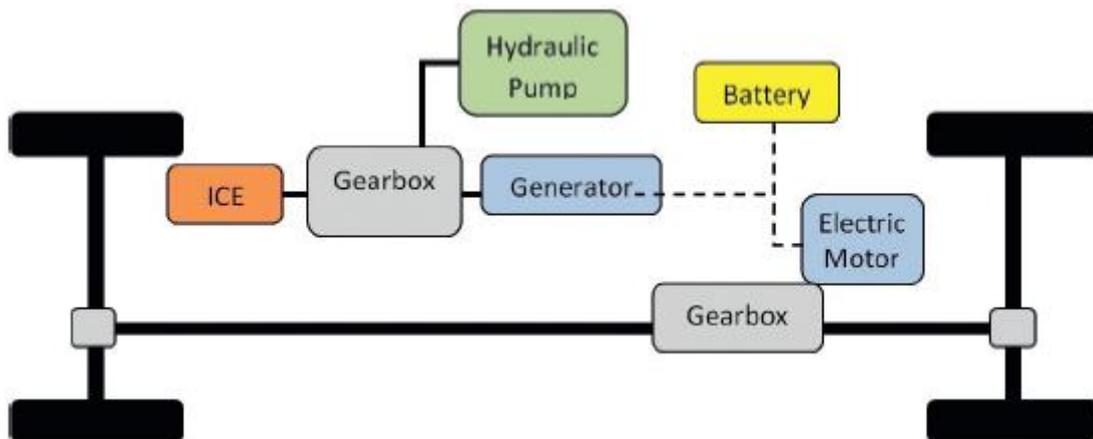


Figura 2.36: Schema del powertrain montato sul sollevatore telescopico sviluppato dall'azienda Merlo

#### 4. *Trattori agricoli*

I trattori agricoli vengono utilizzati per svolgere determinate operazioni nei campi, quali l'erpatura o l'irrigazione dei campi con particolari sostanze, oppure per il trasporto di materiali. Uno dei primi prototipi di trattori ibridi fu il Belarus/RuselProm 3022e, presentato nel 2009. Tale veicolo non è provvisto di un ESS e si identifica in un ibrido serie. Nel 2011 fu poi presentato dalla compagnia RigiTrac il modello EWD 120, il cui powertrain consiste in una architettura Serie dotato di 4 motori elettrici, uno per ogni ruota. Tale veicolo è inoltre dotato di una interfaccia elettrica per fornire potenza ad eventuali attrezzi attaccati, oltre che della normale PTO. La PTO è un innesto meccanico, collegato direttamente al motore, a cui si attaccano gli attrezzi che devono essere azionati dal trattore. Nel 2015 Claas ha sviluppato il modello Arion 650 Hybrid, dove l'unità elettrica è montata in parallelo all'ICE e nella trasmissione è presente un CVT. Nel 2016 John Deere ha presentato un trattore completamente elettrico, un anno dopo anche l'azienda Fendt ha presentato un modello full electric.

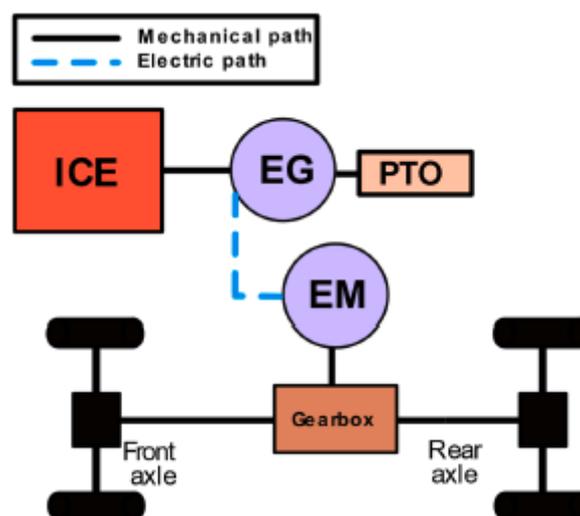


Figura 2.37: Schema del powertrain ibrido del trattore agricolo Belarus 3022e

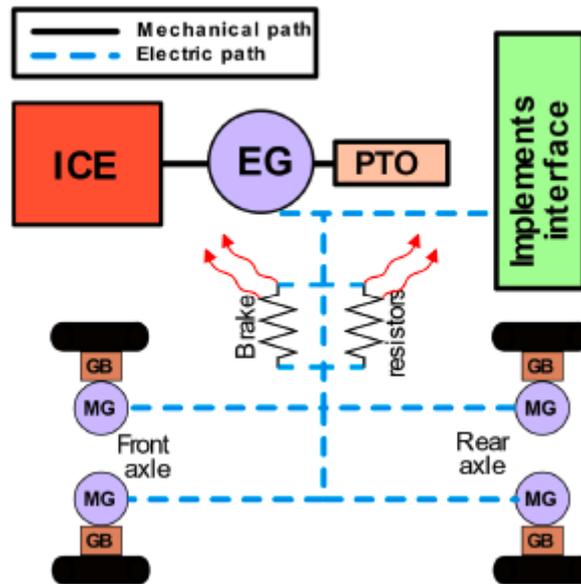


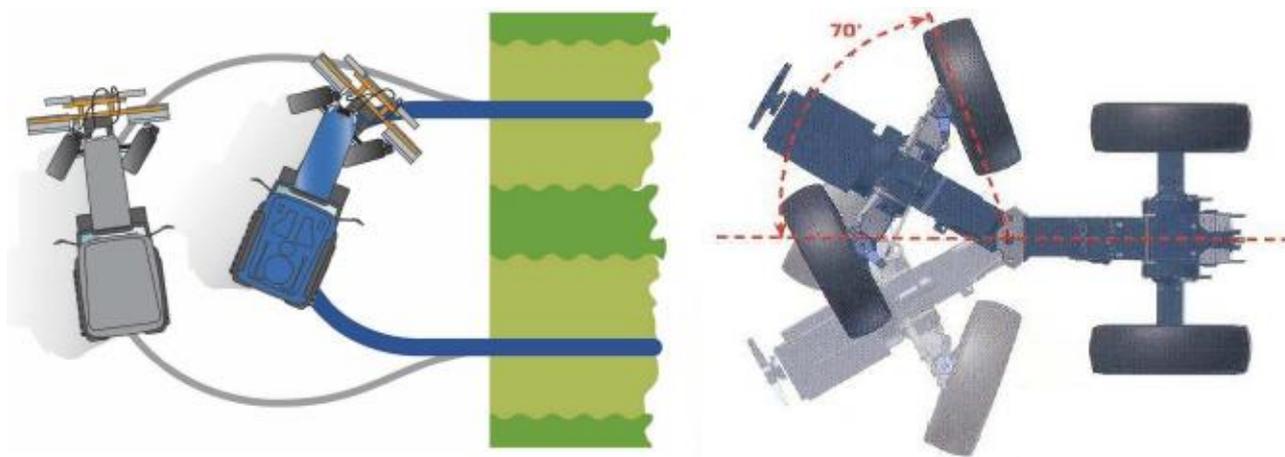
Figura 2.38: Schema del powertrain del trattore agricolo RigiTrac EWD 120

## Capitolo 3

# Modellazione di powertrain ibridi per un trattore da frutteto

### Panoramica generale sui trattori da frutteto

I trattori da frutteto sono una particolare categoria di trattori specializzati per operare all'interno di frutteti o vigneti. Rispetto ai trattori a campo aperto, essi presentano alcune differenze, a partire dalle dimensioni. Un trattore da frutteto, dovendo operare tra i filari degli alberi, ha dei vincoli per quanto concerne la sua larghezza massima, la quale in genere è minore rispetto ai trattori da campo. Oltre alla larghezza, anche l'altezza non deve essere eccessiva, per agevolare il transito in colture con tralci bassi oppure all'interno di serre. Un'altra differenza che vale la pena mettere in evidenza è il fatto che un trattore da frutteto deve poter garantire ridotti raggi di sterzata e, più in generale, deve essere in grado di effettuare manovre in spazi limitati, pertanto anche il passo è solitamente più corto. La manovrabilità, oltre ad essere favorita dal passo più corto, viene migliorata grazie all'impiego sul veicolo di un assale sterzante oppure di un collegamento snodabile.



**Figura 3.39: Rappresentazione schematica di uno sterzo per trattore agricolo da frutteto**

I trattori da frutteto inoltre presentano solitamente delle forme arrotondate, al fine di evitare che rami, foglie, reti o altri elementi si aggancino al veicolo. Questi veicoli infine sono, in genere, provvisti di impianti idraulici estremamente capaci e versatili. Il posto di guida di un trattore spesso è posto all'interno di una cabina e deve soddisfare alcune caratteristiche. In primis deve essere garantire una buona visibilità, senza zone d'ombra, con particolare attenzione alle zone anteriore e posteriore del veicolo. A tal scopo si adottano cabine completamente vetrate a 4 montanti e cofani ribassati. Un secondo aspetto importante del posto di guida è l'ergonomia: i comandi devono essere disposti secondo una logica intuitiva e devono essere distribuiti in maniera da essere di comodo azionamento, il sedile deve essere regolabile, le vibrazioni non devono essere eccessive (sia la cabina che il sedile stesso sono dotati di sospensioni), la cabina deve essere insonorizzata (qualora si superassero i limiti imposti dalla normativa si devono adottare dispositivi DPI come cuffie o tappi auricolari), l'ambiente

del guidatore deve essere climatizzato e pressurizzato. La pressurizzazione si realizza mediante appositi filtri ai carboni attivi. Per quanto riguarda gli organi di trazione, la soluzione più frequente è quella che prevede l'utilizzo di ruote, anche se si trovano sul mercato trattori dotati di cingolati.



**Figura 3.40: Trattore da frutteto mentre passa tra i filari di un vigneto**



**Figura 3.41: Trattore da frutteto mentre esegue una manovra in uno spazio ristretto**

## **Modellazione della dinamica longitudinale**

Il presente studio si prefigge l'obiettivo di confrontare delle possibili architetture ibride con il powertrain convenzionale applicati ad un trattore da frutteto. Un passaggio fondamentale per perseguire tale fine è quello di realizzare un modello che simuli in maniera sufficientemente affidabile il comportamento reale del veicolo e del sistema di propulsione. L'ambiente di simulazione scelto è quello di Simulink. In questa sezione l'attenzione è posta sulla modellizzazione della dinamica longitudinale 1D del veicolo. Il modello fisico è rappresentato in figura 3.4 e soddisfa le seguenti equazioni:

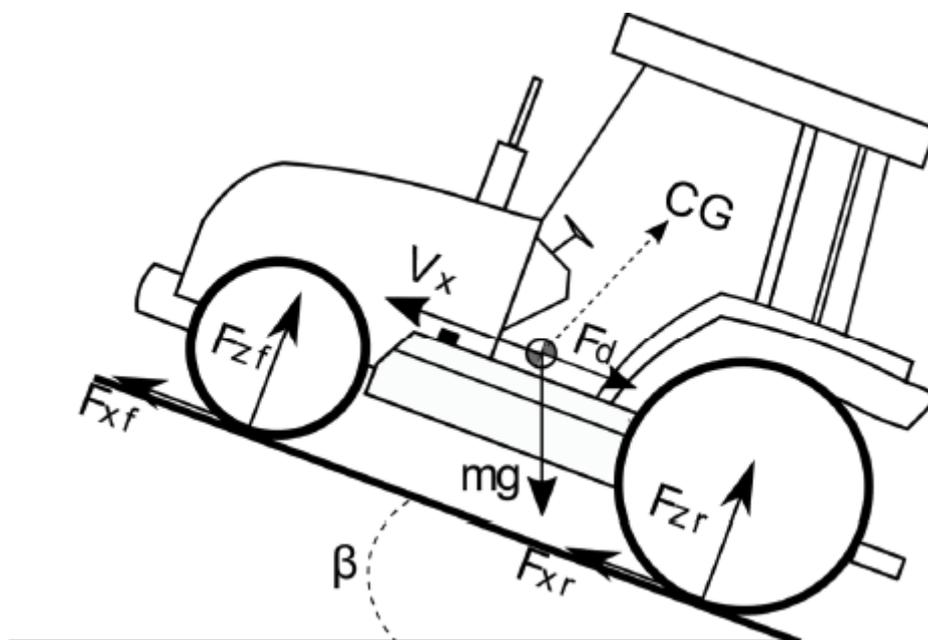
$$m\dot{v}_x = 2 * (F_{xf} + F_{xr}) - F_d - mg * \sin \beta \quad (3.1)$$

$$F_{zf} = \frac{-h * (F_d + mg * \sin \beta) + b * mg * \cos \beta}{2 * (a + b)} \quad (3.2)$$

$$F_{zr} = \frac{h * (F_d + mg * \sin \beta) + a * mg * \cos \beta}{2 * (a + b)} \quad (3.3)$$

Dove:

- $a$  e  $b$  sono le distanze, lungo l'asse longitudinale del veicolo, tra il centro di gravità e gli assali, rispettivamente, anteriore e posteriore;
- $h$  è la distanza del centro di gravità dal suolo;
- $m$  è la massa del veicolo;
- $g$  è l'accelerazione di gravità;
- $\beta$  è l'angolo di inclinazione della strada;
- $v_x$  è la velocità longitudinale del veicolo;
- $F_d$  è la forza dovuta alla resistenza aerodinamica e segue l'equazione  $F_d = 0,5C_d A_f \rho v_x^2$ , dove  $C_d$  è il coefficiente di resistenza aerodinamica,  $\rho$  è la densità dell'aria e  $A_f$  è la sezione frontale del veicolo;
- $F_{xf}$  e  $F_{xr}$  sono le forze di contatto tra pneumatico e suolo nella direzione longitudinale;
- $F_{zf}$  e  $F_{zr}$  sono le forze di contatto nella direzione normale tra pneumatico e suolo



**Figura 3.42: Modello della dinamica longitudinale del veicolo**

Nel modello della dinamica longitudinale, per quanto concerne le ruote, sono stati inseriti quattro blocchi per la simulazione del contatto pneumatico-suolo, i quali si basano sui coefficienti di attrito statico e dinamico. Il coefficiente di attrito statico determina la coppia applicata a cui la ruota perde trazione e inizia a slittare, mentre il coefficiente dinamico indica l'ammontare di coppia che la ruota trasmette al suolo una volta che ha iniziato a slittare. Sono stati inseriti, a livello di trasmissione, due blocchi, ciascuno per assale, che simulano il comportamento dei differenziali. In ultimo, al fine di poter valutare anche il comportamento in frenata del veicolo, sono presenti gli elementi per la simulazione dei freni. Il blocco complessivo della dinamica longitudinale è uguale per tutti i powertrain considerati.

## Modellazione della PTO

La presa di potenza è un dispositivo in grado di derivare, dal motore del trattore, la potenza per azionare attrezzature, macchine operatrici e organi esterni che vengono accoppiati al veicolo. La trasmissione del moto, nel nostro caso di studio, è di tipo interamente meccanico. Il moto viene derivato mediante una serie di ingranaggi e una frizione. In genere l'innesto della PTO si trova nella parte posteriore dei trattori, anche se in alcuni modelli è presente anche nella parte anteriore.

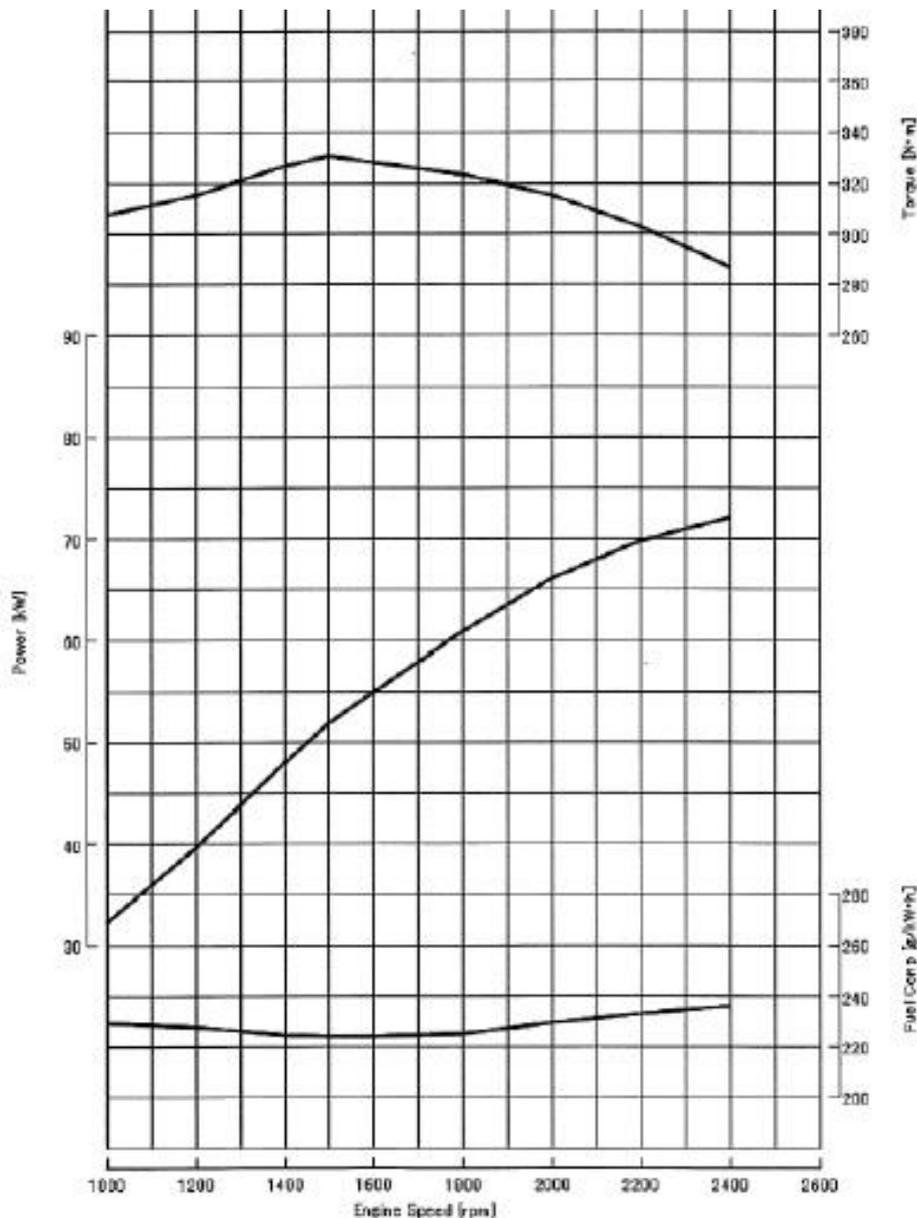


**Figura 3.43: Presa di potenza posteriore su un trattore**

La PTO in genere ha una velocità nominale di rotazione di 540 rpm oppure 1000 rpm, pertanto, tenendo conto delle velocità del motore termico, si devono introdurre dei rapporti di trasmissione di riduzione. Di norma i rapporti sono intorno a 4 per i 540 rpm e intorno a 2 per i 1000 rpm. Nella modellazione della PTO è stato pertanto introdotto un blocco *simple gear* relativo al rapporto di riduzione. Per simulare la potenza assorbita dalle attrezzature è presente un altro blocco che rappresenta una sorgente di coppia, dove il valore della coppia è negativo ad indicare che il flusso di potenza è dal powertrain alla PTO. La presa di potenza è collegata meccanicamente al powertrain mediante una frizione.

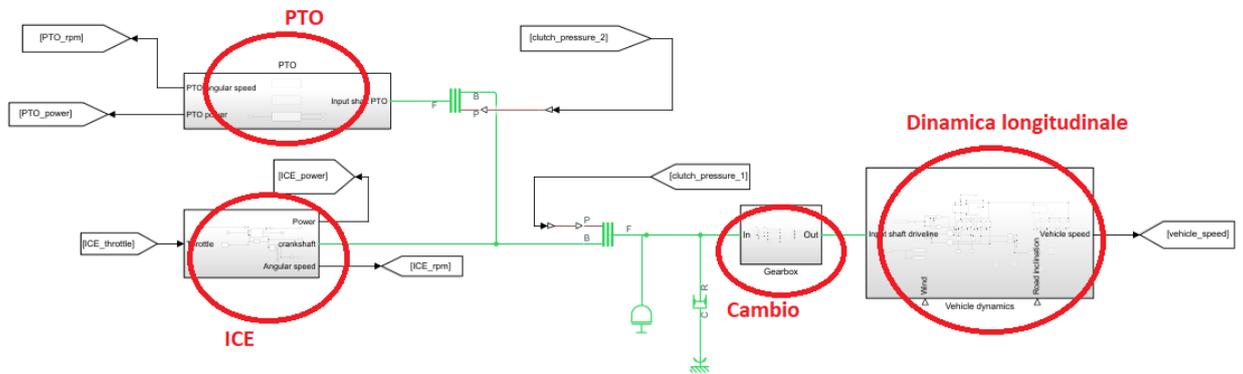
## Modellazione powertrain convenzionale

Il powertrain convenzionale è costituito da un'unica sorgente di potenza, ovvero un motore ad accensione per compressione alimentato a gasolio. Tale unità termica viene simulata da un apposito blocco denominato *generic engine*, a cui vengono fornite le curve di coppia e potenza in funzione del numero di giri del motore. In figura 3.6 sono riportate tali curve.



**Figura 3.44: Dall'alto verso il basso: curva di coppia, curva di potenza, curva dei consumi specifici dell'unità termica del caso convenzionale**

Il powertrain convenzionale scelto per il confronto ha una potenza nominale di circa 73 kW erogabile a 2400 rpm. In figura 3.7 è rappresentato il modello Simulink usato per le simulazioni relative alle prestazioni e ai consumi.



**Figura 3.45: Modello Simulink per la simulazione del powertrain convenzionale**

Il cambio è stato modellizzato introducendo una serie di rapporti di trasmissione, identificabili nelle marce, che vengono attivate da delle frizioni per simulare i cambi di marcia. I rapporti di trasmissione vengono modellati con i blocchi *simple gear*. Nella tabella 3.1 sono riassunti i parametri relativi al blocco della dinamica longitudinale, mentre nella tabella 3.2 sono riportate le caratteristiche riguardanti il motore termico e il cambio.

Massa del veicolo	2570 kg
Area frontale	4 m <sup>2</sup>
Coefficiente aerodinamico	0,8
Raggio delle ruote	0,683 m
a	1,2 m
b	1,6 m
h	0,5 m

**Tabella 3.9: Caratteristiche principali della dinamica longitudinale**

Potenza nominale ICE	73 kW @ 2400 rpm
Numero di giri minimo ICE	1000 rpm
Numero di giri massimo ICE	2400 rpm
Numero di giri funzionamento PTO	540 rpm
Numero di marce	4
Rapporti di trasmissione	115, 56, 28, 15

**Tabella 3.10: Caratteristiche principali dell'ICE e del cambio**

Il cambio di un trattore convenzionale in genere è dotato di molte marce, da 12 fino a 36, ma nel nostro caso non è di nostro interesse introdurre tutte.

## Modellazione del powertrain serie

Come anticipato in precedenza, in questa configurazione sono presenti tre macchine: l'ICE, una prima macchina elettrica reversibile, denominata generatore, ed una seconda macchina elettrica reversibile, chiamata motore. Il blocco usato per la simulazione delle macchine elettriche è denominato *Motor & Drive (System Level)*. I powertrain ibridi, rispetto al caso convenzionale, sono equipaggiati con un motore termico downsized. In questo studio, tutte le configurazioni ibride montano lo stesso ICE. In figura 3.8 sono riportate le curve caratteristiche di tale unità termica.

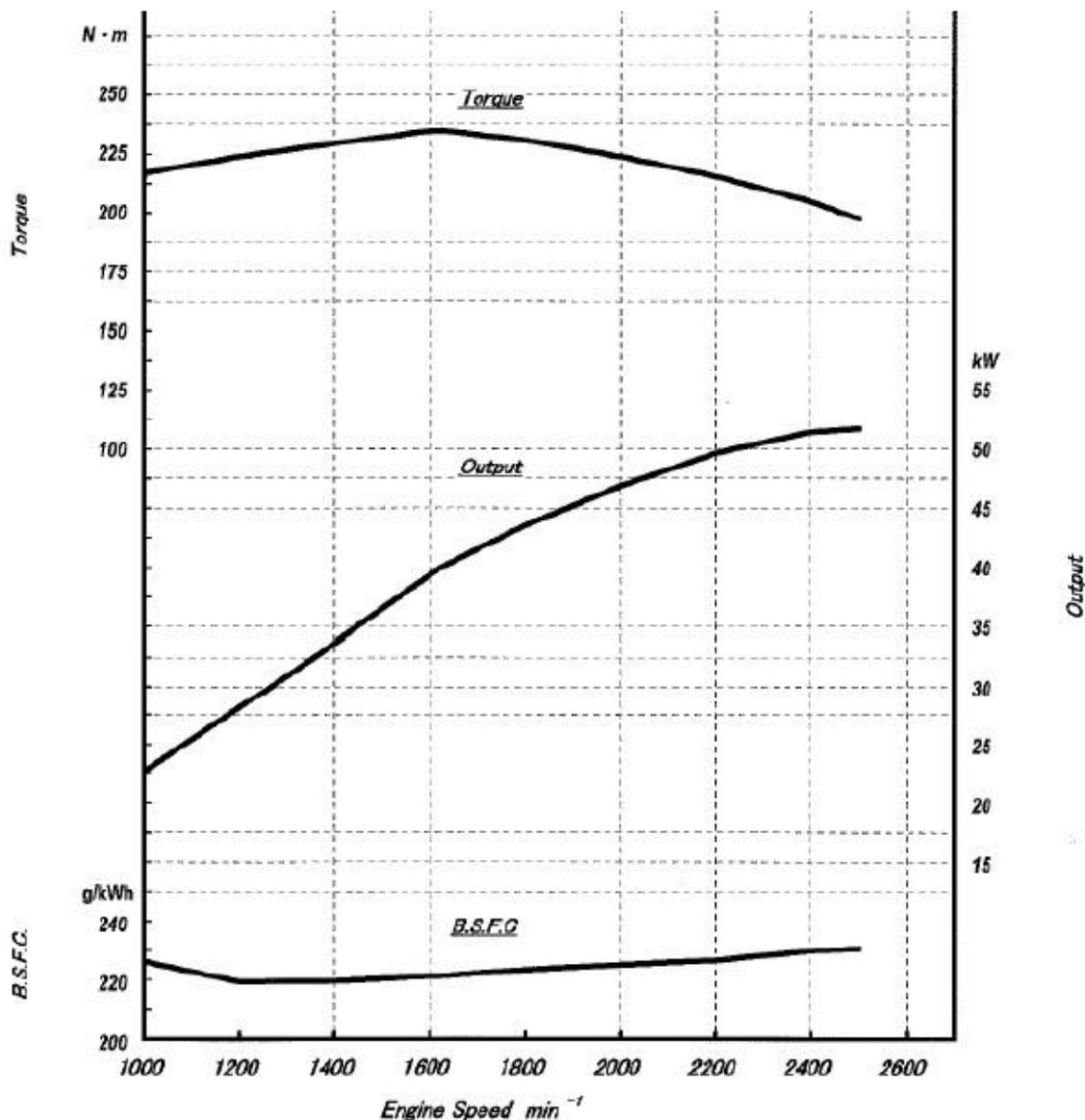
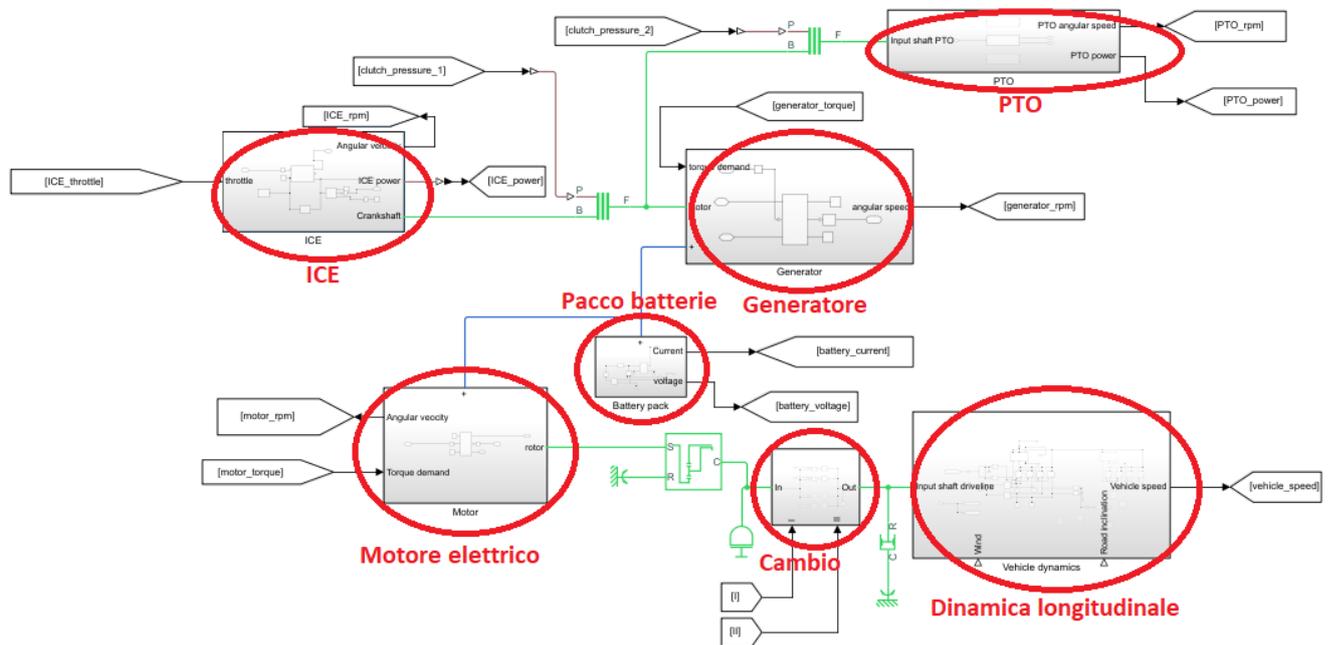


Figura 3.46: Dall'alto verso il basso: curva di coppia, curva di potenza, curva dei consumi specifici dell'unità termica impiegata nei powertrain ibridi in esame

In figura 3.9 è riportato il modello Simulink ideato per la simulazione del powertrain ibrido serie.



**Figura 3.47: Modello Simulink del powertrain serie**

Sono state elaborate due versioni differenti del powertrain serie:

1. Serie I

Potenza massima generatore elettrico	56 kW
Coppia massima generatore elettrico	230 N*m
Potenza massima motore elettrico	54 kW
Coppia massima motore elettrico	90 N*m
Numero di marce cambio	2
Rapporti di trasmissione	97, 35

**Tabella 3.11: Parametri del serie I**

2. Serie II

Potenza massima generatore elettrico	56 kW
Coppia massima generatore elettrico	230 N*m
Potenza massima motore elettrico	63 kW
Coppia massima motore elettrico	100 N*m
Numero di marce cambio	2
Rapporti di trasmissione	103, 38

**Tabella 3.12: Parametri del Serie II**

Come si può evincere dai dati della trasmissione, in questa architettura il veicolo è dotato di un cambio con sole due marce, una per il regime veloce ed una per il regime lento. A differenza del caso convenzionale, questo non è dovuto all'esigenza di semplificare il modello, ma corrisponde al reale

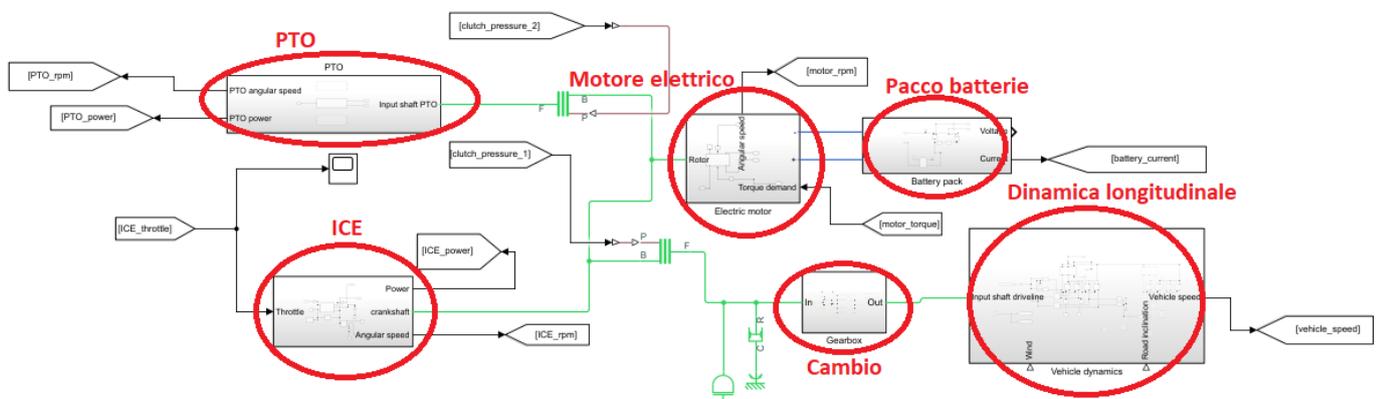
numero di marce che avrebbe un ipotetico prototipo dotato di questo powertrain. Per quanto riguarda il sistema di stoccaggio energia elettrica, esso è costituito da degli accumulatori elettrochimici. Il pacco batterie è stato modellato usando una sorgente di tensione ed una resistenza. La tensione è stata fissata a 600 V, mentre la capacità è pari a 16 kWh. Il pacco batterie è uguale per tutti i powertrain considerati. Per quanto concerne la PTO, essa è collegata meccanicamente all'ICE e al generatore. Qualora la potenza erogata dall'unità termica non fosse sufficiente, il generatore, essendo una macchina elettrica reversibile, può intervenire e fornire potenza prelevandola dal pacco batterie, mentre in caso contrario il surplus di potenza dell'ICE può essere sfruttato per fare una operazione di ricarica.

Tensione del pacco batterie	600 V
Capacità del pacco batterie	16 kWh

**Tabella 3.13: Proprietà del pacco batterie**

## Modellazione del powertrain parallelo

In questa configurazione sono presenti il motore termico downsized (caratteristiche in figura 3.8) e un motore elettrico, entrambi vincolati cinematicamente alle ruote. In figura 3.10 è raffigurato il modello Simulink usato per la simulazione di questa architettura.



**Figura 3.48: Modello Simulink del powertrain parallelo**

Analogamente a quanto realizzato per la precedente architettura serie, anche in questo caso sono state ipotizzate due versioni di ibrido parallelo.

### 1. Parallelo I

Potenza nominale ICE	53 kW @ 2500 rpm
Numero di giri minimo ICE	1000 rpm
Numero di giri massimo ICE	2500 rpm
Numero di giri funzionamento PTO	540 rpm
Potenza massima motore elettrico	30 kW
Coppia massima motore elettrico	130 N*m

**Tabella 3.14: Parametri Parallelo I**

## 1. Parallelo II

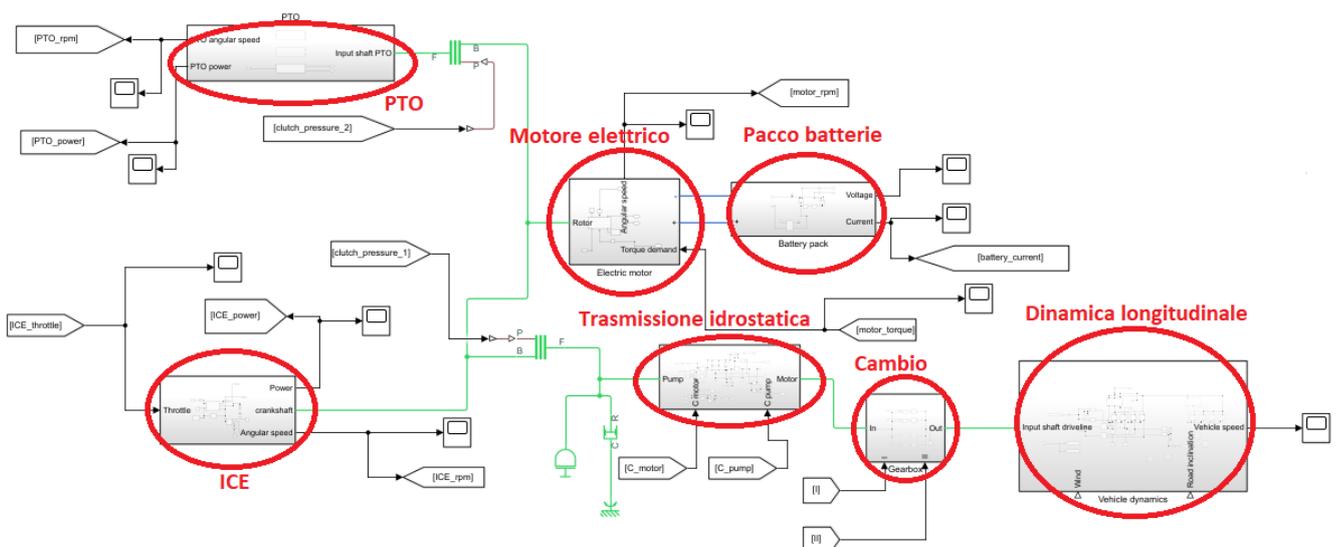
Potenza nominale ICE	53 kW @ 2500 rpm
Numero di giri minimo ICE	1000 rpm
Numero di giri massimo ICE	2500 rpm
Numero di giri funzionamento PTO	540 rpm
Potenza massima motore elettrico	22 kW
Coppia massima motore elettrico	94 N*m

**Tabella 3.15: Parametri Parallelo II**

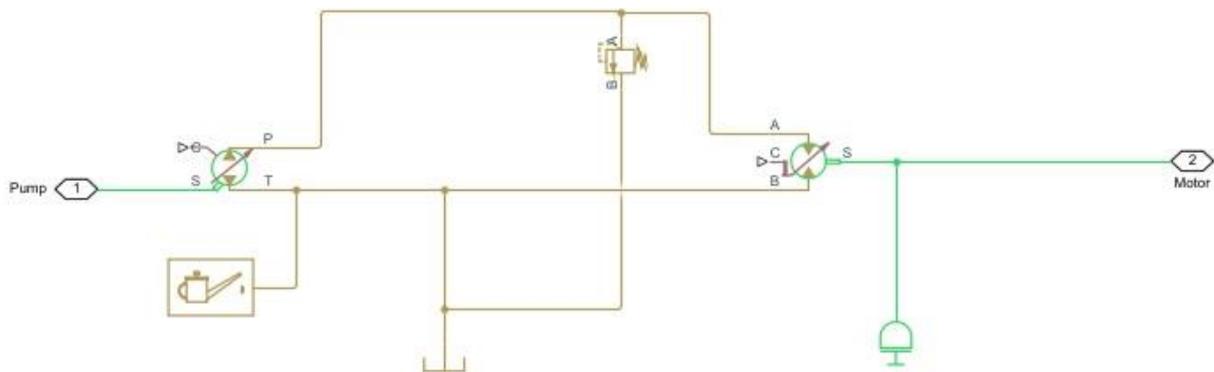
Per quanto concerne il cambio, esso è uguale per entrambe le versioni Parallelo ed è lo stesso del caso convenzionale. Entrambe le sorgenti di potenza sono collegate all'albero della PTO.

## Modellazione del powertrain con trasmissione idrostatica

In questa architettura sono presenti l'ICE downsized e un motore elettrico collegati in parallelo, mentre la sostanziale differenza con la precedente configurazione si trova a livello della trasmissione. La trasmissione è infatti di tipo idrostatico, ovvero le due unità di propulsione azionano una pompa idraulica, la quale trasmette potenza, per mezzo di un fluido in un circuito con una certa portata e pressione, ad un motore idraulico. Tale motore idraulico converte la potenza idraulica del fluido in potenza meccanica. A valle del circuito idraulico è presente un cambio con due marce (come nel caso Serie), una per il regime veloce ed una per il regime lento. Grazie alla trasmissione idrostatica, il motore termico e il motore elettrico sono svincolati dalle ruote, dal momento che la regolazione della velocità avviene variando la cilindrata della pompa idraulica. La PTO è collegata per via meccanica diretta alle due sorgenti di potenza. L'unità termica e l'unità elettrica sono le stesse della configurazione Parallelo II.



**Figura 3.49: Modello Simulink del powertrain con trasmissione idrostatica**



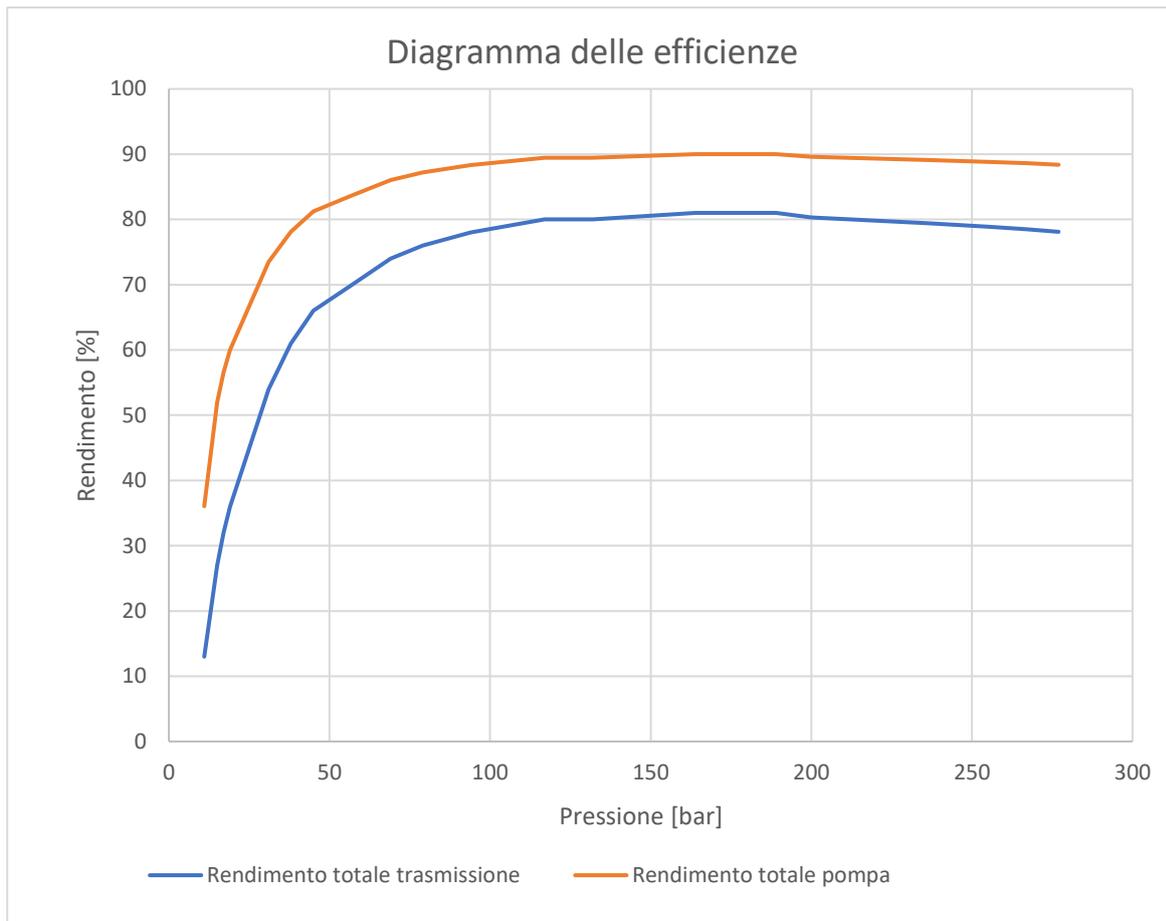
**Figura 3.50: Modello della trasmissione idrostatica**

Il circuito idraulico è costituito da una pompa a cilindrata variabile, un motore a cilindrata fissa e una valvola limitatrice di pressione. Le caratteristiche sono riassunte nella tabella 3.8.

Cilindrata pompa	$80 \text{ cm}^3$
Nominal pressure gain pompa	$250 \text{ bar}$
Velocità angolare nominale pompa	$1500 \text{ rpm}$
Cilindrata motore	$80 \text{ cm}^3$
Nominal pressure drop motore	$250 \text{ bar}$
Velocità angolare nominale motore	$1500 \text{ rpm}$
Pressione di intervento della valvola limitatrice	$300 \text{ bar}$

**Tabella 3.16: Caratteristiche del circuito idraulico**

In figura 3.13 si riportano gli andamenti delle efficienze del gruppo idrostatico in esame, ricavati in condizioni statiche a 1500 rpm, con fluido a 50 °C e con viscosità pari a 30 mm<sup>2</sup>/s.



**Figura 3.51: Rendimento del gruppo idrostatico a 1500 rpm**

I rapporti di trasmissione del cambio sono 38 per il regime lento e 13 per il regime veloce.

## Modellazione dei consumi

Dal momento che l'interesse principale di questo studio è rivolto al confronto fra diverse architetture, per modellizzare i consumi di gasolio dei powertrain si è scelto di usare una formulazione ricavata dal *Nebraska Tractor Test Laboratory* sulla base dei risultati ottenuti su più di 500 trattori Diesel. Le relazioni di questo modello sono le seguenti:

$$Q_F = (0,0434 * X + 0,019) * P_{nom} \quad (3.4)$$

$$Q_R = Q_F * [1 - (N - 1) * (0,45 * X + 0,877)] \quad (3.5)$$

Dove:

- $Q_F$  è il consumo di gasolio a carico parziale e full throttle (gal/h);
- $Q_R$  è il consumo di gasolio a carico parziale e reduced throttle (gal/h);
- $X$  è il carico effettivo espresso come il rapporto tra la potenza effettiva e la potenza massima alla stessa velocità;

- $P_{nom}$  è la potenza nominale del motore (hp);
- $N$  è il rapporto tra l'effettiva velocità di rotazione del motore e la velocità nominale a cui è valutata la potenza nominale

I consumi delle batterie invece sono ricavati sulla base delle seguenti relazioni:

$$Capacità\ utilizzata = \int_0^t i_{batt} dt \quad (3.6)$$

$$SOC = \frac{Capacità\ nominale - Capacità\ utilizzata}{Capacità\ nominale} \quad (3.7)$$

Dove la corrente è positiva quando è uscente dalle batterie.

# Capitolo 4

## Simulazione e confronto delle prestazioni e dei consumi delle varie architetture

### Strategie di controllo dei powertrain ibridi

#### 1. Ibridi Parallelo e Elettro-idraulico

La strategia di controllo può essere schematicamente rappresentata da un diagramma ad albero, in cui il primo step è legato al fatto se il motore termico sia in idle o meno. Nel caso in cui l'ICE stia funzionando in idle, esso fornisce potenza per, qualora fosse possibile, ricaricare il pacco batterie con una velocità massima di  $0,5C$ . Nel momento in cui invece il motore termico non sia in idle, lo step successivo dipende dal SOC delle batterie. Quando esso è superiore al 30%, la modalità di funzionamento è denominata *charge depleting*, ovvero le batterie forniscono energia all'unità elettrica, mentre in caso contrario la modalità di funzionamento è detta *charge sustaining*. Nel caso *charge depleting*, l'unità elettrica interviene in funzione del carico, espresso in %, dell'unità termica. La funzione di intervento è stata impostata del tipo  $x^5$ . A titolo di esempio, se l'unità termica sta funzionando al 30% del suo carico, l'unità elettrica interviene allo 0,243% della sua coppia massima, mentre se l'ICE si trova ad operare al 90% allora il motore elettrico fornirà il 59% del suo carico massimo. Quando il SOC del pacco batterie raggiunge la soglia del 30%, il powertrain entra in modalità *charge sustaining*, ovvero cerca di mantenere il più possibile il livello di carica intorno a tale valore. L'ICE viene controllato in base alla velocità imposta dal guidatore.

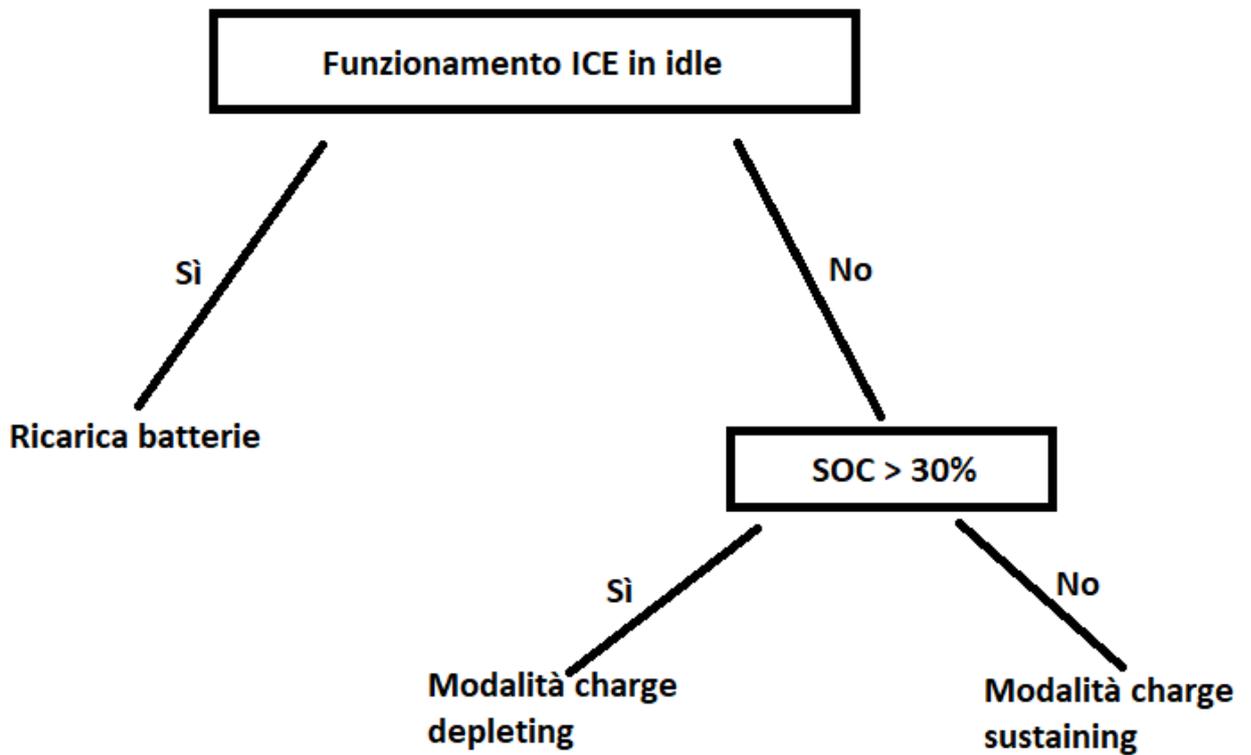


Figura 4.52: Schema semplificato della strategia di controllo del Parallelo e dell'Elettro-idraulico

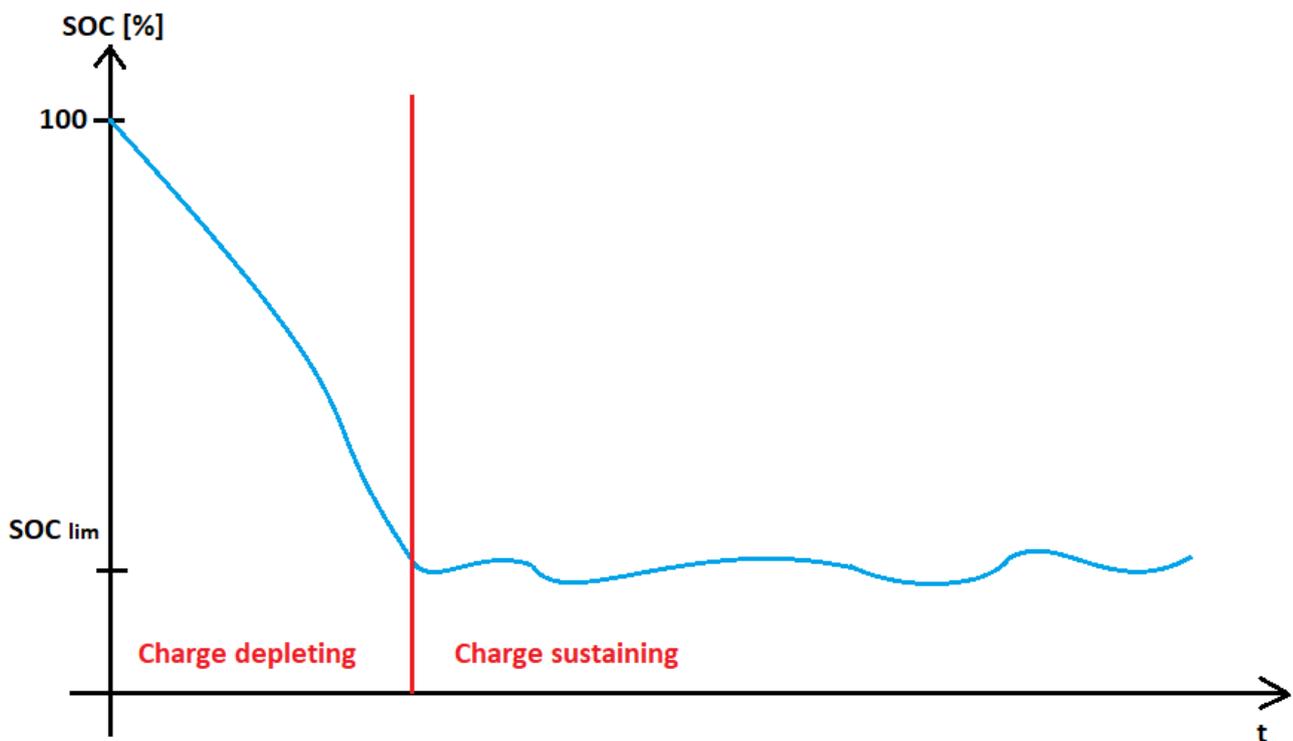


Figura 4.53: Andamento del SOC

## 2. Ibrido Serie

Nel caso del powertrain serie il diagramma ad albero della strategia di controllo è molto simile al caso precedente, nonostante si debbano gestire due macchine elettriche. Per quanto riguarda il motore elettrico, esso è controllato in base alla velocità imposta al veicolo dal guidatore. Il generatore invece è regolato in maniera analoga al motore elettrico nel caso Parallelo. Vi sono però alcune diversità: la prima risiede nella modalità charge depleting, infatti la funzione di intervento cambia a seconda che il veicolo proceda a regime veloce o a regime lento. Nel caso di regime lento, la funzione di intervento è stata impostata del tipo  $x^7$ , mentre nel caso di regime veloce, dal momento che si vuole preservare la durata della carica del pacco batterie, è stata fissata del tipo  $x^{1/5}$ . Al fine di evitare correnti in scarica eccessive, nel caso di funzionamento in regime lento, il generatore viene anche controllato in base alla corrente di scarica misurata. La potenza richiesta al generatore, quando esso preleva energia dal pacco batterie, viene pertanto ridotta nel momento in cui la corrente si avvicina al limite pratico di 5C (limite per scarica impulsiva). In figura 4.3 è rappresentato il diagramma semplificato ad albero della strategia di controllo per l'architettura Serie (non è rappresentato il sistema di controllo della corrente di scarica). Dal momento che l'ICE è svincolato dalle ruote, durante le fasi di movimentazione rimorchio o di spostamento senza attrezzature in uso, è possibile spostare il punto di funzionamento dell'unità termica al fine di ridurre al minimo i consumi.

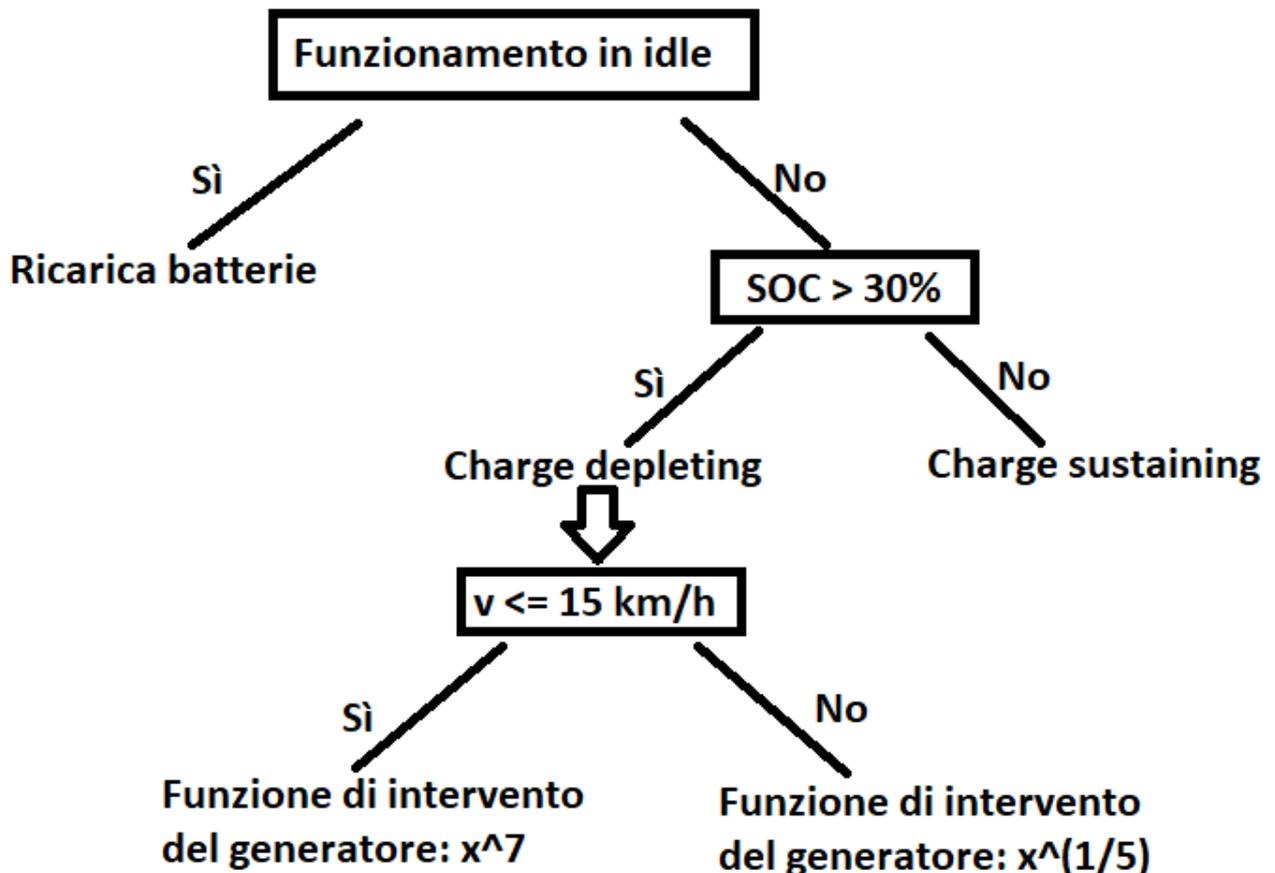


Figura 4.54: Diagramma ad albero semplificato della strategia di controllo del generatore per l'architettura Serie

## Prestazioni in accelerazione e in pendenza

Un aspetto importante per la valutazione di un powertrain sono le sue prestazioni in accelerazione e in pendenza. Dal momento che la legislazione italiana limita la velocità massima dei trattori agricoli a 40 km/h, sono state analizzate le prestazioni nelle accelerazioni 0-15 km/h e 0-40 km/h, nel caso senza rimorchio, con rimorchio da 6000 kg e infine con rimorchio da 10000 kg. Nel caso di powertrain convenzionale e ibrido parallelo sono stati eseguiti 3 cambi di marcia, alle rispettive velocità di 5, 10 e 20 km/h. Il tempo di gearshifting è stato ipotizzato pari a 0,5 secondi, inoltre è stato considerato un ulteriore ritardo di 0,2 secondi dovuti all'azione del filtro pedale. Nel caso invece delle architetture serie ed elettro-idraulico viene eseguito un solo cambio di marcia alla velocità di 15 km/h circa. I risultati dei test sono riportati in tabella 4.1.

	Convenzionale	Parallelo I	Parallelo II	Serie I	Serie II	Serie hydro
t <sub>0-15 km/h</sub> senza rimorchio	2,2 s	2,2 s	2,2 s	1,2 s	1 s	1 s
t <sub>0-15 km/h</sub> rimorchio 6 t	3,4 s	3,2 s	3,4 s	3,5 s	3 s	3 s
t <sub>0-15 km/h</sub> rimorchio 10 t	4,3 s	4,1 s	4,4 s	5,4 s	4,5 s	4,1 s
t <sub>0-40 km/h</sub> senza rimorchio	5,6 s	5,3 s	5,6 s	6,9 s	5,4 s	4,9 s
t <sub>0-40 km/h</sub> rimorchio 6 t	14,7 s	12,5 s	14,7 s	25,7 s	19,8 s	17,5 s
t <sub>0-40 km/h</sub> rimorchio 10 t	23,3 s	19,3 s	23,3 s	49,8 s	35,1 s	29,5 s

**Tabella 4.17: Risultati delle prove in accelerazione**

Per quanto concerne le prove in pendenza, esse sono state eseguite con partenza del veicolo da fermo. I risultati sono riportati in tabella 4.2, essi rappresentano la massima pendenza affrontabile dalle varie architetture in diverse condizioni operative.

	Convenzionale	Parallelo I	Parallelo II	Serie I	Serie II	Serie hydro
Massima pendenza a 5 km/h senza carico	65 %	65 %	65 %	55 %	65 %	65 %
Massima pendenza a 30 km/h senza carico	23 % (32 % se con rapporto dedicato)	25 % (37 % se con rapporto dedicato)	23 % (32 % se con rapporto dedicato)	15 %	18 %	25 %
Massima pendenza a 40 km/h senza carico	22 %	25 %	22 %	14 %	17 %	20 %
Massima pendenza a 5 km/h, rimorchio 10 t	40 %	45 %	40 %	6 %	9 %	12 %
Massima pendenza a 15 km/h, rimorchio 5 t	10 % (15 % se con rapporto dedicato)	10 % (17 % se con rapporto dedicato)	10 % (17 % se con rapporto dedicato)	11 %	15 %	15 %

**Tabella 4.18: Risultati delle prove relative alle prestazioni in pendenza**

Per quanto riguarda questi risultati è doveroso fare una precisazione: i trattori in genere dispongono di molti rapporti di trasmissione (da 12 fino a 36), mentre in questa analisi, nel caso di powertrain convenzionale e powertrain ibrido parallelo, ne vengono considerati soltanto 4. Qualora si avessero dei rapporti dedicati per arrivare a 15 km/h e a 30 km/h a circa 2300 rpm dell'albero motore, le prestazioni sarebbero:

- Massima pendenza a 15 km/h con rimorchio di 5 t: 17 % per l'ibrido parallelo I, 17 % per l'ibrido parallelo II e 15 % per il powertrain convenzionale;
- Massima pendenza a 30 km/h senza rimorchio: 37 % per l'ibrido parallelo I, 32 % per l'ibrido parallelo II e 32 % per il powertrain convenzionale.

## **Prestazioni sui consumi orari con attrezzature e rimorchi**

In seguito alle analisi sulle prestazioni in accelerazione e pendenza, sono state analizzate e confrontate le prestazioni sui consumi orari totali durante l'uso di alcune attrezzature e durante la movimentazione di rimorchi. Le attrezzature considerate per il confronto sono tre: trituratore, atomizzatore ed erpice rotante.

### 1. Biotrituratore

Il biotrituratore è una macchina il cui scopo è lo sminuzzamento di rami, foglie, potature ed altri residui del genere che possono derivare dalla manutenzione di un frutteto. Esso possiede in genere una tramoggia per raccogliere il materiale trinciato.

### 2. Atomizzatore

L'atomizzatore è un attrezzo usato per fare trattamenti antiparassitari, concime fogliare e altro, esso è molto usato nei frutteti, in particolare nei frutteti a chioma. I componenti principali sono un serbatoio, una pompa idraulica, degli ugelli e un ventilatore. La pompa preleva il liquido dal serbatoio e lo manda agli ugelli, i quali lo polverizzano e lo sparano sul ventilatore. Quest'ultimo ha il compito di spargere le goccioline di liquido per mezzo del flusso d'aria che genera. L'atomizzatore agricolo può essere portato, trainato o semovente (in quest'ultimo caso la struttura è dotata di motore proprio). Per quantificare la potenza assorbita da questa attrezzatura si è proceduto considerando quali fossero i componenti attivati dalla presa di potenza: una pompa idraulica ed un ventilatore. La potenza assorbita dalla pompa idraulica si ricava dalla seguente relazione:

$$P_{ass,p} = \frac{Q * p}{\eta_p} \quad (4.1)$$

Dove  $Q$  è la portata di fluido espressa in  $m^3/s$ ,  $p$  è la pressione del fluido e  $\eta$  è il rendimento della pompa. La potenza assorbita dal ventilatore è invece espressa dalla seguente equazione:

$$P_{ass,v} = \frac{Q_{aria} * \Delta p_t}{\eta_v} \quad (4.2)$$

Dove  $\Delta p_t$  è la variazione di pressione totale del fluido. La pressione totale di un fluido è data dalla somma tra pressione dinamica e pressione statica. La pressione dinamica in un ventilatore è valutabile come segue:

$$p_d = \rho * v^2 * \frac{1}{2} \quad (4.3)$$

Dove  $\rho$  è la densità del fluido in  $kg/m^3$  e  $v$  è la velocità del fluido in  $m/s$ . La potenza totale assorbita dall'atomizzatore è:

$$P_{ass,tot} = P_{ass,p} + P_{ass,v} \quad (4.4)$$

### 3. Erpice rotante

L'erpice è un attrezzo che viene utilizzato, a seguito di un'aratura, per rompere le zolle e dissodare il terreno in vista della semina; in altri casi l'erpice serve anche per interrare il concime sparso sul terreno. L'operazione di erpicatura è simile all'operazione di fresatura, pertanto i parametri di interesse sono la velocità di avanzamento, la profondità di passata e la larghezza di lavorazione. La potenza assorbita dalla PTO dall'erpice è esprimibile dalla seguente relazione:

$$P_{ass,1} = K * p * B \quad (4.5)$$

Dove  $K$  è un coefficiente espresso in  $W/(m^*m)$ ,  $p$  è la profondità di passata e  $B$  è larghezza effettiva di lavoro. Oltre alla potenza assorbita dalla PTO, vi è un contributo di potenza assorbita anche a livello di trazione, la quale è ricavabile come segue:

$$P_{ass,2} = K_1 * v_a * p * B_1 \quad (4.6)$$

Dove  $K_1$  è un coefficiente espresso in  $N/(m^*m)$ ,  $v_a$  è la velocità di avanzamento,  $p$  è la profondità di passata e  $B_1$  è larghezza operativa di lavoro.

Le considerazioni fatte sulle singole attrezzature servono per poter stimare il variare della potenza assorbita con il variare dei parametri operativi. A livello di simulazione, la potenza richiesta dalle varie operazioni è stata fissata su dei valori di riferimento misurati sul campo e non è stata calcolata con i precedenti modelli di atomizzatore ed erpice. La tabella 4.3 riporta i valori impostati di potenza assorbita per le tre attrezzature.

	<b>Trituratore</b>	<b>Atomizzatore</b>	<b>Erpice rotante</b>
Potenza minima	<i>12 kW</i>	<i>32 kW</i>	<i>36 kW</i>
Potenza media	<i>19 kW</i>	<i>36 kW</i>	<i>44 kW</i>
Potenza massima	<i>26 kW</i>	<i>40 kW</i>	<i>52 kW</i>

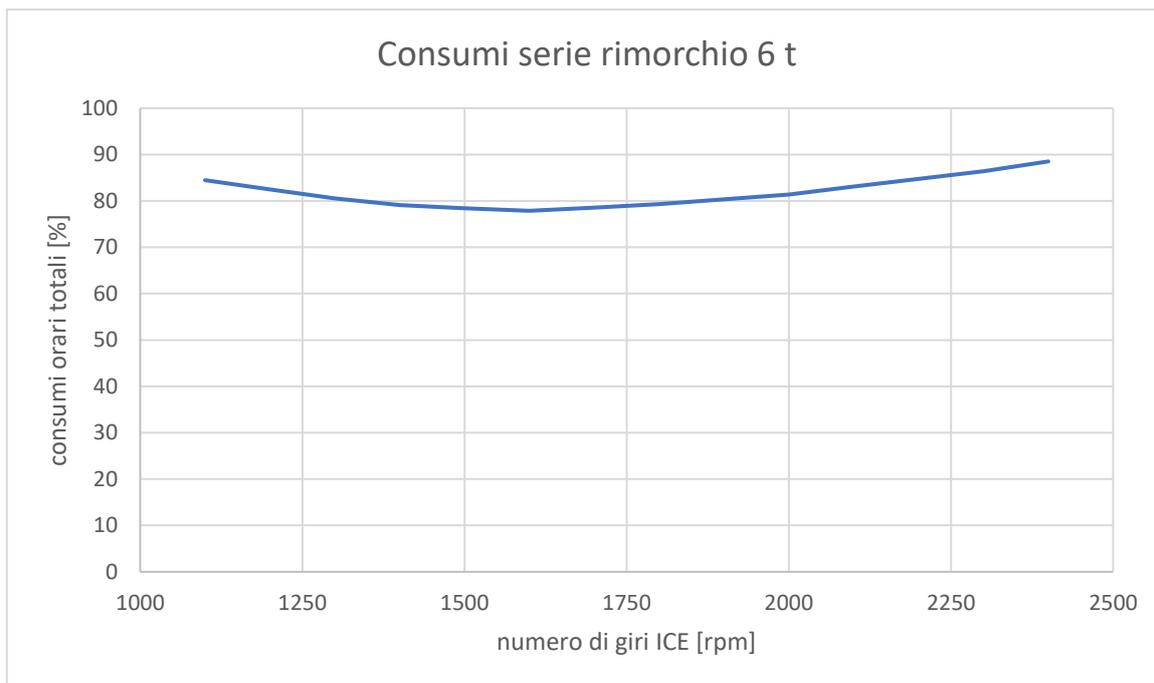
**Tabella 4.19: Potenza assorbita dalle varie attrezzature considerate**

Le simulazioni relative all'uso delle attrezzature sono state effettuate con velocità di avanzamento del veicolo fissata a 5 km/h e regime di rotazione della PTO pari a 540 rpm. Per quanto concerne la movimentazione di rimorchi, i consumi sono stati valutati nelle condizioni di coasting a 40 km/h con rimorchio da 6000 kg e 10000 kg. La tabella 4.4 riporta i valori dei consumi orari totali (ICE + EM), in modalità charge depleting, riferiti ai consumi del powertrain convenzionale. Per quanto riguarda i powertrain Serie I e Serie II nelle operazioni di movimentazione rimorchi, i valori riportati sono ricavati spostando il punto di lavoro dell'ICE al numero di giri che minimizza i consumi orari totali (riferimento fig. 4.4-4.5).

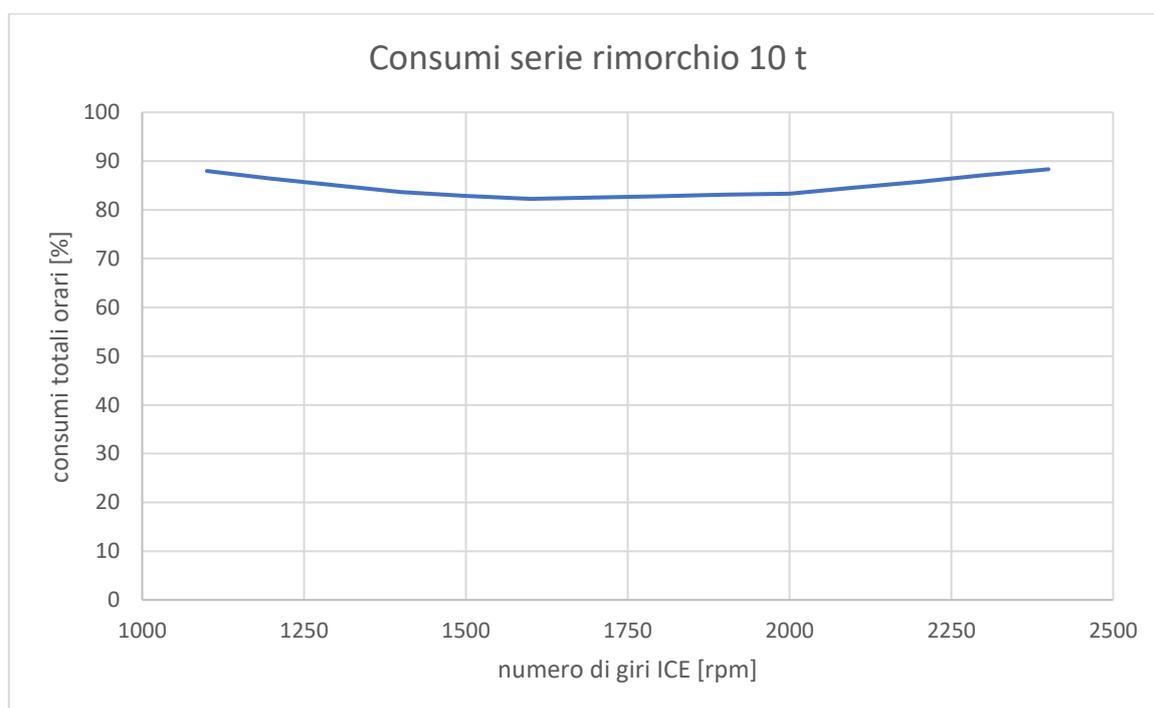
	<b>ICE convenzionale</b>	<b>Ibrido parallelo I</b>	<b>Ibrido parallelo II</b>	<b>Ibrido serie I</b>	<b>Ibrido serie II</b>	<b>Ibrido serie hydro</b>
Trituratore	<i>1</i>	<i>0,842</i>	<i>0,842</i>	<i>0,849</i>	<i>0,849</i>	<i>0,912</i>
Atomizzatore	<i>1</i>	<i>0,867</i>	<i>0,871</i>	<i>0,879</i>	<i>0,879</i>	<i>0,929</i>
Erpice rotante	<i>1</i>	<i>0,876</i>	<i>0,878</i>	<i>0,882</i>	<i>0,882</i>	<i>0,925</i>
Rimorchio 6000 kg	<i>1</i>	<i>0,846</i>	<i>0,846</i>	<i>0,779</i>	<i>0,779</i>	<i>0,936</i>
Rimorchio 10000 kg	<i>1</i>	<i>0,836</i>	<i>0,841</i>	<i>0,823</i>	<i>0,823</i>	<i>0,930</i>

**Tabella 4.20: Confronto sui consumi orari totali in modalità CD**

Nelle figure 4.4 e 4.5 sono riportati gli andamenti dei consumi al variare del punto di funzionamento dell'unità termica.

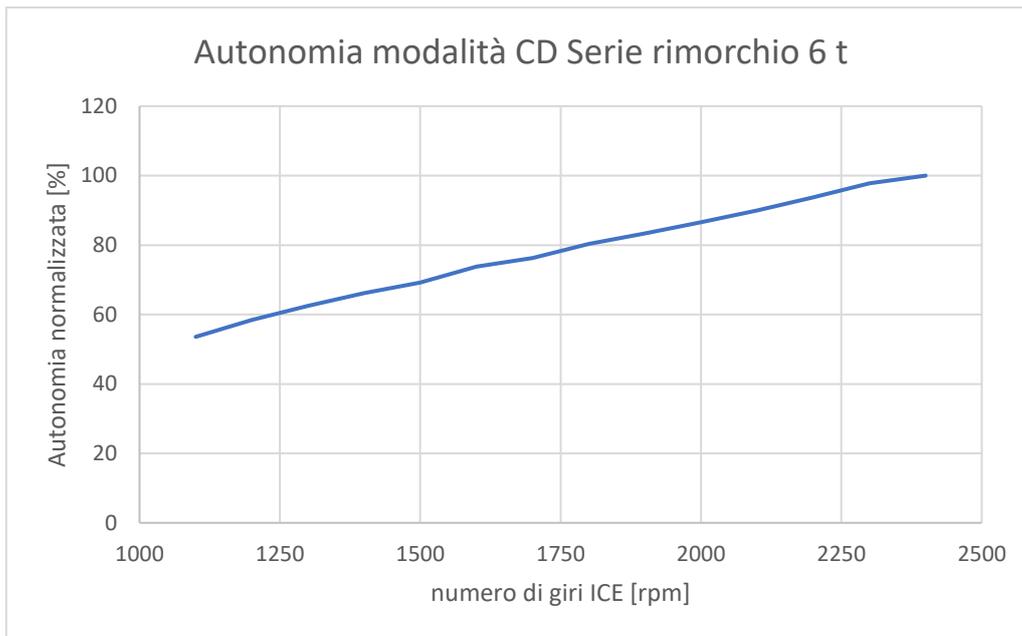


**Figura 4.55: Consumi orari movimentazione rimorchio 6 t al variare del punto di lavoro dell'ICE**

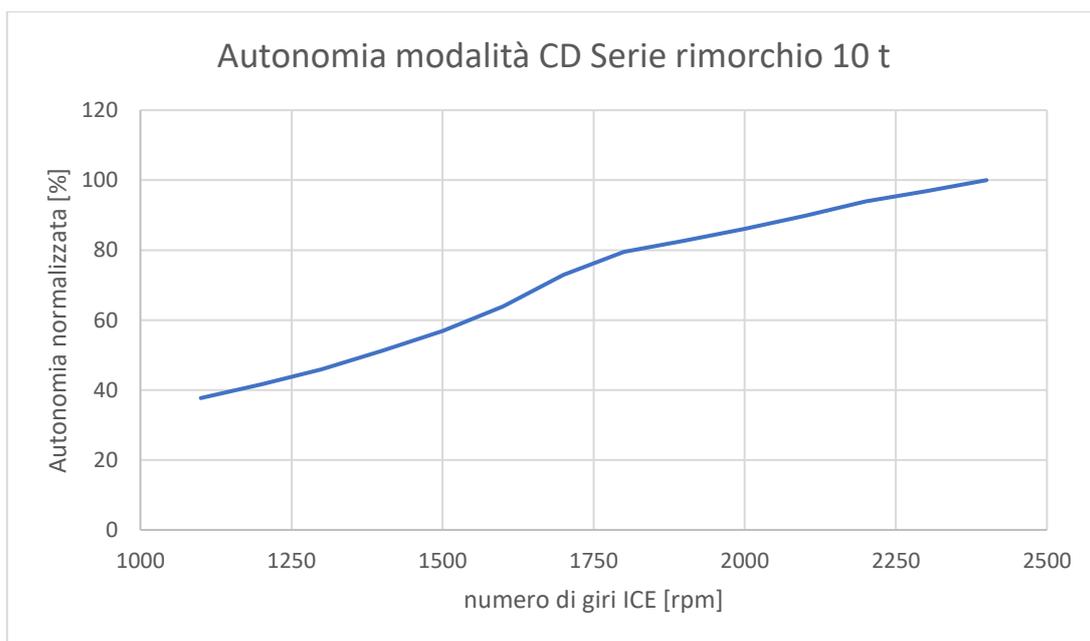


**Figura 4.56: Consumi orari movimentazione rimorchio 10 t al variare del punto di lavoro dell'ICE**

Oltre ai consumi orari, è importante valutare l'autonomia in modalità charge depleting delle varie architetture ibride. Per i powertrain Serie I e Serie II, nell'operazione di movimentazione rimorchi, l'autonomia varia col variare del punto di lavoro dell'ICE. Gli andamenti sono riportati nelle figure 4.6 e 4.7.

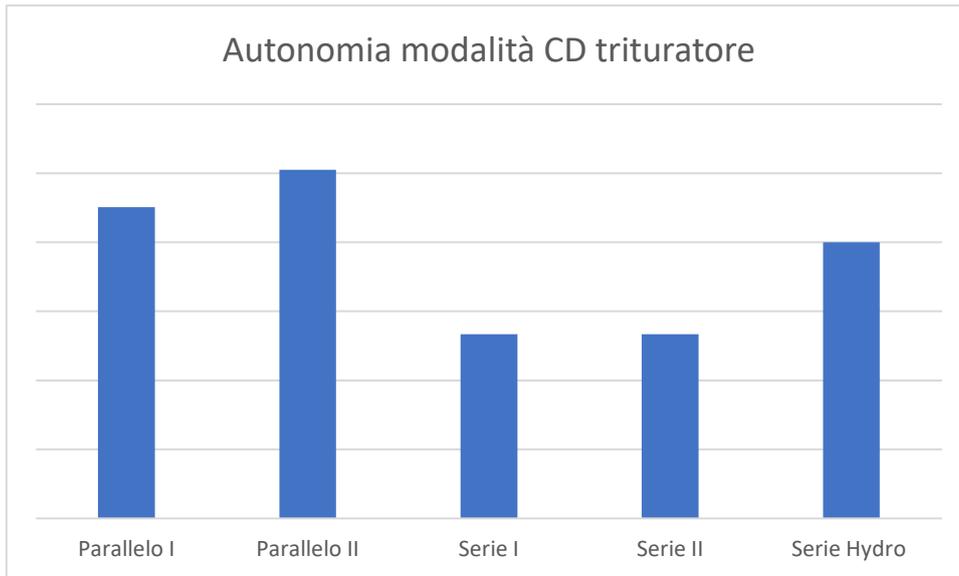


**Figura 4.57: Variazione dell'autonomia del powertrain Serie in modalità CD, nel caso movimentazione rimorchio 6 t, con il punto di lavoro dell'ICE**

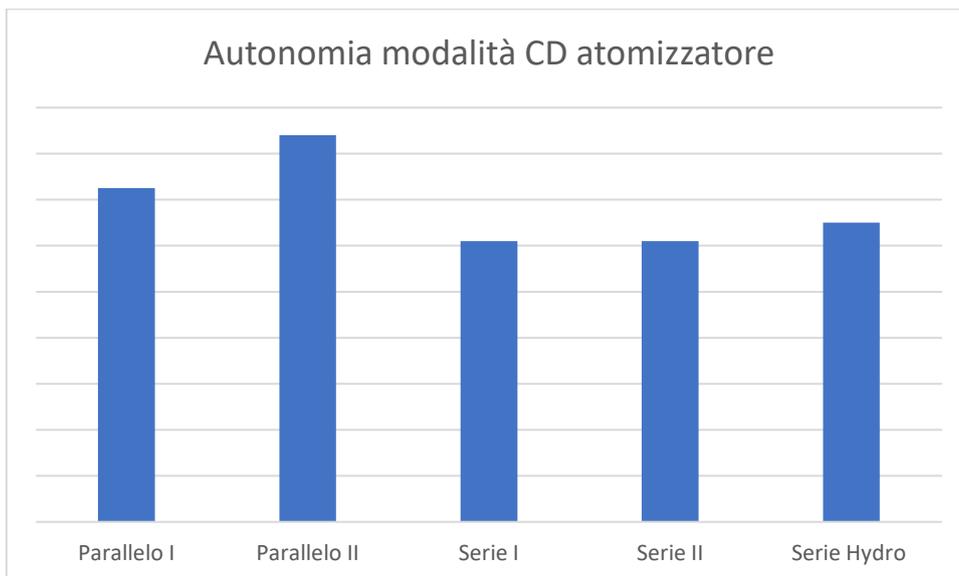


**Figura 4.58: Variazione dell'autonomia del powertrain Serie in modalità CD, nel caso movimentazione rimorchio 10 t, con il punto di lavoro dell'ICE**

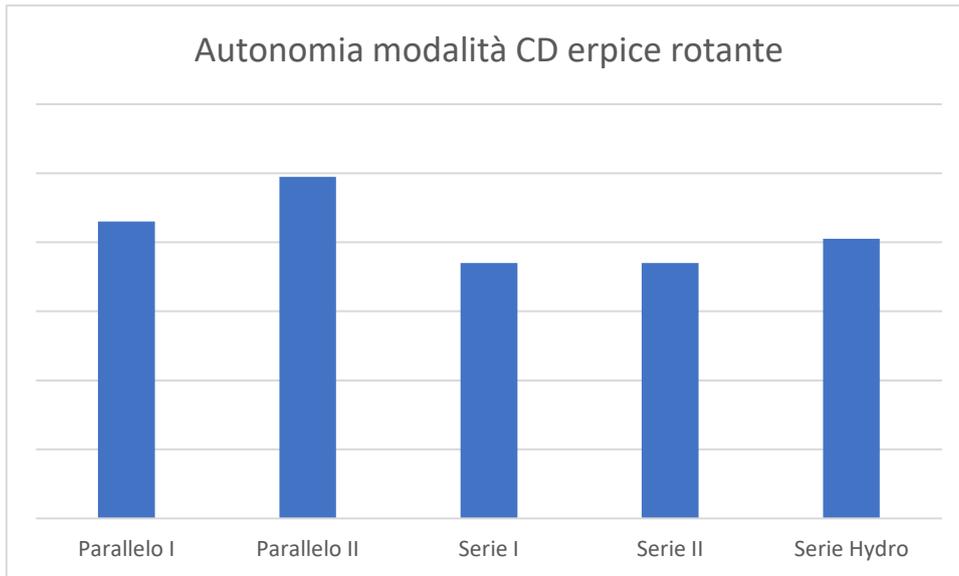
Le figure 4.8-4.12 riportano invece le autonomie delle varie architetture in modalità charge depleting messe a confronto. Per le architetture Serie I e Serie II si considerano le autonomie relative al punto di funzionamento che minimizza i consumi orari totali.



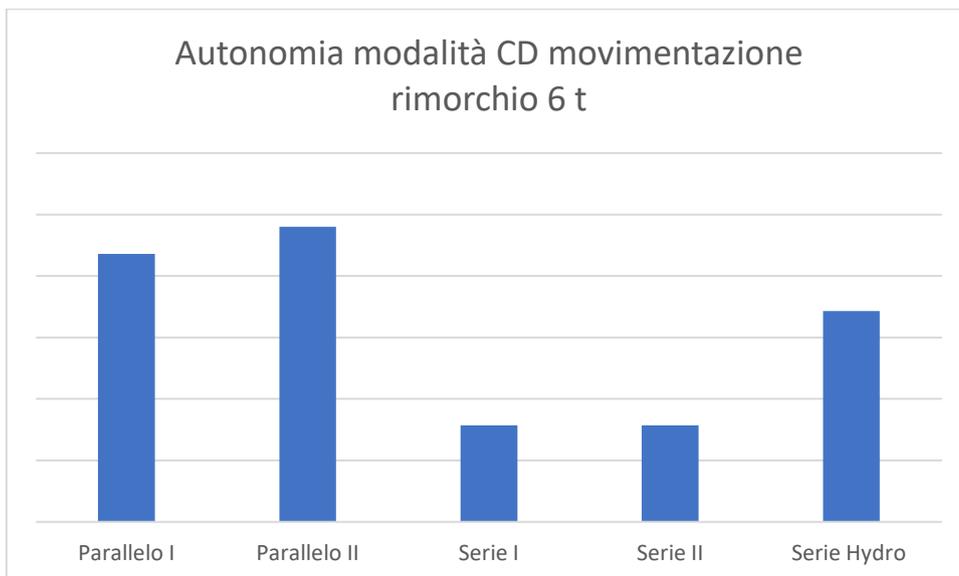
**Figura 4.59: Autonomia in modalità charge depleting con trituratore**



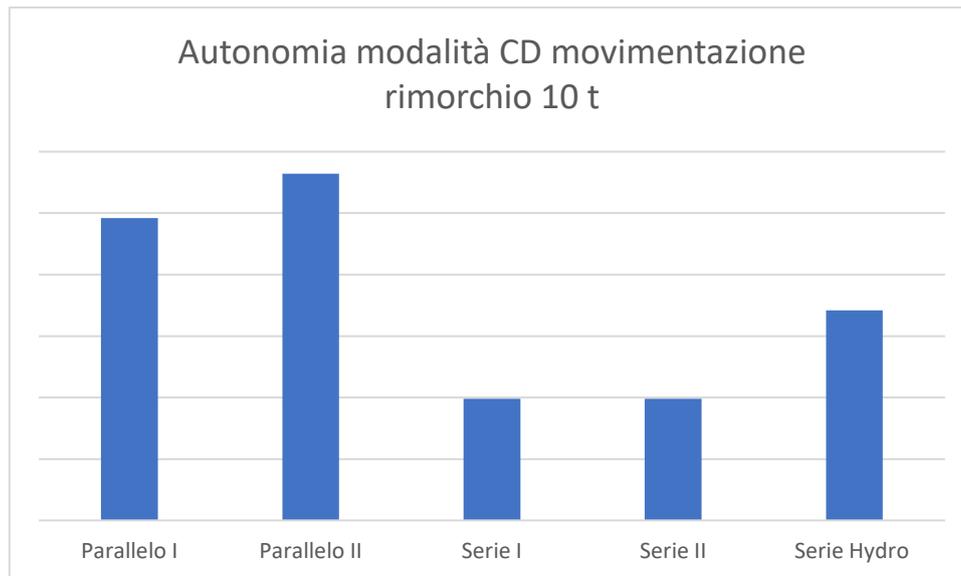
**Figura 4.60: Autonomia in modalità charge depleting con atomizzatore**



**Figura 4.61: Autonomia in modalità charge depleting con erpice**



**Figura 4.62: Autonomia in modalità charge depleting durante la movimentazione di un rimorchio da 6000 kg**



**Figura 4.63: Autonomia in modalità charge depleting durante la movimentazione di un rimorchio da 10000 kg**

## Confronto dei consumi di gasolio su cicli di lavoro

Per effettuare un corretto confronto tra le varie architetture si è deciso di procedere ipotizzando dei possibili scenari lavorativi giornalieri di un trattore. La durata di una giornata di lavoro è stata fissata pari a 8 ore, divise in due blocchi da 4 ore separati da una pausa di 1 ora, in cui il trattore può eventualmente ricaricare le batterie mediante il motore termico. Come anticipato in precedenza, il powertrain funziona in modalità charge depleting fino a che non viene raggiunto un SOC pari al 30%; a quel punto il veicolo entra in modalità charge sustaining. Nei momenti di idle il veicolo ricarica le batterie con una velocità pari a 0,5C. Gli scenari di lavoro ipotizzati per testare il powertrain sono i seguenti:

### 1. Cicli PTO

Questi cicli di lavoro sono composti da 7,2 ore totali di uso della PTO, a cui si devono aggiungere 0,8 ore di funzionamento in idle (pari al 10% delle ore lavorative della giornata). La velocità del trattore durante l'uso dell'attrezzo è fissata a 5 km/h, mentre la velocità della PTO è pari a 540 rpm. I cicli, ai fini del calcolo dei consumi e dello state of charge delle batterie, sono così definiti:

- 1,8 h di funzionamento continuo della PTO;
- 0,4 h di funzionamento in idle;
- 1,8 h di funzionamento continuo della PTO;
- 1 h di pausa;
- 1,8 h di funzionamento continuo della PTO;
- 0,4 h di funzionamento in idle;
- 1,8 h di funzionamento continuo della PTO.

Gli attrezzi considerati sono trituratore, atomizzatore ed erpice rotante.

## 2. Ciclo movimentazione rimorchio

Il ciclo relativo alla movimentazione del rimorchio è definito come segue:

- 1,8 h di movimentazione rimorchio con 10 t;
- 0,4 h di funzionamento in idle;
- 1,8 h di movimentazione rimorchio con 1,4 t;
- 1 h di pausa;
- 1,8 h di movimentazione rimorchio con 10 t;
- 0,4 h di funzionamento in idle;
- 1,8 h di movimentazione rimorchio con 1,4 t.

I valori dei consumi di gasolio delle varie soluzioni, ottenuti sui cicli di riferimento, sono rappresentati come valori percentuali rispetto ai valori dei consumi registrati con ICE convenzionale. I risultati sono rappresentati in tabella 4.5.

	ICE	Parallelo I	Parallelo II	Serie I	Serie II	Serie Hydro
Ciclo trituratore	100	84,3	84,3	85,0	85,0	90,5
Ciclo atomizzatore	100	88,7	88,5	89,6	89,6	94,1
Ciclo erpice	100	90,5	90,2	91,0	91,0	93,8*
Ciclo movimentazione rimorchio	100	82,6	82,6	79,6	79,6	92,1

**Tabella 4.21: Risultati dei consumi di gasolio sui cicli di lavoro giornalieri**

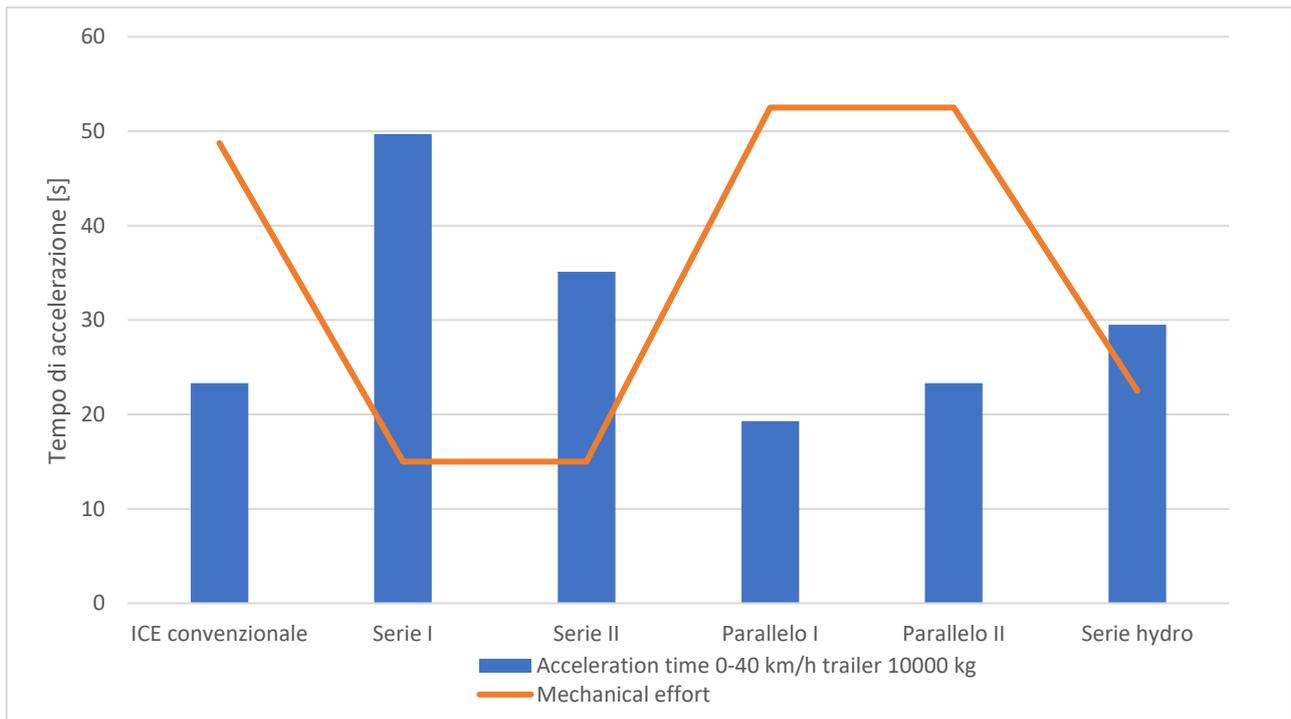
\*Il powertrain, se seguisse la logica di controllo charge depleting fino a SOC=30% e poi charge sustaining, non riuscirebbe a completare la giornata lavorativa, pertanto il valore ricavato è frutto di una strategia che prevede sin dall'inizio della giornata la modalità charge sustaining. E' comunque rilevante tenere conto che, in condizioni di equo confronto, il powertrain elettro-idraulico non sarebbe in grado di completare una giornata di lavoro con l'erpice rotante alle condizioni fissate. Una possibile soluzione a tale problema potrebbe risiedere nella variazione dei parametri di lavorazione, come per esempio ridurre la profondità di passata o la velocità di avanzamento del veicolo.

# Capitolo 5

## Valutazioni e considerazioni sui risultati ottenuti nelle simulazioni

### Valutazione dei risultati nelle prove in accelerazione e pendenza

Analizzando le prestazioni in accelerazione ed in pendenza delle diverse architetture di powertrain emerge come le architetture Parallelo riescano, a parità di ICE con gli altri ibridi, a raggiungere prestazioni elevate, che possono essere prossime o superiori alle prestazioni del termico convenzionale a seconda dell'unità elettrica montata a bordo. Ciò è imputabile al fatto che entrambi i motori forniscono trazione alle ruote, pertanto le potenze e le coppie si sommano. I powertrain Serie invece sono caratterizzati da prestazioni inferiori, questo è conseguenza del fatto che il motore di trazione è soltanto uno e, in seconda istanza, dell'aver imposto come vincolo costruttivo un cambio con solamente due marce. Il powertrain Elettro-idraulico si colloca a metà strada tra le architetture Parallelo e Serie, avendo le stesse sorgenti di potenza del Parallelo II ma essendo caratterizzato da un rendimento della trasmissione più basso a causa della componente idraulica. E' possibile asserire, a livello indicativo, che i powertrain con più componente meccanica nella trasmissione, come l'architettura Parallelo, sono caratterizzati da minor potenza della componente elettrica a parità di prestazioni. I powertrain con una minor quantità di componenti meccanici nella trasmissione, come l'architettura Serie, richiedono invece una maggior potenza della componente elettrica. Ciò si può osservare dal momento che il powertrain Parallelo I ha un'unica unità elettrica, con una potenza nominale di 30 kW, mentre il powertrain Serie II monta a bordo veicolo due unità elettriche, una con potenza nominale di 56 kW e l'altra di 63 kW, per un totale di 119 kW.

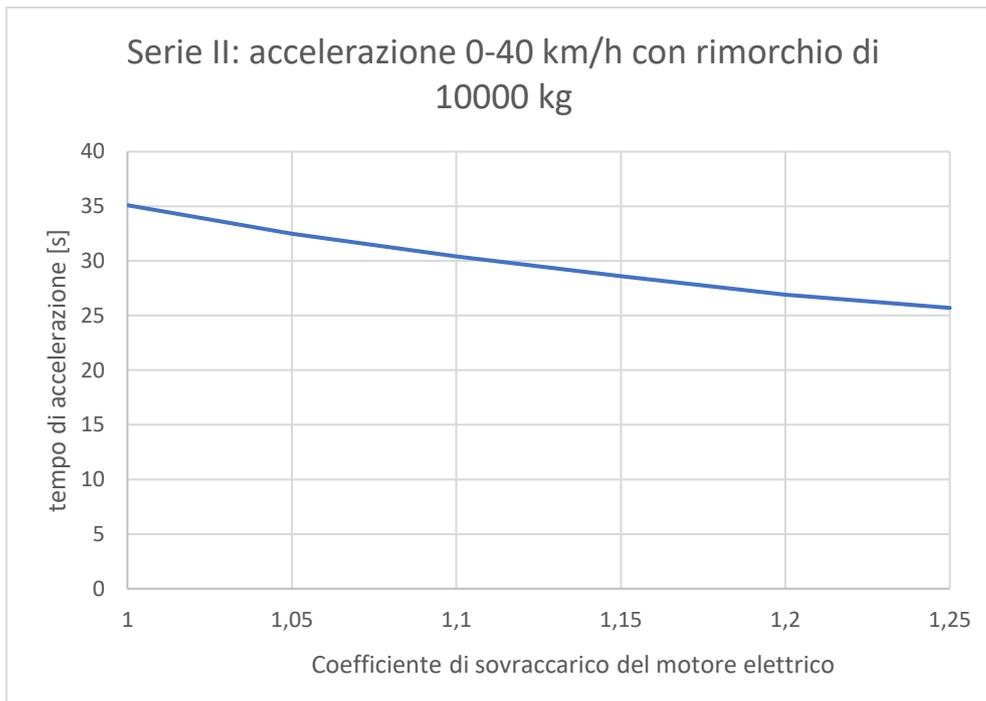


**Figura 5.64: Confronto tra le prestazioni in accelerazione 0-40 km/h con rimorchio di 10000 kg e la presenza di componentistica meccanica nella trasmissione (rappresentata fuori scala)**

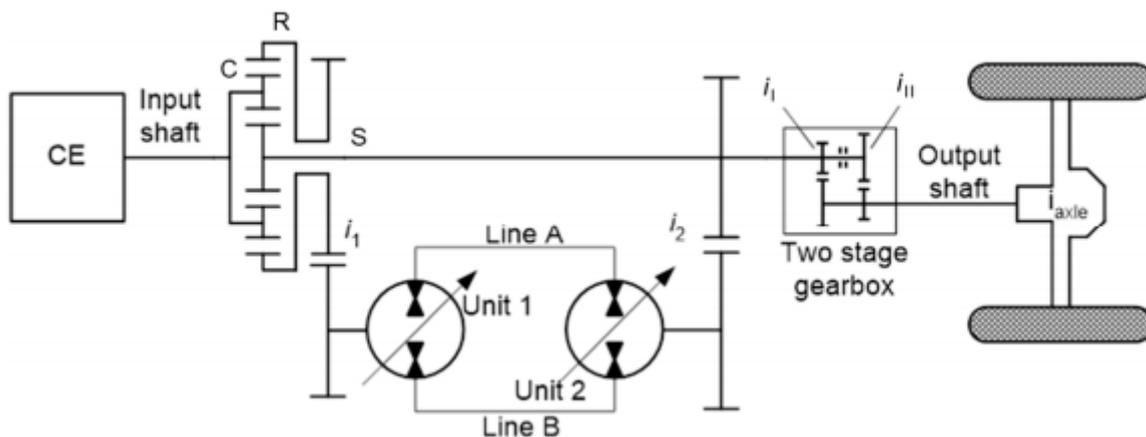
Per poter ridurre i tempi di accelerazione delle architetture Serie una possibile soluzione è quella di sovraccaricare, con un certo coefficiente di sovraccarico, per breve tempo il motore elettrico durante le accelerazioni più spinte. Usando un coefficiente di sovraccarico pari a 1.25 sul motore elettrico del Serie II si ottengono delle prestazioni in accelerazione simili al trattore convenzionale. A titolo informativo, nel caso di un sovraccarico con fattore 1.25 durante tutta la fase di accelerazione 0-40 km/h con rimorchio di 10 t, il Serie II richiede 24,8 s per raggiungere i 40 km/h, mentre nel caso di sovraccarico solo in regime veloce il tempo è pari a 25,7 s. In tabella 5.1 si riportano le prestazioni del Serie II con sovraccarico del motore elettrico confrontate con le prestazioni nel caso senza sovraccarico e nel caso di powertrain convenzionale. Ulteriormente, sono state effettuate delle prove per valutare le prestazioni del powertrain Serie II, sempre con coefficiente di sovraccarico di 1.25, ma partendo in regime veloce. I risultati dei test sono stati i seguenti: 0-40 km/h con rimorchio da 6000 kg in 18,7 s e con rimorchio da 10000 kg in 32 s. Analizzando le prestazioni in pendenza per il Serie II in regime veloce, nonostante il sovraccarico di 1.25, a causa del rapporto di trasmissione non favorevole, i risultati hanno fatto registrare una pendenza massima del 5% con rimorchio da 5000 kg e velocità di 15 km/h. Per quanto riguarda l'architettura Elettro-idraulica, al fine di aumentare il rendimento totale della trasmissione, una alternativa consiste nell'accoppiare al ramo idraulico un ramo meccanico mediante un elemento di collegamento, per esempio un rotismo epicicloidale (figura 5.3). A seconda delle condizioni operative la potenza verrà divisa tra i due rami, di conseguenza vi saranno minori perdite dovuto al circuito idraulico.

	<b>Serie II senza sovraccarico</b>	<b>Serie II sovraccaricato con coefficiente 1.25</b>	<b>ICE convenzionale</b>
Accelerazione 0-40 km/h con rimorchio di 6000 kg	19,8 s	14,9 s (sovraccarico sia in regime lento che veloce) 15,3 s (sovraccarico solo in regime veloce)	14,7 s
Accelerazione 0-40 km/h con rimorchio di 10000 kg	35,1 s	24,8 s (sovraccarico sia in regime lento che veloce) 25,7 s (sovraccarico solo in regime veloce)	23,3 s
Massima pendenza a 5 km/h senza rimorchio	65 %	65 %	65 %
Massima pendenza a 30 km/h senza rimorchio	18 %	23 %	23 % (32 % se con rapporto dedicato)
Massima pendenza a 40 km/h senza rimorchio	17 %	22 %	22 %
Massima pendenza a 15 km/h con rimorchio di 5 t	15 %	22 %	10 % (15 % se con rapporto dedicato)
Massima pendenza a 5 km/h con rimorchio di 10 t	9 %	11 %	40 %

**Tabella 5.22: Confronto tra le prestazioni del Serie II senza sovraccarico, del Serie II con sovraccarico e del powertrain convenzionale**



**Figura 5.65: Andamento del tempo di accelerazione 0-40 km/h con rimorchio di 10000 kg in funzione del coefficiente di sovraccarico del motore elettrico nel caso del Serie II**

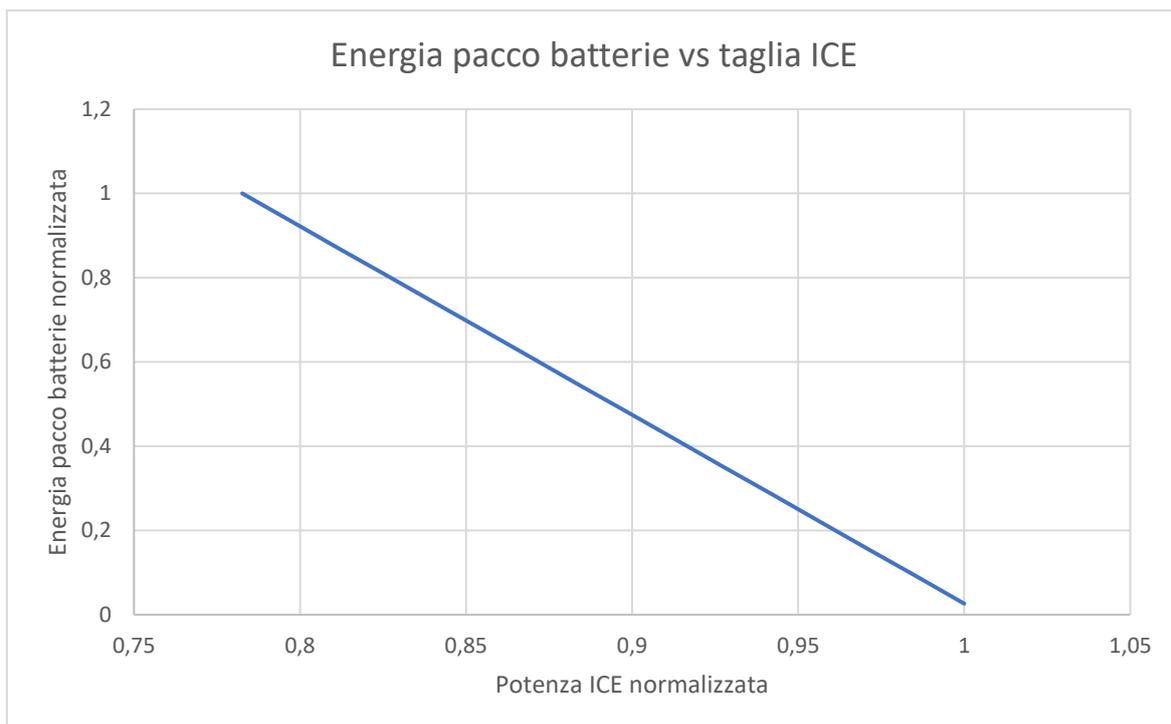


**Figura 5.66: Schema di un powertrain power split idraulico**

## Valutazione dei consumi orari con attrezzature e rimorchi in modalità charge depleting

Analizzando i risultati dei consumi orari totali durante l'uso delle attrezzature emerge come vi sia un importante risparmio di energia per tutte le versioni ibride, anche se con alcune differenze. Si evince di fatto come l'architettura Elettro-idraulica permetta di avere dei risparmi minori rispetto alle configurazioni Serie e Parallelo, questo è dovuto principalmente alle perdite di potenza a livello del circuito idraulico. Dal momento che la velocità del veicolo impostata nei test relativi all'uso delle attrezzature è di 5 km/h, il circuito idraulico opera a pressioni relativamente basse, e questo comporta dei rendimenti molto bassi. Nonostante la potenza richiesta per la trazione non sia elevata a tali velocità, i ridotti rendimenti della trasmissione idrostatica penalizzano i risultati sui consumi. Per quanto concerne le altre architetture ibride, i consumi durante l'uso della PTO sono molto simili, con

un leggero aumento nel caso Serie. Ciò è probabilmente imputabile al fatto che vi sono più rendimenti di conversione di potenza rispetto all'alternativa Parallelo. Per quanto riguarda la movimentazione dei rimorchi, l'architettura che presenta i consumi minori è quella Serie. Questo è dovuto alla possibilità di spostare il punto di funzionamento dell'unità termica, dal momento che la sua velocità angolare non è vincolata alle ruote. E' possibile inoltre osservare che minore è la massa da spostare, maggiori saranno i risparmi di tale configurazione. Nuovamente l'architettura Elettro-idraulica presenta, anche per la movimentazione di rimorchi, maggiori consumi rispetto alle altre configurazioni ibride. Se da un lato la pressione nel circuito è maggiore, quindi il rendimento della trasmissione è più alto rispetto all'uso delle attrezzature a 5 km/h, è da evidenziare che aumenta la potenza richiesta per la trazione, pertanto le perdite sono consistenti rispetto alle altre alternative. In linea generale i risparmi sui consumi rispetto al powertrain convenzionale sono dovuti al downsizing dell'unità termica e ai maggiori rendimenti delle macchine elettriche rispetto ai motori endotermici. Si possono realizzare dei powertrain ibridi con downsizing maggiori per avere dei risparmi ancora più elevati, la conseguenza è però la necessità di implementare a bordo veicolo dei pacchi batterie maggiori, inoltre il termico potrebbe, in tal caso, non essere in grado di mantenere lo state of charge circa costante durante la fase di charge sustaining. Per le architetture ibride sono stati adottati un pacco batterie da 16 kWh e un ICE downsized da 53 kW poiché tale combinazione presenta dei risparmi consistenti, senza però richiedere un sistema di stoccaggio dell'energia elettrica particolarmente ingombrante o pesante. La figura 5.4 riporta in maniera indicativa il variare delle dimensioni del pacco batterie al variare della potenza dell'unità termica in un veicolo ibrido.



**Figura 5.67: Variazione della dimensione dell'ESS al variare della potenza dell'unità termica in un powertrain ibrido**

## Valutazione dei consumi di gasolio su cicli di lavoro

I consumi di gasolio registrati durante le ipotetiche giornate di lavoro forniscono una panoramica più realistica delle prestazioni di fuel management del powertrain. Durante questi test i powertrain

ibridi funzionano sia in modalità charge depleting, sia in modalità charge sustaining, pertanto i risultati finali offrono una visione dei consumi maggiormente indicativa. I risultati, per quanto riguarda l'uso delle attrezzature, sono simili per le architetture Serie e Parallelo. Il Serie fa registrare dei consumi leggermente più alti a causa delle conversioni di potenza, come anche accadeva nel caso dei consumi orari totali in modalità charge depleting. Un risultato di particolare rilevanza è il fatto che l'architettura Elettro-idraulica non riesce a completare la giornata lavorativa con l'erpice rotante. Questo evidenzia come in tal caso sia necessario o cambiare i parametri di erpicatura, il quale potrebbe avere un impatto negativo sulla lavorazione (es: velocità di avanzamento minore, necessità di fare più passate etc.), o aumentare le dimensioni del pacco batterie, con conseguente aumento del loro peso ed ingombro, oppure infine aumentare la taglia dell'ICE, il che implica una riduzione del downsizing. Per quanto concerne la movimentazione del rimorchio, i powertrain Serie registrano un risparmio sui consumi di gasolio maggiore del 20% rispetto al caso convenzionale, circa tre punti percentuali in più delle architetture Parallelo e dodici punti percentuali in più dell'Elettro-idraulico. È importante sottolineare che l'architettura Serie presenta dei vantaggi legati alla facilità di costruzione e gestione delle sorgenti di potenza, pertanto quello che si può asserire, a simulazioni fatte, è che tale powertrain risulta essere un buon compromesso tra prestazioni nei consumi e semplicità realizzativa.

## **Autonomia in modalità full electric e recupero energia in frenata rigenerativa per il powertrain Serie II**

Dal momento che l'architettura Serie presenta unicamente il motore elettrico come unità di trazione, è interessante analizzare brevemente alcuni aspetti legati alla modalità di funzionamento *full electric*. Quando il powertrain funziona in tale modalità, il motore termico è spento e l'unità elettrica di trazione preleva energia dalle batterie. Il veicolo può utilizzare questa modalità, per esempio, quando viene movimentato senza attrezzatura all'interno di un capannone, oppure quando non deve svolgere attività particolarmente pesanti. I vantaggi di usare questa modalità al chiuso risiedono nell'evitare di diffondere localmente nell'aria sostanze inquinanti, che possono risultare pericolose per le eventuali persone presenti all'interno dell'ambiente, e nella silenziosità del veicolo. Ulteriormente, le macchine elettriche presentano maggiori efficienze rispetto ad un motore a combustione interna. Nelle simulazioni effettuate sono state valutate l'autonomia in determinate condizioni operative e la massima pendenza affrontabile con partenza da fermo. Per quanto riguarda le prestazioni in pendenza in modalità puramente elettrica, le differenze rispetto ai risultati ottenuti in modalità ibrida sono dovute ai vincoli relativi alla massima corrente di scarica ammissibile dal pacco batterie. Questi vincoli prevedono una corrente di scarica massima continuativa pari a 3C, mentre per la corrente di scarica massima di picco il valore è di 5C. Nelle tabelle 6.1 e 6.2 sono riportati i risultati delle simulazioni. I risultati relativi all'autonomia riportano il tempo di scarica del pacco batterie dalla condizione di SOC = 100% alla condizione di SOC = 10%.

<b>Condizione di lavoro</b>	<b>Autonomia full electric</b>
Coasting a 5 km/h senza rimorchio	$t_{100-10} = 8 \text{ ore}$
Coasting a 15 km/h senza rimorchio	$t_{100-10} = 3,4 \text{ ore}$
Coasting a 40 km/h senza rimorchio	$t_{100-10} = 1,4 \text{ ore}$
Coasting a 5 km/h con rimorchio di 6000 kg	$t_{100-10} = 4,1 \text{ ore}$
Coasting a 15 km/h con rimorchio di 6000 kg	$t_{100-10} = 1,52 \text{ ore}$
Coasting a 40 km/h con rimorchio di 6000 kg	$t_{100-10} = 0,5 \text{ ore}$

**Tabella 5.2: Autonomia in modalità full electric**

<b>Condizione di lavoro</b>	<b>Massima pendenza affrontabile</b>
5 km/h senza rimorchio	65 %
15 km/h senza rimorchio	38 %
40 km/h senza rimorchio	10 %
5 km/h con rimorchio di 6000 kg	15 %
15 km/h con rimorchio di 6000 kg	9 %

**Tabella 5.3: Pendenze affrontabili in modalità full electric**

Oltre alla modalità full electric, sono state effettuate anche delle simulazioni relative alla frenata rigenerativa. Durante la fase di frenata di un veicolo, nel caso di freni convenzionali, l'energia cinetica viene dispersa in calore per attrito. Tale energia può invece essere convertita, mediante un opportuno sistema di recupero dell'energia cinetica (KERS), ed essere immagazzinata in un sistema di stoccaggio per poi essere riutilizzata. Un metodo per realizzare questo recupero di energia è quello di utilizzare la macchina elettrica di trazione come un generatore elettrico. In tal caso, il rotore della macchina elettrica fornisce una coppia resistente alle ruote, permettendo così la frenata del veicolo e contemporaneamente fornendo energia al pacco batterie. Sono stati effettuati dei test per valutare la ricarica delle batterie, lo spazio di frenata e il tempo di frenata durante una frenata rigenerativa completa, ovvero senza l'intervento dei freni ad attrito per, sostanzialmente, tutta la durata della frenatura. E' stato imposto come vincolo la corrente massima di ricarica impulsiva, fissata a C, per evitare di danneggiare il pacco batterie. Nella tabella 6.3 si riportano i risultati delle prove effettuate. Durante i test la coppia resistente del generatore non è mantenuta costante, ma viene fatta variare per ottimizzare la frenata.

<b>Condizioni frenata</b>	<b><math>\Delta</math>SOC</b>	<b>Spazio di frenata</b>	<b>Tempo di frenata</b>
Frenata da 40 km/h a 0 km/h senza rimorchio	0,167 %	49 m	7,7 s
Frenata da 40 km/h a 0 km/h con rimorchio di 6000 kg	0,416 %	115 m	18,4 s
Frenata da 40 km/h a 0 km/h con rimorchio di 10000 kg	0,517 %	145 m	23,5 s

**Tabella 5.4: Risultati delle prove di frenata rigenerativa totale**

E' importante specificare che queste prove sono ricavate imponendo certe condizioni della strada, pertanto esse forniscono dei valori puramente indicativi.



# Riferimenti e bibliografia

## Capitolo 1

- [1.1] E. Spessa, *Controllo delle emissioni di inquinanti: Formazione NO<sub>x</sub>*, 2019
- [1.2] E. Spessa, *Controllo delle emissioni di inquinanti: Formazione CO*, 2019
- [1.3] E. Spessa, *Controllo delle emissioni di inquinanti: Formazione HC*, 2019
- [1.4] E. Spessa, *Controllo delle emissioni di inquinanti: Formazione PM*, 2019
- [1.5] Wikipedia, *Inquinamento atmosferico*, 2021
- [1.6] World Health Organization, *Air pollution – the silent killer*, 2021
- [1.7] F. Mocera, *Study of hybrid electric architectures for industrial vehicle applications using Hardware In the Loop techniques*, 2019
- [1.8] European Parliament, Council of the European Union, “Regulation (EU) 2016/1628”, 2016
- [1.9] E. Spessa, *Controllo delle emissioni di inquinanti: After treatment CI*, 2019
- [1.10] W. Addy Majewski, *Diesel Oxidation Catalyst*, 2021
- [1.11] Quattroruote.it, *Componenti auto: Filtro antiparticolato*, 2021
- [1.12] Wikipedia, *Gustave Trouve*, 2021
- [1.13] Wikipedia, *Storia dell’auto elettrica*, 2021
- [1.14] Presskit.porsche.de, *Ferdinand Porsche: il pioniere del motore ibrido*, 2021
- [1.15] Wikipedia, *Ferdinand Porsche*, 2021
- [1.16] A. Somà, *Trends and Hybridization Factor for Heavy-Duty Working Vehicles*, 2017

## Capitolo 2

- [2.1] E. Spessa, *HEVs introduzione ed architetture*, 2019
- [2.2] S. Vaschetto, *Architetture veicoli elettrici ed ibridi*, 2020
- [2.3] A. Somà, *Trends and Hybridization Factor for Heavy-Duty Working Vehicles*, 2017
- [2.4] L. Rolando, *Powertrain electrification*, 2019
- [2.5] S. Vaschetto, *Sorgenti di energia di bordo*, 2020

- [2.6] V. Baglio, A. Paolone, A. Sanson, P. P. Prosini, E. Micolano, L. Pellegrino, *Sistemi di accumulo elettrochimico*
- [2.7] Maxwell technologies, *Ultracapacitors Overview*, 2021
- [2.8] Wikipedia, *Supercondensatore*, 2021
- [2.9] Wikipedia, *Pila a combustibile*, 2021
- [2.10] Wikipedia, *Volano (batteria)*, 2021
- [2.11] Mustafa E. Amiryar, Keith R. Pullen, *Analysis of Standby Losses and Charging Cycles in Flywheel Energy Storage Systems*, 2020
- [2.12] S. Vaschetto, *Macchine elettriche: le tecnologie per la trazione stradale*, 2020
- [2.13] A. Mozzato, *Rendimenti delle macchine elettriche e lo sviluppo dei motori ed inverter ad alta efficienza*, 2013
- [2.14] S. Vaschetto, *Macchine elettriche: richiami materiali*, 2020
- [2.15] Wikipedia, *Filo litz*, 2021
- [2.16] L. Frosini, *Materiali magnetici*
- [2.17] Wikipedia, *Motore elettrico*, 2021
- [2.18] Wikipedia, *Rigidità dielettrica*, 2021
- [2.19] Wikipedia, *Escavatore*, 2021
- [2.20] A. Somà, *Trends and Hybridization Factor for Heavy-Duty Working Vehicles*, 2017
- [2.21] F. Mocera, *Study of hybrid electric architectures for industrial vehicle applications using Hardware In the Loop techniques*, 2019
- [2.22] Wikipedia, *Pala caricatrice*, 2021

## Capitolo 3

- [3.1] D. Pessina, *La meccanizzazione delle lavorazioni*
- [3.2] G. Molari, *Il trattore, tra novità e prospettive*, 2016
- [3.3] Same, *Frutteto*
- [3.4] Valtra, *Trattori serie F per vigneto e frutteto*, 2019
- [3.5] F. Mocera, A. Somà, *Analysis of a Parallel Hybrid Electric Tractor for Agricultural Applications*, 2020
- [3.6] D. Pessina, *Presa di potenza*, 2002
- [3.7] ASL Mantova, *Alberi cardanici e prese di potenza*

- [3.8] Wikipedia, *Presa di potenza*, 2021
- [3.9] Meccagri.it, *Debuttano all'Eima i nuovi Atos di Claas*, 2014
- [3.10] Mathworks, *Tire (friction parametrized)*, 2021
- [3.11] Mathworks, *Simple gear*, 2021
- [3.12] Mathworks, *Generic engine*, 2021
- [3.13] Mathworks, *Motor & Drive (System level)*, 2021
- [3.14] Mathworks, *Variable-Displacement Pump*, 2021
- [3.15] Mathworks, *Variable-Displacement Motor*, 2021
- [3.16] Mathworks, *Pressure Relief Valve*, 2021

## Capitolo 4

- [4.1] F. Mocera, A. Somà, *Analysis of a Parallel Hybrid Electric Tractor for Agricultural Applications*, 2020
- [4.2] S. Zhang, J. Zhang, *Optimal State-of-Charge Value for Charge-Sustaining Mode of Plug-In Hybrid Electric Vehicles*, 2020
- [4.3] D. Gao, W. Zhang, A. Shen, Y. Wang, *Parameter design and energy control of the power train in a hybrid electric boat*, 2017
- [4.4] Wikipedia, *Biotrituratore*, 2021
- [4.5] Wikipedia, *Atomizzatore agricolo*, 2021
- [4.6] S. Pascuzzi, *Macchine per la distribuzione di fitofarmaci*
- [4.7] S&P Italia Spa, *Dispense tecniche: leggi dei ventilatori*, 2006
- [4.8] G. Catone, *Ventilatori: definizioni e generalità*, estratto del libro *Prontuario dell'ingegnere*, 2010
- [4.9] Wikipedia, *Erpice*, 2021
- [4.10] Enama, Entam, *Servizio di accertamento delle caratteristiche funzionali e della sicurezza delle macchine agricole: certificato n° 03 – 035a*, 2001

## Capitolo 5

- [5.1] E. Spessa, *HEVs introduzione ed architetture*, 2019

- [5.2] L. Rolando, *Powertrain electrification*, 2019
- [5.3] F. Millo, *Corso di propulsori termici*, 2019
- [5.4] F. Mocera, A. Somà, *Analysis of a Parallel Hybrid Electric Tractor for Agricultural Applications*, 2020
- [5.5] C. Sieg, F. Küçükay, *Benchmarking of Dedicated Hybrid Transmissions*, 2020
- [5.6] L. Wan, H. Dai, Q. Zeng, Z. Sun, M. Tian, *Characteristic Analysis and Co-Validation of Hydro-Mechanical Continuously Variable Transmission Based on the Wheel Loader*, 2020
- [5.7] S. Xiong, G. Wilfong, J. Lumkes Jr., *Components Sizing and Performance Analysis of Hydro-Mechanical Power Split Transmission Applied to a Wheel Loader*, 2019
- [5.7] Wikipedia, *Freno rigenerativo*, 2021
- [5.8] Wikipedia, *KERS*, 2021