POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aereospaziale, dell'Autoveicolo e della Produzione

Tesi di laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

STUDIO DI DIFFERENTI ARCHITETTURE PER VEICOLI A PROPULSIONE IBRIDA AL VARIARE DELLA TAGLIA DEL POWERTRAIN DIESEL E DELLA MACCHINA ELETTRICA

Relatore: Prof. Ing. Stefano D'ambrosio

Correlatore: Prof. Ing. Roberto Finesso

Candidato

Luigi Daddario

Relatore aziendale: Ing. Gianpiero Einaudi – Daca-I Powertrain Engineering

A mio zio Luigi

"Nessuno muore mai completamente, c'è sempre

qualcosa di lui che rimane vivo dentro di noi"

STUDIO DI DIFFERENTI ARCHITETTURE PER VEICOLI A PROPULSIONE IBRIDA AL VARIARE DELLA TAGLIA DEL POWERTRAIN DIESEL E DELLA MACCHINA ELETTRICA

Luigi Daddario

(in collaborazione con Daca-I Powertrain Engineering)

Dipartimento di Energia "Galileo Ferraris" (DENERG)
Politecnico di Torino
TORINO, ITALIA, 2019

Sommario

Abstract 2
Ringraziamenti 3
Indice delle figure 4
Indice delle tabelle 7
Simboli e abbreviazioni 8
Introduzione 10
Capitolo 1: Software Simcenter Amesim by Siemens 12
Capitolo 2: Cicli di omologazione 14
- Normative 14
- Procedura dei test 15
- Cicli di prova WLTP 16
- Ciclo di prova RDE 20

Capitolo 3: Classificazione di veicoli ibridi 21
- Micro Hybrid 22
- Mild Hybrid 22
  - Electric machine and inverter 24
  - DC/DC converter 26
  - Electric compressor (e-Compressor) 27
  - Electrically Heated Catalyst EMICAT® 27
- Full Hybrid 29

Capitolo 4: Architetture ibride 30
- Belt Starter Generator Architecture: P0 31
- Crankshaft mounted electric machine: P1 34
- Driveline side electric machine: P2, P3, P4 36

Capitolo 5: Calcolo delle informazioni mancanti dai dati motore forniti 38
- Accoppiamento motore 40
- Consumi specifici e mappe motore 41
- Metodo Willans line per motori a combustione interna 44

Capitolo 6: Creazione dei modelli Amesim 46
- Definizione dell'architettura 47
- Architecture Parameter 51
  - Engine Parameter 51

Electric Motor (GEN & MOT) parameters 52
Battery (BAT) 52
Vehicle (VEH) 53
Gearbox (Rx) 53
Strategy definition 53
Test case definition 55
Computation 56
HOT 57
Post Processing 60
Capitolo 7: Descrizione dei componenti del modello 62
DRV driver auto 62
DRV-vehicle 63
DRV-VCU-ECMS-2 63
DRV-ECU for ICE6 65
DRV-ICE4 66
DRV-Manual gearbox Thermal 66
DRV-Elettric motor Therm1 67
DRV-bat 67
Modelli creati su Amesim Simcenter 68
Capitolo 8: Dimensionamento del motore termico attraverso il software Amesim Simcenter 69
Definizione dell'architettura 70
Combustione 70
Definizione delle performance 71
Modo Scalare 71
Modo Vettoriale 72
Capitolo 9: Dimensionamento del motore elettrico attraverso il Software Amesim Simcenter 74
Dimensionamento analitico del motore elettrico 74
Capitolo 10: Dimensionamento del pacco batterie attraverso il tool dedicato di Amesim Simcenter 76
Dimensionamento analitico del pacco batterie 77
Capitolo 11: Descrizione della metodologia utilizzata 79
Design Of Experiment 79
Full Factorial 80

Implementazione della logica ECMS all'interno della centralina 84
Capitolo 11: Analisi dei costi 87
Capitolo 12: Comparazione tra i costi per ogni motorizzazione 139
Capitolo 13: Risultati ottenuti 142
Capitolo 13: Conclusioni 159
Bibliografia 161

Abstract

"Dal primo settembre 2019 non è più possibile poter immatricolare un'autovettura catalogata Euro 6. La normativa che lo prevede è in vigore dal 2014 e ha ottenuto un primo aggiornamento solo dopo un quinquennio. Solo dopo attenti studi in merito è stato previsto così l'obbligo tassativo per ogni nuova autovettura di corrispondere ai criteri Euro 6d-Temp. Questo prevede che i costruttori possano omologare le proprie auto secondo nuovi test che tengano conto anche della guida su strada in condizioni reali e non si basino, invece, solo sui test in laboratorio (che per altro sono resi molto severi rispetto al precedente ciclo nominato NEDC). Tuttavia, si tratta di una fase di passaggio, dove è concesso, almeno per il momento, meno rigore sui test ottenuti dal nuovo ciclo in laboratorio WLTP e le prove su strada RDE. Infatti, la tolleranza adottata per tali prove è del 110%, mentre, a gennaio 2020 la tolleranza scenderà al 50%. Per quanto riguarda la CO_2, invece, questa raggiungerà come soglia limite 95 g/Km e l'Unione Europea ha dato il via libera per un ulteriore programma di riduzione delle emissioni di anidride carbonica: entro il 2030 le autovetture non potranno superare i 59 g/km" (Gomez, s.d.).

Le vetture con alimentazione a benzina o diesel, a lungo andare, troverebbero enormi problematiche a poter entrare in quel mercato che prevede delle caratteristiche molto stringenti. Questo vale sia adottando le migliori strategie di controllo, ma anche intervenendo con tecnologie avanzate su componenti che costituiscono il motore stesso, in quanto non si riuscirebbe comunque a coprire quel gap che le normative impongono.

Una delle soluzioni, potenzialmente vincenti, potrebbe essere proprio quella di introdurre un motore elettrico in combinazione con un motore termico. Così facendo, è possibile adottare delle strategie di funzionamento del motore elettrico, proprio nei punti di lavoro dove il motore termico risulta essere meno efficiente.

Lo scopo della tesi è quello di analizzare varie categorie di ibrido (P0, P1, P2, …, P5), capendo quali e quanti sono i vantaggi che si otterrebbero dall'accoppiamento di diverse taglie di motore elettrico con quello termico.

In questa tesi, l'utilizzo di motorizzazioni diesel non risulta essere una casualità, ma un ulteriore motivo di osservazione, per poter verificare se, in questo nuovo mercato, i motori diesel possono avere ancora un ruolo da protagonista oppure cedere pian piano il posto ad altri tipi di combustibili che ad oggi non hanno avuto grande successo, come ad esempio il Metano o il GPL.

Ringraziamenti

Mi è doveroso dedicare questo spazio del mio elaborato alle persone che hanno contribuito, con il loro instancabile supporto, alla realizzazione dello stesso.
Un ringraziamento speciale al Politecnico di Torino, per avermi fornito tutte le basi per formare la mia figura e il mio carattere professionale. Un importante ringraziamento va ai miei relatori Prof. Ing. D'ambrosio Stefano e il Prof. Ing. Finesso Roberto, per la loro immensa pazienza, per i loro indispensabili consigli, per le conoscenze trasmesse durante tutto il percorso di stesura dell'elaborato.
Un ringraziamento importante va al Prof. Ing. Rundo Massimo e al dottorando Alessandro Corvaglia, per avermi messo a disposizione il laboratorio e ulteriori licenze Amesim per poter terminare in tempi ragionevoli le simulazioni.

Ringrazio l'azienda Daca-I Powertrain Engineering nella persona dell'Ing. Einaudi Gianpiero per avermi fornito tutte le conoscenze utili per interfacciarmi con il mondo lavorativo. Ringrazio l'azienda BSim Engineering, partner della Daca-I Powertrain Engineering, per avermi fornito il software Amesim per la realizzazione dei modelli e tutto il supporto tecnico.

Ringrazio infinitamente i miei genitori, che in momenti difficili mi hanno sempre sostenuto, appoggiando ogni mia decisione, dalla scelta del mio percorso di studi fino ad arrivare all'ultimo giorno della stesura di questo elaborato. Mi sento di aggiungere, che risulta molto più semplice raggiungere il successo nella vita, che essere degli ottimi genitori, che sappiano insegnare tre pilastri fondamentali: sacrificio, umiltà e tenacia. Saranno un importante figura per la mia vita lavorativa e non, che cercherò di emulare e crescere secondo i solidi principi che mi hanno insegnato.

Un grazie di cuore alla mia sorellina MariaNunzia, per il supporto video nelle sere di solitudine dove l'unico pensiero era quello di studiare. Per rendere la distanza che ci separa un qualcosa di piccolo che non ci ha limitato ad esprimere il bene che tra di noi c'è sempre stato.

Ringrazio i miei nonni materni Nunzio e Francesca per avermi trasmesso quell'affetto che sin dal primo attimo che mi hanno accolto tra le loro braccia non è mai venuto a mancare. Immagino minimamente la loro felicità e la loro contentezza per aver visto quella piccola peste giocare con i soldi sulle cassette della frutta ed imitare il nonno, diventare finalmente un uomo. "Chi lo avrebbe mai detto?" Non smetterò mai di ringraziarvi per tutto quello che avete fatto per me e che sicuramente continuerete a fare.

Un infinito grazie a Chiara, per aver reso questo giorno migliore. Hai accettato la sfida di laurearci assieme, come hai notato ci siamo riusciti. Hai combattuto sempre senza mollare, mi hai dato il dono di amare e credere nelle persone, cercherò di farne tesoro dei tuoi insegnamenti. Considerando che la nostra storia è nata come nei migliori film romantici, all'interno di una biblioteca universitaria, ci impegneremo a non scrivere mai la fine, ma di essere protagonisti di questo magnifico film per il resto della nostra vita.

Ringrazio Enrico, Anna e Marta e la nonna Rita, per avermi fatto sentire parte della loro famiglia, ma anche per la loro vicinanza con suggerimenti, consigli dati in momenti difficili. (vi ringrazio anche per avermi fatto conoscere il pasticciotto leccese diventato uno dei miei dolci preferiti)
Infine, dedico questa tesi a me stesso, ai miei sacrifici e alla mia tenacia che mi hanno permesso di arrivare fin qui. Tra i mille difetti sono riuscito a migliorare e lavorare su me stesso cercando di sviluppare tutte quelle skills che mi mancavano.

Indice delle figure

FIGURA 1: SIMCENTER AMESIM - GRAFICA DI LAVORO 12
FIGURA 2: CICLO WLTP PER VEICOLO DI CLASSE 3 17
FIGURA 3: CICLO WLTP PER VEICOLO DI CLASSE 2 18
FIGURA 4: CICLO WLTP PER VEICOLO DI CLASSE 1 19
FIGURA 5: ELENCO DELLE VARIE TAGLIE DI MOTORE ELETTRICO UTILIZZATE PER LE DIVERSE CATEGORIE 21
FIGURA 6: 12VOLT POWER NET SYSTEM (CONTINENTAL, S.D.) 22
FIGURA 7: TRANSITION FROM 12V TO DUAL VOLTAGE 12V-48V ARCHITECTURE (BISG) 24
FIGURA 8: 48V BELT STARTER GENERATOR 25
FIGURA 9: 48V BELT STARTER GENERATOR – EXPLODED VIEW 25
FIGURA 10: 48V P2 HYBRID MODULE 26
FIGURA 11: 48V DCDC CONVERTER 26
FIGURA 12: 48V E-COMPRESSOR 27
FIGURA 13: EMICAT PERFORMANCE 28
FIGURA 14: FULL HYBRID - MERCEDES BENZ (AUTO, S.D.) 29
FIGURA 15: ARCHITETTURE IBRIDE 30
FIGURA 16: STRUTTURA P0 31
FIGURA 17: SISTEMA INTEGRATO NELL'AUDI A8 48V MHEV – 3.0 TFSI INTERNAL COMBUSTION ENGINE 33
FIGURA 18: STRUTTURA P1 34
FIGURA 19: INTEGRATED MOTOR ASSIST (IMA) FOR MILD HYBRID 34
FIGURA 20: SX: P2 ARCHITECTURE – SIDE EM / DX: P2 ARCHITECTURE – INTEGRATED EM 36
FIGURA 21: P3 O P4 ARCHITETTURA 36
FIGURA 22: CURVE DI COPPIA E POTENZA DI UN MOTORE 1.3 DIESEL 38
FIGURA 23: CURVA DI COPPIA E POTENZA DEL MOTORE 1300 CM^3 39
FIGURA 24: CURVE DI COPPIA E POTENZA DEL MOTORE 1600 CM^3 39
FIGURA 25: CURVE DI COPPIA E POTENZA DEL MOTORE 2000 CM^3 39
FIGURA 26: RAPPRESENTAZIONE DELLA FORZA MOTRICE DISPONIBILE ALLE RUOTE E LA FORZA RESISTENTE, IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ V 40
FIGURA 27: UTILIZZO DI UN CAMBIO DISCONTINUO A QUATTRO MARCE PER PERMETTERE DI AVVICINARE LA CURVA DEL MOTORE A QUELLA OTTIMALE 41
FIGURA 28:MAPPA MOTORE; CONSUMI SPECIFICI DI COMBUSTIBILE IN FUNZIONE DEL CARICO 42
FIGURA 29: MAPPA MOTORE 1300 CM^3 42
FIGURA 30: MAPPA MOTORE 1600 CM^3 43
FIGURA 31: MAPPA MOTORE 2000 CM^3 43
FIGURA 32: ESEMPIO DELL'APPROCCIO DEL METODO WILLANS LINE 44
FIGURA 33: HOT: HYBRID OPTIMIZATION TOOL 46
FIGURA 34: DEFINIZIONE DELL'ARCHITETTURA DA UTILIZZARE 47
FIGURA 35: PARAMETRI DA INSERIRE NEL MODELLO 51
FIGURA 36: STEP PER LA DEFINIZIONE DELLA STRATEGIA 53
FIGURA 37: CASE DEFINITION 55
FIGURA 38: IMPOSTAZIONE DEL CAMBIO MARCIA FISSO OPPURE LIBERO 56
FIGURA 39:SEZIONE DELLA COMPUTAZIONE 56
FIGURA 40: SIGNIFICATO FISICO DEL VALORE S_0 ALL'INTERNO DELL'HOT 58
FIGURA 41: BASIC HOT FLOW CHART: ADDITIONAL VARIABLES: V(T), F_T(T) SPEED AND 59
FIGURA 42: ILLUSTRATION OF THE BISECTION METHOD TO FIND S_0 60
FIGURA 43:SCHERMATA DEL POST-PROCESSING 60
FIGURA 44: RIEPILOGO RIASSUNTIVO DELLA PROCEDURA HOT 61
FIGURA 45: SOTTOMODELLO DEL DRIVER - AMESIM SIMCENTER 62
FIGURA 46: SOTTO MODELLO DEL VEICOLO - AMESIM SIMCENTER 63
FIGURA 47: SOTTO MODELLO DELLA CENTRALINA PRODOTTA DAL TOOL HOT - AMESIM SIMCENTER 63
FIGURA 48: SOTTO MODELLO DELLA CENTRALINA PER IL MOTORE TERMICO - AMESIM SIMCENTER 65
FIGURA 49: LOGICA DI CONTROLLO DELLA ECU-ICE6 - AMESIM SIMCENTER 65
FIGURA 50: MODELLO DEL MOTORE TERMICO - AMESIM SIMCENTER 66

FIGURA 51: MODELLO DEL CAMBIO - AMESIM SIMCENTER 66
FIGURA 52: MODELLO DEL MOTORE ELETTRICO - AMESIM SIMCENTER 67
FIGURA 53: ALGORITMO DEL MOTORE ELETTRICO - AMESIM SIMCENTER 67
FIGURA 54: MODELLO DELLA BATTERIA -AMESIM SIMCENTER 67
FIGURA 55: ARCHITETTURA P0 - AMESIM SIMCENTER 68
FIGURA 56: ARCHITETTURA P2 - AMESIM SIMCENTER 68
FIGURA 57: TOOL PER INSERIRE I PARAMETRI DEL MOTORE TERMICO 69
FIGURA 58: DEFINIZIONE DELL'ARCHITETTURA DELL'ICE 70
FIGURA 59: SCHERMATA DELLA DEFINIZIONE DELLA COMBUSTIONE 71
FIGURA 60: SCHERMATA DELLA MODALITÀ SCALARE DEI PARAMETRI DEL MOTORE 71
FIGURA 61: SCHERMATA PER IMPLEMENTARE LE CURVE DI COPPIA E POTENZA 72
FIGURA 62:SCHERMATA DI PROCESSING 72
FIGURA 63: FLOW CHART PER L'IDENTIFICAZIONE DELLE PERDITE NELL'ICE 73
FIGURA 64: INTERFACCIA PER LA CREAZIONE DEI DATI DEL MOTORE ELETTRICO 74
FIGURA 65:PRE-DIMENSIONAMENTO DEL PACCO BATTERIA 76
FIGURA 66: INTERFACCIA PER IL DIMENSIONAMENTO DEL PACCO BATTERIA 77
FIGURA 67: METODI DI OTTIMIZZAZIONE IMPLEMENTATI ALL'INTERNO DI AMESIM SIMCENTER 80
FIGURA 68: ESEMPIO PRATICO DEL METODO DI STUDIO FULL FACTORIAL 81
FIGURA 69: CORE TOOL ASSOCIAZIONE DELLA POSIZIONE 85
FIGURA 70: CORE TOOL IDENTIFICAZIONE DEL CLUSTER GENERICO 85
FIGURA 71: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 1300 CM^3 - 0 KM PERCORSI 90
FIGURA 72: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 1600 CM^3 - 0 KM PERCORSI 90
FIGURA 73: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 2000 CM^3 - 0 KM PERCORSI 91
FIGURA 74: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 1300 CM^3 - 50.000 KM PERCORSI 91
FIGURA 75: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 1600 CM^3 - 50.000 KM PERCORSI 92
FIGURA 76: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 2000 CM^3 - 50.000 KM PERCORSI 92
FIGURA 77: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 1300 CM^3 - 100.000 KM PERCORSI 93
FIGURA 78: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 1600 CM^3 - 100.000 KM PERCORSI 93
FIGURA 79: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 2000 CM^3 - 100.000 KM PERCORSI 94
FIGURA 80: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 1300 CM^3 - 150.000 KM PERCORSI 94
FIGURA 81: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 1600 CM^3 - 150.000 KM PERCORSI 95
FIGURA 82: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 2000 CM^3 - 150.000 KM PERCORSI 95
FIGURA 83: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 1300 CM^3 - 200.000 KM PERCORSI 96
FIGURA 84: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 1600 CM^3 - 200.000 KM PERCORSI 96
FIGURA 85: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 2000 CM^3 - 200.000 KM PERCORSI 97
FIGURA 86: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 1300 CM^3 - 300.000 KM PERCORSI 97
FIGURA 87: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 2000 CM3 - 200.000 KM PERCORSI 98
FIGURA 88: ANDAMENTO DEI COSTI TOTALI 2000 CM3 - 300.000 KM PERCORSI 98
FIGURA 89: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 1300 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 0 KM 143
FIGURA 90: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 1600 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 0 KM 144
FIGURA 91: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 2000 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 0 KM 144
FIGURA 92: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 1300 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 50.000 KM 146
FIGURA 93: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 1600 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 50.000 KM 146
FIGURA 94: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 2000 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 50.000 KM 147
FIGURA 95: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 1300 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 100.000 KM 149
FIGURA 96: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 1600 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 100.000 KM 149
FIGURA 97: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 2000 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 100.000 KM 150
FIGURA 98: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 1300 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 150.000 KM 151
FIGURA 99: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 1600 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 150.000 KM 152
FIGURA 100: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 2000 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 150.000 KM 152
FIGURA 101: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 1300 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 200.000 KM 154
FIGURA 102: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 1600 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 200.000 KM 154
FIGURA 103: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 2000 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 200.000 KM 155

FIGURA 104: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 1300 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 300.000 KM 156
FIGURA 105: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 1600 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 300.000 KM 157
FIGURA 106: ANALISI COSTI / BENEFICI IN TERMINI DI CO_2 - 2000 CM^3; CHILOMETRI PERCORSI: 300.000 KM 157

Indice delle tabelle

TABELLA 1:CLASSIFICAZIONE DEI VEICOLI SU BASE DELLA NORMATIVA DELLE EMISSIONI INQUINANTI 14
TABELLA 2: DATI DEL CICLO WLTP, VEICOLO DI CLASSE 3 17
TABELLA 3: DATI DEL CICLO WLTP, VEICOLO DI CLASSE 2 18
TABELLA 4: DATI DEL CICLO WLTP, VEICOLO DI CLASSE 1 18
TABELLA 5: DATI DEL CICLO WLTP PER VEICOLI IBRIDI O ELETTRICI 20
TABELLA 6: VANTAGGI E SVANTAGGI DELLE VARIE CLASSIFICHE DI VEICOLI IBRIDI 23
TABELLA 7: CATEGORIE DI IBRIDO 30
TABELLA 8: P0: FUEL EFFICIENCY, HYBRID MODES, ADVANTAGES, DISANDAVANTAGES, OVERALL CHARACTERISTICS 32
TABELLA 9: P1:FUEL EFFICIENCY, HYBRID MODES, ADVANTAGES, DISANDAVANTAGES, OVERALL CHARACTERISTICS 35
TABELLA 10: P2, P3, P4:FUEL EFFICIENCY, HYBRID MODES, ADVANTAGES, DISANDAVANTAGES, OVERALL CHARACTERISTICS 37
TABELLA 11: VALORI DI FABBRICA DELLA TRASMISSIONE 41
TABELLA 12: ARCHITETTURE DI IBRIDO IMPLEMENTABILI SU AMESIM ATTRAVERSO IL TOOL HOT 48
TABELLA 13: CVT CONNECTIONS 50
TABELLA 14: DATI RICAVATI PER VELOCITÀ ANGOLARE MASSIMA DEL MOTORE ELETTRICO 75
TABELLA 15: DATASHEET DEI MOTORI ELETTRICI 75
TABELLA 16: VALORI DI FINAL DRIVE UTILIZZATI PER L'ARCHITETTURA CONVENZIONALI 81
TABELLA 17: VALORI DEL FINAL DRIVE, TORQUE COUPLING E TAGLIA DEL MOTORE ELETTRICO PER L'ARCHITETTURA P0 82
TABELLA 18: VALORI DEL FINAL DRIVE, TORQUE COUPLING E TAGLIA DEL MOTORE ELETTRICO PER L'ARCHITETTURA P2 83
TABELLA 19: ELENCO COSTI COVENTIONAL - 0 KM 99
TABELLA 20: ELENCO COSTI COVENTIONAL + CYLINDER DEACTIVATION - 0 KM 100
TABELLA 21: ELENCO COSTI P0 - 0 KM 103
TABELLA 22: ELENCO COSTI P2 - 0 KM 105
TABELLA 23: ELENCO COSTI CONVENTIONAL - 50.000 KM 106
TABELLA 24: ELENCO COSTI CONVENTIONAL + CYLINDER DEACTIVATION - 50.000 KM 107
TABELLA 25: ELENCO COSTI P0 - 50.000 KM 110
TABELLA 26: ELENCO COSTI P2 - 50.000 KM 112
TABELLA 27: ELENCO COSTI CONVENTIONAL - 100.000 KM 113
TABELLA 28: ELENCO COSTI CONVENTIONAL + CYLINDER DEACTIVATION - 100.000 KM 114
TABELLA 29: ELENCO COSTI P0 - 100.000 KM 117
TABELLA 30: ELENCO COSTI P2 - 100.000 KM 119
TABELLA 31: ELENCO COSTI CONVENTIONAL - 150.000 KM 120
TABELLA 32: ELENCO COSTI CONVENTIONAL +CYLINDER DEACTIVATION - 150.000 KM 121
TABELLA 33: ELENCO COSTI P0 - 150.000 KM 123
TABELLA 34: ELENCO COSTI P2 - 150.000 KM 125
TABELLA 35: ELENCO COSTI CONVENTIONAL - 200.000 KM 126
TABELLA 36: ELENCO COSTI CONVENTIONAL + CYLINDER DEACTIVATION - 200.000 KM 127
TABELLA 37: ELENCO COSTI P0 - 200.000 KM 129
TABELLA 38: ELENCO COSTI P2 - 200.000 KM 132
TABELLA 39: ELENCO COSTI CONVENTIONAL - 300.000 KM 133
TABELLA 40: ELENCO COSTI CONVENTIONAL + CYLINDER DEACTIVATION - 300.000 KM 133
TABELLA 41: ELENCO COSTI P0 - 300.000 KM 136
TABELLA 42: ELENCO COSTI P2 - 300.000 KM 138
TABELLA 43: RISULTATI OTTENUTI 0 KM 143
TABELLA 44: RISULTATI OTTENUTI 50.000 KM 145
TABELLA 45: RISULTATI OTTENUTI 100.000 KM 148
TABELLA 46: RISULTATI OTTENUTI 150.000 KM 151
TABELLA 47: RISULTATI OTTENUTI 200.000 KM 153
TABELLA 48: RISULTATI OTTENUTI 300.000 KM 156

Simboli e abbreviazioni

NEDC: New European Driving Cycle

WTLP: Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure

RDE: (real driving emissions)

BMEP: Brake Mean Effective Pressure[1]

DCT: Dual Clutch Transmission.

DOD: Depth Of Discharge[2]

ECU: Electronic Control Unit or Engine Control Unit depending on the context.

FMEP: Friction Mean Effective Pressure[3]

ICE: Internal Combustion Engine

IMEP: Indicated Mean Effective Pressure[4]

SOC: State Of Charge[5]

OVC-HEVs: off-vehicle chargeable hybrid electric vehicles

NOVC-HEV: not off-vehicle chargeable hybrid electric vehicles

PEV: pure electric vehicles

AER: All electric range

EAER: Equivalent all electric range

EAC: Recharged energy

FC: Fuel consumption

NOVC – HEV: not off vehicle charging hybrid electric vehicle

OVC – HEV: off vehicle charging hybrid electric vehicle

EV: pure electric vehicle

---

[1] BMEP è una quantità fisica comune usata dai motoristi. È la pressione media che, se imposta sui pistoni uniformemente dall'alto verso il basso di ogni corsa di potenza, produrrebbe la potenza misurata.
[2] DOD rappresenta lo stato di carica di una batteria. Se il DOD è nullo, la batteria è completamente carica. Se il DOD è al 100%, la batteria è scarica e non può fornire energia. È l'opposto del SOC.
[3] è una quantità fisica comune usata dai motoristi. Gli attriti tra gli elementi del motore generano una perdita di coppia. L'FMEP rappresenta questa perdita. Ridurre al minimo FMEP aumenta l'efficienza del motore e la coppia disponibile all'uscita del motore.
[4] È la pressione media che, se imposta sui pistoni uniformemente dall'alto verso il basso di ogni corsa di potenza, produrrebbe la potenza misurata + attriti + perdite di pompaggio.
[5] Rappresenta lo stato di carica di una batteria. Se il SOC è nullo, la batteria è scarica e non può fornire energia. Se il SOC è al 100%, la batteria è completamente carica. È l'opposto del DOD.

RCDA: charge depleting actual range

RCDC: charge depleting cycle range

MHEV: Mild Hybrid Electric Vehicle

BiSG: Belt-integrated Starter Generator (engine side)

TiMG: Transmission-integrated Motor Generator (transmission side)

DC/DC: convertitore di corrente continua[6]

FEAD: Front End Accessory Drive

OEM: Original equipment manufacturer

PME: Pressione Media Effettiva

AMEP: pressione effettiva media disponibile

CVT: Continuously variable transmission

HEV: Hybrid Electric Vehicle

ECMS: Equivalent Consumption Minimization Strategy

DOE: Designe Of Experiment

CORE: estrazione della regola di ottimizzazione del clustering

GA: Algoritmo Generico

[6] Un **convertitore DC-DC**, in ingegneria elettronica, è un circuito che converte una sorgente di corrente continua da una tensione a un'altra. Costituisce una classe di convertitori di potenza.

Introduzione

Il lavoro di tesi nasce da una sfida molto importante sia in tema etico ma anche di evoluzione tecnologica. I tanti studi affrontati in merito hanno come scopo principale quello di ridurre le emissioni di CO_2 emesse dai motori a combustione. Dal 2015 l'introduzione del ciclo WLTP all'interno delle normative per l'omologazione delle vetture ha comportato un inseverimento omologativo rispetto all'utilizzo del tradizionale ciclo NEDC.

Nel 2020 l'impegno dei costruttori e delle istituzioni è quella di avere una norma di omologazione che garantisca un quantitativo di emissioni relativamente basso. Considerando che comunque, almeno in Italia, il parco auto circolante ha una vita media relativamente alta. Intervenire con nuove tecnologie che garantiscano l'abbattimento delle emissioni non permetterebbe, almeno nell'immediato, di avere dei benefici tangibili.

Per questo si è considerato di aggiungere al ciclo WLTP, anche l'RDE, che prevede una rilevazione delle emissioni in condizione di utilizzo giornaliero della vettura. Con una politica di rigore e un abbassamento relativo della soglia massima di g/km di CO_2, le vetture che dal 2020 si ritroverebbero a circolare per le strade sarebbe relativamente esiguo.

Tra l'altro la motorizzazione che troverebbe maggiori difficolta ad entrare in un mercato come quello preannunciato è quella diesel. Considerando una macroeconomia come quella Italiana, che detiene un record sull'equipaggiamento delle vetture circolanti con un 77% di vetture equipaggiate diesel e solo il 23% benzina, sarebbe un freno anche per l'economia del paese essendo radicato e improntato su questa tipologia di vettore.

Il motore Diesel ha innumerevoli vantaggi, ma altrettanti svantaggi, argomento che meriterebbe una trattazione dedicata. Questa motorizzazione acquisirebbe un know how migliore e sicuramente si rilancerebbe in una nuova veste, se venisse accoppiata ad una macchina elettrica per andare a colmare quel gap che si troverebbe ad affrontare con l'introduzione delle nuove normative.

Attraverso questa tesi, si cerca di avvalorare proprio questo concetto di "reinventare il diesel", sotto un punto di vista tecnico ma anche economico. Quindi poter cercare il connubio migliore tra la giusta taglia di macchina elettrica ed il downsizing della motorizzazione termica che porti il beneficio migliore, improntato su tre aspetti oggetto di questo lavoro:

- Tecnico: minor emissioni allo scarico
- Economico: minor costo possibile
- Tecnico + Economico: si cerca l'ottimo tra i due aspetti

Attraverso l'utilizzo del software Amesim Simcenter, si andranno a creare i modelli, avendo come punto di riferimento un'autovettura di classe C, delle categorie in esame:

- Convenzionale
- Convenzionale + Cylinder Deactivation
- P0
- P2

Implementando le diverse caratteristiche che garantirebbero la valutazione dei risultati ottenuti per le emissioni allo scarico del motore.

Successivamente, si valuteranno i costi delle singole categorie assunte per il caso studio e se ne traggono le dovute conclusioni.

Capitolo 1: Software Simcenter Amesim by Siemens

Caratteristiche del programma

Simcenter Amesim è l'acronimo di Advanced Modeling Environment per eseguire simulazioni di sistemi di ingegneria. Si basa su un'interfaccia grafica intuitiva in cui il sistema viene visualizzato durante il processo di simulazione.

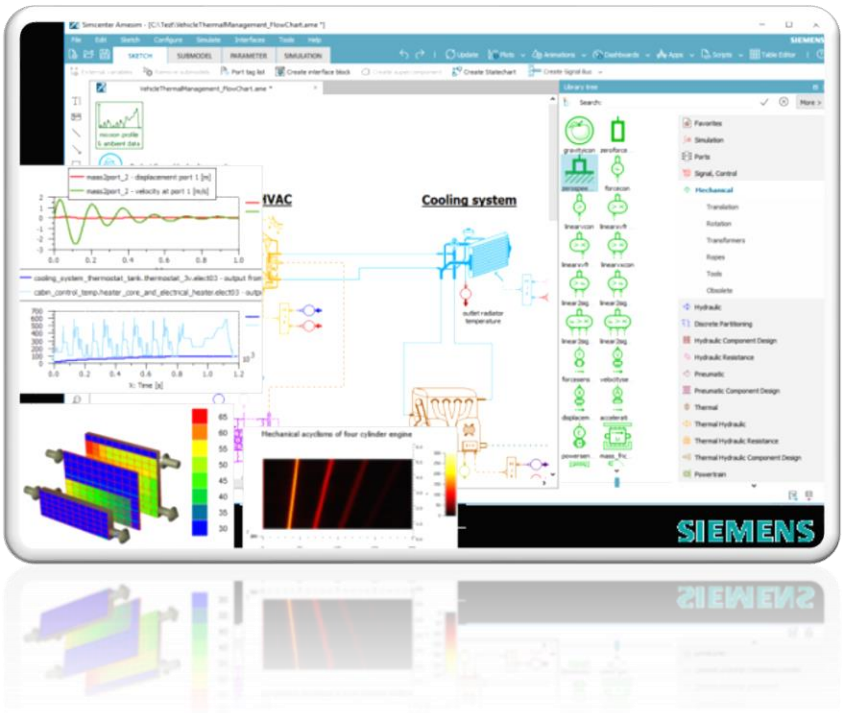


Figura 1: Simcenter Amesim - Grafica di lavoro

Il Software ha implementato un sistema di simulazione 1D per modellare e analizzare sistemi intelligenti multidisciplinari e prevederne le prestazioni a fine della prova. Offre potenti funzionalità, in modo che qualsiasi utente esperto o meno esperto, abbia la capacità di creare un modello Simcenter Amesim semplicemente dalle librerie standard incluse o dalle librerie utente poterle eseguire per ottenere dei risultati di analisi interessanti.

La struttura della piattaforma Simcenter Amesim garantisce:

- un facile utilizzo dei modelli nel lavoro quotidiano
- consente l'integrazione di Simcenter Amesim nel processo di progettazione da utilizzare nella maggior parte delle fasi del V-Cycle.

Inoltre, le strutture della piattaforma Simcenter Amesim possiedono dalle funzionalità denominate "Simulazione scripting" e "Personalizzazione Simcenter Amesim" che includono i seguenti metodi "MIL / SIL / HIL e Real-Time" o "1D / 3D / CAE".

Considerando il caso studio in questione l'impatto ambientale della combustione è diventato un problema importante negli ultimi decenni. Attraverso il buon senso e le normative sempre più stringenti per un

discorso legato alle emissioni inquinanti, i miglioramenti tecnologici hanno così portato ad una forte riduzione del consumo di carburante per abbattere il più possibile le emissioni dei veicoli. Lo studio attraverso un software risulterebbe un vantaggio, soprattutto di tempo, se lo si applicasse, in fase di pre-design, ad una analisi di ciò che si vorrebbe realizzare, per poter arginare il problema delle emissioni.

Questo tipo di analisi ha riguardato principalmente, la scelta delle architetture e delle tecnologie "atte allo scopo", quindi, alla loro implementazione e ottimizzazione attraverso l'utilizzo di questo software. Ci permettono di ottenere dopo la creazione del modello e la simulazione, dati sia di riduzione di emissioni che di consumo carburante, tema generalmente molto complesso da affrontare. Uno strumento, come Amesim Simcenter, in grado di svolgere questo compito, rappresenta un grande vantaggio competitivo essenzialmente per le case automobilistiche e fornitori di attrezzature ad esse associate.

La libreria IFP-Drive è stata sviluppata per poter affrontare queste tematiche ed è completamente integrata con l'ambiente software Simcenter Amesim ™. Si occupa di:

- simulazione della capacità di un veicolo di soddisfare un profilo di velocità / tempo di un ciclo di guida standard (NEDC, WLTC, etc.…)
- simulazione del consumo di carburante
- simulazione ed analisi delle emissioni (efficienza del catalizzatore, ...)
- previsione di prestazioni del veicolo (capacità di accelerazione, pendenza massima salita, velocità massima, ...)
- collaudo di diverse motorizzazioni o trasmissioni
- simulazione di veicoli ibridi (ibridi paralleli o in serie) e strategie di elettrificazione
- test delle prestazioni di un sistema di controllo effettivo (prevedere il bilancio energetico e efficienze, ...).

La libreria IFP-Drive, secondo la Guida Amesim è stata sviluppata in stretta collaborazione tecnica con IFP Energies Nouvelles.

Capitolo 2: Cicli di omologazione

Normative

Secondo la normativa:

La classificazione Euro dei veicoli serve per stabilire fino a che punto un veicolo (auto o moto) è inquinante. Ma è anche fondamentale per le sempre più frequenti limitazioni alla circolazione atte alla comprensione del fermo di specifici veicoli, in giorni dove il livello di emissioni, supera i limiti di legge. Di seguito viene riportata una tabella dove è elencata per ogni categoria, la direttiva di riferimento e la data in cui è entrata in vigore.

Categoria Euro	**Direttiva di riferimento (indicata sulla carta di circolazione**	**Data di entrata in vigore**
Euro 1	91/441/CEE - 91/542/CEE punto 6.2.1.A - 93/59/CEE	1.1.1993
Euro 2	91/542/CEE punto 6.2.1.B - 94/12/CE - 96/1/CE - 96/44/CE - 96/69/CE - 98/77/CE	1.1.1997
Euro 3	98/69/CE - 98/77/CE rif 98/69/CE A - 1999/96/CE A - 1999/102/CE rif. 98/69/CE - 2001/1/CE rif 98/69/CE - 2001/27/CE A - 2001/100/CE A - 2002/80/CE A - 2003/76/CE A	1.1.2001
Euro 4	98/69/CE B - 98/77/CE rif. 98/69/CE B - 1999/96/CE B - 1999/102/CE rif. 98/69/CE B - 2001/1/CE rif. 98/69 CE B - 2001/27/CE B - 2001/100/CE B - 2002/80/CE B - 2003/76/CE B - 2005/55/CE B1 - 2006/51/CE rif. 2005/55/CE B1	1.1.2006
Euro 5	2005/55/CE B2 - 2006/51/CE rif. 2005/55/CE B2 - 2006/51/CErif. 2005/55/CE B2 (ecol. migliorato) oppure Riga C -1999/96/CE fase III oppure Riga B2 o C - 2001/27/CE Rif. 1999/96 Riga B2 oppure Riga C ▪ 2005/78/CE Rif 2005/55 CE Riga B2 oppure riga C ▪ 2006/81 CE rif. 2005/55 CE riga B2 ▪ 2006/81 CE rif. 2005/55 CE riga C (ecol. migliorato) ▪ 715/2007*692/2008 (Euro 5 A) ▪ 715/2007*692/2008 (Euro 5 B) ▪ 2008/74/CE rif. 2005/55/CE riga B2 ▪ 2008/74/CE rif. 2005/55/CE riga B2 (ecol. migliorato) ▪ 2008/74/CE rif. 2005/55/CE riga B2 (con disp. anti-part)	1.9.2009 per omologazione 1.1.2011 per immatricolazione
Euro 6	715/2007*692/2008 (Euro 6 A) 715/2007*692/2008 (Euro 6 B)	Obbligatoria per le immatricolazioni dal 1º settembre 2015

Tabella 1:Classificazione dei veicoli su base della Normativa delle emissioni inquinanti

Per poter accertare il rispetto delle norme omologative vengono eseguite delle prove, che possono variare:

- a seconda dello standard
- in funzione dei paesi che attuano i relativi standard

Il ciclo omologativo utilizzato in origine è l'NEDC test che è stato successivamente sostituito il 1º settembre 2017 dal WTLP e dal 2020 sarà affiancato dal test RDE.

La **procedura di prova per veicoli leggeri armonizzata a livello mondiale** comunemente chiamata **WLTP** definisce:

- una norma armonizzata globale per determinare i livelli di inquinanti e emissioni essenzialmente di CO_2
- consumo di carburante
- energia
- gamma di veicoli elettrici leggeri (autovetture e furgoni commerciali leggeri).

Gli esperti automobilistici, dell'Unione Europea, del Giappone e dell'India, sotto la guida del Forum mondiale dell'UNECE[7] si riuniscono per l'armonizzazione dei regolamenti sui veicoli, perciò hanno sviluppato lo standard con una versione finale pubblicata nell'anno 2015.

Procedura dei test

L'esecuzione dei test produce come risultato una guida "grintosa" per quanto riguarda le condizioni dei test dinamometrici per simulare a banco il carico stradale (resistenza al movimento), cambio marcia, peso totale della vettura (includendo equipaggiamenti opzionali, merci e passeggeri), carburante, temperatura ambiente e infine la tipologia e pressione degli pneumatici.

La normativa che impone il ciclo omologativo, prevede per il WLTC, una distinzione a seconda della classe del veicolo. Questa distinzione viene definita dal rapporto (potenza/peso PW_r in [kW]) / (T potenza nominale motore) / peso a vuoto:

- Classe 1 - veicoli a bassa potenza con $PW_r <= 22$;
- Classe 2 - veicoli con $22 < PW_r <= 34$;
- Classe 3 - veicoli ad alta potenza con $PW_r > 34$;

Le auto più comuni, tipicamente, hanno rapporti di potenza di 40-100 [kW] / [tonnellata], quindi, per avere un esempio pratico appartengono maggiormente alla *classe 3*.

"In ogni classe, ci sono diversi test di guida progettati per rappresentare il funzionamento di veicoli reali su strade urbane ed extraurbane e autostrade. La durata di ogni step è fissata tra le classi, tuttavia le curve di accelerazione e velocità hanno una forma diversa. La sequenza di prove è ulteriormente limitata dalla velocità massima del veicolo V_{max}. Avendo a disposizione una maggiore varietà di cambi manuali con

[7] La **Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite** (**ECE** o **UNECE** dall' acronimo inglese di **United Nations Economic Commission for Europe**) è una delle cinque commissioni economiche che riportano al Consiglio economico e sociale delle Nazioni unite (ECOSOC). Aderiscono all'ECE, istituita nel 1947 con l'obiettivo di favorire la cooperazione economica e sociale e lo sviluppo sostenibile nell' Europa postbellica, sia i paesi dell'Europa orientale che quelli dell'Europa occidentale oltre agli Stati Uniti, a Canada, Israele, ed alcuni stati centro-asiatici. Funzione principale della commissione è quella di valutare i problemi economici, tecnici e ambientali, sia nei paesi membri che tra gli stessi, e nel suggerire le possibili soluzioni.

4, 5, 6 e 7 marce, attualmente in commercio, ciò rende impossibile specificare i punti di cambiata fissi, così come poteva essere per l'NEDC.

La procedura dei test WLTP fornisce, invece, un algoritmo per il calcolo dei punti di cambiata ottimali, che tiene conto:

- del peso totale del veicolo
- delle curve di potenza a pieno carico entro i regimi normalizzati del motore, coprendo l'ampia gamma di velocità di rotazione
- potenza del motore consentite dalla tecnologia corrente

Questo per poter rispecchiare l'uso pratico e lo stile di guida efficiente dal punto di vista essenzialmente del consumo di combustibile; inoltre, i cambi di marcia frequenti che avvengono in meno di 5 secondi vengono filtrati" (Wikipedia, 2019).

Dal 1º settembre 2018 il WLTP entra in vigore sostituendo il NEDC come test per l'immatricolazione delle automobili all'interno dell'Unione Europea. La variazione dell'obbligo per l'omologazione dei nuovi modelli/versioni di veicoli era avvenuta precedentemente solo il 1º settembre 2017[8].

Cicli di prova WLTP

Ciclo per veicoli di classe 3

La Classe 3 prevede il più alto rapporto potenza/massa, ed è attuata sia in Europa che in Giappone. I veicoli di classe 3 sono suddivisi in 2 sottoclassi in base alla loro velocità massima che questi raggiungono:

- Classe 3a con v_{max} <120 km/h
- Classe 3b con $v_{max} \geq 120$ km/h

Di seguito vengono riportati all'interno della Tabella i valori associati alla seguente prova:

[8] **REGOLAMENTO DI ESECUZIONE (UE) …/... DELLA COMMISSIONE** del 21.2.2018 che modifica il regolamento (UE) n. 427/2014 per adeguarlo al cambio di procedura regolamentare di prova e semplificare le procedure amministrative di richiesta e certificazione

Tabella 2 Ciclo WLTP classe 3: parametri selezionati									
Fase	**Durata**	**Stop Duration**	**Distanza**	**p_stop**	**V_max**	**v_ave w / o si ferma**	**v_ave w / stop**	**a_min**	**a_max**
	[s]	*[s]*	*[m]*	*[%]*	*[km / h]*	*[km / h]*	*[km / h]*	*[m / s]*	*[m / s]*
Classe 3b (v_max ≥ 120 km / h)									
Basso 3	589	156	3095	26,5%	56.5	25.7	18,9	-1,47	1.47
Medio 3-2	433	48	4756	11,1%	76.6	44.5	39.5	-1,49	1.57
Alto 3-2	455	31	7162	6,8%	97.4	60,8	56.7	-1,49	1.58
Extra alto 3	323	7	8254	2,2%	131,3	94.0	92,0	-1.21	1.03
Totale	**1800**	**242**	**23266**						
Classe 3a (v_max <120 km / h)									
Basso 3	589	156	3095	26,5%	56.5	25.7	18,9	-1,47	1.47
Medio 3-1	433	48	4721	11,1%	76.6	44.1	39.3	-1,47	1.28
Alto 3-1	455	31	7124	6,8%	97.4	60.5	56,4	-1,49	1.58
Extra alto 3	323	7	8254	2,2%	131,3	94.0	92,0	-1.21	1.03
Totale	**1800**	**242**	**23194**						

Tabella 2: Dati del ciclo WLTP, veicolo di classe 3

I parametri riportati nella precedente tabella, dei cicli di Classe 3 e il profilo di velocità del veicolo per la Classe 3b vengono così diagrammati:

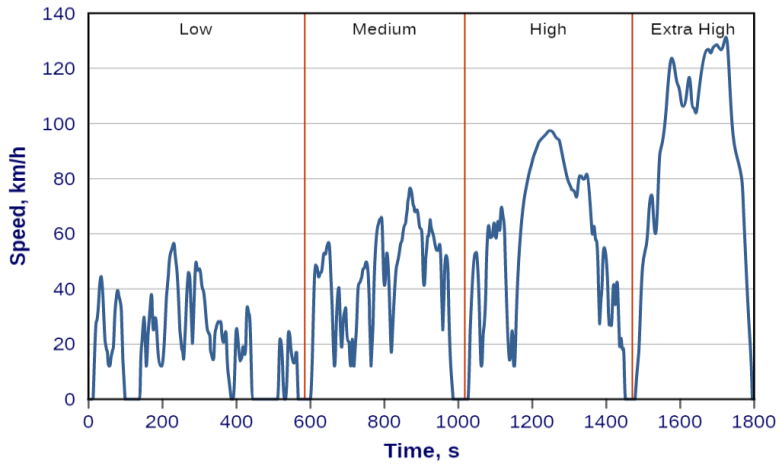


Figura 2: Ciclo WLTP per veicolo di classe 3

Ciclo per veicoli di classe 2

I veicoli di classe 2 sono principalmente:

- veicoli guidati in India
- veicoli a bassa potenza guidati in Giappone ed Europa

I parametri selezionati del ciclo di Classe 2 sono riportati nella tabella di seguito:

Fase	Durata	Stop Duration	Distanza	p_stop	V_max	v_ave w / o si ferma	v_ave w / stop	a_min	a_max
	S	*S*	*m*		*km / h*	*km / h*	*km / h*	*m / s*	*m / s*
Basso 2	589	155	3101	26,3%	51.4	25.7	19,0	-0.94	0.90
Medio 2	433	48	4737	11,1%	74,7	44.3	39.4	-0.93	0.96
Alta 2	455	30	6792	6,6%	85.2	57.5	53,7	-1.11	0.85
Extra alto 2	323	7	8019	2,2%	123.1	91,4	89.4	-1,06	0.65
Totale	**1800**	**240**	**22649**						

Tabella 3: Dati del ciclo WLTP, veicolo di classe 2

I parametri e il profilo di velocità della vettura vengono riportati di seguito:

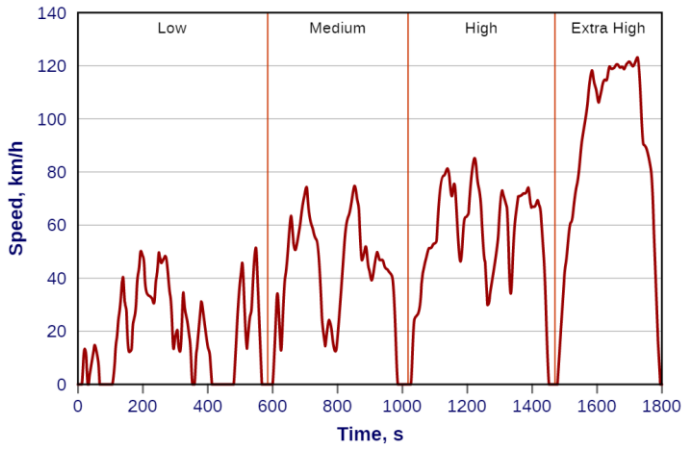


Figura 3: Ciclo WLTP per veicolo di classe 2

Ciclo di classe 1

I veicoli con un rapporto potenza/massa relativamente più basso, fanno parte della Classe 1. A questa categoria appartengono veicoli prodotti principalmente in India. I parametri del ciclo di Classe 1 vengono riportati nella seguente tabella:

Fase	Durata	Stop Duration	Distanza	p_stop	V_max	v_ave w / o si ferma	v_ave w / stop	a_min	a_max
	S	*S*	*m*		*km / h*	*km / h*	*km / h*	*m / s*	*m / s*
Basso 1	589	154	3330	26,1%	49.1	27.6	20.4	-1.00	0.76
Medio 1	433	48	4767	11,1%	64,4	44.6	39.6	-0.53	0.63
Basso 1	589	154	3330	26,1%	49.1	27.6	20.4	-1.00	0.76
Totale	**1611**	**356**	**11428**						

Tabella 4: Dati del ciclo WLTP, veicolo di classe 1

Una rappresentazione grafica del profilo di velocità del veicolo è il seguente:

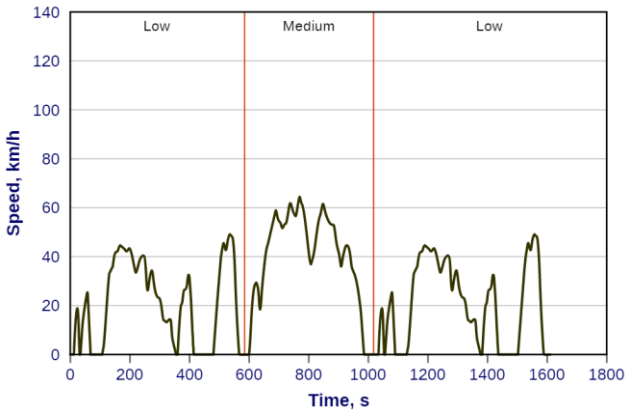


Figura 4: Ciclo WLTP per veicolo di classe 1

Per alcuni veicoli, c'è la possibilità che non possibile poter seguire questi requisiti di velocità/tempo del ciclo.

Le ragioni sono:

1. I veicoli con rapporti potenza/massa vicini ai confini tra i veicoli di Classe 2 e Classe 3 o per i veicoli a potenza molto bassa della Classe 1 potrebbero non essere in grado di raggiungere le accelerazioni necessarie per mantenere la velocità del ciclo. Perciò in questi casi, è possibile applicare una procedura di ridimensionamento, per poter ridurre i tassi di accelerazione massimi anche per poter migliorare la guidabilità. Una delle conseguenze di questa procedura è quella di una riduzione delle velocità massime del ciclo.
2. Alcuni veicoli possono avere una velocità massima che risulta essere limitata ad un valore inferiore alla velocità massima del ciclo ridotto. In questi casi, il veicolo deve essere guidato con la sua velocità massima in quei tratti di ciclo in cui la velocità del ciclo è superiore alla velocità massima del veicolo.
3. Alcuni veicoli potrebbero non essere in grado di seguire il profilo di velocità del ciclo discendente entro la tolleranza richiesta per periodi specifici. In questi casi il veicolo deve essere guidato con il comando dell'acceleratore completamente attivato durante questi periodi.

Prove per veicoli ibridi ed elettrici

Il ciclo omologativo WLTP include disposizioni speciali per il collaudo di varie categorie di veicoli ibridi elettrici e completamente elettrici:

- OVC-HEV,
- NOVC-HEV,
- PEV

Tutte le categorie sono classificate come veicoli di classe 3. Per quanto riguarda le emissioni e una serie di altri parametri, vengono testati nel rispettivo ciclo di Classe 3 (Classe 3a o Classe 3b), in entrambe le modalità *di riduzione della carica* e *di mantenimento della carica* iniziale. Inoltre, alcuni parametri

vengono testati su dei cicli *urbani WLTC*, composti solo dalle fasi a bassa e a media velocità. La tabella dei test è riassunta di seguito:

		WLTP		WLTP city
		Charge Depleting	**Charge Sustaining**	**Charge Depleting**
		Criteria Emissions, FC, CO_2, AER, EAER, R_{CDC}, R_{CDA}, E_{AC}	Criteria Emissions, FC, CO_2	AER_{city}, E_{AC}city
OVC-HEV	Class 3a	Low 3 + Medium 3-1 + High 3-1 + Extra High 3	Low 3 + Medium 3-1 + High 3-1 + Extra High 3	Low 3 + Medium 3-1
	Class 3b	Low 3 + Medium 3-2 + High 3-2 + Extra High 3	Low 3 + Medium 3-2 + High 3-2 + ExtraHigh 3	Low 3 + Medium 3-2
NOVC-HEV	Class 3a	--	Low 3 + Medium 3-1 + High 3-1 + ExtraHigh 3	--
	Class 3b	--	Low 3 + Medium 3-2 + High 3-2 + Extra High 3	--
PEV	Class 3a	Low 3 + Medium 3-1 + High 3-1 + Extra High 3	--	Low 3 + Medium 3-1
	Class 3b	Low 3 + Medium 3-2 + High 3-2 + Extra High 3	--	Low 3 + Medium 3-2

Tabella 5: Dati del ciclo WLTP per veicoli ibridi o elettrici

Ciclo di prova RDE

Il nuovo test delle emissioni di guida reali misura gli inquinanti, come ad esempio gli NO_x, emessi dalle auto mentre si guida su strada. Il ciclo RDE non sostituisce il test in laboratorio WLTP, ma lo completa. RDE serve a confermare i risultati WLTP nella vita reale, garantendo in tal modo che le automobili producano basse emissioni inquinanti, non solo in laboratorio ma anche su strada. L'Europa è la prima al mondo a introdurre questo tipo di test su strada, segnando un grande balzo in avanti nelle prove sulle emissioni delle auto.

Attraverso lo svolgimento del ciclo RDE, l'auto viene guidata su strade pubbliche ed esposta a una vasta gamma di condizioni diverse. Le apparecchiature specifiche installate sul veicolo raccolgono dati per verificare che non vengano superati i limiti legislativi per inquinanti come ad esempio gli NO_x. Le condizioni di guida, inoltre, includono:

- Altitudini basse e alte
- Temperature su tutto l'anno solare
- Carico utile aggiuntivo del veicolo
- Guida in salita e in discesa
- Strade urbane (bassa velocità)
- Strade rurali (media velocità)
- Autostrade (alta velocità)

Anche se, il ciclo RDE, richiederà ai produttori di effettuare importanti investimenti nello sviluppo di nuovi veicoli e nell'aggiornamento delle loro strutture di collaudo, l'industria automobilistica concorda

sul fatto che il nuovo test RDE è necessario per confermare i risultati dei test di laboratorio e per garantire che le auto soddisfino i limiti specificati una volta immatricolati e immessi su strada. (DieselNet, 2019)

Capitolo 3: Classificazione di veicoli ibridi

Negli ultimi tempi la parola "Elettrificazione" è una delle parole che sentiamo pronunciare spesso perché è ormai diventata uno dei punti cardine dei programmi di sviluppo di tutti i costruttori di auto sulla via di una mobilità più pulita.

Analizzando il termine nello specifico, questo indica proprio la progressiva introduzione di sistemi di propulsione elettrici che affianchino o rimpiazzino del tutto quelli tradizionali, dando dunque vita alle vetture definite ibride (in cui coesistono entrambi i tipi di propulsione) oppure interamente elettrice.

All'interno di queste due famiglie esistono tuttavia soluzioni diverse, che potremmo ordinare proprio secondo il livello di elettrificazione, ossia del ruolo che la parte elettrica ha rispetto a quella termica. Dunque, partendo dai sistemi che la utilizzano in modo marginale per arrivare a quelli in cui è invece la principale forza motrice se non l'unica.

La tipologia di ibridazione che viene raggiunta può essere differenziata in base a tre differenti aspetti:

- scala di potenza della fonte secondaria,
- design del sistema di propulsione
- fonte di alimentazione del sistema di propulsione

Le varie classificazioni delle macchine elettriche, maggiormente utilizzate in campo automotive, sono elencate di seguito:

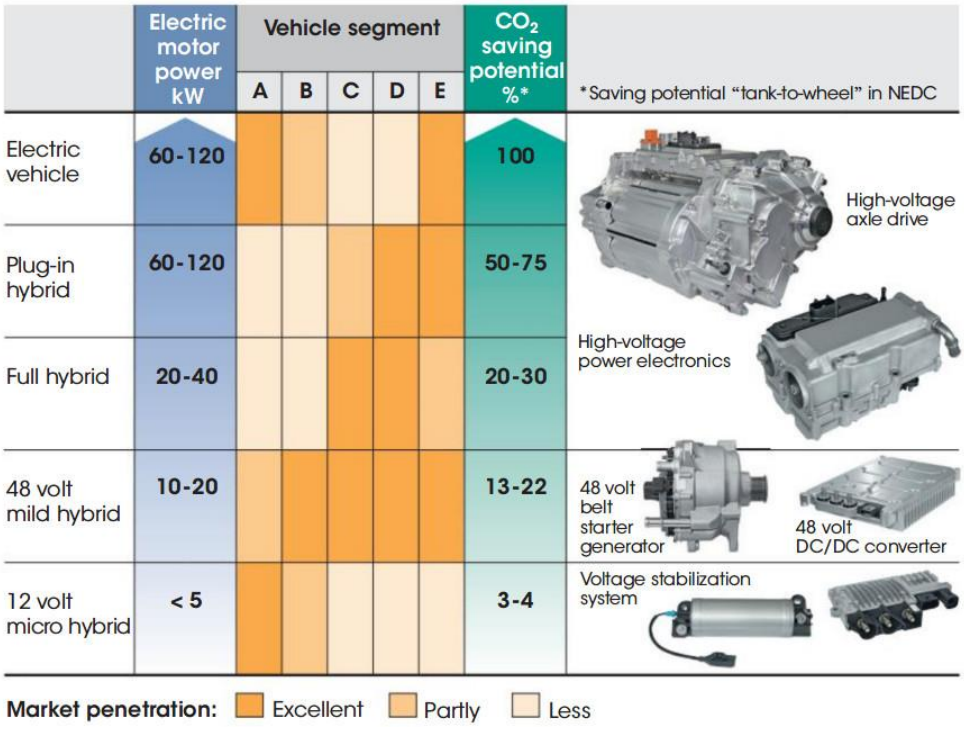


Figura 5: Elenco delle varie taglie di motore elettrico utilizzate per le diverse categorie

Micro Hybrid

I veicoli che necessitano di una minima dipendenza dall'energia elettrica per guidare il veicolo sono denominati come Micro hybrid. Le macchine elettriche utilizzate per questo tipo di categoria sono essenzialmente motori sincroni.

Al giorno d'oggi, tuttavia, le macchine sincrone collegate direttamente all'albero motore non vengono più considerate ibridi a causa della mancanza di energia elettrica sufficiente per la trazione del veicolo. Di fatto ci riferiamo ad un sistema Start&Stop, che consiste in un motorino d'avviamento potenziato, rispetto a quello comunemente installato sulle vetture tradizionali, trattasi di un dispositivo intelligente che spegne il motore durante le soste per poter avere un guadagno di carburante e lo riavvia per ripartire. Ci sono ulteriori funzioni, come la gestione della ricarica della batteria, che permette così la sostituzione del tradizionale alternatore.

Inoltre, in presenza di cambi automatici o robotizzati, alcuni sistemi di questo tipo possono anticipare lo spegnimento del motore principale quando l'auto non è ancora ferma, al di sotto di una certa velocità che di solito non supera i 12 km/h. Oggi queste funzioni sono integrate in molti sistemi start&stop che non sono ritenuti ibridi.

Figura 6: 12Volt Power Net System[9] (Continental, s.d.)

Mild Hybrid

L'industria automobilistica è molto dinamica quando si tratta di riduzione delle emissioni inquinanti, introducendo nuove tecnologie innovative che arrivano ad un ritmo incessante e senza sosta. Lo sviluppo dei veicoli catalogati come MHEV è principalmente guidato da due fattori:

- Efficienza: l'obiettivo di ridurre l'emissione di CO_2 della flotta
- Drivability: aumento della domanda delle prestazioni dinamiche del veicolo

Per quanto riguarda i limiti e gli obiettivi da raggiungere, relativi alle emissioni di CO_2, in molti paesi del mondo sono in vigore normative[10] sulla quantità di CO_2 massima prodotta dai veicoli stradali.

[9] The Power Net System supporta i 12V, durante le richieste di start&stop

[10] Ogni stato presenta una normativa che viene discussa dagli stati membri e i costruttori di autovetture così da riuscire ad arrivare ad una soluzione comune. L'Europa, l'America, la Cina etc. presentano differenti normative inerenti sia al massimo quantitativo di CO_2 emesso per km, ma anche la tipologia con cui si eseguono le prove di omologazione.

Apparentemente è facile definire un Mild Hybrid Electric Vehicle, ma la maggior parte delle fonti fornisce una definizione relativamente incompleta. Quando si esaminano i tipi di HEV, è necessario considerare i seguenti aspetti chiave:

- l'energia elettrica disponibile (10 - 20 [kW])
- la tensione della batteria ad alta tensione (48 [V])
- il consumo di carburante / potenziale di riduzione di CO_2 (13 – 22 [%])
- le funzioni svolte dalla macchina elettrica (ad es. boost di coppia)

Il costo è un ulteriore fattore molto importante che influenza il livello di ibridazione elettrica di un veicolo. Poiché l'introduzione dei componenti elettrici presenta un costo decisamente più elevato, il livello di ibridazione dipende dal segmento del veicolo. I veicoli più piccoli presentano un livello minimo di integrazione dell'ibridazione elettrica, a causa dell'impatto sul prezzo complessivo del veicolo.

Nel mercato automobilistico i MHEV vengono suddivisi in due principali categorie per il valore operativo della rete ad alta tensione da 48 V fino ad arrivare a 160 V.

L'attenzione dei costruttori, ma soprattutto di chi progetta questi componenti, si sta spostando decisamente verso la soluzione a 48 V, che diventerà la soluzione standard per i MHEV. Di seguito vengono definite le varie categorie di veicoli ibridi con le relative tecnologie implementate:

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

Tabella 6: Vantaggi e svantaggi delle varie classifiche di veicoli ibridi

Osservando i maggiori vantaggi della tecnologia a 48 V, è possibile osservare principalmente:

- l'integrazione semplice nelle architetture dei veicoli esistenti
- una elevata efficienza dei componenti

Infatti, nella figura è possibile vedere come vengono associati ad una struttura già esistente.

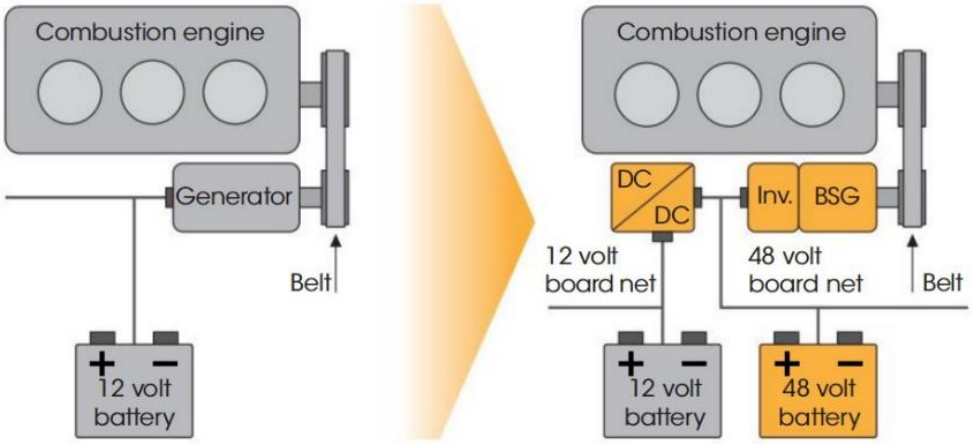


Figura 7: Transition from 12V to dual voltage 12V-48V architecture (BiSG)

Un sistema MHEV 48 V è composto da quattro componenti principali:

- macchina elettrica (BiSG o TiMG)
- inverter (solitamente integrato con la macchina elettrica)
- convertitore DC/DC
- batteria ad alta tensione (48 V)

Il sistema MHEV BiSG system introduce il minor numero di modifiche sull'architettura del veicolo esistente, quindi risulta essere la soluzione di ibridazione più economica. L'aggiunta di più componenti elettrici, sulla rete elettrica a 48 V, consente ulteriori miglioramenti in termini di efficienza e di consumo di carburante, ma anche c'è un vantaggio sulla guidabilità del veicolo stesso. A seconda dell'applicazione del veicolo, i componenti elencati di seguito possono essere elettrificati e collegati alla rete a 48 V:

- pompa dell'olio motore
- pompa per il vuoto del motore
- pompa olio – cambio
- pompa dell'acqua del motore
- compressore A / C
- compressore intake air

Una tensione della batteria e una capacità energetica maggiori offrono, l'opportunità di migliorare le tecnologie per i sistemi di post-trattamento dei gas di scarico. Un esempio è:

- Electrically Heated Catalyst EMICAT®

Electric machine and inverter

Attualmente, l'architettura Mild hybrid più comune è l'architettura P0, in cui la macchina elettrica è integrata nel FEAD. In questo caso, la macchina elettrica sta sostituendo l'alternatore in termini di ruolo e packaging.

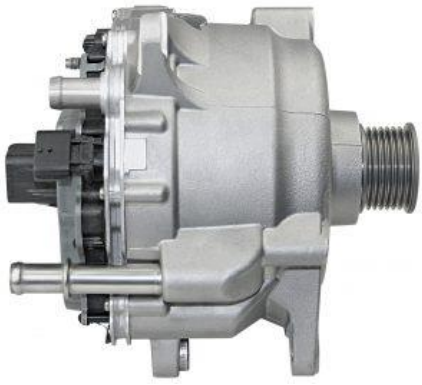


Figura 8: 48V belt starter generator

Il generatore di avviamento integrato nella cinghia (BiSG o e-machine) può essere una macchina elettrica asincrona o sincrona, che ha due funzioni principali:

- fornire coppia al gruppo propulsore in modalità motore
- produrre elettricità in modalità generatore

Figura 9: 48V belt starter generator – exploded view

1. pulley
2. housing
3. rotor
4. stator
5. integrated inverter

La maggior parte dei generatori di avviamento a 48 V sono macchine elettriche a corrente alternata trifase (CA) con un inverter integrato. L'inverter ha due ruoli:

- convertire la corrente continua fornita dalla batteria in corrente alternata, per alimentare la macchina elettrica quando è in modalità motore
- convertire la corrente alternata generata dalla macchina elettrica (in modalità generatore) in corrente continua, che può essere immagazzinata nella batteria.

Per avere un confronto, nel caso di un'architettura P1 Mild hybrid, le macchine elettriche devono avere una forma piatta, al fine di essere posizionate tra il motore a combustione interna e la trasmissione. Per queste applicazioni, al fine di avere una coppia elevata, le macchine elettriche possiedono una densità di

potenza elevata. Pertanto, vengono utilizzate le e-machine sincrone a magneti permanenti anziché le e-machine asincrone ad induzione.

Le macchine elettriche montate sulla trasmissione, o le architetture ibride P2, possono essere integrate nella scatola della trasmissione o montate lateralmente, collegate attraverso una cinghia.

Il design con trasmissione a cinghia risulta essere molto compatto e facilita l'integrazione nello spazio limitato tra il motore a combustione interna e la trasmissione. Il vantaggio principale di questa configurazione è che il motore può essere disaccoppiato dalla macchina elettrica, il che migliora il recupero di energia elettrica (nessuna perdita del motore coinvolta).

Figura 10: 48V P2 hybrid module

Se il raffreddamento delle e-machine P2 viene effettuato attraverso l'olio della trasmissione, il tipo di rotore deve essere senza spazzole a magneti permanenti o a induzione. In caso di vincoli che presentano uno spazio limitato, si preferisce per il packaging, una macchina a magneti permanenti, dove si ha maggiore densità di coppia, anziché una macchina ad induzione.

DC/DC converter

Un veicolo elettrico ibrido leggero da 48 V ha due reti elettriche: una rete a bassa tensione (12 V) e una rete ad alta tensione (48 V). L'energia elettrica può essere prodotta solo dalla macchina elettrica a 48 V, pertanto è necessario un convertitore DCDC per trasferire energia dal sistema a 48 V al sistema a 12 V.

Figura 11: 48V DCDC converter

Un convertitore DC/DC può funzionare in:

- buck-mode (step down), quando converte la tensione da alta a bassa (ad esempio: da 48 V a 12 V)
- boost (step up), quando si converte la tensione da bassa ad alta (ad esempio: da 12 V a 48 V)

Nelle applicazioni MHEV, il più delle volte, il DC/DC funziona in modalità buck ma sono in grado di eseguire entrambe le modalità descritte.

Electric compressor (e-Compressor)

I motori turbo presentano una criticità nell'azionamento del sistema Turbo denominato "turbo lag", che sostanzialmente si traduce in un ritardo nell'accelerazione del veicolo dal momento in cui il conducente ha affondato il pedale dell'acceleratore. Ciò accade a causa dell'inerzia dei gas di aspirazione / scarico e del rotore del compressore.

Il vantaggio di avere una rete a 48 V è quella di offrire l'opportunità di utilizzare compressori elettrici con tempi di risposta più rapidi rispetto ai turbocompressori convenzionali. L'e-Compressor migliora la risposta complessiva ai transitori di coppia del motore e la caratteristica di coppia ai bassi regimi, che consente un ulteriore ridimensionamento del motore per un'applicazione mild hybrid.

Figura 12: 48V e-Compressor

Electrically Heated Catalyst EMICAT®

I motori a combustione interna richiedono che i sistemi di post-trattamento siano in grado di soddisfare gli standard sulle emissioni dei gas di scarico (Euro 6, SULEV, ecc.). I convertitori catalitici sono ampiamente utilizzati nei sistemi di post-trattamento dell'ICE. Uno degli svantaggi del convertitore catalitico è che devono raggiungere una temperatura elevata per poter funzionare in modo efficiente.

Su un convertitore catalitico a tre vie, utilizzato per motori a benzina, la temperatura di spegnimento (il valore da cui iniziano a funzionare) è di circa 300 ° C. Il tasso di conversione più efficiente si ottiene alla temperatura nominale, compresa tra 400 e 800 ° C.

Al fine di ridurre il più possibile la quantità di emissioni, il catalizzatore dovrebbe raggiungere il più rapidamente possibile la temperatura di lavoro a regime. I veicoli ibridi peggiorano questa situazione

perché le situazioni di arresto del motore si verificano più frequentemente durante l'arresto e l'avviamento o la marcia per inerzia a motore spento.

Il catalizzatore che viene riscaldato elettricamente denominato EMICAT® fornito da Continental, risolve questo problema riscaldando il catalizzatore in pochissimo tempo. Questa tecnologia consente fasi di spegnimento del motore ripetute e prolungate, riducendo allo stesso tempo la quantità di emissioni (raggiungendo la temperatura di spegnimento del catalizzatore in un tempo più breve). Può essere integrato nei sistemi di post-trattamento delle autovetture a benzina e diesel, nonché in applicazioni pesanti, tra cui un catalizzatore di supporto altamente efficace.

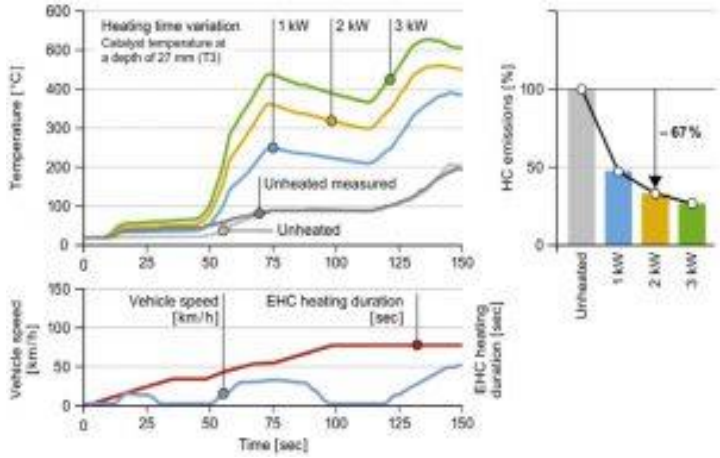


Figura 13: EMICAT performance

Nella figura precedente è possibile osservare la risposta della temperatura e la riduzione delle emissioni di idrocarburi (HC), funzione della potenza nominale del catalizzatore riscaldato, rispetto a un catalizzatore non riscaldato. Le migliori prestazioni si ottengono con una potenza elettrica di 3 kW, adatta per reti elettriche a 48 V.

Un catalizzatore riscaldato elettricamente porta numerosi vantaggi nel sistema di post-trattamento, come:

- ✓ rapidità di colmare il gap di temperatura del catalizzatore fuori dalla temperatura di regime
- ✓ ridotto raffreddamento del catalizzatore durante le fasi a vuoto o a motore spento
- ✓ potenziale riduzione dei metalli preziosi utilizzati per la realizzazione (riduzione dei costi)
- ✓ l'energia aggiuntiva aggiunta allo scarico migliora la vaporizzazione dei liquidi
- ✓ SCR migliorato a bassa temperatura (riduzione catalitica selettiva)
- ✓ attivazione intelligente per una potenza di riscaldamento inferiore
- ✓ utilizzo di energia di recupero senza accumulo intermedio (nessun ciclo attraverso la batteria)
- ✓ supporto alle sfide RDE

Full Hybrid

Con il termine Full Hybrid si intende un'autovettura ibrida nella quale il motore termico è affiancato da uno o più motori elettrici che forniscono sia trazione che recuperano energia in frenata. La differenza di questa tipologia di ibrido, rispetto al sistema mild-hybrid, è essenzialmente quella di poter funzionare solo in modalità elettrica pura per un tratto urban limitato.

In un'auto ibrida il motore elettrico viene installato solitamente tra il motore termico e il cambio: una frizione interposta tra i due motori li può scollegare permettendo la marcia in modalità solo elettrica. In alcuni casi il motore elettrico è posizionato sul retrotreno, per una trazione integrale ibrida. Esso è supportato da un pacco batterie che di norma è posizionato sul fondo della vettura.

La trazione viene affidata maggiormente al motore termico, al motore elettrico o la combinazione di entrambi a seconda delle seguenti condizioni di marcia:

- le batterie risultano essere cariche
- la partenza avviene in modalità elettrica

In accelerazione i due motori collaborano per aumentare prestazioni ed efficienza, mentre in rilascio o in frenata il dispositivo elettrico si trasforma in generatore ricaricando le batterie.

Ad ogni arresto della vettura il motore a combustione interna si spegne: in queste vetture lo Start&Stop risulta essere più evoluto rispetto a quello presente negli altri veicoli, perché non riavvia il motore termico fino a che non si raggiunge, la velocità di crociera considerata dal sistema. Vista la necessità del complesso sistema di gestione dell'energia di operare in maniera pressoché autonoma, le vetture full hybrid sono dotate solitamente di cambi automatici (x-engineer, s.d.).

Figura 14: Full Hybrid - Mercedes Benz (Auto, s.d.)

Capitolo 4: Architetture ibride

Ci sono diverse architetture per gli ibridi MHEV, esaminandoli nel dettaglio, si osserva che i fattori che ne determinano l'appartenenza alla categoria sono:

- il posizionamento dei componenti sul veicolo
- le possibili funzioni di controllo
- i vantaggi e gli svantaggi in termini di consumo di carburante e guidabilità.

Per architettura, topologia o configurazione si considera il posizionamento dei principali componenti del sistema elettrico ibrido sul veicolo. L'architettura è sostanzialmente definita dalla posizione della macchina elettrica e dal tipo di connessione con il gruppo propulsore / trasmissione (cinghia, integrato o cambio marcia).

La configurazione del gruppo propulsore ha un impatto significativo sulle prestazioni e sulle caratteristiche del veicolo, in termini di:

- costo di integrazione in fase di montaggio
- efficienza del carburante
- prestazione dinamica (miglioramento della coppia del motore)

Gli OEM e automotive Tier 1 stanno analizzando e valutando diverse importanti architetture di propulsione. La macchina elettrica può essere posizionata, rispetto agli altri componenti del gruppo propulsore, in cinque punti principali, così come posizionati in figura:

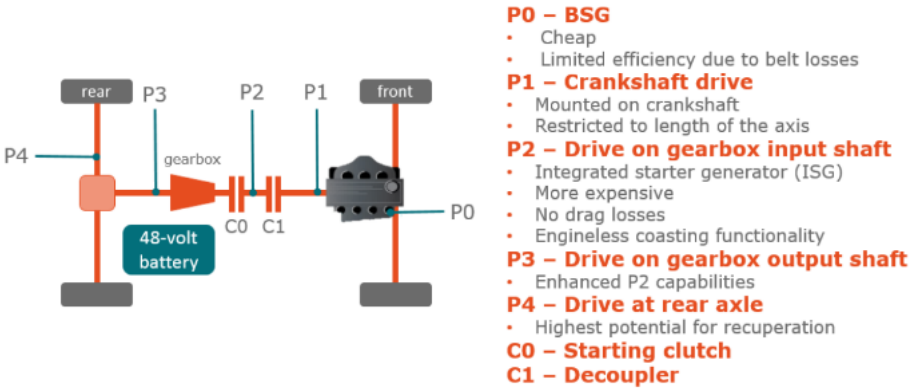


Figura 15: Architetture ibride

P0	La macchina elettrica è collegata al motore a combustione interna attraverso una cinghia, sull'azionamento accessorio anteriore (FEAD)
P1	La macchina elettrica è collegata direttamente all'albero motore del motore a combustione interna
P2	La macchina elettrica è fissata lateralmente (attraverso una cinghia) o integrata tra il motore a combustione interna e la trasmissione; la macchina elettrica è disaccoppiata dall'ICE e ha la stessa velocità dell'ICE (o multipli di essa)
P3	La macchina elettrica è collegata attraverso una rete di ingranaggi con la trasmissione; la macchina elettrica è disaccoppiata dall'ICE e la sua velocità è un multiplo della velocità della ruota
P4	La macchina elettrica è collegata attraverso una rete di ingranaggi sull'asse posteriore del veicolo; la macchina elettrica è disaccoppiata dall'ICE e si trova nella trasmissione dell'asse posteriore o nel mozzo delle ruote

Tabella 7: Categorie di ibrido

Belt Starter Generator Architecture: P0

Questa classificazione è anche conosciuta con l'acronimo BiSG dal generatore di avviamento integrato nella cinghia, questa topologia ibrida è la più conveniente dal punto di vista economico a causa dell'impatto limitato del sistema a 48 V sull'architettura del veicolo esistente.

In un'applicazione ibrida per veicoli elettrici, ci sono due principali fattori di costo:

- l'impatto sui componenti del gruppo propulsore esistenti
- la batteria ad alta tensione

Per ridurre al minimo i costi di integrazione, l'architettura del veicolo e della trasmissione dovrebbe essere mantenuta uguale o quasi a quella di un veicolo convenzionale. Pertanto, il modo più semplice per ottenere un costo minimo è integrare la macchina elettrica a 48 V nella trasmissione a cinghia per accessori motore già esistenti, sostituendo l'alternatore a 12V (o generatore) presente nel veicolo convenzionale.

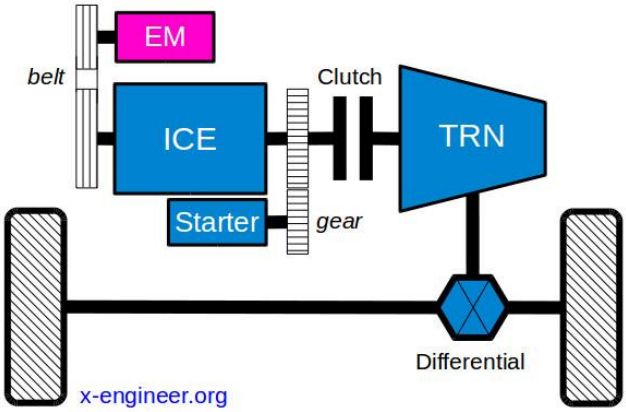


Figura 16: Struttura P0

Nell'architettura BiSG, l'ICE e la macchina elettrica non possono essere separati, ma sono collegati meccanicamente attraverso la cinghia accessoria. Pertanto, uno degli svantaggi di questa configurazione è che la coppia di attrito del motore risulta essere una perdita parassitaria per la macchina elettrica quando fornisce una coppia di sovralimentazione e anche quando sta recuperando energia elettrica in fase di frenata rigenerativa.

Di seguito vengono definiti i parametri di massima di questo tipo di architettura, esponendo i vantaggi e gli svantaggi di questo tipo di architettura ibrida:

Fuel Efficiency	**New European Driving Cycle (NEDC):** 10 … 12 % **Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP):** 7 … 9 %
Hybrid modes (functions)	Idle Stop & Start Moving Stop & Start Engine load shift Torque assist (fill) Torque boost Sailing / Coasting Energy recuperation Brake regeneration
Advantages	Basso costo di integrazione Macchina elettrica raffreddata ad aria o liquido Inverter integrato (con macchina elettrica) Modularità dimensionale per la macchina elettrica Il rapporto velocità / coppia possibile tra la macchina elettrica e ICE comporta una riduzione della potenza richiesta dalla macchina elettrica
Disadvantages	Capacità di coppia limitata a causa della trasmissione a cinghia Recupero di energia influenzato dalle perdite per attrito del motore
Overall characteristics	Capacità di incremento della coppia: media (limitata da slittamento della cinghia, durata) Recupero di energia elettrica: medio (a causa di perdite del motore) Miglioramenti della guidabilità: medio (a causa della spinta della coppia limitata) Creep / azionamento elettrico: impossibile (a causa della coppia e della trasmissione a cinghia limitate) Confezione: facile integrazione dei componenti con impatto limitato su altri componenti Efficienza del sistema: media (principalmente a causa dell'integrazione della trasmissione a cinghia sul FEAD)

Tabella 8: P0: Fuel Efficiency, Hybrid modes, Advantages, Disandavantages, Overall characteristics

L'architettura BiSG ha un impatto significativo sul design del FEAD. La durabilità della cinghia deve essere aumentata per sostenere una coppia più elevata e più cicli off / on del motore. I tendicinghia variabili devono fornire:

- aumentare la tensione durante l'avviamento e aumentare (coppia dalla macchina elettrica al motore)
- aumentare la tensione durante il recupero (coppia dal motore alla macchina elettrica)
- ridurre la tensione durante la guida normale (al fine di ridurre le perdite per attrito)

Vi è anche un impatto significativo sul rumore, sulle vibrazioni (NVH) del motore e sulla durata del cuscinetto principale dell'albero motore del motore.

Attualmente, tutte le applicazioni BiSG 48V utilizzano ancora l'avviatore a 12V. Il motivo è che l'avvio a freddo del motore, soprattutto dopo un lungo periodo di inattività, richiede un'elevata coppia della macchina elettrica (causa dell'elevato attrito del motore). Questa è una limitazione del BiSG perché la quantità di coppia che può essere trasmessa è limitata dallo scorrimento della cinghia. Con un design migliorato della cinghia e una maggiore durata, l'avviatore da 12 V può essere rimosso e tutte le funzioni eseguite dalla macchina elettrica da 48 V possono quindi essere un vantaggio. Di seguito vengono rappresentati alcuni dei componenti presenti sul veicolo.

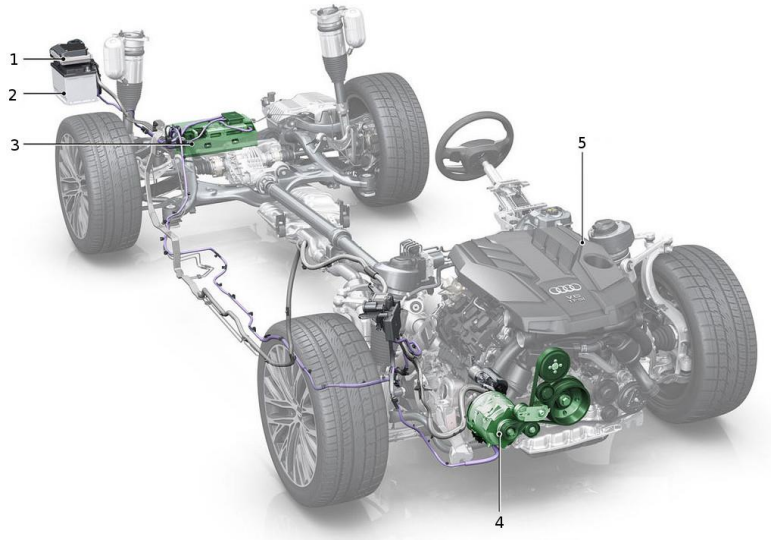


Figura 17: Sistema integrato nell'Audi A8 48V MHEV – 3.0 TFSI Internal Combustion Engine

1. DC/DC converter
2. low voltage battery (12 V)
3. high voltage battery (48 V)
4. 48V belt-drive starter-generator

Crankshaft mounted electric machine: P1

L'architettura P1 presenta la macchina elettrica collegata direttamente all'albero a gomiti del motore. Il motore elettrico ha una duplice funzione:

- come generatore, durante la fase di decelerazione del veicolo
- come avviatore del motore e come motore (per assistere l'ICE) durante le accelerazioni del veicolo.

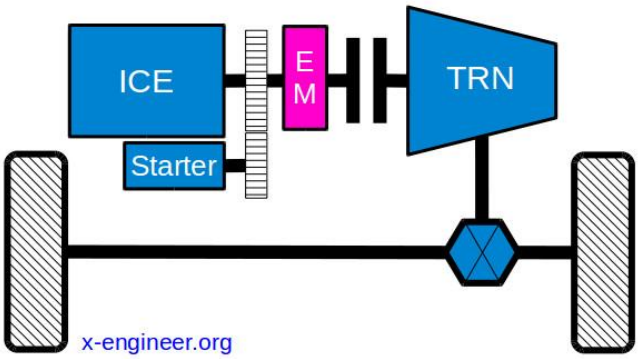


Figura 18: Struttura P1

Uno dei maggiori vantaggi di questa soluzione è che il motore elettrico può fornire una coppia maggiore rispetto al BiSG, poiché non vi è alcuna limitazione della cinghia (ad esempio un possibile slittamento). Tuttavia, poiché non esiste un rapporto velocità / coppia tra la macchina elettrica e l'albero motore, i requisiti di coppia del motore elettrico possono essere piuttosto impegnativi.

Figura 19: Integrated Motor Assist (IMA) for mild hybrid

Hybrid modes (functions)	Idle Stop & Start Moving Stop & Start Engine load shift Torque assist (fill) Torque boost Sailing / Coasting Energy recuperation Brake regeneration
Advantages	Maggiore efficienza Lo starter da 12V può essere rimosso
Disadvantages	Coppia in uscita limitata dalle dimensioni della macchina elettrica Recupero di energia influenzato dalle perdite per attrito del motore Alto impatto sull'architettura esistente del veicolo Maggiore costo complessivo dei componenti elettrici Il raffreddamento ad aria non è possibile per la macchina elettrica
Overall characteristics	Capacità di incremento della coppia: alta Recupero di energia elettrica: medio Miglioramenti della guidabilità: medio Creep / Drive elettrico: possibile Confezione: integrazione di componenti difficili Efficienza del sistema: elevata (nessuna perdita di ingranaggi o perdite di cinghia)

Tabella 9: P1:Fuel Efficiency, Hybrid modes, Advantages, Disandavantages, Overall characteristics

Driveline side electric machine: P2, P3, P4

Entrambe le configurazioni, P0 e P1, presentano le macchine elettriche sul lato motore, senza possibilità di disconnessione meccanica. Ciò rende l'incremento di coppia e il recupero dell'energia non molto efficienti a causa delle perdite ad esse associati. Inoltre, il fattore che incide notevolmente per questa tipologia è il non poter recuperare energia elettrica quando il motore risulta essere spento, durante la marcia per inerzia.

Mentre per le architetture P2, P3 e P4 risultano migliori in termini di efficienza del flusso di energia, principalmente per il posizionamento della macchina elettrica. In questi tipi di configurazioni, la macchina elettrica viene posizionata dopo il dispositivo di collegamento della trasmissione, sull'albero di ingresso della trasmissione (P2), sull'albero di uscita della trasmissione (P3) o sul differenziale posteriore (P4).

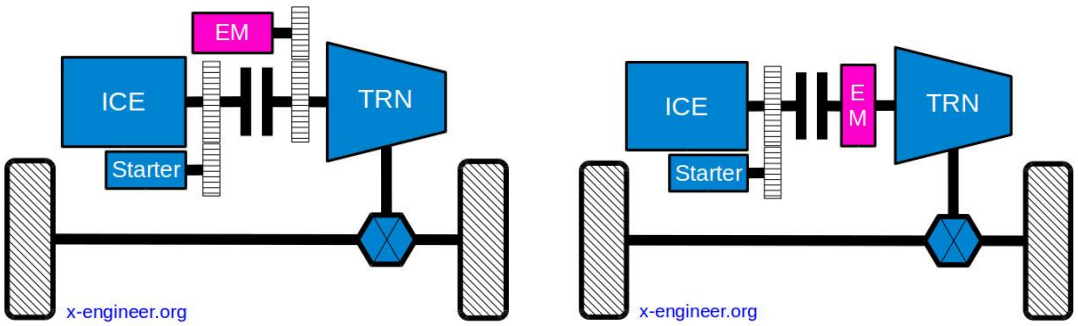


Figura 20: sx: P2 architecture – side EM / dx: P2 architecture – integrated EM

In una configurazione P2, la macchina elettrica può essere collegata nei seguenti modi:

- collegata lateralmente alla trasmissione
- collegata tramite una cinghia
- integrata nella trasmissione
- collegata tramite una rete di ingranaggi

Il vantaggio principale dell'architettura P2 è l'aumento del recupero di energia e la disponibilità di ulteriori funzioni di controllo (scorrimento / azionamento elettrico o recupero di energia durante la frenata). Mentre, lo svantaggio principale è il costo di integrazione più elevato di un tale sistema.

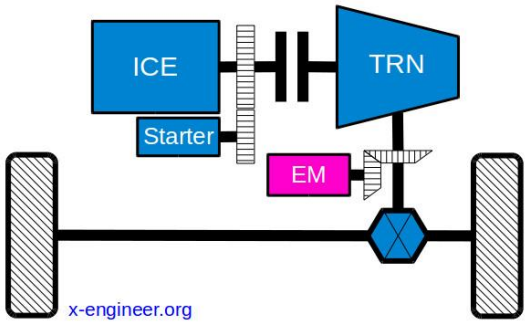


Figura 21: P3 o P4 architettura

Nell'architettura P3 il motore elettrico è fissato sulla trasmissione, dell'albero di uscita. Nell'architettura P4, invece, il motore elettrico è montato sulla trasmissione dell'assale posteriore o sui mozzi delle ruote.

Il vantaggio principale della topologia P3 o P4 è dovuto al massimo potenziale di recupero di energia in fase di frenata.

Rispetto alle configurazioni P0, P1 e P2, le perdite del motore e della trasmissione, quando la trasmissione è scollegata, non vengono prese in considerazione durante la rigenerazione di energia. Le architetture P3 e P4 generano potenza per la modalità di guida elettrica se dotata di una macchina elettrica con un'elevata coppia. L'architettura P4, invece, offre al veicolo la capacità di guidare a quattro ruote motrici, con l'asse anteriore alimentato da un motore a combustione interna e l'asse posteriore alimentato da un motore elettrico. A causa del fatto che la macchina elettrica si trova sul lato trasmissione, per qualsiasi architettura P2, P3 o P4, per eseguire l'arresto e l'avvio del motore, è necessario installare un'altra macchina elettrica sul lato motore. Questa funzione può essere ottenuta con un avviatore standard rinforzato (12 V) o un generatore di avviamento integrato nella cinghia (12 V o 48 V). (x-engineer, s.d.)

Fuel Efficiency	**New European Driving Cycle (NEDC):** 19 … 22 % **Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP):** 14 … 16 %
Hybrid modes (functions)	Idle Stop & Start (if additional electric machine on engine side) Moving Stop & Start (if additional electric machine on engine side) Engine load shift (through the road) Torque assist (fill) Torque boost Sailing / Coasting Energy recuperation Brake regeneration Electrical driving (creep)
Advantages	Massima efficienza Guida elettrica (creep) Modalità a quattro / quattro ruote motrici (architettura P4)
Disadvantages	Richiede una macchina elettrica aggiuntiva per Stop & Start del motore Alto impatto sull'architettura esistente del veicolo Maggiore costo complessivo dei componenti elettrici Il raffreddamento ad aria non è possibile per la macchina elettrica
Overall characteristics	Capacità di incremento della coppia: alta Recupero di energia elettrica: alto Miglioramenti della guidabilità: medio Creep / Drive elettrico: possibile Confezione: integrazione di componenti difficili Efficienza del sistema: elevata

Tabella 10: P2, P3, P4:Fuel Efficiency, Hybrid modes, Advantages, Disandavantages, Overall characteristics

Capitolo 5: Calcolo delle informazioni mancanti dai dati motore forniti

Le curve che caratterizzano il comportamento di un motore sono quelle che esprimono la coppia motrice e la potenza effettiva in funzione del regime di rotazione. Occorre però tenere presente che le condizioni di funzionamento non sono definibili con un solo parametro operativo. Ad un dato regime di rotazione, infatti, un motore può sviluppare una potenza variabile agendo sull'organo della regolazione. In condizioni di funzionamento stazionario i parametri che definiscono il modo di operare di un motore sono quindi necessariamente due. Generalmente si utilizzano:

- Il regime di rotazione dell'albero motore
- Il carico imposto dall'utilizzatore

Nel formulare le curve caratteristiche, quindi, occorre indicare anche le condizioni di carico cui si riferiscono. Generalmente se sono quelle di massimo carico (o piena ammissione), perché in tale caso le curve forniscono le effettive prestazioni limite che il motore può assicurare. (Ferrari, 2016)

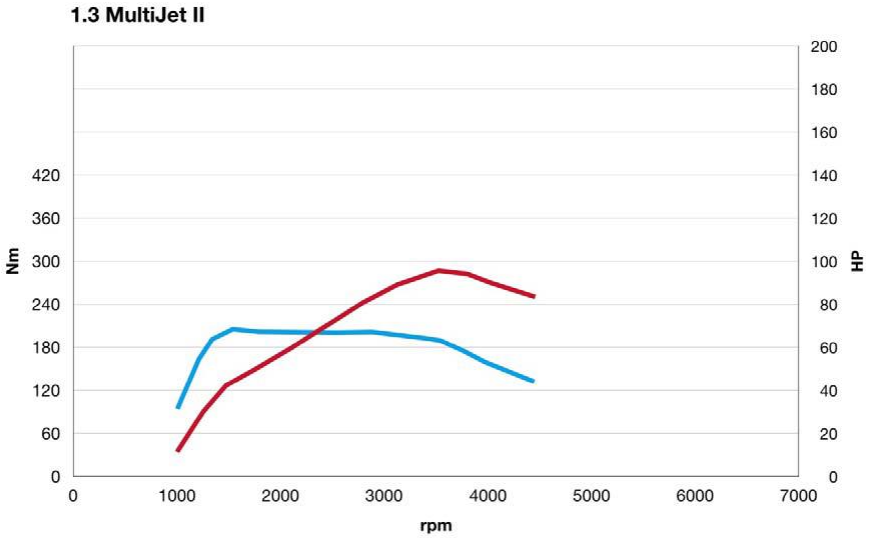


Figura 22: Curve di coppia e potenza di un motore 1.3 Diesel

Nella figura vengono mostrate, un esempio, di curve di coppia e potenza definite di "full load", per un motore a ciclo otto per autovettura passenger. La curva azzurra (Coppia) presenta un massimo per un regime di rotazione relativamente basso, rispetto al campo di impiego del motore. Questo perché la coppia sia in corrispondenza del regime ottimale con un valore elevato, ai fini dell'impedimento del cilindro e successivamente diminuisce al crescere del numero dei giri. Questo avviene perché decrescono sia il rendimento globale che il coefficiente di riempimento. Per regimi inferiori a quelle di massimo, invece, la coppia cresce con il numero di giri perché migliora il coefficiente di riempimento.

I motori termici per il caso studio prevedono tre diverse taglie:

- 1300 cm^3
- 1600 cm^3
- 2000 cm^3

Di seguito vengono rappresentate le curve di full load dei rispettivi motori, implementati all'interno del software Amesim Simcenter:

Le curve di potenza e coppia in funzione del numero di giri del motore, per il motore 1300 cm^3 sono:

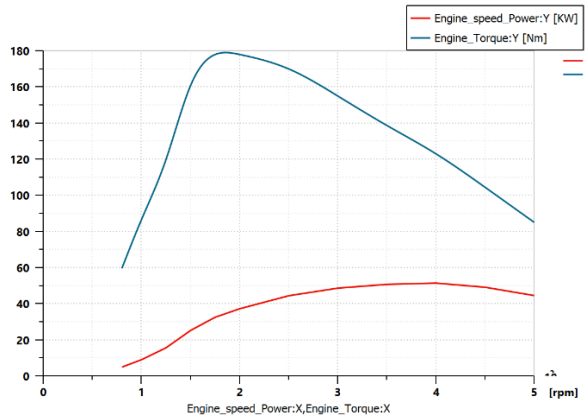


Figura 23: Curva di coppia e potenza del motore 1300 cm^3

per il motore 1600 cm^3 sono:

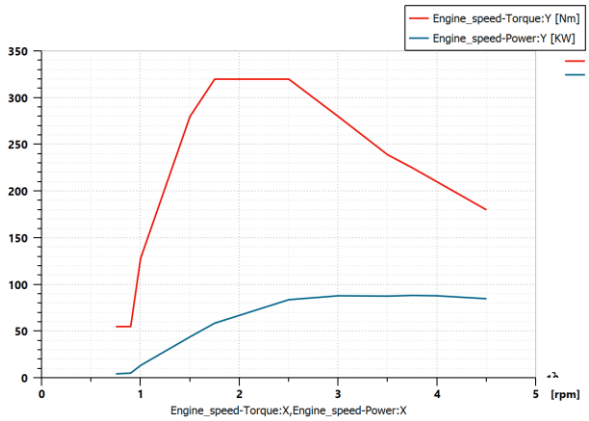


Figura 24: Curve di coppia e potenza del motore 1600 cm^3

per il motore 2000 cm^3 sono:

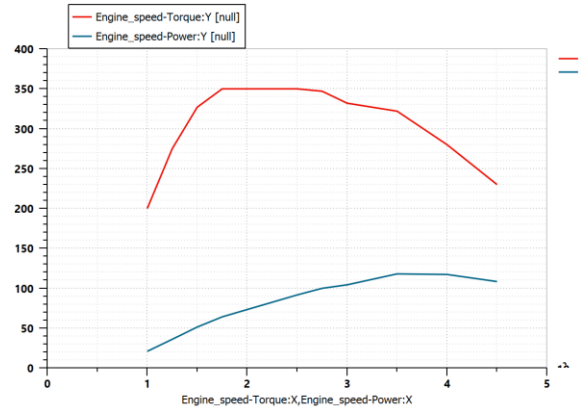


Figura 25: Curve di coppia e potenza del motore 2000 cm^3

Accoppiamento motore

L'andamento delle curve caratteristiche di un motore risulta particolarmente importante per lo studio del suo accoppiamento all'utilizzatore. Si possono presentare modi molto vari, perché molteplici sono le applicazioni dei motori a combustione interna, come generatori di potenza meccanica, tuttavia si possono considerare tre situazioni tipiche:

- La macchina trascinata richiede una velocità di rotazione costante, con una coppia variabile dal minimo al massimo valore, in funzione del carico applicato
- Il motore deve fornire una coppia crescente con il quadrato del regime di rotazione, perché con tale legge aumenta la resistenza incontrata dall'utilizzatore
- Vengono richiesti valori variabili di velocità di rotazione e di coppia motrice, insieme alla prontezza di risposta nel passaggio da una condizione all'altra e dalla stabilità di funzionamento a regime

Sui motori destinati alla trazione grava il maggior numero di esigenze, dovendo fornire prestazioni brillanti su di un ampio campo di regimi di rotazione dei carichi con accettabili consumi specifici di combustibile e qualità dei gas scaricati.

In particolare, per sfruttare al meglio la potenza installata, sarebbe auspicabile che tali motori rendessero disponibili alle ruote una potenza utile costante, al variare della velocità del veicolo. In tale caso ottimale la forza motrice disponibile alle ruote aumenterebbe con legge iperbolica al diminuire della velocità, trovando nella zona delle piccole velocità il suo limite superiore nel valore imposto dal problema dell'aderenza delle ruote motrici al terreno. La resistenza incontrata R dal veicolo è una funzione crescente della velocità, normalmente espressa come somma di due addendi. La relazione in merito sarebbe la seguente:

$$R = R_0 + R_2 \cdot v^2$$

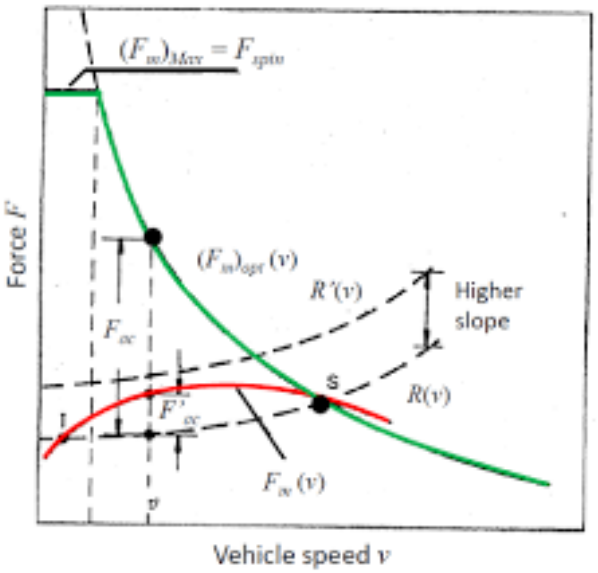


Figura 26: Rappresentazione della Forza motrice disponibile alle ruote e la forza resistente, in funzione della velocità v

L'esempio riportato in figura rappresenta una strada con due differenti pendenze e sono rappresentate dalle curve nere tratteggiate. Il punto S individuato nel grafico, la condizione di funzionamento a regime. Si può allora notare che la curva motrice ottimale fornita presenta due importanti proprietà:

- Risultano stabili tutti i punti di funzionamento a regime del possibile campo di impiego del veicolo. Se adesso deve affrontare un aumento della resistenza, il motore è sempre in grado di fornire una forza motrice $F_m > R$, fino al limite dell'aderenza, Pur di ridurre opportunamente la velocità.
- nei transitori mette a disposizione tutta la potenza installata, per raggiungere con prontezza la condizione di regime, garantendo così la massima forza accelerante in ogni istante

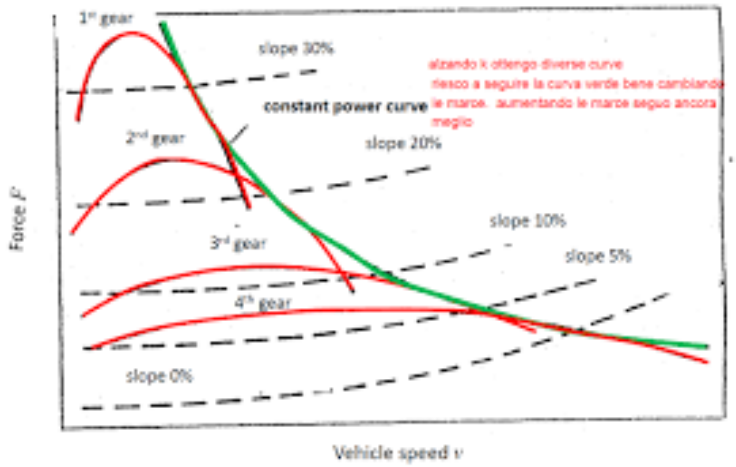


Figura 27: Utilizzo di un cambio discontinuo a quattro marce per permettere di avvicinare la curva del motore a quella ottimale

Si deduce quindi che la trasmissione del moto tra un motore a combustione interna e le ruote, non può ridursi ad un rapporto meccanico fisso, ma deve costituire un gruppo capace di cambiare la forma delle curve, rendendola adatta alle esigenze della trazione, e di permettere al motore di avviarsi in assenza del carico. (Ferrari, 2016)

I valori utilizzati per i modelli creati su Amesim sono quelli forniti dai costruttori e vengono riportati nella tabella che segue:

	τ						
Engine [cm³]	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6	τ_{final}
1300	4,273	2,238	1,444	1,029	0,767	-	2,4
1600	4,154	2,269	1,435	0,978	0,754	0,622	3,579
2000	3,917	2,04	1,435	0,954	0,755	0,623	2,4

Tabella 11: Valori di fabbrica della trasmissione

Consumi specifici e mappe motore

Per poter identificare il consumo specifico in funzione di altri parametri, è possibile farlo attraverso un diagramma bidimensionale ed è possibile riportare sugli assi due grandezze e tutti i possibili punti di lavoro del motore che cadono in un'area delimitata della curva della *pme* a pieno carico. Dall'asse delle ascisse e dalle due verticali che indicano il numero di giri minimo e massimo. Le mappe vengono spesso

usate per riportare i valori di diversi parametri caratteristici del motore, in funzione dello specifico punto di lavoro.

In particolare, il consumo specifico viene di solito precisato attraverso linee iso-consumo tracciate sulla mappa del motore. Un esempio di mappa con le caratteristiche appena elencate è la seguente:

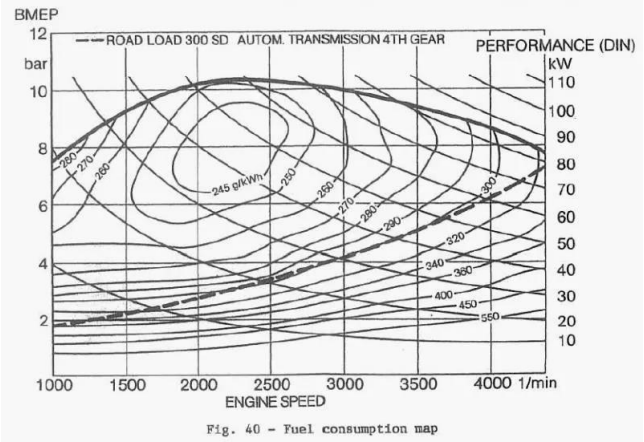


Figura 28:Mappa motore; consumi specifici di combustibile in funzione del carico

All'interno della Figura, possiamo notare una zona di minimo consumo in corrispondenza di carichi elevati e regimi che si aggirano alla coppia massima raggiungibile dal motore. Nella parte bassa i consumi iniziano ad aumentare, quando c'è la presenza della diminuzione del carico. Per quanto i motori diesel nella zona di minimo consumo, caratterizzato da valori di rapporti di espansione che permettono di espandere maggiormente i gas combusti, convertendo così in lavoro meccanico una frazione maggiore della loro energia interna." (Ferrari, 2016)

Le mappe motore implementate all'interno del software vengono riportate di seguito:

- 1300 cm^3:

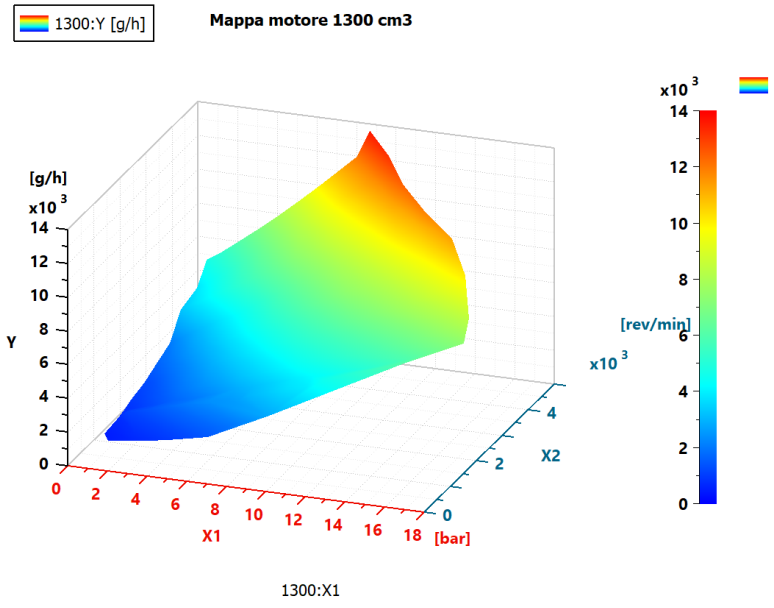


Figura 29: Mappa motore 1300 cm^3

- 1600 cm^3:

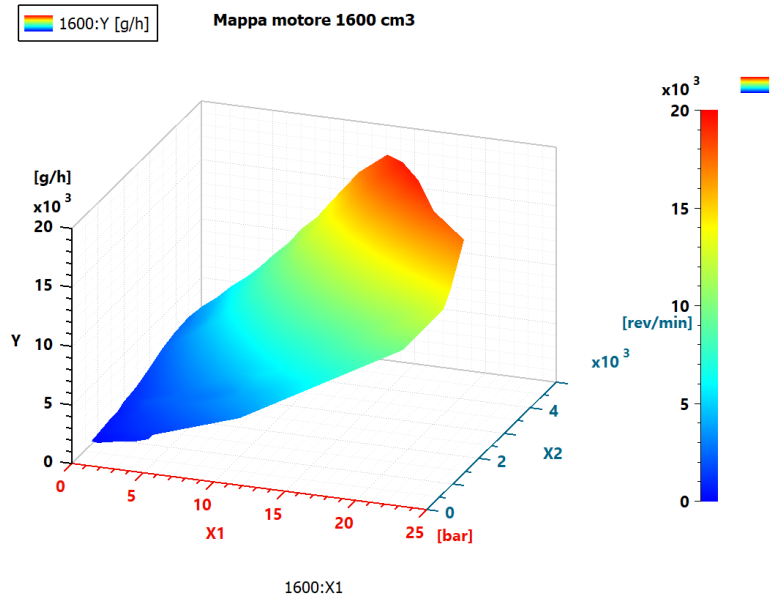


Figura 30: Mappa motore 1600 cm^3

- 2000 cm^3:

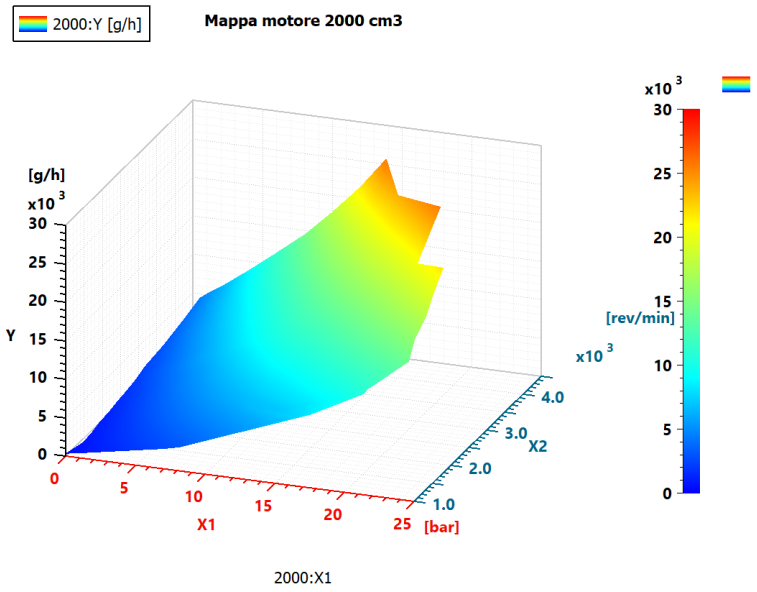


Figura 31: Mappa motore 2000 cm^3

Metodo Willans line per motori a combustione interna

Non avendo a disposizione per ogni taglia di motore a combustione interna, valori che quantificassero le perdite al loro interno, si è stabilito di assumere come riferimento per estrapolare questo tipo di informazioni il metodo Willans Line.

La tecnica di modellazione della Willans Line è stata inizialmente applicata per descrivere la relazione, approssimativamente lineare, che collega la pressione media effettiva al consumo di carburante del freno e del motore. Inoltre, questo approccio è adatto per la valutazione immediata e approssimativa di nuove configurazioni di progettazione e nuove soluzioni ingegneristiche per quelle classi di macchine prototipo o, in generale, per quelle macchine per le quali non vi sono dati sufficienti sull'efficienza.

Il fattore chiave di questo tipo di rappresentazione è che per una velocità fissa esiste una relazione tra le variabili di output e di input. Tale metodo suggerisce una stretta correlazione tra l'energia disponibile totale (l'energia chimica del carburante) e l'energia effettivamente utilizzata (l'energia disponibile all'albero a gomiti).

La rappresentazione risultante è descritta da due fattori: la pendenza, o efficienza di conversione di energia intrinseca 'e', e l'asse verticale intercetta 'P_{loss}', che rappresenta le perdite dovute alla frizione di perdite meccaniche, alternatore, ausiliari ecc., così come descritto in Figura:

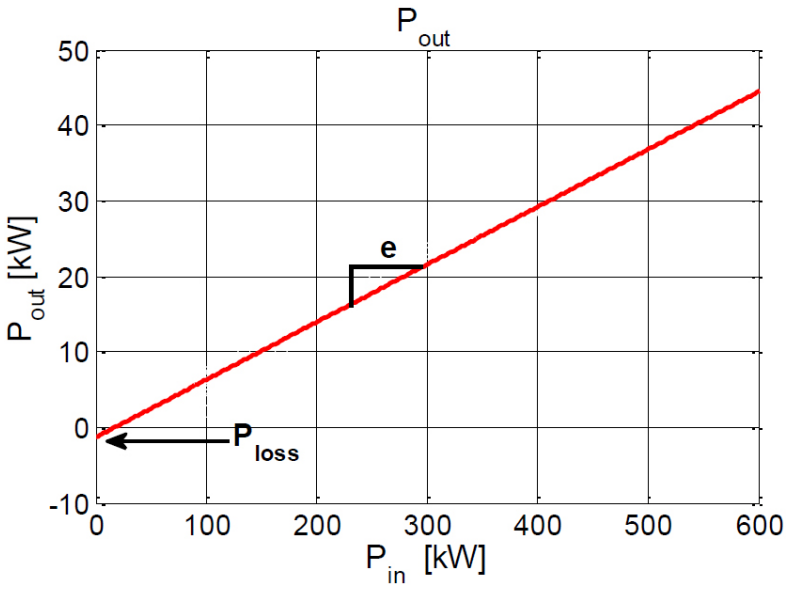


Figura 32: esempio dell'approccio del metodo Willans Line

L'efficienza di conversione energetica e la relazione tra potenze di input e output sono quindi espresse dalla seguente equazione:

$$P_{out} = e * P_{in} - P_{loss}$$

dove "e" è stato considerato ottenuto come il prodotto di efficienze termodinamiche (η_t) e di combustione (η_b). Ciò significa che "e" rappresenta già le perdite dovute al lavoro di pompaggio. Oppure esprimere il tutto in termini di coppia, prendendo semplici sostituzioni:

$$T_e = e * H_{LHV} * \frac{\dot{m}}{\omega} - T_{loss} = e * T_a - T_{loss}$$

con

- "T_a" si considera la coppia disponibile,
- "H_{LHV}" come potere calorifico inferiore del carburante
- "T_{loss}" coppia di perdita a causa di fenomeni di attrito

Per ottenere relazioni scalabili, si introducono i concetti di BMEP (può anche essere vista come la capacità del motore di svolgere il lavoro meccanico), AMEP (energia fornita dall'alimentazione del carburante) e la velocità media del pistone "v_{pist}", corrispondente rispettivamente alla coppia di uscita, alla coppia disponibile e alla velocità del motore. Per un motore a quattro tempi, così come nel caso studio si ottiene:

$$\begin{cases} BMEP = T_e * \left(\frac{4\pi}{V_d}\right) \\ AMEP = H_{LHV} * \left(\frac{4\pi}{V_d}\right) * \frac{\dot{m}}{\omega} \\ v_{pist} = \left(\frac{s}{\pi}\right) * \omega \end{cases}$$

dove "V_d" è la cilindrata, "$\dot{m}$" è la portata massica del carburante, "ω" è la velocità angolare del motore e "s" è la corsa del pistone. L'efficienza del motore può quindi essere definita come segue:

$$\eta_{ICE} = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) = \frac{\omega * T_e}{\dot{m} * H_{LHV}}$$

Sostituendo ottengo la seguente relazione:

$$BMEP = e * AMEP - p_{loss} \rightarrow \eta_{ICE} = \left(\frac{BMEP}{AMEP}\right)$$

dove "P_{loss}" è la pressione media effettiva persa ed è definita in modo simile a BMEP e AMEP. I parametri "e" e "p_{loss}" sono funzioni del carico e della velocità media del pistone (Marco Sorrentino, 09/06/2015).

Capitolo 6: Creazione dei modelli Amesim

Il caso studio prevede la modellazione di un veicolo ibrido per poter studiarne le possibili combinazioni tra motori termici ed elettrici che danno un valore importante nel guadagno delle emissioni. Attraverso Amesim è possibile poter affrontare la modellazione della vettura attraverso due modalità:

- Inserendo componente per componente i vari tasselli che compongono la vettura
- Utilizzando un toll apposito per la realizzazione di questi tipi di modelli e successivamente modificarli secondo le esigenze del caso studio

Per la realizzazione del modello si è proseguito attraverso l'utilizzo del tool denominato "HOT", essendo di massima praticità, velocità e intuizione dei comandi che lo compongono.

Lo **Hybrid Optimization Tool** è un'interfaccia interattiva dedicata per ottenere il potenziale energetico di un'architettura del veicolo in un determinato ciclo e altri parametri di ottimo. Infine, oltre a fornire una serie di informazioni in merito alla vettura è possibile creare lo sketch corrispondente all'architettura che si vuole studiare.

Lo strumento può essere avviato da un'icona specifica che si trova nella sezione sketch, all'interno della libreria di Amesim. La figura che lo contraddistingue è la seguente:

Figura 33: HOT: Hybrid Optimization Tool

Questa icona dovrebbe essere posizionata su un nuovo sketch e successivamente posizionarsi in modalità parametri, e avviare lo strumento associato (collegamento blu).

Lo strumento HOT è composto da diversi passaggi, di seguito elencati:

- Passaggio 1: definizione dell'architettura
- Passaggio 2: parametri dell'architettura
- Passaggio 3: definizione della strategia
- Passaggio 4: definizione del test case
- Passaggio 5: calcolo
- Passaggio 6: post elaborazione

Lo strumento può ottenere:

- Il calcolo del consumo di carburante ottimizzato
- Il calcolo della selezione delle marce ottimizzata
- Creazione di uno sketch basato sull'architettura selezionata
- Eseguire un test delle prestazioni in base all'architettura selezionata

Definizione dell'architettura

In questa sezione, verrà definita l'architettura del veicolo:

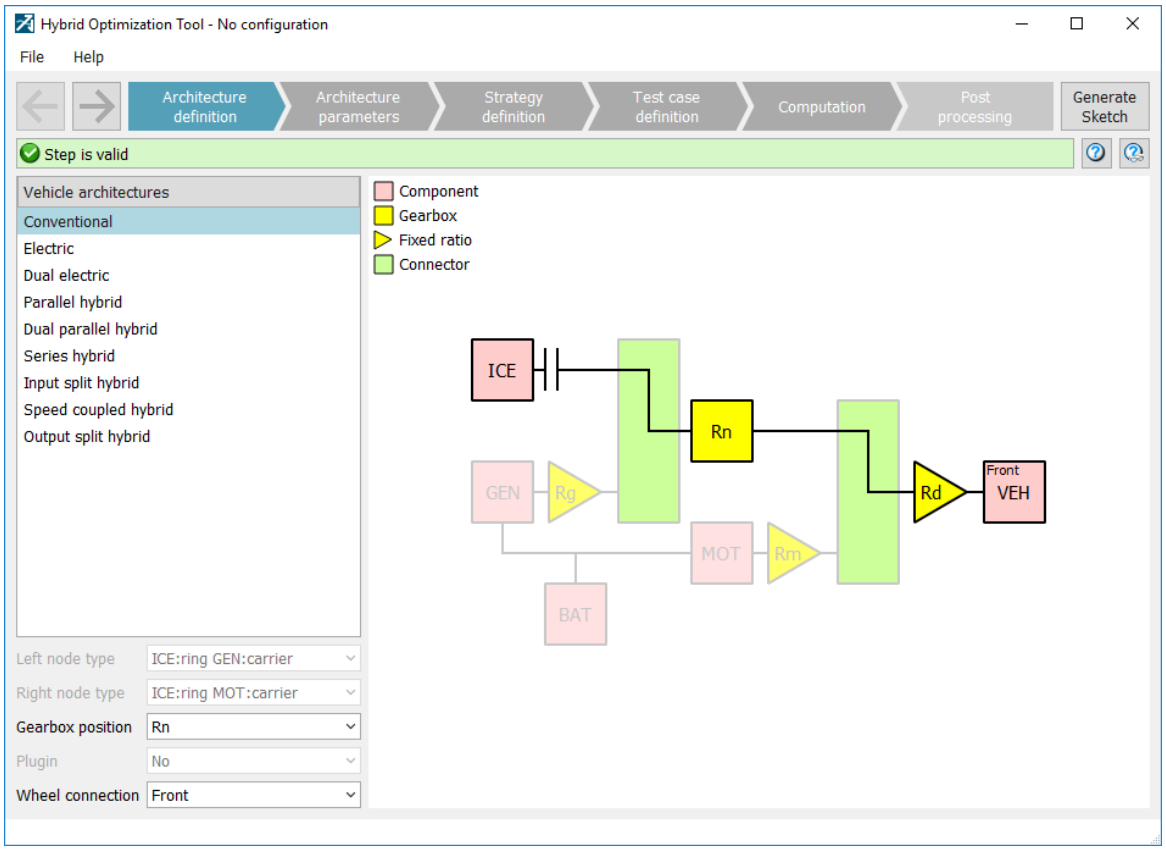


Figura 34: Definizione dell'architettura da utilizzare

La lista presente a sinistra rappresenta le architetture del veicolo che andiamo a scegliere. Sulla destra, invece, i riquadri rosa rappresentano i componenti, mentre quelli gialli sono gli organi di trasmissione del moto:

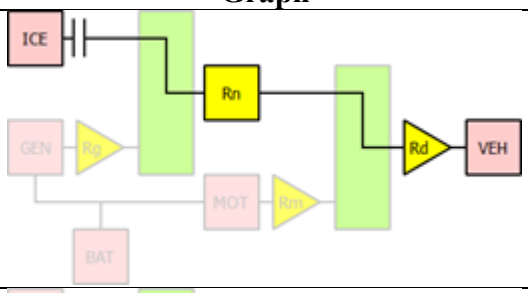
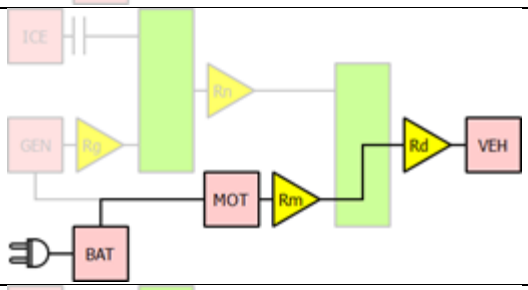
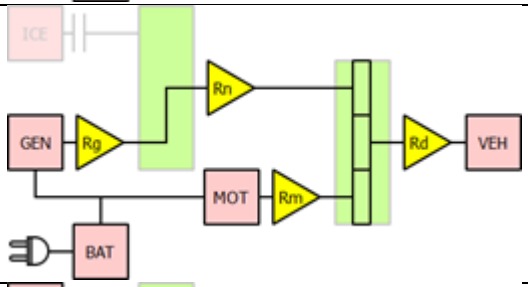
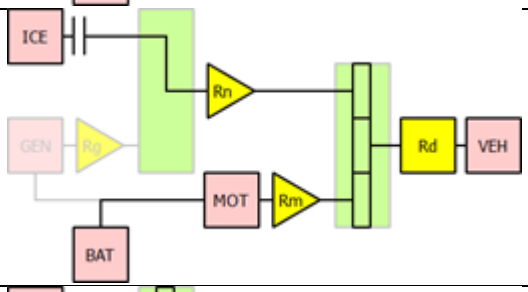
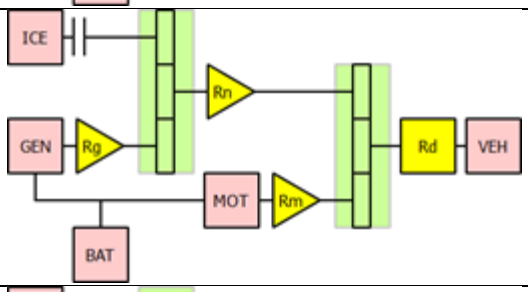
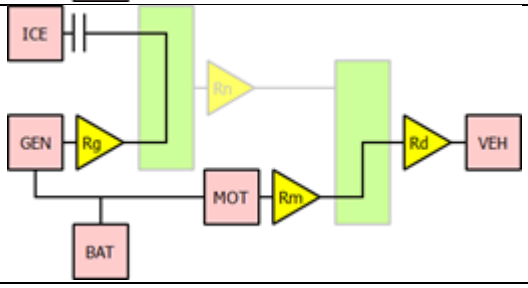
- ICE: motore a combustione interna
- GEN: generatore elettrico
- BAT: batteria
- MOT: motore elettrico
- VEH: veicolo

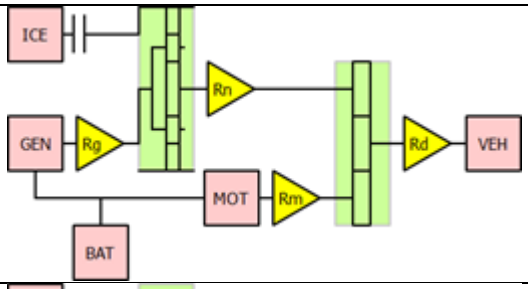
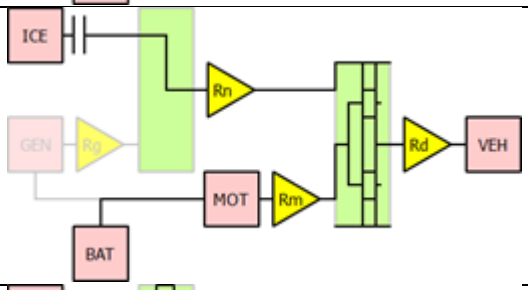
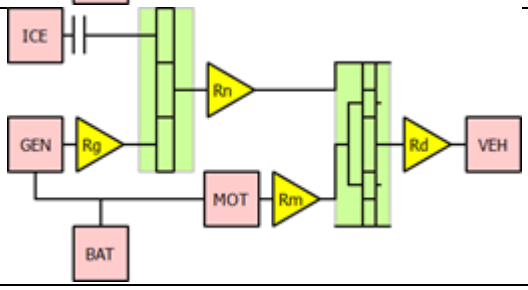
Precisamente i triangoli gialli rappresentano i rapporti fissi e il nome di questi rapporti (Rd, Rn ...) gli differenzia dai componenti che compongono il modello. Il riquadro giallo, invece, rappresenta il cambio, che può anche generare CVT fino ad un massimo di 20 marce. Infine, il rettangolo verde rappresenta come sono collegati i componenti tra loro; identifichiamo quindi i vari collegamenti:

- Connessione diretta
- Ingranaggio semplice
- Treno epicicloidale

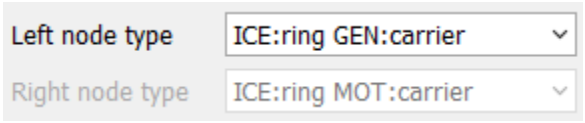
Di seguito sono elencate tutte le architetture implementare all'interno del software Amesim:

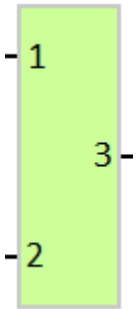
Tabella 12: Architetture di ibrido implementabili su Amesim attraverso il tool HOT

Architecture	Graph
Conventional	
Electric	
Dual electric	
Parallel hybrid	
Dual parallel hybrid	
Series hybrid	

Input split hybrid	
Speed coupled hybrid	
Output split hybrid	

Quando viene utilizzata una trasmissione epicicloidale, le connessioni possono essere selezionate utilizzando le caselle combinate, attraverso la seguente interfaccia:





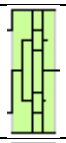
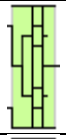
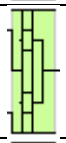
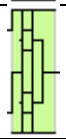
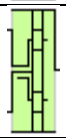
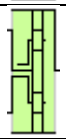
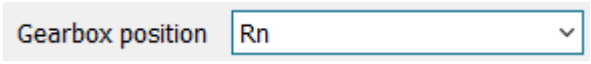
Text	Connections	Picture
rcs	1: ring 2: carrier 3: sun	
Crs	1: carrier 2: ring 3: sun	
Src	1: sun 2: ring 3: carrier	
Rsc	1: ring 2: sun 3: carrier	
Csr	1: carrier 2: sun 3: ring	
scr	1: sun 2: carrier 3: ring	

Tabella 13: CVT connections

Quando da parte dell'utente è richiesto un cambio o un CVT, con rapporto fisso (triangolo giallo) viene convertita direttamente la Gearbox position, andando a segnalare la posizione che si vuole inserire.



Quando è necessaria una batteria aggiuntiva per l'architettura, che non sia quella comune per alimentare l'architettura convenzionale, allora sarà disponibile l'opzione plug-in.

ATTENZIONE: in questa prima versione del modello, il test di convergenza potrebbe non essere adattato a tutte le configurazioni di plug-in. Perciò risulta opportuno controllare il risultato dell'evoluzione del SOC. Andando quindi ad osservare che se il SOC_{target} viene raggiunto come allo stato iniziale del ciclo, il risultato potrebbe non essere ottimale.

Questo può capitare soprattutto se il SOC_{minimo} della batteria e il SOC_{finale_target} sono molto vicini tra loro come valori. Si consiglia quindi di ri-eseguire l'ottimizzazione utilizzando valori di minimo e massimo più elevati.

Architecture Parameter

All'interno di questa interfaccia è necessario compilare tutti i parametri dei componenti, affinché avvenga il cambio di colore dei riquadri che testimonia l'inserimento di tutti i parametri, da color arancio a colore verde. Inoltre, nel caso ci fosse un errore nell'inserimento dei dati o di un file, il riquadro assume il colore rosso.

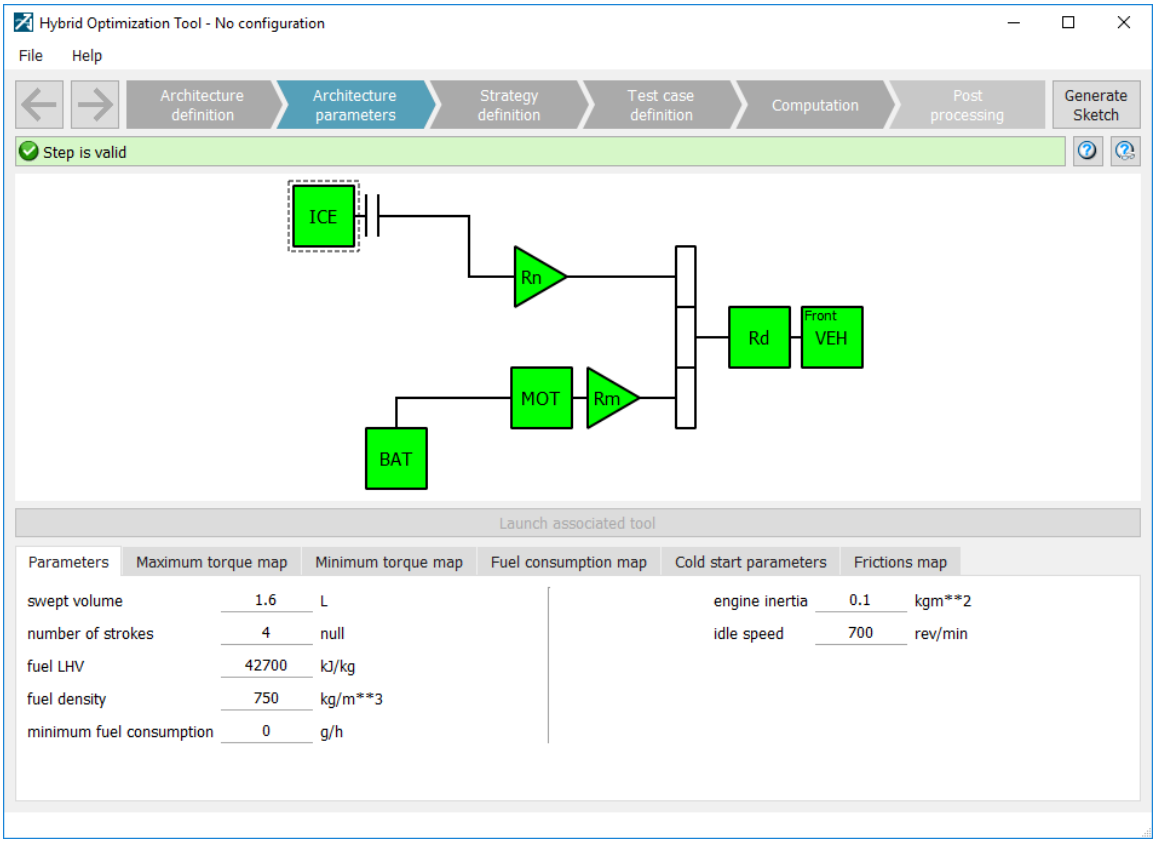


Figura 35: Parametri da inserire nel modello

I parametri da inserire possono essere di due forme:

- Scalari
- mappe di funzionamento

Per poter creare delle tabelle o delle mappe, bisogna utilizzare il mini tool denominato "Table" implementato all'interno del programma Amesim. Se si verificasse un errore, nella tabella dei valori viene visualizzato un messaggio di colore rosso che ne indica la motivazione. Analizzando tutti i parametri immessi possiamo notare:

Engine Parameter

All'interno di quest'area, bisogna fare particolare attenzione ai seguenti fattori per il consumo:

- Il fattore "a"
- Il fattore "b"

Questi due fattori vengono utilizzati per la correzione del consumo di carburante in funzione della temperatura dell'acqua del motore.

Il coefficiente corretto $Conso_{cor}$ è calcolato come segue:

$$Conso_{cor} = a * T_{water} + b$$

Dove:

- T_{water}: temperatura del liquido di raffreddamento dell'acqua del motore

Questo coefficiente viene quindi moltiplicato per il consumo di carburante letto nella mappa del motore per ottenere il consumo di carburante finale.

Electric Motor (GEN & MOT) parameters

Per i calcoli HOT viene utilizzata principalmente la coppia di picco del motore elettrico, ad eccezione di questi casi:

- Architetture split in serie e di input, dove, la coppia di picco viene utilizzata per il motore e la coppia continua per il generatore.
- Per le architetture split e speed coupled, dove, per entrambe le macchine viene utilizzata la coppia continua.

Se non si vorrebbero eseguire tali impostazioni, c'è sempre la possibilità di impostare le coppie di picco delle macchine elettriche con valori di coppia continui o viceversa. Inoltre, è possibile caricare un file.hot da una precedente versione HOT, cosicché le coppie continue e di picco assumeranno i valori memorizzati all'interno del medesimo file.

Avvertenza: in caso di configurazione in serie ibrida, la coppia ottimale del motore viene confrontata con la coppia del generatore. Può apparire a video il seguente messaggio di errore:

"*La coppia del punto di azionamento del motore è maggiore della coppia massima del generatore.*"

A causa della differenza di convenzione, il modo per poter risolvere questo problema è ridurre la coppia minima (in effetti la coppia ottimale del motore viene confrontata con l'opposto della coppia minima del generatore).

Battery (BAT)

In questa sezione, bisogna impostare 4 parametri (limiti: di potenza e tensione) che risultano molto importanti per i calcoli delle prestazioni, inoltre, sono anche usati per la strategia di ottimizzazione.

Pertanto, questi parametri possono modificare i risultati del consumo di carburante precedentemente ottenuti. Per poter inserire questi valori dobbiamo far riferimento a quanto riportato di seguito:

- Potenza massima di scarica [W] (valore positivo): il doppio della massima potenza meccanica positiva (coppia positiva) della macchina elettrica più potente
- Potenza di carica massima [W] (valore positivo): il doppio della massima potenza negativa meccanica (coppia negativa) della macchina elettrica più potente
- Tensione minima [V]: OCV minimo * Numero di celle in serie * 0,5
- Tensione massima [V]: OCV massimo * Numero di celle in serie * 1.5

Se invece c'è bisogno di avere dei valori più realistici, è possibile avviare lo strumento TULIPS disponibile nel componente batteria tra i parametri. Bisogna fare attenzione se si vuole implementare un

modello di batteria che non è compresa nel datasheet di Amesim, perché necessita di validazione. Al contrario, quelli già presenti sono stati già validati.

Vehicle (VEH)

All'interno di questa sezione bisogna inserire i valori riferiti alle prove di cost down, peso, dimensioni delle ruote, inerzie etc, del veicolo.

Gearbox (Rx)

All'interno di questa sezione è possibile inserire:

- Il numero di marce

e per ogni marcia è possibile configurare i seguenti parametri:

- Rapporto: velocità di rotazione a monte / velocità di rotazione a valle
- Efficienza
- Rapporto finale al ponte

Da un punto di vista dell'ottimizzazione, un CVT equivale a un cambio con un numero infinito di rapporti di trasmissione. Pertanto, è equivalente a un cambio con un gran numero di rapporti: il numero massimo del rapporto di trasmissione è 20.

Bisogna fare attenzione, se da un rapporto di trasmissione, il controllo può usare tutti gli altri rapporti (definiti nella matrice in basso a sinistra), il tempo di calcolo è quindi quasi proporzionale al numero di rapporti.

- Treno planetario
- Rapporto numero denti solari / numero denti anulari

Strategy definition

In questa fase è necessario definire la strategia descritta dalla drivability e delle modalità di cambio marcia:

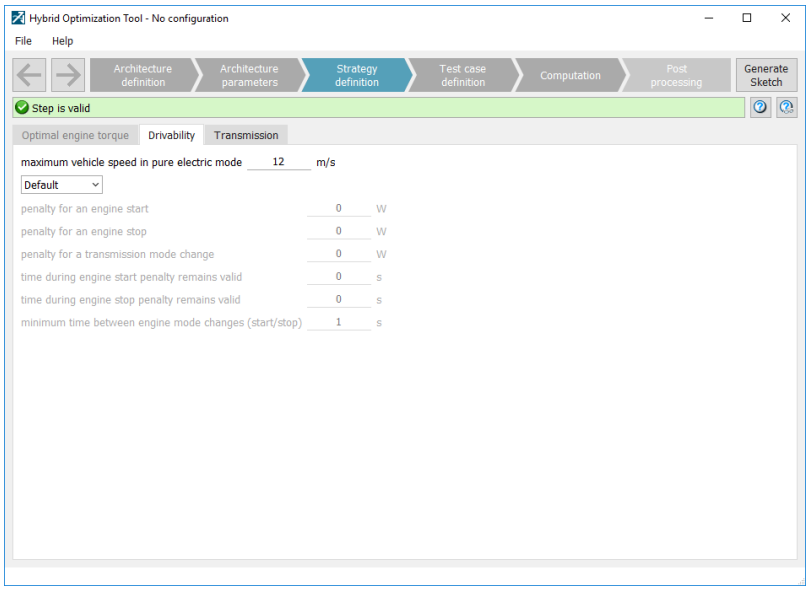


Figura 36: Step per la definizione della strategia

In questa fase sono disponibili varie schede, che possono essere implementate, come:

- *Coppia motrice ottimale [Nm]*: questa scheda è disponibile solo per architetture specifiche (ibrido parallelo doppio, serie, power split, speed coupled). Dalla minima alla massima potenza di uscita del motore termico, questa scheda definisce la coppia del motore definita in [giri/min] / coppia [Nm], dove il consumo specifico di carburante è il più basso per una determinata potenza. Questo è usato per ottimizzare il regime del motore, quando non è fisso.
  Per la configurazione serie, sarebbe doveroso prendere in considerazione l'efficienza del generatore elettrico, per poter definire i set point del motore termico. Per questo caso particolare, è la combinazione motore termico / generatore elettrico che deve essere ottimizzata.

- *Punti di interruzione*: in questa scheda possono essere richiesti 1 o 2 parametri, quali:
  - numero di punti di interruzione riferito alla coppia del motore: questo è il numero di coppie del motore (tra i valori minimo e massimo) che vengono automaticamente testati per l'ottimizzazione, in un'architettura in cui la coppia del motore risulta un grado di libertà. Questo numero deve essere modificato per casi particolari: ad esempio, in un'architettura ibrida parallela, se la coppia massima del motore è di molto superiore alla coppia minima del motore, la batteria potrebbe essere difficile da caricare.
  - numero di punti di interruzione per la coppia del motore: questo parametro viene utilizzato solo per la doppia architettura ibrida parallela, in cui la coppia del motore risulta un grado di libertà.

- *Guidabilità*: in questa scheda vengono richiesti i parametri chiave della strategia:
  - Limitare la velocità del veicolo per l'arresto del motore [m/s]: in una configurazione parallela ibrida, le modalità “elettriche pure” sono evitate al di sopra del limite imposto.
  - Motore acceso: la condizione tale per cui è possibile considerare il motore acceso è dato dai seguenti vincoli:
    - regime motore > 0 rpm
    - coppia motore > 0 Nm
- Alcuni parametri vengono automaticamente impostati sul valore predefinito ma possono comunque essere modificati se la casella è impostata su "Definito dall'utente". Al fine di evitare la commutazione della modalità con un’alta frequenza tra gruppi di controllo con un ben determinato livello di energia, con una configurazione molto diversa (come ad esempio rapporto di trasmissione diverso, carica/scarica della batteria, ICE on/off.), si può definire dei valori penalizzanti di potenza per limitare i cambiamenti di modalità. Va notato che questi parametri hanno solo un'influenza sulla strategia ma non hanno nessun effetto diretto sul consumo di carburante/energia.
  Infatti, consideriamo vari parametri da poter considerare:
  - Penalità per l'avviamento di un motore [W]: si tratta di una potenza aggiuntiva utilizzata per limitare l'avvio del motore. Questa penalità è operativa per un periodo di tempo limitato
  - Penalità per l'arresto del motore [W]: uguale alla precedente, per gli arresti del motore
  - Penalità per una modalità di cambio marcia per la trasmissione [W]: si tratta di una potenza aggiuntiva utilizzata per limitare la commutazione ad alta frequenza tra i comandi impostati.

- il tempo durante la penalità di partenza che rimane valido [s]
- il tempo durante la penalità di arresto che rimane valido [s]
- Isteresi per il confronto delle modalità Hamiltoniane in solo elettrico o ibrido: risulta una penalità aggiuntiva impostata in percentuale. Se fosse già in modalità elettrica, per scegliere la spesa energetica in modalità ibrida dovrà essere inferiore all'h in percentuale della spesa energetica più bassa in modalità elettrica. Tecnicamente, questo parametro deve essere compreso tra i valori 0 e 1. Ma ha un interesse fisico tra 0,8 e 1,0; inoltre, di default il suo valore è impostato su 1.

- Durata minima per la convalida di un cambio di modalità, del motore (avvio/arresto) [s]: questo è il tempo minimo tra il tempo di rilevamento del cambiamento di modalità (tra motore ON / OFF) e il momento in cui la modifica viene effettuata (se le condizioni rilevate fossero ancora valide). Se la fase del tempo impostata risulta essere molto piccola, lo si fa per evitare il cambio di modalità a causa di una particolare singolarità per un breve periodo (nelle condizioni in cui la modalità in corso può fornire la potenza richiesta). Questo parametro deve essere impostato maggiore di 0.
- Trasmissione: in questa scheda sono descritti gli stati della trasmissione. Se viene utilizzato un cambio, il numero di modalità di cambiate è uguale a: N° di cambiate + 1. Questa modalità aggiuntiva è la modalità neutra o anche denominata modalità elettrica pura nel caso di una configurazione ibrida parallela.
- Modalità solo elettrico: definisce la modalità di trasmissione scelta per la sola trazione elettrica. Ciò corrisponderà al numero di marce corrispondente alla modalità di trasmissione. Se impostato su "Modalità solo elettrica" questa risulta uguale a due, ciò significa che la sola modalità elettrica viene eseguita utilizzando il secondo rapporto di trasmissione.

Test case definition

In questa fase è possibile poter definire il tipo di test che si vuole analizzare per il veicolo (ciclo omologativi: WLTC, RDE, personal, etc.):

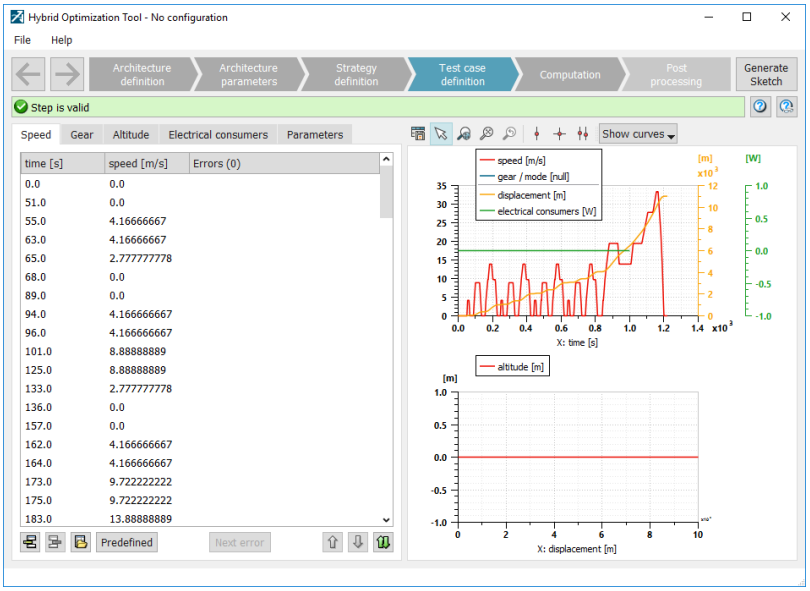


Figura 37: Case definition

Dopo aver scelto un caso è possibile definire:

- La velocità target in funzione del tempo, ed è possibile utilizzare alcuni cicli predefiniti (come NEDC, WLTC, 10-15 ...)
- Il tipo di cambio marcia, infatti, sono disponibili 2 opzioni:
  - funzione di rapporto fisso del tempo
  - libero: in questo caso, l'HOT è in grado di calcolare il miglior rapporto da utilizzare per ridurre al minimo il consumo di energia.

Figura 38: Impostazione del cambio marcia fisso oppure libero

Computation

In questo step avviene la fase do compilazione del modello, così come viene descritto nella figura seguente:

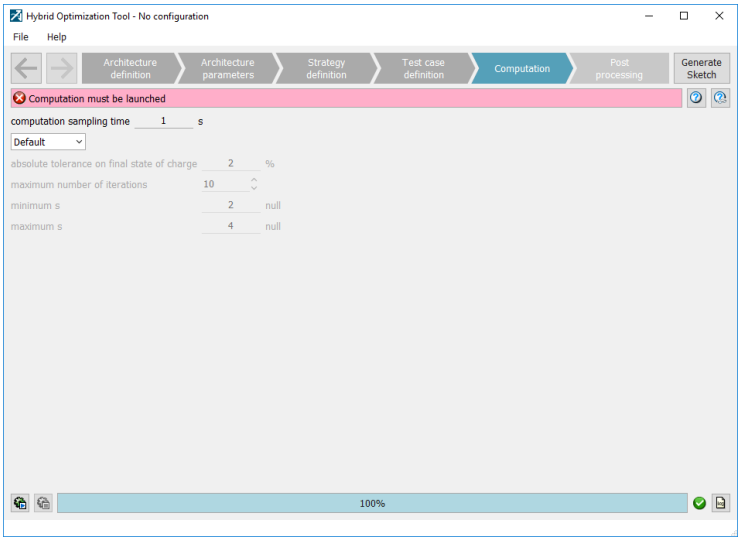


Figura 39:Sezione della computazione

Alcuni dei parametri da inserire sono:

- Tempo di campionamento per il calcolo [s]: viene effettuato con una fase temporale fissa.
- Alcuni parametri avanzati, possono essere impostati sul valore predefinito in maniera automatica, ma possono essere modificati se la casella combinata è impostata su "definito dall'utente"
    - Tolleranza assoluta sullo stato di carica finale: la strategia è ottimizzata durante il calcolo per raggiungere l'obiettivo del SOC. Il calcolo termina quando viene raggiunta la tolleranza SOC +/- la tolleranza impostata.
    - Numero massimo di iterazioni: questo è il numero di calcolo del ciclo, usando ogni volta una s diversa, per poter adattare il SOC_{finale} abbastanza vicino al SOC_{target}. Questo viene fatto quando la configurazione è dotata di un motore termico e un sistema elettrico. Per un veicolo convenzionale o un veicolo esclusivamente elettrico, si ottiene un solo calcolo del ciclo.
    - Minimo s: valore del fattore minimo s. Si consiglia di impostarlo su 0 per una configurazione plug-in e su 2 per una configurazione non plug-in.
    - Maximum s: valore del fattore massimo s. Si consiglia di impostarlo su 2 per una configurazione plug-in e su 4 per una configurazione non plug-in." (Amsim)

HOT

La teoria che presente per il tool denominato "HOT" si basa sulla teoria del controllo ottimale e in particolare sul metodo noto come Principio minimo di Pontryagin (PMP). Considerando che ogni architettura HEV presenta uno o più gradi di libertà per soddisfare il ciclo di guida prescritto.

Allora, considerando come esempio un veicolo HEV parallelo, il totale della coppia alle ruote è imposta dal ciclo, per poter seguirne comunque una tra la coppia del motore e quella della macchina elettrica e questo può essere selezionato liberamente. Per un veicolo in serie o HEV suddiviso in potenza ce n'è solo uno di grado di libertà da poter scegliere (ad esempio la velocità del motore). La modalità Gear può rappresentare un ulteriore grado di libertà di ottimizzazione, se non imposta attraverso il ciclo.

Trovare la strategia di controllo ottimale significa quindi, trovare il valore ottimo di ciascun grado di libertà in ogni fase del ciclo. L'HOT, prevede quindi una funzione "ottimale" nonché una funzione che riduca al minimo il consumo di carburante all'interno del ciclo, considerando il SOC alla fine del ciclo, vincolato uguale al valore di target imposto. Il SOC è quindi l'unica variabile dinamica considerata. Questo problema di controllo può essere formulato nel secondo modo:

trovata una u (t), $\forall t \in [0, T]$ tale che

$$\underbrace{min}_{u(t)} J = \int_0^T \dot{m}\,(u,t)dt$$

soggetto a:

$$\dot{\xi}(t) = f(u,t,\xi), \qquad \xi(0) = \xi_0, \qquad \xi(T) = \xi_{target}$$

Dove:

- u (t) rappresenta i gradi di libertà da ottimizzare
- $\dot{m}_f$ è la portata massica del carburante

- ξ è il SOC
- ξ_{target} il suo valore target alla fine del ciclo

Ulteriori vincoli sono imposti sia da u (t) che da ξ (t) per far rispettare i limiti fisici. Il PMP afferma che in ogni fase, i valori ottimali dei gradi di libertà si trovano minimizzando una funzione denominata Hamiltoniano. Al fine di fornire un significato fisico ed una interpretazione di tale metodo, moltiplichiamo l'Hamiltoniano con un valore costante H_{LHV} (trattandosi di un valore riferito potere calorifico inferiore del carburante, in questo caso Diesel), si raggiunge la seguente relazione:

$$u^{opt}(t) = argmin\, H(u, t, \xi)$$

$$H = \dot{m}_f H_{LHV} + s_0 P_{ech}$$

dove:

- H_{LHV} è il valore del potere calorifico inferiore del carburante
- P_{ech} è il consumo elettrochimico (tenendo conto delle perdite della batteria e dell'efficienza di carica) della batteria
- s_0 è il fattore di equivalenza nonché una riformulazione del moltiplicatore della legge della teoria di Lagrange associato al SoC.

Il fattore di equivalenza s_0 risulta essere costante nel tempo, ma differisce per ogni ciclo. Il suo significato fisico è possibile capirlo attraverso i seguenti grafici:

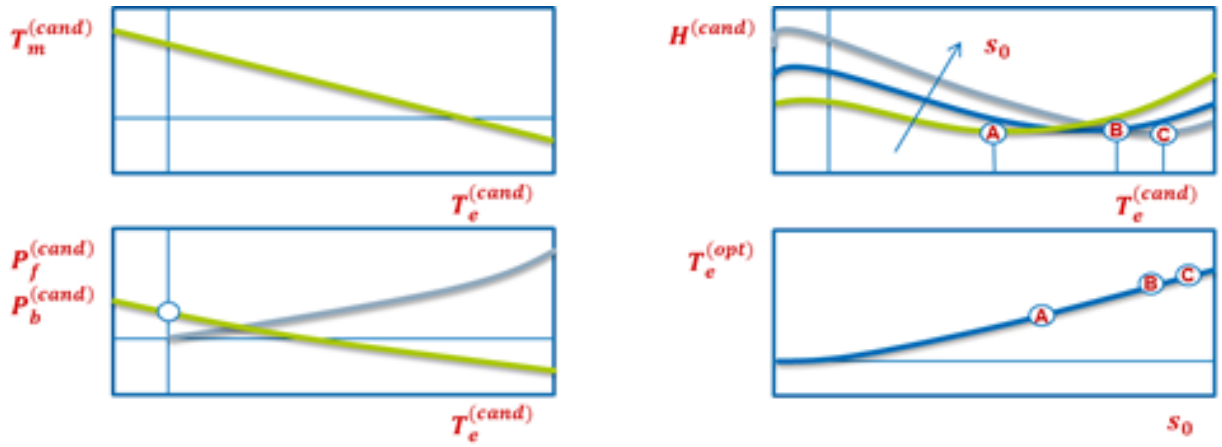


Figura 40: Significato fisico del valore s_0 all'interno dell'HOT

I costi ritenuti aggiuntivi possono essere considerati, secondo vari aspetti, come il costo dell'energia del motore, che viene calcolata utilizzando la FMEP e l'inerzia del motore.

Per un veicolo ibrido parallelo, al tempo t, la coppia motore ottimale T_e risulta essere un valore da ricercare. A seconda del valore assunto di T_e, la coppia del motore T_m varia, mentre, per quanto riguarda la potenza generata dal carburante, questa è calcolata come: $P_f = \dot{m}f\, H_{LHV}$

La funzione di ottimizzazione hamiltoniana, quindi dipende dal valore s_0. La posizione del minimo hamiltoniano e quindi della coppia T_e ottimale varia di conseguenza con il valore assunto da s_0. Quello

che si può osservare è che maggiore è il valore assunto e maggiore sarà l'uso del motore termico (e viceversa).

Il fattore di equivalenza può essere effettivamente considerato come il "costo" dell'elettricità riferita al carburante, quindi, valori più alti indurranno ad un minor consumo di elettricità, ma un maggior consumo di combustibile.

Di conseguenza, in ogni fase del ciclo, l'algoritmo HOT genera diversi valori possibili per i gradi di libertà (definiti "candidati") u (k) con k = 1, ..., N.

Di conseguenza, diversi valori di $P_f = \dot{m}_f H_{LHV}$ e P_{ech} che vengono successivamente valutati. Quindi l'HOT calcola gli hamiltoniani H(k) e al termine trova:

$$u_{opt}(t) = u(k_{opt}) \qquad \text{tale che} \qquad H(k_{opt}) = \min.$$

Il fattore di equivalenza non è imposto dall'utente ma è calcolato in in modo tale da soddisfare il seguente vincolo: SOC_{finale}, $\zeta(T) = \zeta_t$. Il ciclo con le diverse iterazione in base al metodo di dissezione/dicotomia, fino al raggiungimento della convergenza (entro la tolleranza prescritta) tra il SOC_{finale} e il SOC_{target}, è il seguente:

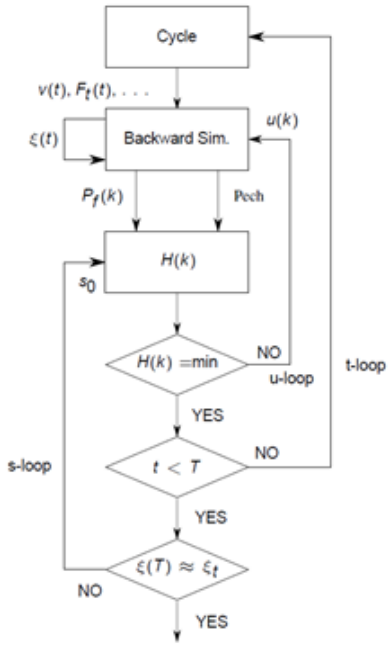


Figura 41: Basic HOT flow chart: additional variables: v(t), F_t(t) speed and traction force imposed by the cycle at each time step.

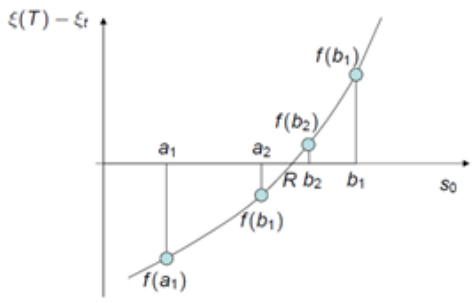


Figura 42: Illustration of the bisection method to find s_0

Come mostrato nella Figura, il primo intervallo di ricerca è tra [a_1, b_1]. Alla metà della curva il punto a_2 viene testato e il corrispondente ζ (T) risulta inferiore di ζt. Il nuovo intervallo è quindi [a_2, b_1] e un nuovo punto medio considerato risulta b_2 e di conseguenza viene testato. La convergenza si raggiunge quando il punto centrale si avvicina alla radice R, tale che ζ (T) ≈ ζ_t. (Jean-Charles Dabadie, 09/04/2017).

Post Processing

In questa fase è possibile eseguire la post-elaborazione dei risultati:

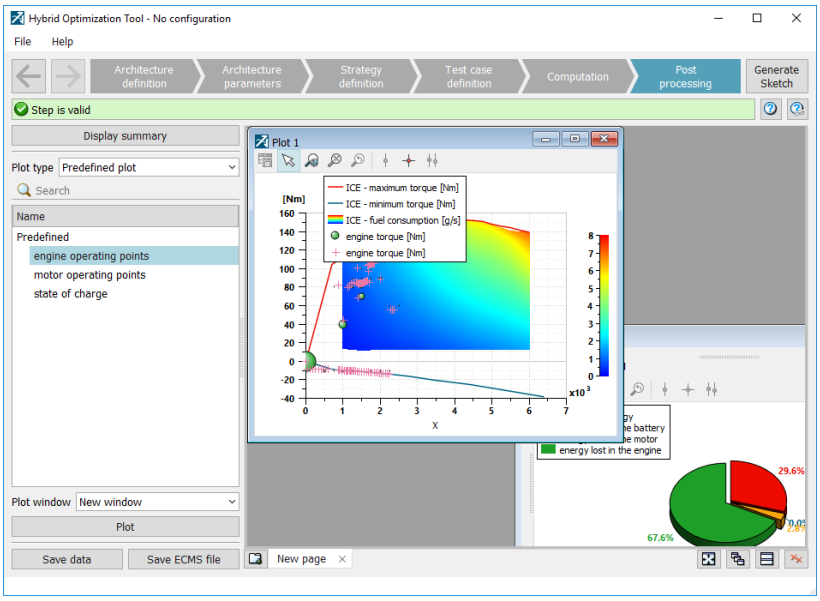


Figura 43:Schermata del Post-Processing

Premendo il pulsante "Visualizza riepilogo" viene visualizzata una vista globale del calcolo nella parte destra:

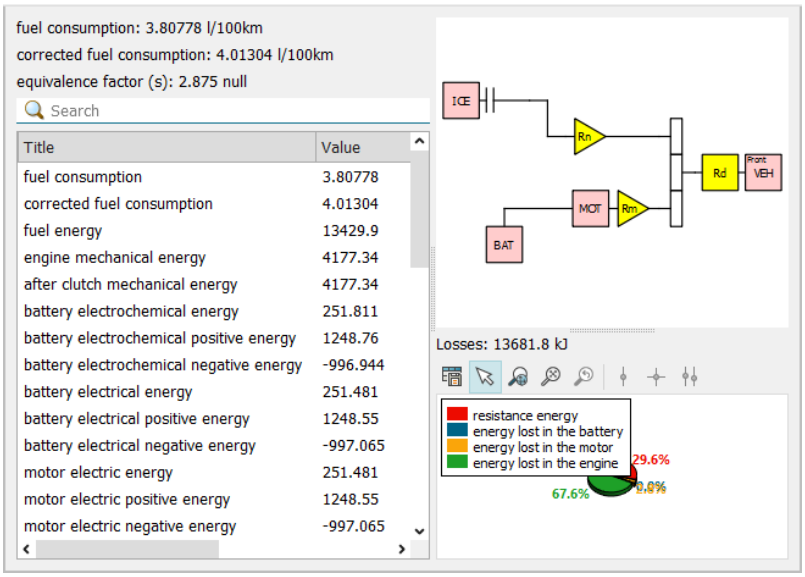


Figura 44: Riepilogo riassuntivo della procedura HOT

Molti risultati di calcolo sono disponibili alla fine del calcolo, nella finestra di riepilogo. (Amsim)

Capitolo 7: Descrizione dei componenti del modello

Dopo aver utilizzato il tool HOT, cliccando su "generate sketch" viene creato automaticamente il modello di base dell'architettura oggetto di studio. Questo modello prevede gli aspetti essenziali di base, per poter far partire una simulazione, quindi per poter analizzare i vari aspetti del modello, bisogna implementare nuovi elementi al suo interno.

La complessità del modello iniziale accordata con il Politecnico di Torino e l'azienda Daca-I Powertrain Engineering, si è concentrata sull'implementazione di un impianto di raffreddamento del motore termico che dal modello di base viene tenuto costante e per alcuni modelli si è aggiunta una ECU che prevedesse i seguenti aspetti:

- Performance runs: l'obiettivo dell'ECMS è quella di ridurre al minimo il consumo di carburante, non adatto per le performance dei vari runs
- Disattivazione dei cilindri: 2 cilindri sono disattivati quando i seguenti parametri vengono raggiunti 1400 < n <4000 [rpm] e 25 < T <100 [Nm] (vedi capitolo "Disattivazione dei cilindri")

Di seguito verranno analizzati tutti i componenti principali presenti all'interno del modello.

DRV driver auto

Il simbolo che caratterizza il componente è il seguente:

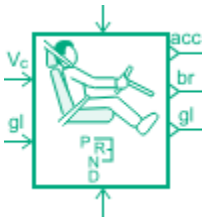


Figura 45: Sottomodello del driver - Amesim Simcenter

Definisce quello che è il pilota e le sue azioni principali, può essere utilizzato nella modellazione di ogni veicolo in vari modi

- Con cambio manuale
- Con cambio automatico
- CVT
- Cambio robotizzato

Il driver segue esattamente il target del ciclo imposto al veicolo, con forti variazioni della coppia richiesta. Questo aspetto ovviamente preclude che non è rappresentativo per un guidatore umano. Il componente non calcola il rapporto del cambio e i comandi della frizione, ma se fosse necessario, devono essere calcolati in un sotto-modello ECU o con un altro sotto-modello, come ad esempio:

- DRVDRVRMT01

Il sotto-modello può prendere in considerazione due aspetti essenziali, quelli di frenata ed accelerazione. Perciò simula il comportamento del pilota schiacciando il pedale del freno per arrestare o rallentare il veicolo, oppure, schiacciare l'acceleratore per seguire il profilo di velocità.

DRV-vehicle

Il simbolo che caratterizza il componente è il seguente:

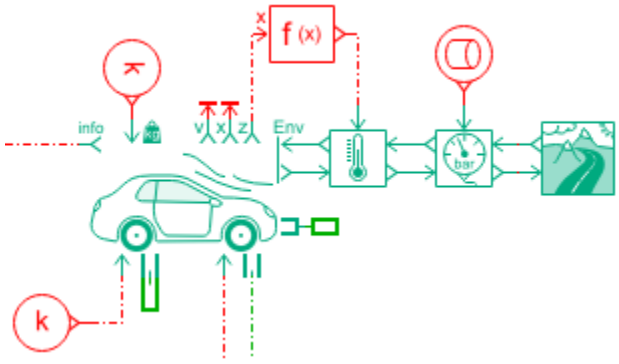


Figura 46: Sotto modello del veicolo - Amesim Simcenter

L' asse anteriore e quello posteriore sono modellati (è possibile considerare configurazioni 4x4), l'utente può scegliere tra tre configurazioni di test per il veicolo, quali:

- Su strada: prendendo in considerazione l'attrito volvente, pendenza della strada e resistenza aerodinamica
- banco prova a rulli: coefficienti di attrito banco prova a rulli in cui vengono definiti i parametri dall'utente
- coast-down: dal file coast-down il componente calcola i coefficienti di attrito del banco prova rulli

Inoltre, l'utente può scegliere tra due configurazioni di scorrimento longitudinale, quali:

- senza slittamento: nessuno slittamento tra pneumatico e terreno
- con slittamento: parametri di slittamento longitudinale dello pneumatico definiti in fase di inserimento dall'utente

DRV-VCU-ECMS-2

Il simbolo che caratterizza il componente è il seguente:

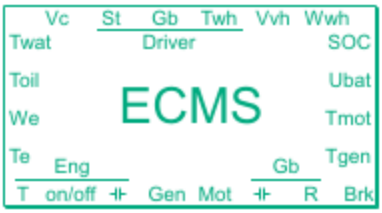


Figura 47: Sotto modello della centralina prodotta dal tool HOT - Amesim Simcenter

L'ECMS è un modulo che rappresenta l'unità di controllo del veicolo, dedicata essenzialmente ai propulsori ibridi. Il sotto-modello non viene visualizzato nella struttura della libreria IFP-Drive ma è disponibile solo dallo strumento di ottimizzazione HOT, esaminato in precedenza. Lo scopo di questo componente è quello di poter controllare il veicolo al fine di riprodurre i risultati dello strumento di

ottimizzazione ibrida su un determinato ciclo di guida. Il componente è progettato per funzionare con il modello generato dallo strumento di ottimizzazione ibrida. Qualsiasi modifica allo schizzo potrebbe comportare deviazioni in termini di comportamento del veicolo e consumo di carburante (rispetto ai dati di riferimento di HOT) e potrebbe persino comportare problemi di robustezza. Questo controllo si basa su un'ottimizzazione del consumo di carburante durante il ciclo guida e non è adattato ai cicli di prestazione.

L'obiettivo è quello di adattare la strategia ottimale (ottenuta con calcoli quasi statici) a un modello di sistema dinamico del veicolo simulato. Il passaggio da un approccio statico a un approccio dinamico può portare a differenze in termini di risultati. Un buon esempio di ciò è l'innesto/disinnesto della frizione che genera sempre una fase transitoria nel modello dinamico che non viene presa in considerazione dal modello statico in HOT.

Un'altra differenza strategica chiave per la configurazione parallela ibrida è data durante la fase di decelerazione o richiesta di una coppia bassa, perciò il motore può essere disinnestato per tutti i rapporti di trasmissione. Non è il caso dello strumento di ottimizzazione ibrida in cui, nella configurazione predefinita, il motore viene disinnestato solo nel rapporto di trasmissione elettrica pura.

Questo sotto-modello controlla i componenti principali (quando presenti) di un veicolo ibrido, quali:

- motore termico
- motore elettrico
- generatore elettrico
- frizione del cambio
- frizione del motore

Alcuni casi specifici non sono supportati, a seconda delle impostazioni dei parametri come ad esempio:

- stop & start: ciò significa che nel file.ecms creato da Hybrid Optimization Tool, il parametro ENG.didle deve essere nullo
- architetture con un treno planetario combinato con una trasmissione
- doppie configurazioni parallele e parallelo - serie con cambio in R_m o R_g

la configurazione ibrida parallela con il cambio in R_n è una configurazione con una frizione tra motore e motore elettrico, non può supportare un avvio del motore prima che il veicolo si muova, perciò il parametro denominato “DRV.vmaxel” del file.ecms deve essere di un valore decisamente elevato, da evitare il cambio di marcia (si consiglia un minimo di 3 m/s, a seconda della configurazione).

L’architettura con cambio in Rd può funzionare solo per l'architettura P_0 (nessuna frizione tra motore e motore elettrico), la limitazione è la stessa per la doppia configurazione ibrida parallela: v_{maxel} dovrebbe essere abbastanza grande da evitare qualsiasi slittamento della frizione.

DRV-ECU for ICE6

Il simbolo che caratterizza il componente è il seguente:

Figura 48: Sotto modello della centralina per il motore termico - Amesim Simcenter

Questo componente nominato "ECU for ICE" è un'unità di controllo del motore termico ed assicura la corretta comunicazione tra la richiesta di carico da parte del conducente e i segnali di controllo del motore (come ad esempio: modalità di combustione, regolazione del minimo, regolazione della velocità massima, velocità di ripresa del carburante ...).

L'ECU for ICE, esegue diversi algoritmi conoscendo:

- velocità ideale del veicolo
- velocità massima del veicolo
- risposta di ripresa della marcia considerando il carburante

L'algoritmo di controllo nell'ECU viene rappresentata nella figura seguente:

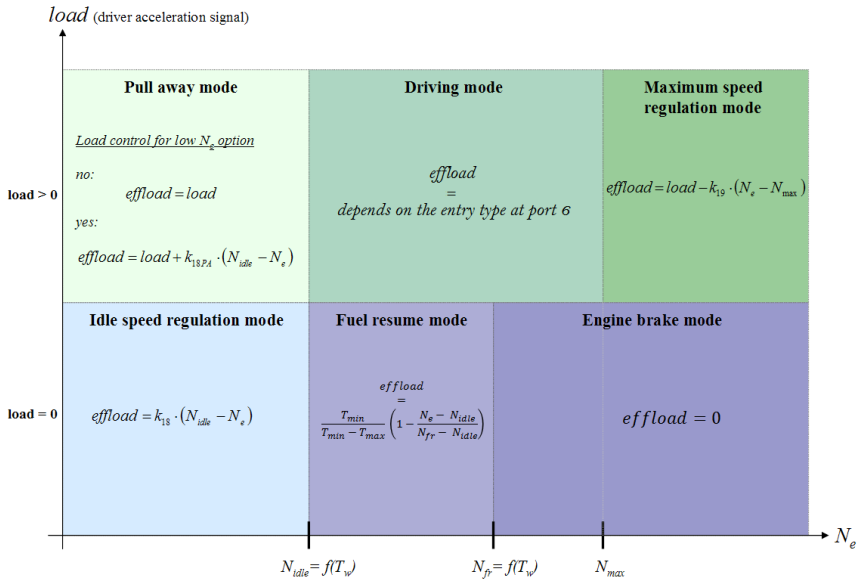


Figura 49: Logica di controllo della ECU-ICE6 - Amesim Simcenter

con:

- N_e: immettere la velocità del motore [giro / min]
- load: input del segnale di accelerazione del driver [null]
- N_{idle}: regime minimo controllato definito dall'utente [giri / min]
- N_{fr}: velocità di ripristino del carburante definita dall'utente [giri / min]
- N_{max}: regime massimo del motore definito dall'utente [giri / min]
- k_{18}: guadagno definito dall'utente per la regolazione del minimo [null]
- k_{18PA}: guadagno definito dall'utente per la regolazione del minimo durante il pull-away [null]
- k_{19}: guadagno definito dall'utente per la regolazione della velocità massima [null]
- T_{min}: coppia minima del motore [Nm]
- T_{max}: coppia massima del motore [Nm]

DRV-ICE4

Il simbolo che caratterizza questo componente è il seguente:

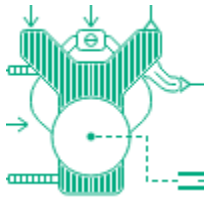


Figura 50: Modello del motore termico - Amesim Simcenter

Questo sotto-modello prevede vari campi di applicazione. Inoltre, c'è bisogno di implementare i seguenti parametri, in base a ciò che vorremmo studiare per il modello in fase di assemblaggio:

- momento torcente
- coppia e consumo di carburante
- coppia e consumo di carburante ed emissioni inquinanti di scarico
- coppia e consumo di carburante e perdite di calore
- coppia e consumo di carburante e perdite di calore ed emissioni di inquinanti di scarico
- personalizzato (calcolo definito dall'utente)

Le correzioni e le dipendenze all'avvio del motore, alle temperature fredde e calde sono inserite all'interno e possono essere utilizzate. Per quanto riguarda il sistema di raffreddamento, è considerato costante una volta generato lo sketch. Per poter considerare l'effetto delle temperature sugli attriti del motore c'è bisogno di inserire un sistema di raffreddamento, così come è stato fatto per i modelli per il caso studio.

DRV-Manual gearbox Thermal

Il simbolo che caratterizza questo componente è il seguente:

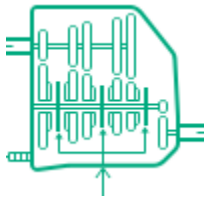


Figura 51: Modello del cambio - Amesim Simcenter

Questo modello può essere utilizzato per ottenere una modellazione dinamica avanzata di un cambio manuale in rapporto n (avanti e indietro). L'inerzia dell'albero primario non viene presa in considerazione e l'ingresso del segnale nella parte sottostante è il controllo del cambio; questa variabile è da considerare un output per il "driver".

DRV-Elettric motor Therm1

Il simbolo che caratterizza questo componente è il seguente:

Figura 52: Modello del motore elettrico - Amesim Simcenter

Questo componente rappresenta un motore / generatore elettrico con relativo convertitore che presenta la coppia in uscita e le perdite di potenza che possono essere determinate utilizzando file di dati o parametri caratteristici.

Questo modello è bidirezionale (motore / generatore) e indipendente dalla tecnologia del motore e del suo convertitore. Per i parametri vengono considerati le condizioni operative statiche nel dominio lineare del motore. Inoltre, può essere utilizzato per simulazioni dinamiche se il tempo di determinazione della corrente è abbastanza veloce rispetto alla dinamica del sistema.

Nella figura sottostante sono illustrate le diverse modalità di funzionamento del motore/generatore elettrico:

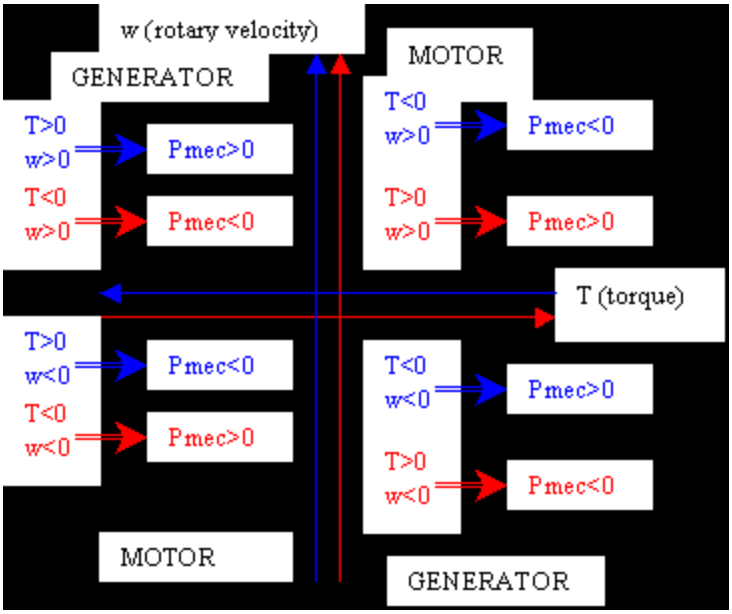


Figura 53: Algoritmo del motore elettrico - Amesim Simcenter

DRV-bat

Il simbolo che caratterizza questo componente è il seguente:

Figura 54: Modello della batteria -Amesim Simcenter

La tensione della batteria può essere fissa o variabile, mentre lo stato di carica può essere calcolato o meno, in caso di tensione variabile, include un modello di resistenza interna. Sono necessari dei dati

sperimentali per descrivere la tensione a circuito aperto e la resistenza interna alla batteria. Gli effetti termici possono essere presi in considerazione oppure tenerli costanti, mentre, la tensione a circuito aperto e la resistenza interna può dipendere principalmente dalla temperatura. Questo modello di batteria è una concatenazione di celle in serie e in parallelo. (Amsim)

Modelli creati su Amesim Simcenter

Attraverso il tool HOT, si è proceduto con la creazione del modello, in base all'architettura scelta per il caso studio. In fase di analisi del caso studio si è deciso di adottare le seguenti architetture:

- ✓ P0
- ✓ P2

Inserendo all'interno del tool i vari parametri e successivamente procedendo con la compilazione e la generazione del file ECMS vengono generate le seguenti strutture:

- Architettura P0:

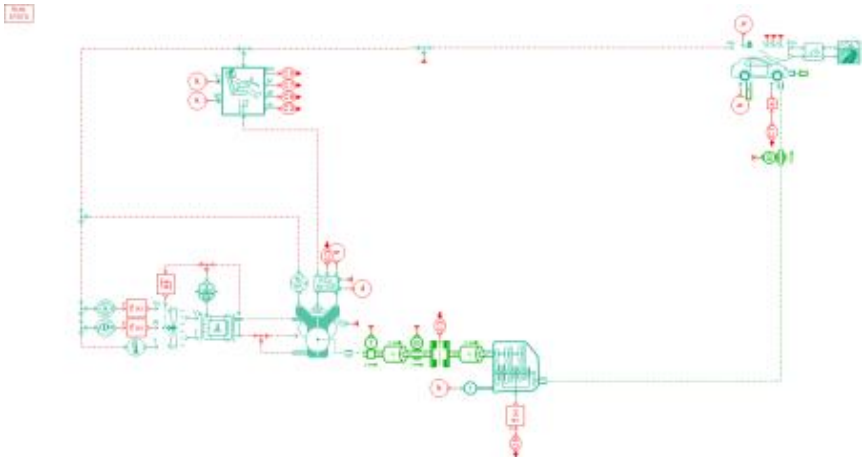


Figura 55: Architettura P0 - Amesim Simcenter

- Architettura P2:

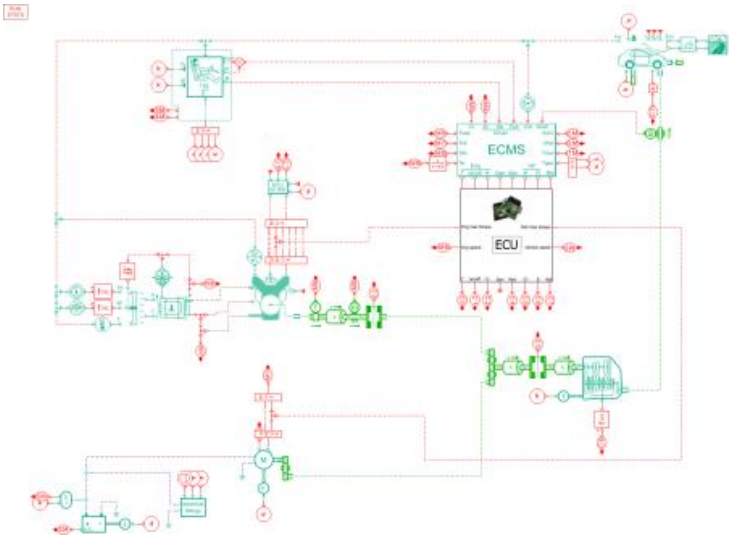


Figura 56: Architettura P2 - Amesim Simcenter

Capitolo 8: Dimensionamento del motore termico attraverso il software Amesim Simcenter

Lo strumento DRV-ICE Tables Creator è un'interfaccia interattiva dedicata alla generazione di vari file di dati necessari per utilizzare il sotto-modello IFP-Drive Engine. Questo permette di calcolare le caratteristiche operative di un determinato motore considerando la sua architettura e le prestazioni ad alti carichi.

I maggiori vantaggi dell'utilizzo di questo software sono:

- Calcolo delle caratteristiche operative realistiche per un determinato motore, considerando la sua architettura e le prestazioni di full load
- Visualizzazione dei grafici per validare le caratteristiche calcolate
- Creare file di dati basati su questi calcoli e necessari per far funzionare il sotto-modello del motore IFP-Drive.

Al termine della procedura vengono generati i seguenti file di dati:

- Momento torcente
- BMEP
- Consumo di carburante
- FMEP
- Equivalence Ratio
- Temperatura di scarico

Vengono, inoltre, generate delle mappe predefinite inizialmente di:

- emissioni (CO, HC, NO_x e Soot) e automaticamente sono impostate su 0
- il coefficiente di perdita termica che viene impostato sul valore 0,35.

Per poter calcolare queste mappe, bisogna inserire i seguenti parametri:

- Volume spazzato dal pistone
- Corsa del motore
- Numero di cilindri del motore

Le prestazioni, di full load del motore, possono essere calcolate tramite:

- Coppia e velocità massime del motore
- Coppia massima, nonché potenza e velocità massime del motore

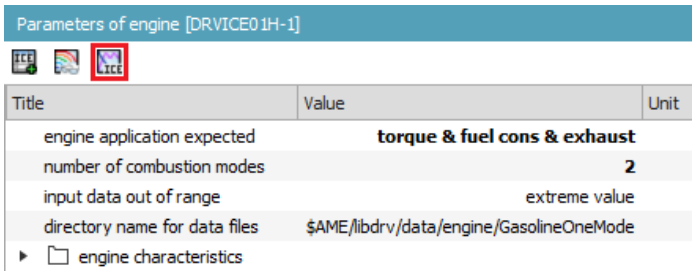


Figura 57: Tool per inserire i parametri del motore termico

Lo strumento DRV-ICE Tables Creator è composto da sei parti principali:

1. La parte di architettura definisce la geometria del motore e il percorso dell'aria (aspirato o turbo)
2. La parte di combustione definisce le caratteristiche di combustione del motore
3. La parte di definizione delle prestazioni definisce i dati delle prestazioni di fascia alta del motore
4. La parte di elaborazione consente di creare le mappe operative del motore
5. La visualizzazione delle tabelle consente di visualizzare le mappe generate e modificarle
6. La parte di creazione delle tabelle consente di salvare le mappe generate in file di dati

Definizione dell'architettura

In questa sezione è possibile definire:

- L'architettura del motore (in linea o V),
- Gli attriti del motore (basso, regolare o alto),
- Il tipo di percorso dell'aria del motore (turbo o aspirato),
- Il numero di cilindri,
- Il volume spazzato,
- Il colpo. È necessario generare una mappa del consumo di carburante.

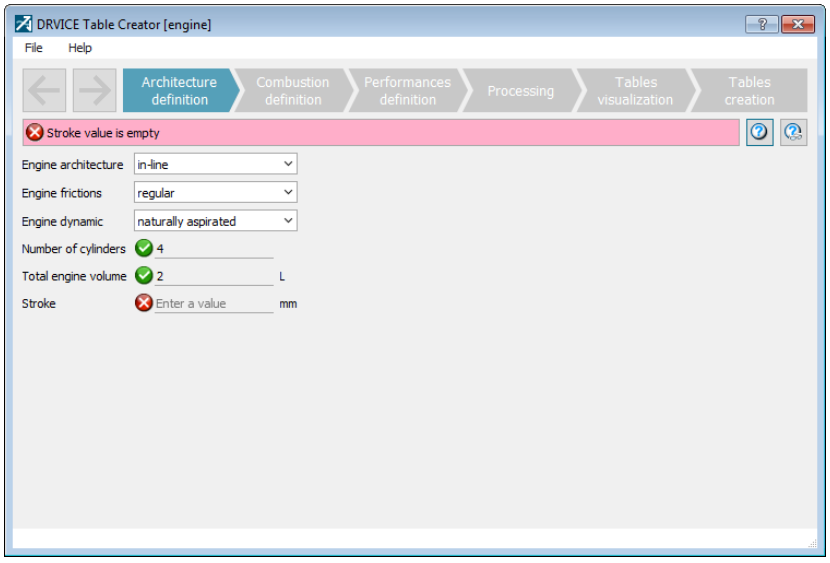


Figura 58: Definizione dell'architettura dell'ICE

Combustione

In questa sezione, è necessario definire le caratteristiche di combustione del motore:

- Tipo di motore. Sono disponibili tre tipi:
  - accensione a scintilla,
  - accensione a scintilla con bruciatura magra,
  - e accensione spontanea.
- Efficienza indicata lorda del motore e viene considerata una costante nell'intero campo di funzionamento del motore.
- Rapporto di equivalenza carburante / aria di funzionamento (FAER). Il FAER minimo e massimo tra cui funziona il motore.

- Caratteristiche del carburante: valore di riscaldamento specifico del carburante e rapporto stechiometrico aria / carburante.

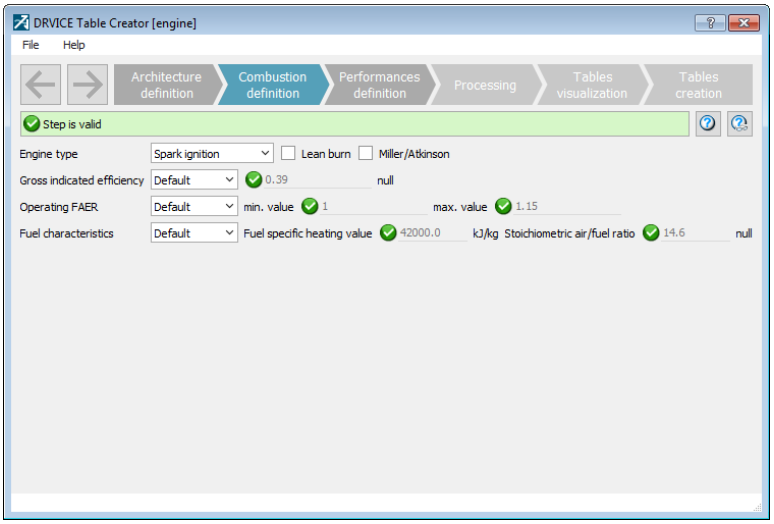


Figura 59: Schermata della definizione della combustione

Definizione delle performance

In questa parte, è necessario definire le caratteristiche di full load del motore. Possono essere inseriti attraverso due modalità:

- scalare
- vettoriale

Modo Scalare

La modalità scalare può essere utilizzata quando sono disponibili solo la coppia e la potenza massima del motore. Sulla base di questi dati viene effettuata un'estrapolazione per generare una curva completa per una coppia di full load simile a quella che dovrebbe essere definita in modalità vettoriale:

Figura 60: Schermata della modalità scalare dei parametri del motore

Modo Vettoriale

In modalità vettoriale bisogna, invece, definire la curva completa della coppia di full load in funzione della velocità del motore:

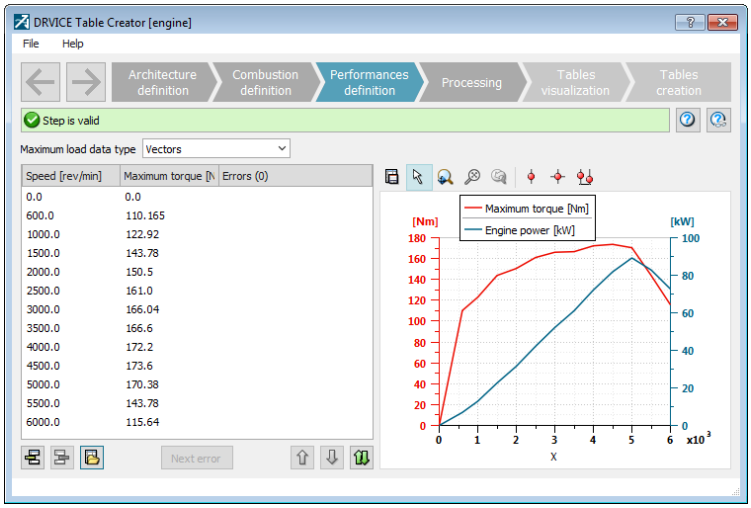


Figura 61: Schermata per implementare le curve di coppia e potenza

Questa parte consente la creazione della mappa operativa di consumo/emissioni di carburante utilizzate nel motore durante le simulazioni che possono essere definite in g/h o in g/kWh.

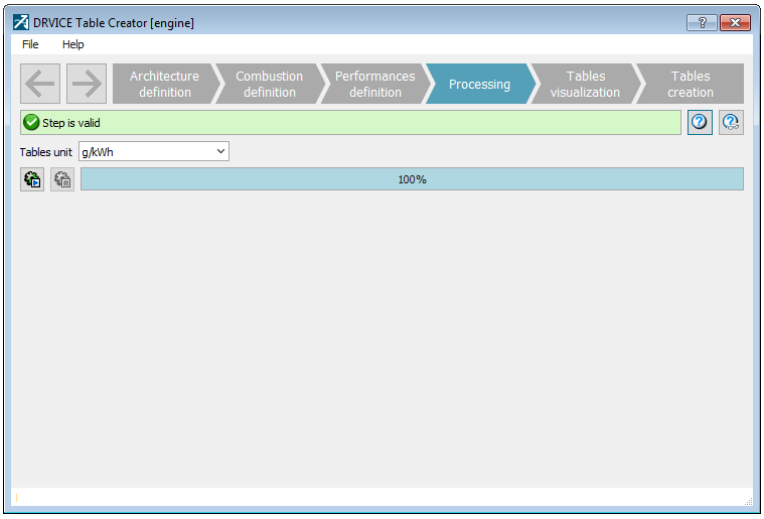


Figura 62:Schermata di Processing

Il processo di generazione di tali valori, si basa su un algoritmo iterativo illustrato di seguito:

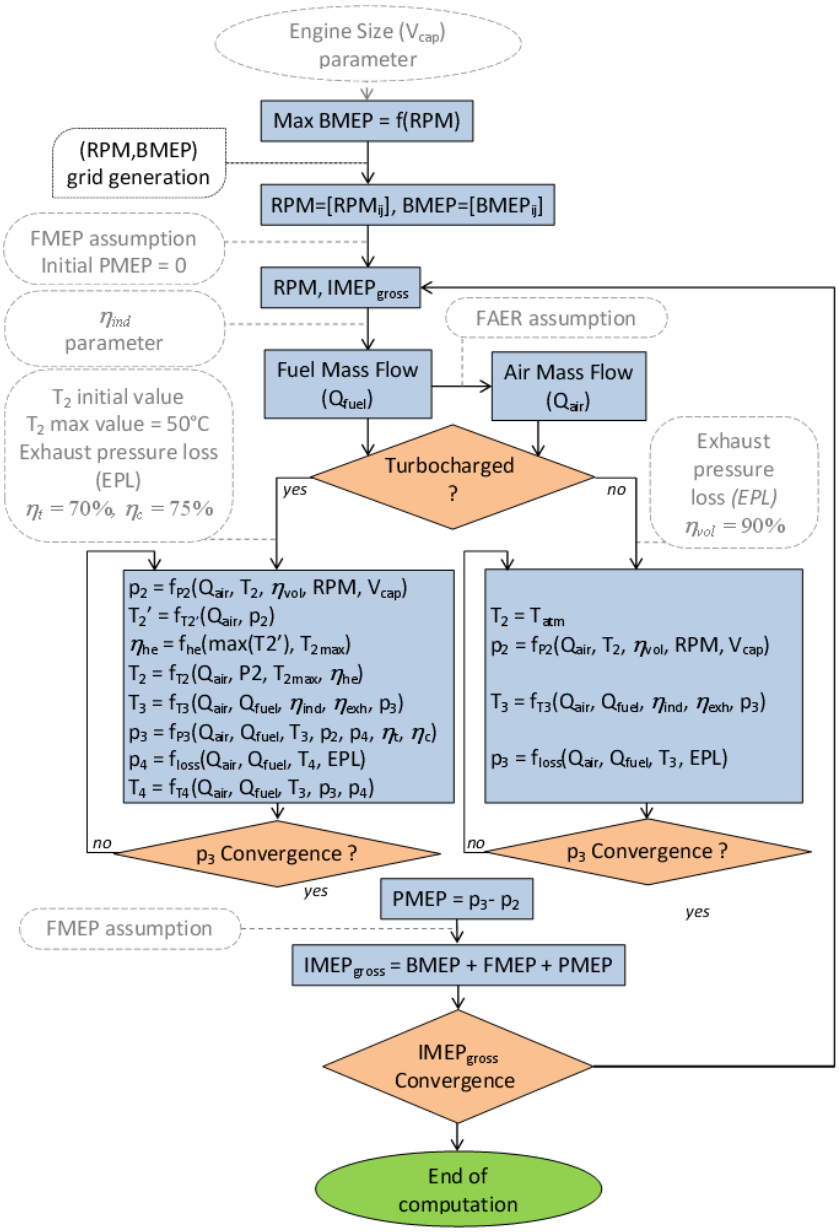


Figura 63: Flow chart per l'identificazione delle perdite nell'ICE

Il principio di questo algoritmo è quello di calcolare le perdite di pompaggio per i diversi punti operativi della griglia (Engine Speed, BMEP). (Amsim)

Capitolo 9: Dimensionamento del motore elettrico attraverso il Software Amesim Simcenter

All'interno di Amesim Simcenter è presente un tool dedicato per i motori elettrici, questa risulta essere un'interfaccia interattiva dedicata alla generazione di file di dati necessari per poter utilizzare i sotto-modelli del motore IFP-Drive.

Permette di calcolare le caratteristiche operative di un determinato motore considerando la sua architettura e le prestazioni di full load. (Amsim)

I vantaggi del tool sono i seguenti:

- ✓ Calcola direttamente le caratteristiche operative realistiche per un determinato motore considerando la sua architettura e le prestazioni di full load
- ✓ Visualizza i relativi grafici per validare le caratteristiche calcolate
- ✓ Crea automaticamente dei file di dati basati su questi calcoli necessari per far funzionare il sotto-modello del motore elettrico.

Di seguito è riportata l'interfaccia del tool:

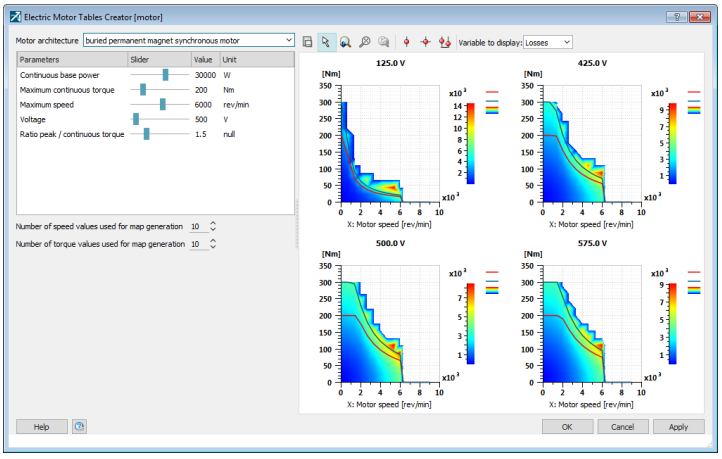


Figura 64: Interfaccia per la creazione dei dati del motore elettrico

Dimensionamento analitico del motore elettrico

Per un primo dimensionamento del motore elettrico sono state utilizzate delle relazioni tratte dal (M. Ehsani, 2005).

Come primo aspetto analizzato risulta la velocità massima del motore ω_{motor_max}, calcolata analiticamente dalla velocità massima del veicolo v_{max}, e dal rapporto di trasmissione G_r e dal raggio della ruota R_w, nel seguente modo:

$$\omega_{motor_{max}} = G_r \frac{v_{max}}{R_w}$$

La velocità di base della macchina ω_{motor_base} è definita come metà della velocità massima della macchina:

$$\omega_{motor_{base}} = \frac{\omega_{motor_{max}}}{2}$$

I dati esposti in tabella rappresentano un compromesso tra i valori ricavati dalle precedenti relazioni e i datasheet dei costruttori di macchine elettriche consultati:

Categoria	v_{max} [Km/h]	ω_{max} [rpm]
P_0	165 – 200 - 220	12000
P_1	165 – 200 - 220	6000

Tabella 14: Dati ricavati per velocità angolare massima del motore elettrico

Il datasheet dei motori elettrici, oggetto di studio per la medesima tesi, con le velocità angolari massime raggiunte, sono:

Categoria	Power	ω
[-]	[KW]	[rpm]
P_0	2	12000
P_0	3	12000
P_0	4	12000
P_0	5	12000
P_1	20	6000
P_1	25	6000
P_1	30	6000
P_1	40	6000

Tabella 15: Datasheet dei motori elettrici

Capitolo 10: Dimensionamento del pacco batterie attraverso il tool dedicato di Amesim Simcenter

Nel caso del dimensionamento e della specifica di un pacco batteria, di solito vengono prese in considerazione diverse celle commerciali al fine di proporre un'architettura adatta e che soddisfi i vincoli quali:

- Potenza [KW]
- Energia [KWh]
- massa totale [Kg]

Tuttavia, la potenza e l'energia del pacco batteria sono spesso sopravvalutate e pertanto non soddisfano al meglio le esigenze che il veicolo richiede. Questo è ciò che ha fatto sì della creazione di strumenti che consentano di dimensionare un pacco batteria partendo da celle "ideali", che non sono commerciali ma si adattano perfettamente alle esigenze di simulazione.

È possibile determinare i seguenti parametri:

- le dimensioni
- la massa
- le prestazioni di una cella elettrochimica virtuale dai dati di celle commerciali della stessa chimica, per un'applicazione target

Attualmente la metodologia è stata applicata e validata su tre diverse chimiche, così definite:

- LFP-C
- NCA-C
- NMC-C

Lo strumento di pre-dimensionamento della batteria è in grado di generare, dalla conoscenza delle celle agli ioni di litio commerciali, le caratteristiche di una cella agli ioni di litio conforme alle specifiche della batteria presente all'interno di un veicolo. Queste specifiche impongono un livello di prestazioni in termini di tensione (V), potenza (P) ed energia (E).

Per poter accedere al tool del programma bisogna entrare nella sezione Parametri della batteria e procedere come descritto nelle seguenti figure:

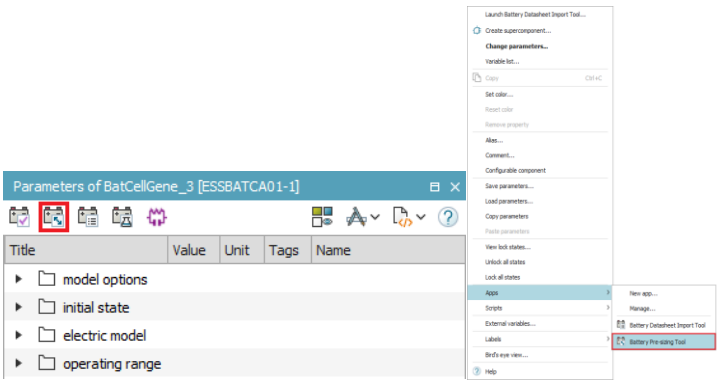


Figura 65:Pre-dimensionamento del pacco batteria

Una volta entrati all'interno del tool è possibile poter inserire i dati relativi alla batteria che si vuole implementare:

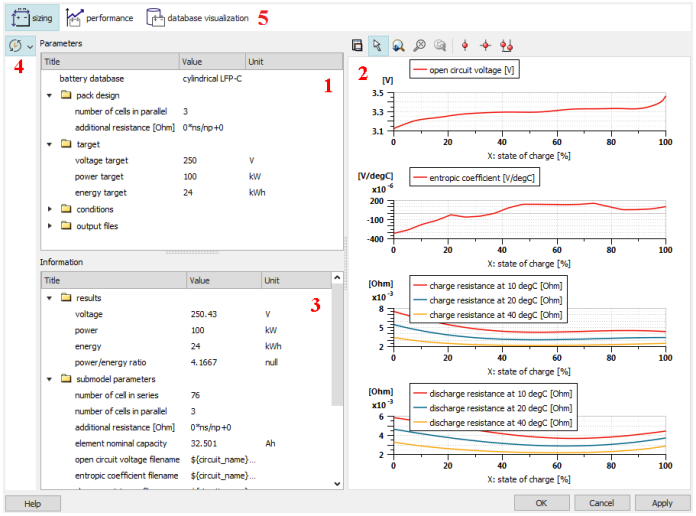


Figura 66: Interfaccia per il dimensionamento del pacco batteria

1. Tabella dei parametri, in cui è possibile modificare i valori dei parametri
2. Il grafico mostra le curve generate usando i parametri inserita
3. Informazioni generate utilizzando i parametri
4. Per l'impostazione predefinita, i calcoli che vengono attivati automaticamente dopo ogni modifica del parametro immesso, ma è possibile passare all'aggiornamento manuale facendo clic sul pulsante "Aggiorna"
5. Modalità: dimensionamento, prestazioni o visualizzazione del database

Dimensionamento analitico del pacco batterie

Dopo aver definito il motore, pur avendolo sovradimensionato per poter garantire che il WLTC venga eseguito correttamente dal modello, è possibile simulare il veicolo, così da poter stimare il consumo di energia su un ciclo (E_{cycle}).

L'energia viene estrapolata linearmente dal seguente rapporto:

$$\frac{d_{range}}{d_{cycle}}$$

dove,

- d_{range} è l'intervallo richiesto
- d_{cycle} è la distanza del ciclo

Infine, poiché l'intervallo viene valutato a partire da uno stato di carica di soc_{max} (impostato al 80%) e termina con uno stato di carica di soc_{min} (impostato al 20%), per preservare la vita utile della batteria, è necessario applicare il coefficiente:

$$\frac{1}{soc_{max} - soc_{min}}$$

Per poter stimare correttamente l'energia della batteria richiesta E_{bat} bisogna far riferimento alla seguente relazione:

$$E_{batt} = \frac{1}{soc_{max} - soc_{min}} \cdot \frac{d_{range}}{d_{cycle}} \cdot E_{cycle}$$

Le taglie delle batterie utilizzate per l'analisi del caso studio fanno riferimento alla corrispettiva taglia della macchina elettrica.

Inizialmente lo studio è nato lasciando una taglia di batteria, costante per tutte le prove. Ma questo ha comportato, per i risultati, delle criticità:

- Per una potenza inferiore della batteria rispetto alla taglia della macchina elettrica: si è notato che l'utilizzo ripetuto del motore termico per la ricarica, vanificava il vantaggio di avere questo tipo di soluzione
- Per una potenza uguale della batteria rispetto alla taglia della macchina elettrica: si è notato che rispecchia il giusto utilizzo del motore elettrico, andando a considerare la giusta metodologia di carica e scarica e automaticamente dell'accensione e dello spegnimento dell'ICE
- Per una potenza superiore della batteria rispetto alla taglia della macchina elettrica: si è notato che l'ICE si accende molto meno garantendo un enorme vantaggio a livello di emissioni e un incremento dell'utilizzo della macchina elettrica

Analizzando questi fattori si è deciso di utilizzare per le prove, delle batterie che avessero una capacità pari alla taglia del motore elettrico. Attraverso l'utilizzo della strategia ECMS implementata nella ECU prodotta dal programma HOT, quest'ultima cerca di portare il SOC_f pari al SOC_i, ma non sempre questo risulta possibile.

Capitolo 11: Descrizione della metodologia utilizzata

Fatte le giuste osservazioni del caso, si è notato che il final drive al ponte e la torque coupling in device del motore elettrico, incidono notevolmente sul consumo specifico di combustibile. In concomitanza a questa osservazione fatta, è possibile verificare che questo incide notevolmente anche sulle emissioni di CO_2, oltre che sulle prestazioni.

Avendo a disposizione varie taglie di motori termici e di motori elettrici, si sono mantenuti costanti determinati parametri, mentre, assumere come caso studio gli intorni dei parametri ritenuti invece variabili, fissando nell'analisi un determinato passo di variazione.

Questo è stato possibile attraverso il programma Amesim Simcenter, attraverso una sezione dedicata allo studio dei parametri e del post-processing. Questo tipo di elaborazione prevede un approfondimento dettagliato del modello che si è costruito potendo sperimentare i vari parametri e analizzarne il risultato.

Si è considerato quindi il final drive, torque coupling e la taglia del motore elettrico come variabili, lasciando costante gli altri parametri del modello. Per ragioni legate a tempistiche, risorse e agli scarsi dati in possesso non si è potuto aggiungere a queste variabili anche la taglia della batteria.

Questa analisi che potrà essere oggetto di studio di ulteriori tesi, potrà essere condotta attraverso la creazione di un mini-modello del pacco batteria con specifiche di livello superiore. Così facendo è possibile variarne i parametri e analizzarne, i benefici o gli svantaggi, che una differente taglia di batteria possa apportare al guadagno del combustibile.

La struttura di elaborazione del software Amesim Simcenter, attraverso la sezione "Study Manager", permette di adottare questo tipo di analisi. Ci sono sostanzialmente tre azioni che si possono seguire:

- Design Of Experimens
- Optimization
- Monte Carlo

Il nostro caso studio ricade nella sezione del Design of Experiment, di seguito descritto.

Design Of Experiment

Il Design of Experiment considera strumenti statistici per valutare l'influenza dei diversi parametri di controllo su una o più funzioni di output. L'obiettivo del DOE è quello di ridurre drasticamente il numero di prove rispetto a un piano fattoriale completo pur mantenendo una elevata significatività dei modelli ottenuti. Questo permette di sviluppare una comprensione più approfondita del modello stabilendo relazioni di causa ed effetto, stabilendo un elenco di parametri ininfluenti.

Questo permette di semplificare il modello e di eseguire un'ottimizzazione gerarchica per ridurre i tempi di calcolo. Questo può avvenire attraverso con il 1° livello o più livelli, andando a valutare l'ottimizzazione dei parametri ininfluenti.

Il DOE può essere utilizzato per ottenere:

- un modello matematico surrogato
- un modello di superficie di risposta polinomiale (RSM) di una funzione costosa a livello computazionale

Conoscendo le influenze di ciascun parametro, il DOE permette di:

- ✓ ridurre i costi diminuendo le tolleranze sui parametri di scarsa influenza
- ✓ sapere quali sono i parametri veramente ininfluenti
- ✓ stabilire una gerarchia per la fase di ottimizzazione

Di seguito vengono raccolte tutti i possibili metodi di studio che il software ha implementato al suo interno:

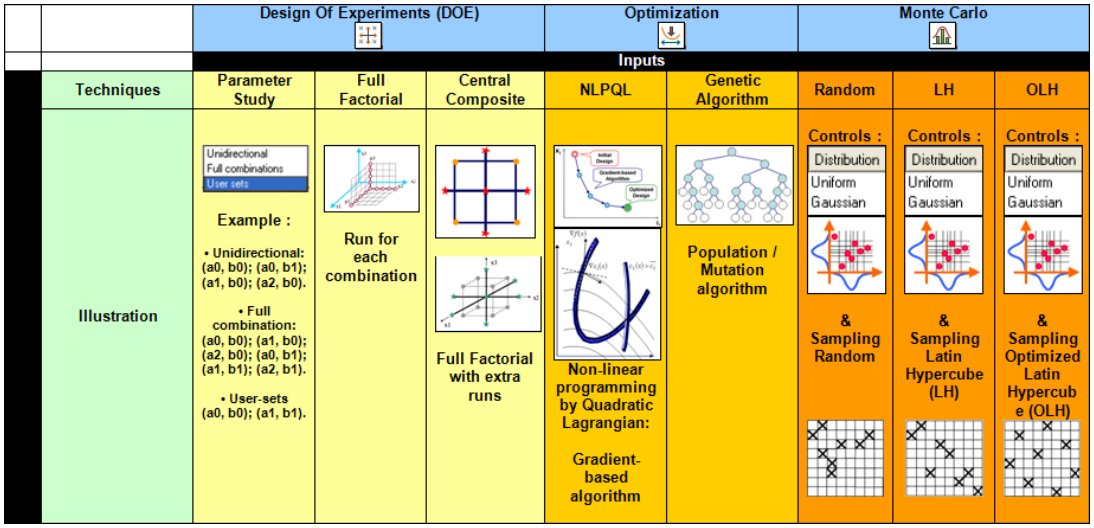
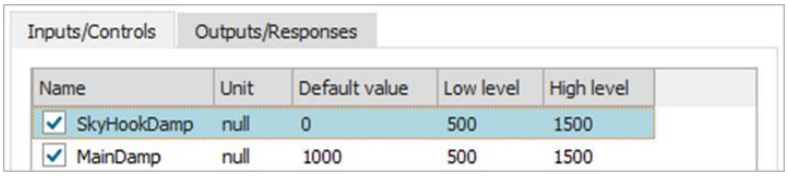


Figura 67: Metodi di ottimizzazione implementati all'interno di Amesim Simcenter

Full Factorial

Il full factorial può essere adottato ad 1 livello o più per ciascun parametro, l'idea di base è quella di eseguire una combinazione di parametri. Ciò significa che sono necessarie 2^N esecuzioni. Attraverso lo studio del full factorial è possibile calcolare l'effetto principale di ciascun fattore o di un gruppo di fattori.

All'interno del tool c'è un elenco di input visualizzato per la tecnica di studio full factorial viene presentato di seguito:



Inoltre, sono presenti due colonne rispetto a quelle standard, quali:

- Basso livello
- Alto livello

È possibile modificare questi valori, dipendenti dal tipo di parametro allegato:

- Se fosse discreto:
  - Cliccando sul parametro è possibile modificarlo normalmente

Un esempio può essere rappresentato in figura:

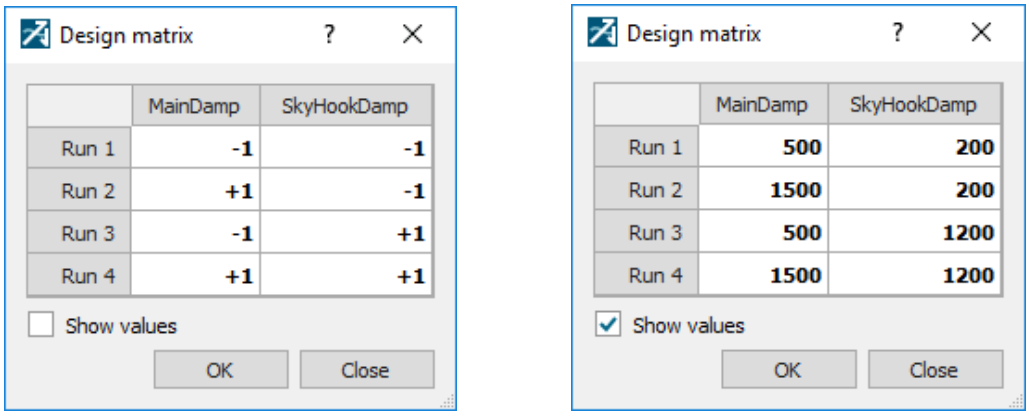


Figura 68: Esempio pratico del metodo di studio Full Factorial

Per la matrice di progettazione di un DOE – Full Factorial il valore -1 indica il livello basso, mentre il valore +1 indica il livello più alto.

Ultimato questo tipo di studio, considerando come variabili il Final Drive, il Torque Coupling e la taglia del motore elettrico, tenendo costante tutti gli altri valori del modello, i dati venuti fuori per le prove del caso studio sono sintetizzati nelle seguenti tabelle:

- Veicolo convenzionale:

Size Engine [cm^3]	**Final Drive (FD) [-]**	**Torque Coupling [-]**
1300	2,4	-
1600	3,5	-
2000	2,4	-

Tabella 16: Valori di Final Drive utilizzati per l'architettura Convenzionali

- Architettura P0:

ICE: 1300 cm³							
EM: 2KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	2,5	0,2	1,5	2,9	48	
	Final Ratio	4,2	0,2	3,2	4,2		
EM: 3KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	2,5	0,2	1,9	3,1	49	
	Final Ratio	4	0,3	3,2	4,9		
EM: 4KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	1,8	0,1	1,1	2,5	135	
	Final Ratio	3,4	0,2	2,8	4,4		
EM: 5KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	3,4	0,3	2,8	4,6	63	
	Final Ratio	2	0,2	1,2	2,8		
ICE: 1600 cm³							
EM: 2KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	2,7	0,2	1,5	2,9	56	
	Final Ratio	3,5	0,3	2,6	4,4		
EM: 3KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	2,2	0,2	1,2	3,4	72	
	Final Ratio	3,5	0,3	2,9	4,4		
EM: 4KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	2,2	0,2	1,2	3,2	88	
	Final Ratio	3,5	0,3	2,3	4,4		
EM: 5KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	2,2	0,2	1,2	3,2	77	
	Final Ratio	3,5	0,3	2,6	4,4		
ICE: 2000 cm³							
EM: 2KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	3	0,2	2	3,4	56	
	Final Ratio	3,4	0,3	2,5	4,3		
EM: 3KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	3	0,2	2	3,8	70	
	Final Ratio	3,4	0,3	2,5	4,3		
EM: 4KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	2,8	0,2	2,4	3,8	48	
	Final Ratio	3,4	0,3	3,1	4,6		
EM: 5KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	3,2	0,2	2	3,8	80	
	Final Ratio	3,4	0,3	2,5	4,6		
					Total	**842**	**runs**

Tabella 17: Valori del Final drive, Torque Coupling e taglia del motore elettrico per l'architettura P0

ICE: 1300 cm³							
EM: 20kW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	2	0,2	1,2	3	80	
	Final Ratio	3,8	0,3	2,3	4,4		
EM: 25KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	2	0,2	1,2	2,6	56	
	Final Ratio	3,5	0,3	2,3	4,1		
EM: 30KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	2,4	0,2	1,2	2,8	63	
	Final Ratio	3	0,3	2,4	4,2		
EM: 40KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	1,2	0,2	1,2	3	80	
	Final Ratio	2	0,3	2	4,1		
ICE: 1600 cm³							
EM: 20KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	2,4	0,2	1,2	2,8	72	
	Final Ratio	3	0,3	2,1	4,2		
EM: 25KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	2,4	0,2	1,2	3	80	
	Final Ratio	3	0,3	2,1	4,2		
EM: 30KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	2,4	0,2	1,2	2,8	63	
	Final Ratio	3	0,3	2,4	4,2		
EM: 40KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	2,4	0,2	1,2	2,8	63	
	Final Ratio	3	0,3	2,4	4,2		
ICE: 2000 cm³							
EM: 20KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	2	0,2	2	3,2	35	
	Final Ratio	3	0,3	2,4	3,6		
EM: 25KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	1,2	0,2	1,2	3	60	
	Final Ratio	2,6	0,3	2	3,5		
EM: 30KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	1,2	0,2	1,2	3	50	
	Final Ratio	2,6	0,3	2,6	3,8		
EM: 40KW		Value	Step Size	Min value	Max Value	Total Simulation	
	Speed Ratio	1,2	0,2	1,2	3	50	
	Final Ratio	2,6	0,3	2,6	3,8		
					Total	**752**	**runs**

Tabella 18: Valori del Final drive, Torque Coupling e taglia del motore elettrico per l'architettura P2

Per le architetture P0 e P2, il range considerato per l'analisi dei dati comprende una taglia della macchina elettrica che varia rispettivamente da 2 a 5 KW, mentre, per il P2 varia da 20 a 40 KW.

Implementazione della logica ECMS all'interno della centralina

La strategia per poter gestire il controllo di accensione e spegnimento del motore termico, sia per quanto riguarda la trazione che per quanto riguarda la carica della batteria, passa attraverso lo studio approfondito del seguente paper: "Robust equivalent consumption – based controllers for a dual – mode diesel parallel HEV" di Roberto Finesso, Ezio Spessa e Mattia Venditti.

Analizzando nel dettaglio quanto eseguito nei loro studi notiamo che sono stati sviluppati applicativi per nuove strategie di minimizzazione del consumo equivalente (definito ECMS). Questo permette di identificare la strategia di controllo ottimale di un veicolo ibrido parallelo. Lo studio è improntato sulla determinazione della funzione di consumo equivalente istantaneo (CE), che tiene conto non solo del consumo di carburante (FC) e del flusso di energia attraverso componenti elettrici.

La funzione EC è incentrata su una tecnica di apprendimento automatico a validazione incrociata, basata su un algoritmo genetico, in cui è stato selezionato il set di dati al fine di massimizzarne le prestazioni.

Il controllo ECMS può essere implementato in un'unità di controllo del veicolo per il controllo delle prestazioni. Incentrata su uno strumento di programmazione dinamica, utilizzato come riferimento, senza avere un feedback sulla batteria SOC o un modello di guida già implementato prima di avviare le prove.

La legge basata sulla strategia di controllo è legata alla u*(t) determinata dalla minimizzazione di una funzione, J, mentre, il vincolo sul valore finale di SOC deve essere garantito. La formulazione matematica del problema è la seguente:

$$u*(t) = \underbrace{min}_{u(t)\epsilon S^*(t)} J\big(u(t)\big)$$

$$SOC_{end} \geq SOC_0$$

dove u(t) è la variabile generica o anche la strategia di controllo mentre S*(t) è l'insieme di possibili combinazioni di variabili di controllo per ciascun intervallo di tempo t; SOC_{end} è la batteria SOC alla fine della missione invece SOC_0 è il suo valore iniziale. S*(t) è un sottoinsieme dell'insieme di tutte le combinazioni di variabili di controllo.

L'ottimizzatore basato sull'apprendimento automatico che è stato sviluppato ha lo scopo di estrarre un insieme ottimale di regole, per una data missione del veicolo, sulla base della strategia di controllo ottimale identificato per la prima volta tramite l'ottimizzatore del benchmark. Un dominio di input 3D, costituito da:

- velocità del veicolo
- accelerazione del veicolo (che è correlata alla domanda di potenza del veicolo)
- SOC della batteria

viene generata e discretizzata, in modo che una maglia di input si ottengono dei cluster. L'azione più frequente intrapresa dall'ottimizzatore viene quindi selezionato per ciascun cluster e memorizzato come regola del controller per quel cluster specifico. La discretizzazione ottimale del dominio in input 3D è ottenuta utilizzando una tecnica con un GA. Lo strumento proposto è stato quindi definito CORE.

Da un punto di vista matematico, questo strumento definisce un ottimale automa deterministico finito adatto per l'implementazione in un controller basato su regole per l'ottimizzazione della strategia di controllo integrata. L'automa finito è costituito da un insieme finito di stati di input, un insieme finito di stati di uscita e una regola. Quest'ultimo deve collegare gli stati di input agli stati di uscita.

La velocità del veicolo, l'accelerazione del veicolo e il SOC della batteria sono stati selezionati come variabili di input e la loro discretizzazione rappresenta gli stati di input, mentre la discretizzazione delle due variabili di controllo, GN e PF, generano gli stati di uscita.

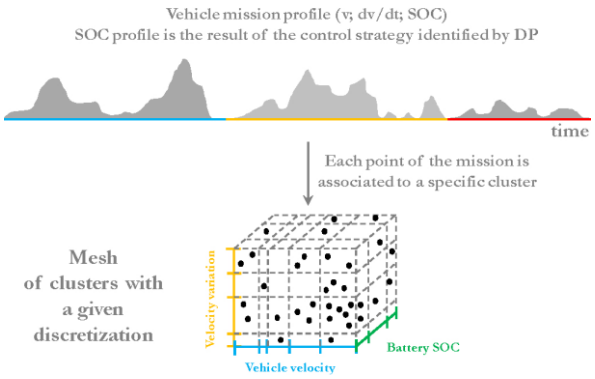


Figura 69: CORE tool associazione della posizione

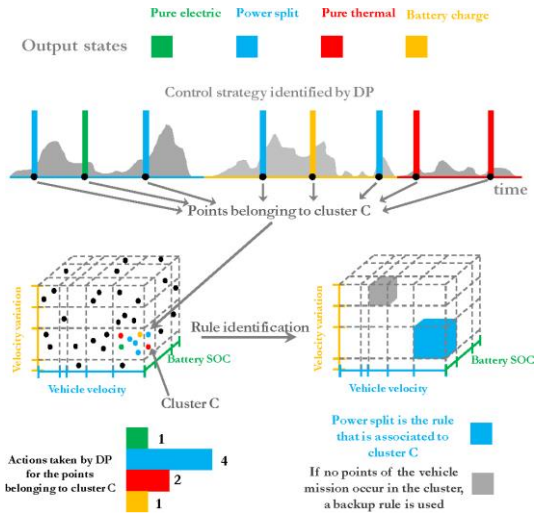


Figura 70: CORE tool identificazione del cluster generico

(Roberto Finesso E. S., 2016)

In fase di implementazione di tale teoria, ci siamo accorti delle limitazioni che il programma possedeva. Questo perché Amesim Simcenter ha implementato al suo interno una teoria Hamiltoniana, precedentemente descritta, al quale non è possibile accedervi per modificarla. Questo compromette il fatto di:

- Assumere tale teoria per il proprio caso studio
- Modificare attraverso controlli ben organizzati la modifica della teoria di base
- Costruirsi una struttura di ECU partendo dal foglio bianco e generandola per il proprio caso studio

L'idea iniziale era quella di sperimentare quanto descritto nel paper di (Roberto Finesso E. S., 2016), ma questo prevedeva un lavoro oneroso a livello di tempo e risorse, che potrebbe essere come oggetto di studio successivo. Questo ha precluso, quindi, di assumere involontariamente la teoria implementata dal programma HOT definita come ECMS.

Capitolo 11: Analisi dei costi

Oltre ad avere un riscontro sottoforma di riduzione di g/km di CO_2 rispetto ad una configurazione standard, bisognerebbe valutare, anche l'impatto economico che si avrebbe per implementare e sostenere queste nuove tecnologie.

Per questa Analisi economica, si è fatto riferimento al paper "Cost-optimized design of a dual-mode diesel parallel hybrid electric vehicle for several driving missions and market scenarios" di Roberto Finesso, Ezio Spessa, Mattia Venditti.

Gli EV, hanno solo una batteria come fonte di energia e la potenza di trazione è fornita da uno o più macchine elettriche. Questi veicoli sono altamente efficienti dal punto di vista energetico e sono caratterizzati da emissioni zero allo scarico, mentre le emissioni dalla produzione alla ruota è legata al processo di produzione dell'energia elettrica che comunque non permette di dire, pur se l'energia fosse prodotta esclusivamente da fonti rinnovabili che l'impatto di CO_2 sia pari a zero.

Se l'elettrico utilizzasse energia derivata da una fonte rinnovabile, le emissioni sono decisamente inferiori. Tuttavia, questi veicoli non hanno finora avuto successo sul mercato, a causa di:

- costi decisamente elevati,
- il peso aggiunto delle batterie,
- la capacità di carico ridotta,
- il limitato campo pratico,
- mancanza di infrastrutture di ricarica

Gli (HEV) offrono un migliore risparmio di carburante e minori emissioni rispetto ai veicoli convenzionali e possono sfruttare il carburante esistente già nelle infrastrutture. Gli HEV sono dotati di due fonti di energia, vale a dire:

- a batteria
- serbatoio del carburante

sono dotati di un motore termico ed una o più macchine elettriche. Un significativo vantaggio degli HEV, rispetto ai veicoli elettrici a batteria, è che offrono la possibilità di aumentare il campo di praticità, per via della presenza del motore termico. Gli HEV portano ad una riduzione del consumo di carburante e di Emissioni di CO_2, rispetto ai veicoli convenzionali, principalmente a causa della riduzione delle dimensioni del motore, alla possibilità di recuperare l'energia cinetica attraverso la frenata rigenerativa, fino all'implementazione della modalità Stop-Start e alla possibilità di ottimizzare il flusso di potenza dal motore e dalle macchine elettriche.

Lo strumento utilizzato per identificare la progettazione ottimale di ogni veicolo ibrido si basa sulla generazione di un numero elevato di diversi layout (in termini di dimensioni del motore, dimensioni della macchina elettrica e rapporti di velocità dei dispositivi e del final ratio) per ogni architettura del veicolo. I costi di produzione e del funzionamento relativi al consumo di carburante e all'esaurimento della durata della batteria sono i principali da dover considerare.

La disposizione ottimale x* è stata selezionata per ciascuna architettura di veicolo ibrido minimizzando il costo totale. Identificato il layout bisogna garantire prestazioni ed emissioni specifiche legata ai vincoli imposti dal ciclo. Identifichiamo le seguenti voci di costo:

- Produzione (C_{pr}): il costo dei componenti del motore termico.
- OEM (C_{oem}): Esso consiste in:
  - i costi di produzione
  - frazione dei costi dovuti alla sostituzione della batteria

È stato ipotizzato che l'OEM potrebbe essere interessato a finanziare parzialmente l'acquisto di batterie aggiuntive, se necessarie, per la durata del veicolo. Questa è una politica ragionevole che potrebbe essere adottata dall'OEM alla fine di promuovere l'introduzione di veicoli ibridi sul mercato.

- Carburante (C_{fc}): il costo del carburante necessario per guidare il veicolo
- Funzionamento: il costo del carburante e il costo dovuto a qualsiasi sostituzione di batteria
- Utente (C_{usr}): il costo relativo all'utente, ovvero il costo del carburante e a frazione dei costi di sostituzione della batteria (questo è fondamentalmente per la definizione orientata ai costi operativi, in quanto non include i costi richiesti per l'acquisto del veicolo e costi relativi a assicurazioni / tasse)
- Totale (C_{tot}): la somma dei costi di produzione e operativi

Il costo di produzione C_{prod} tiene conto del costo del motore (C_e), di tutte le macchine elettriche (C_{em}) e del pacco batterie (C_{BAT}):

$$C_{prod}(X) = C_e + C_{em} + C_{bat}$$

che può essere suddiviso in:

$$C_e(x) = 12\ P_{e,max} + 424$$

$$C_{em}(x) = 21.7\ P_{em,max} + 425$$

$$C_{bat}(x) = 350\ E_{bat,tot} + 680$$

Dove:

- $P_{e,\,max}$ è la potenza massima del motore [kW]
- $P_{em,\,max}$ è la potenza massima della macchina elettrica [kW]
- $E_{bat,\,tot}$ è il contenuto energetico della batteria [kW h]

Per quanto riguarda la valutazione dei costi operativi, è necessario per valutare il consumo di carburante e la durata della batteria nel corso di una determinata missione di guida. Queste quantità dipendono dal controllo della strategia in larga misura. Il costo minimo raggiungibile del carburante C_{fc} viene quindi stimato come segue:

$$C_{fc}(x,u) = \frac{FP\ D\ I}{\rho\ N\ d}\ FC(u^*)$$

Dove:

- FP è il prezzo del carburante (€ / kg)
- D è una distanza in km ragionevole, coperto dal veicolo durante la sua vita utile
- N rappresenta l'orizzonte temporale (anno)
- d è la distanza della missione specifica

- FC è il consumo cumulativo di carburante massa (kg)
- u* è la politica ottimale ottenuta con DP che minimizza la funzione obiettivo J
- I è correlato ai fenomeni di inflazione
- i è l'indice di inflazione

Il costo relativo alla sostituzione della batteria richiede il calcolo del numero di batterie che devono essere utilizzate durante la vita del veicolo. A tal fine, la BU di utilizzo della batteria è stata introdotta come segue:

$$BU = \frac{\lambda}{\Lambda}\frac{D}{d}$$

dove λ è il consumo effettivo della batteria (Ah) e Λ è la durata della batteria (Ah). La sostituzione della batteria costa C'_{br} calcolato nel seguente modo:

$$C'_{br} = C_{bat}\frac{I}{N}(BU - 1)$$

Tuttavia, poiché la prima batteria fa parte del veicolo iniziale, esso non è stata inclusa nei costi operativi. Una seconda considerazione è stata quindi presa in considerazione:

$$C_{br} = \max(0, C_{bat}\frac{I}{N}(BU - 1))$$

I costi OEM sono stati invece stimati come segue:

$$C_{oem} = C_{pr} + C_{br}/2$$

mentre il costo dell'utente è stato stimato come:

$$C_{usr} = C_{fc} + \min(C'_{br}, {}^{C_{br}}/_{2})$$

I costi operativi sono stati definiti come segue:

$$C_{op} = C_{fc} + C_{br}$$

Infine, i costi totali sono la somma dei tre termini, vale a dire: la produzione, il consumo di carburante e la sostituzione della batteria:

$$C_{tot} = C_{pr} + C_{fc} + C_{br}$$

(Roberto Finesso E. S., 2016)

Attraverso le relazioni precedentemente analizzate, tratte dal Paper, si è stimato il costo totale del veicolo in base alla taglia del motore termico, tenuta costante, facendo invece variare la taglia della macchina elettrica. Inoltre, lo studio è stato affrontato considerando una vita utile del veicolo, N pari a 10 anni. Variando il chilometraggio annuale è possibile osservare il breakeven point, che determina quando in vari scenari, quali:

- Poco utilizzo
- Medio utilizzo
- Eccessivo utilizzo

il costo iniziale viene recuperato e inizia ad apportare dei vantaggi nell'utilizzo di una architettura in comparazione con un'altra. Di seguito vengono riportati i grafici che riportano i costi, per le diverse motorizzazioni 1300 cm^3, 1600 cm^3 e 2000 cm^3, variando la taglia della macchina elettrica in funzione dei chilometri percorsi:

- 0 km percorsi in 10 anni
  - I costi totali sono:
    - 1300 cm^3

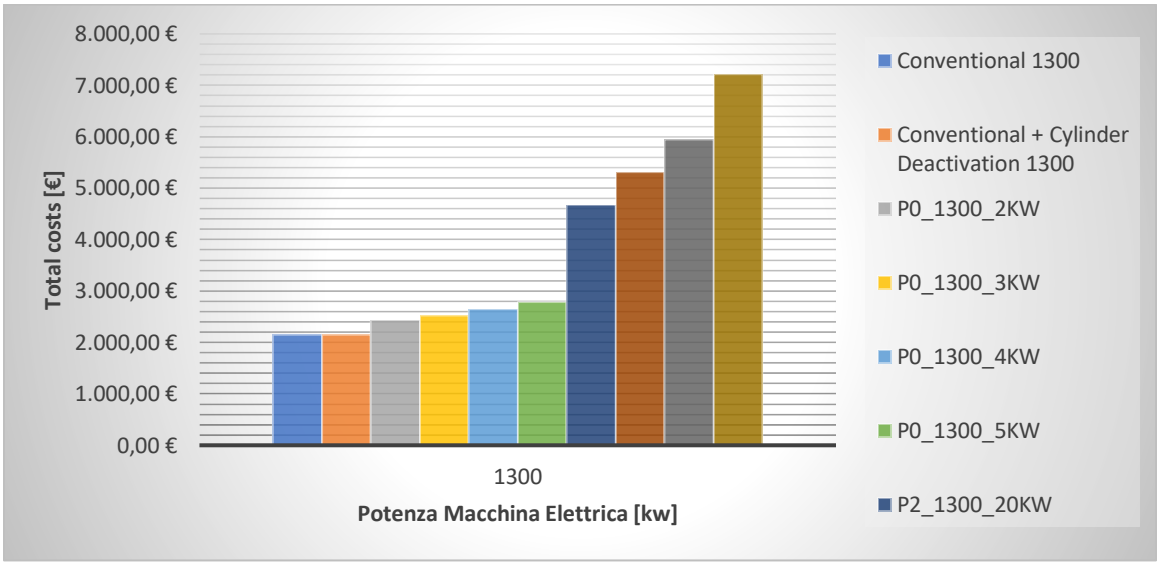


Figura 71: Andamento dei costi totali 1300 cm^3 - 0 km percorsi

    - 1600 cm^3

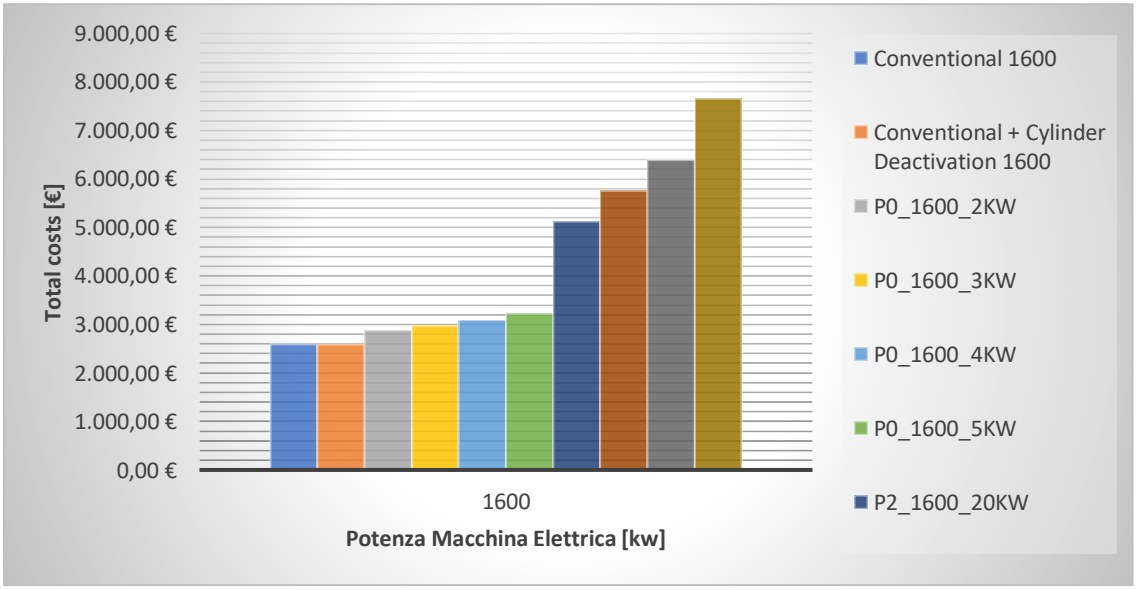


Figura 72: Andamento dei costi totali 1600 cm^3 - 0 km percorsi

- 2000 cm^3

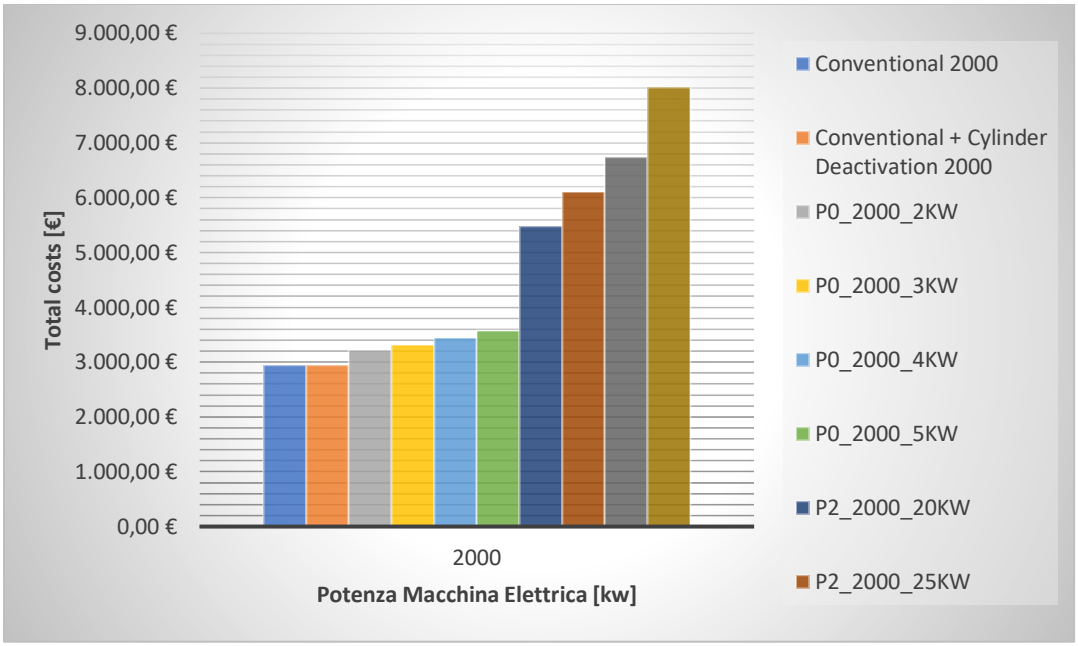


Figura 73: Andamento dei costi totali 2000 cm^3 - 0 km percorsi

❖ 50.000 km percorsi in 10 anni
  - I costi totali sono:
    - 1300 cm^3

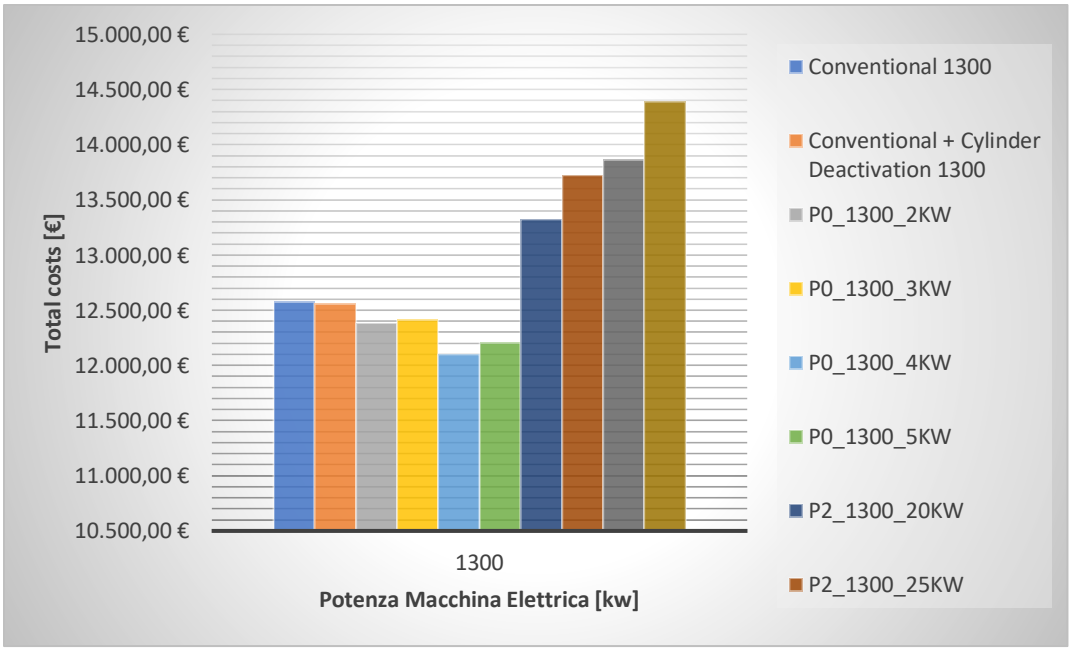


Figura 74: Andamento dei costi totali 1300 cm^3 - 50.000 km percorsi

- 1600 cm^3

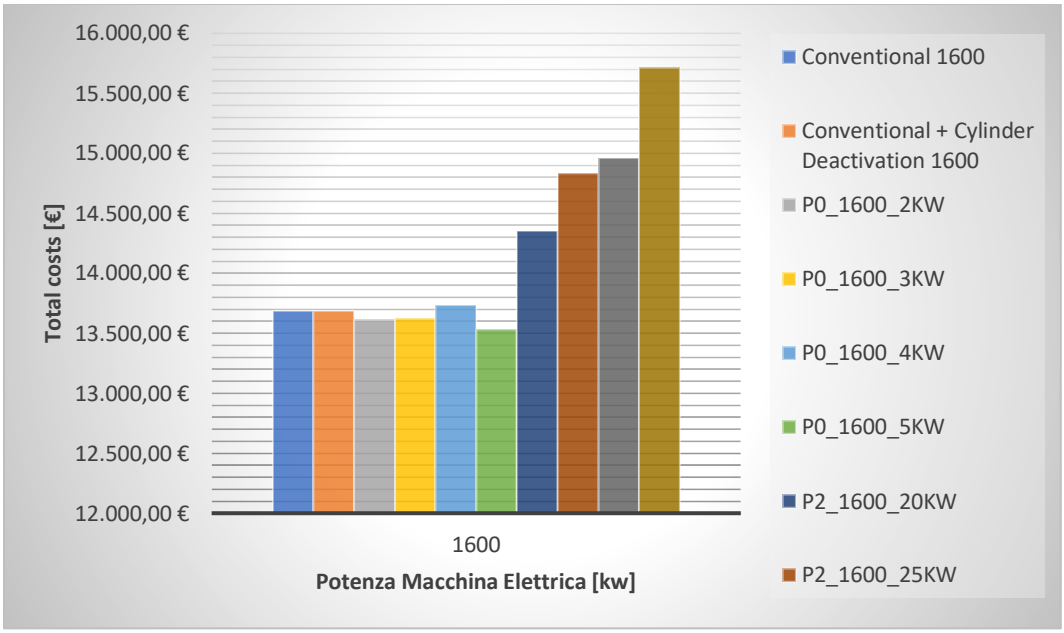


Figura 75: Andamento dei costi totali 1600 cm^3 - 50.000 km percorsi

- 2000 cm^3

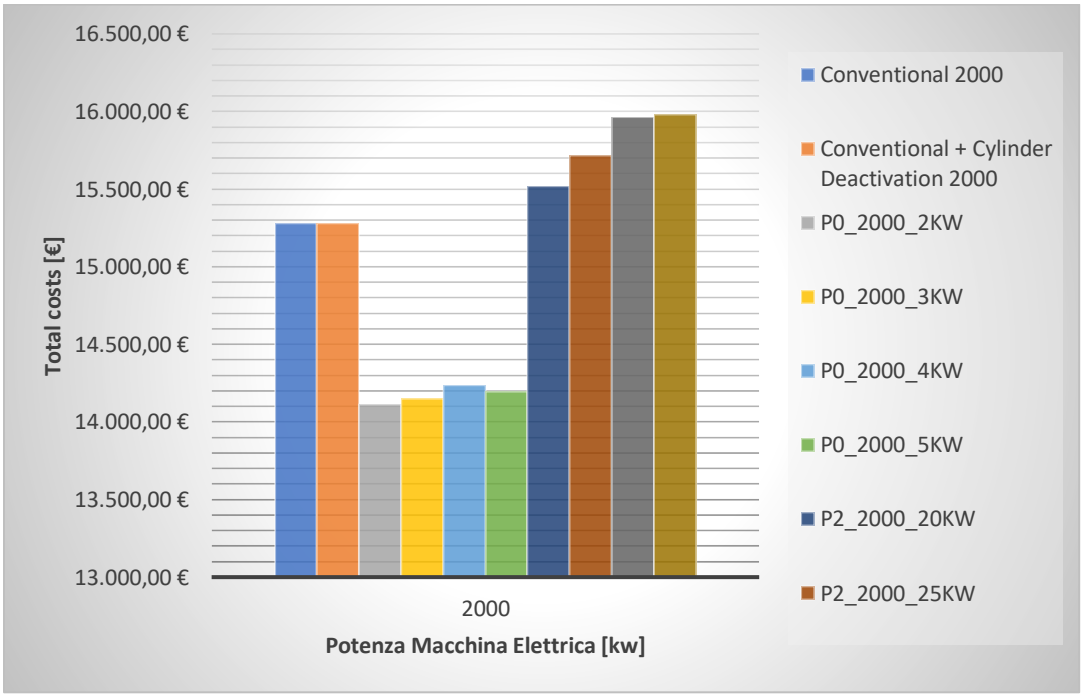


Figura 76: Andamento dei costi totali 2000 cm^3 - 50.000 km percorsi

- 100.000 km percorsi in 10 anni
  - I costi totali sono:
    - 1300 cm^3

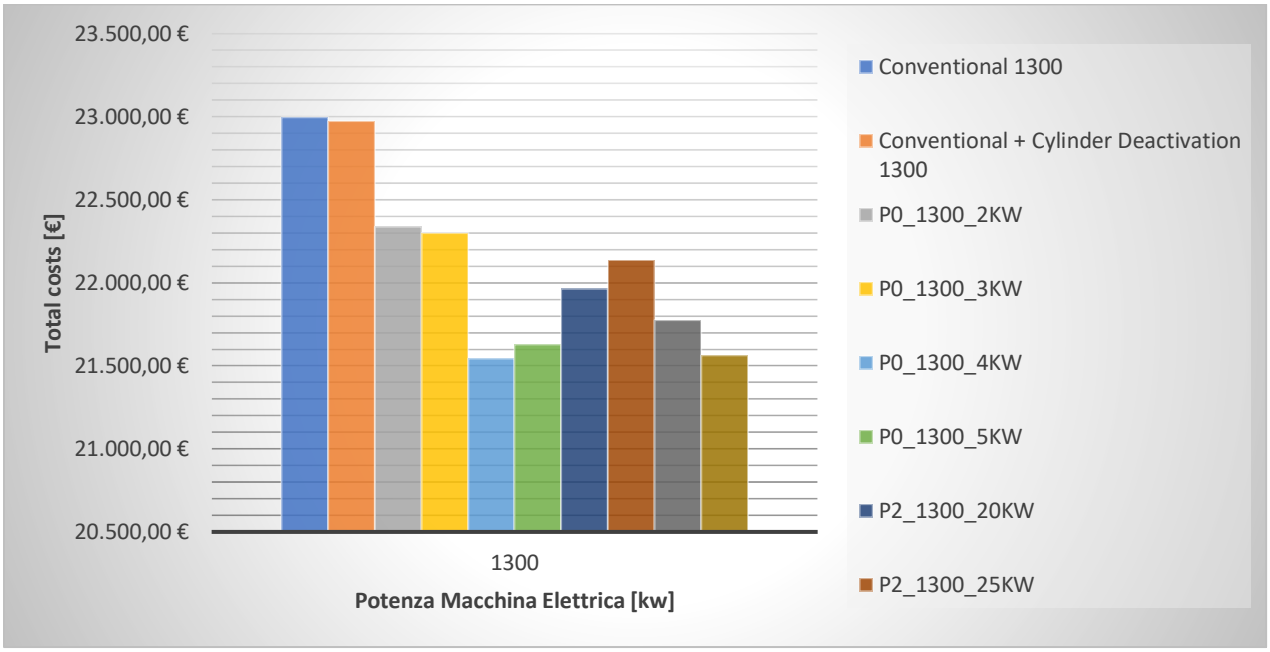


Figura 77: Andamento dei costi totali 1300 cm^3 - 100.000 km percorsi

- 1600 cm^3

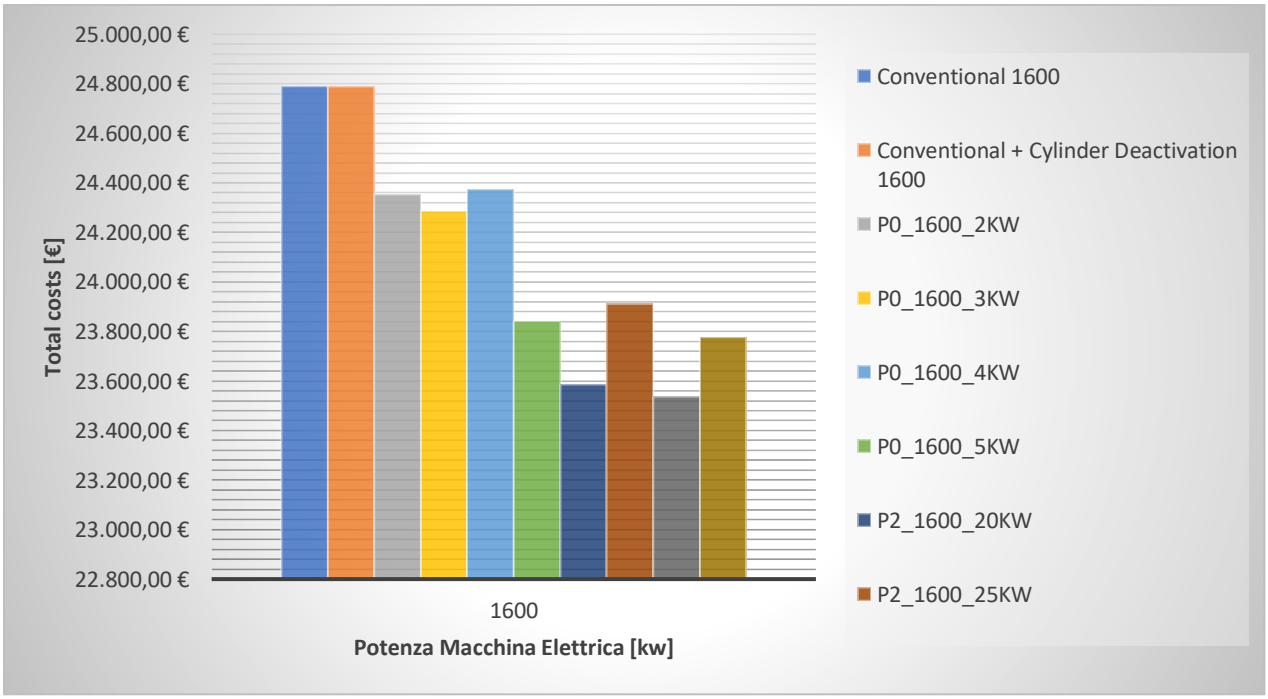


Figura 78: Andamento dei costi totali 1600 cm^3 - 100.000 km percorsi

- 2000 cm^3

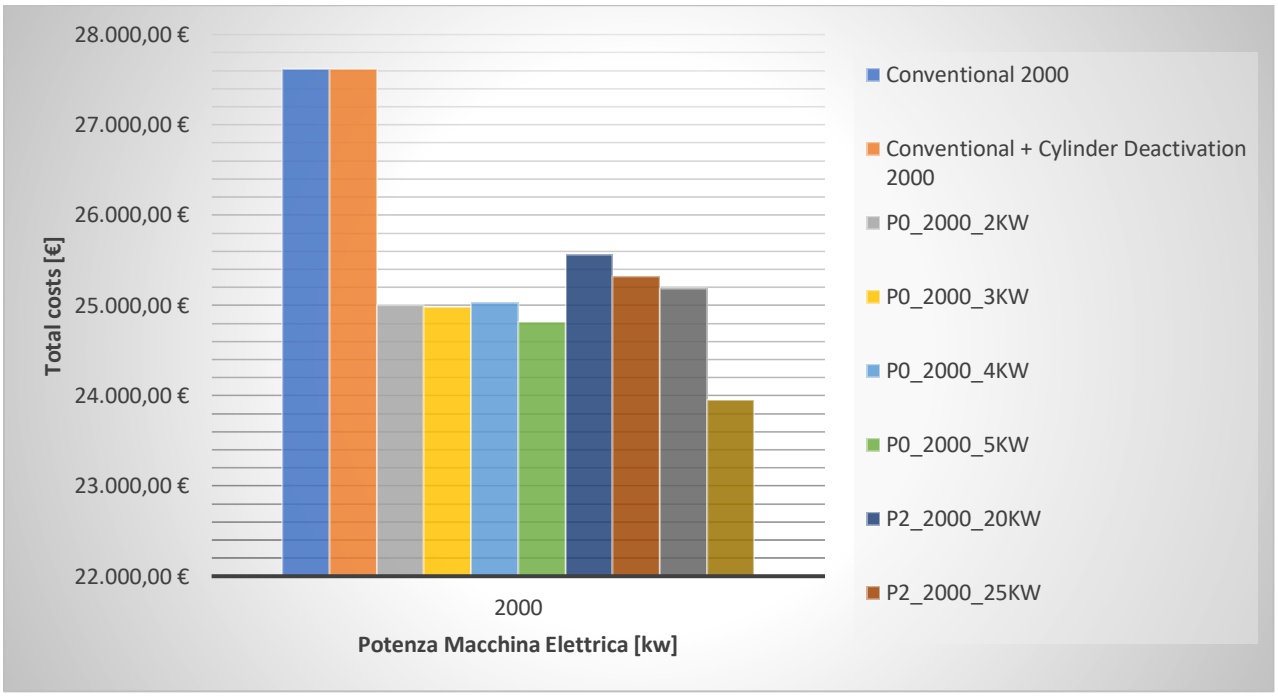


Figura 79: Andamento dei costi totali 2000 cm^3 - 100.000 km percorsi

- 150.000 km percorsi in 10 anni
  - I costi totali sono:
    - 1300 cm^3

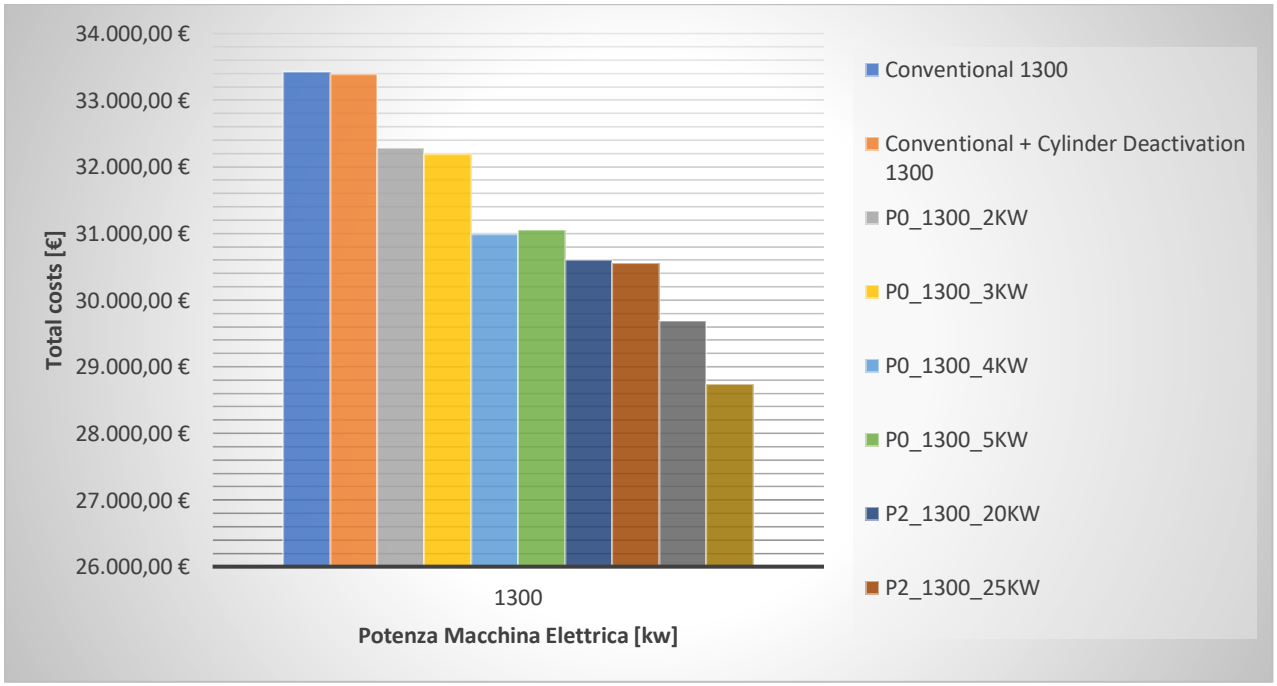


Figura 80: Andamento dei costi totali 1300 cm^3 - 150.000 km percorsi

- 1600 cm^3

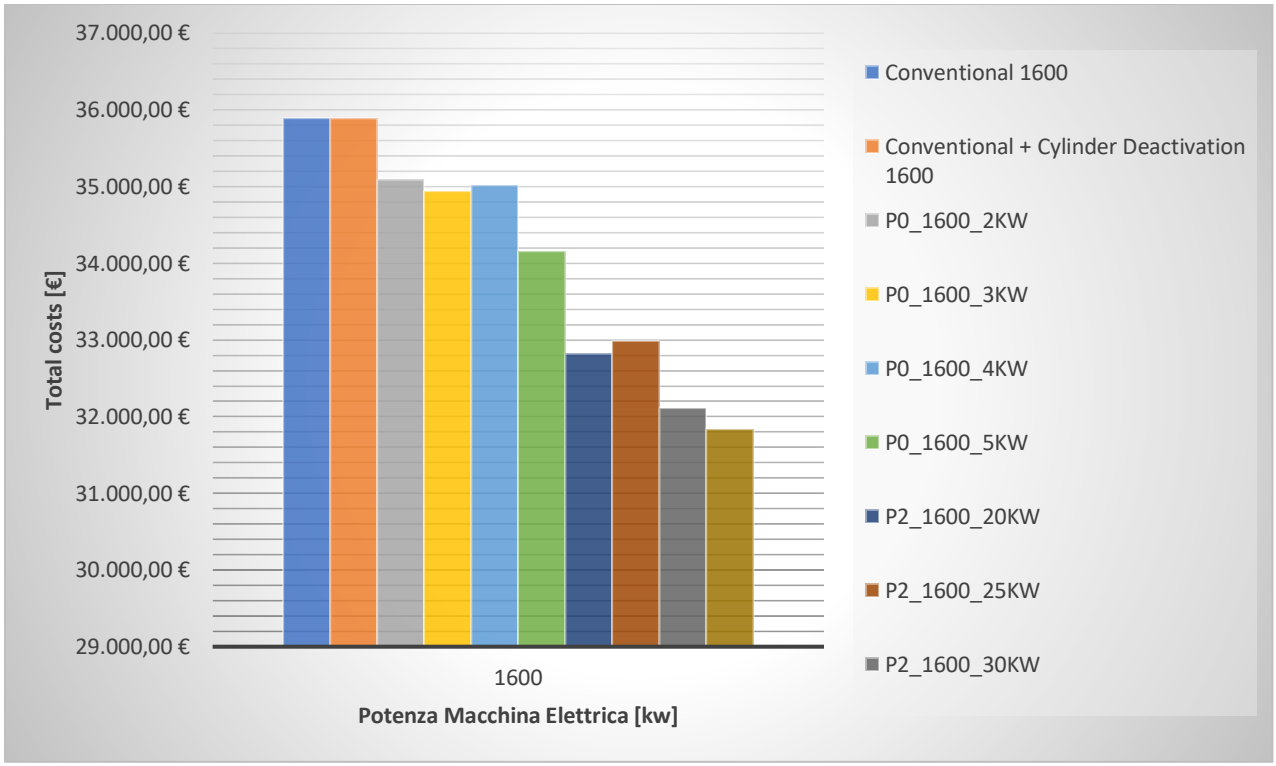


Figura 81: Andamento dei costi totali 1600 cm^3 - 150.000 km percorsi

- 2000 cm^3

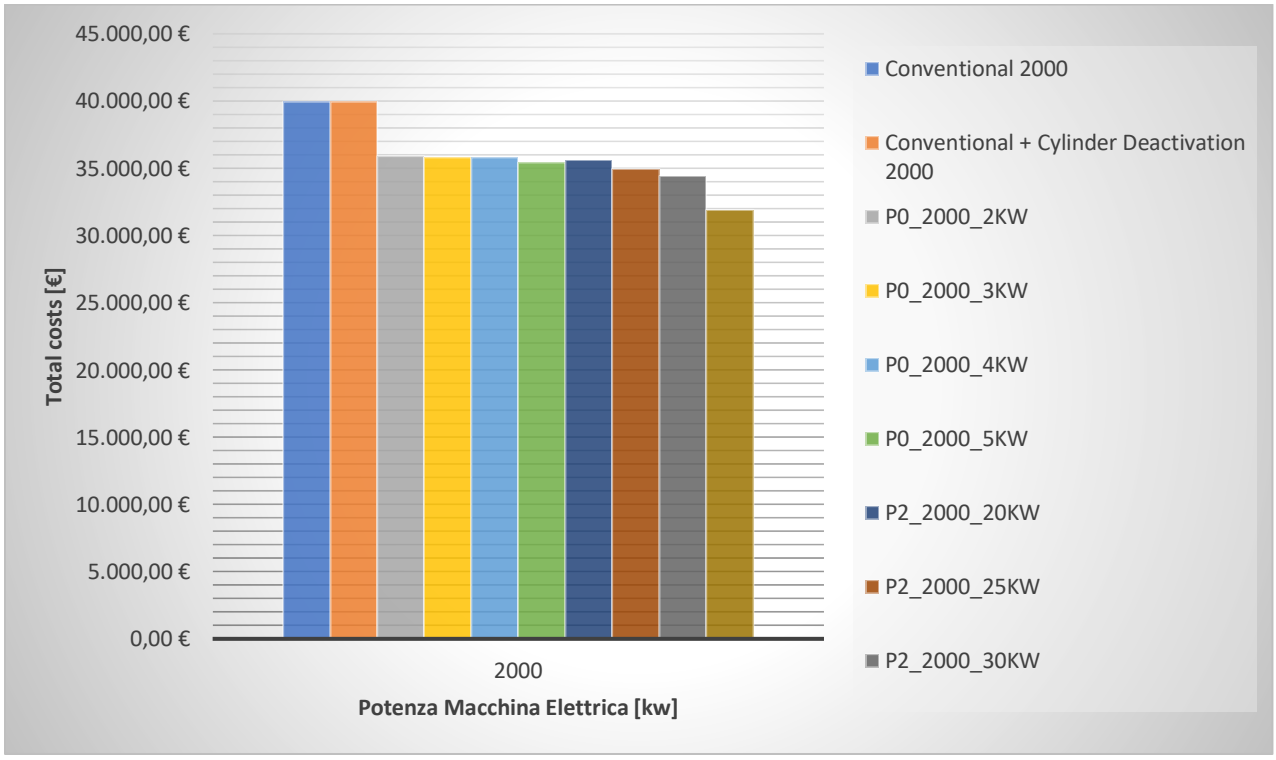


Figura 82: Andamento dei costi totali 2000 cm^3 - 150.000 km percorsi

- 200.000 km percorsi in 10 anni
  - I costi totali sono:
    - 1300 cm^3

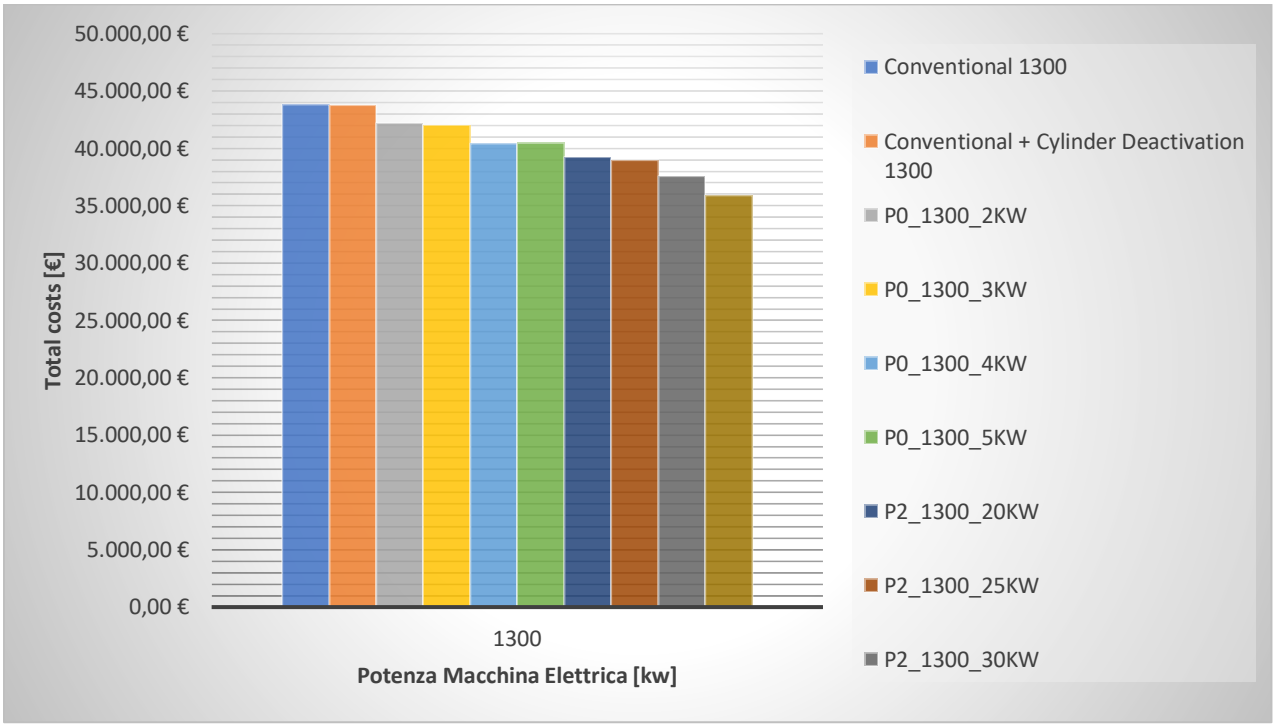


Figura 83: Andamento dei costi totali 1300 cm^3 - 200.000 km percorsi

- 1600 cm^3

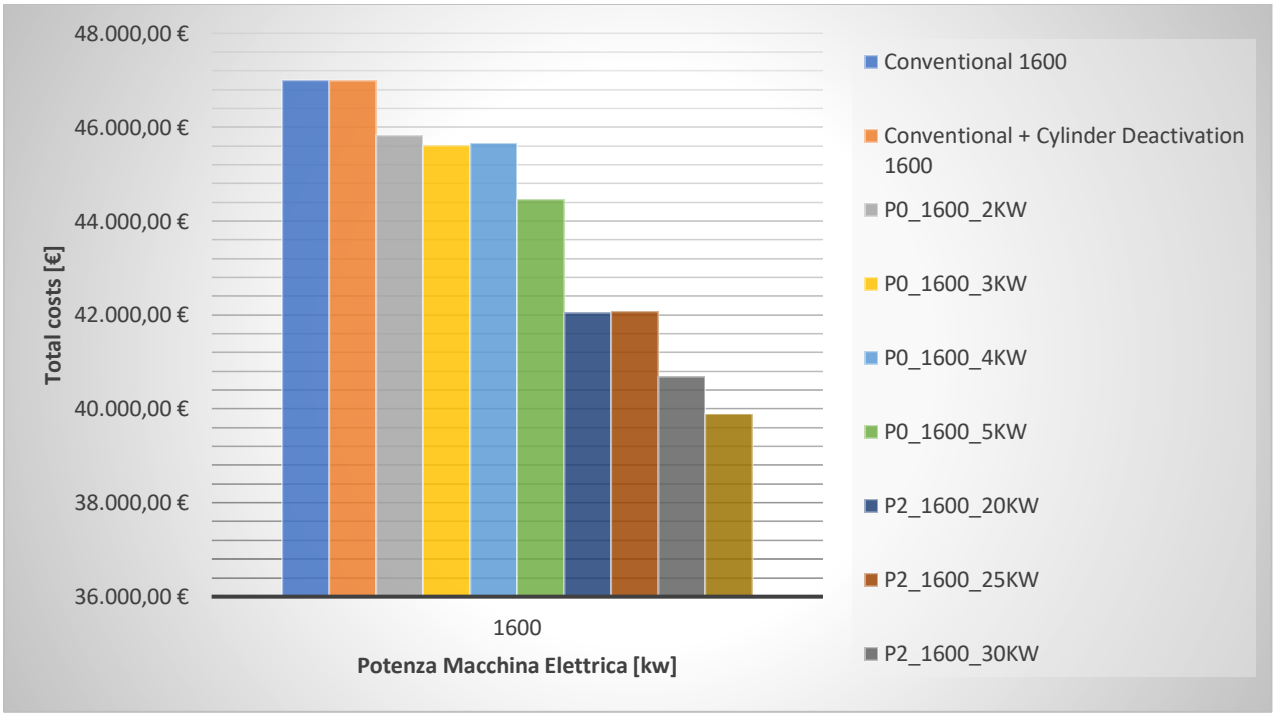


Figura 84: Andamento dei costi totali 1600 cm^3 - 200.000 km percorsi

- 2000 cm^3

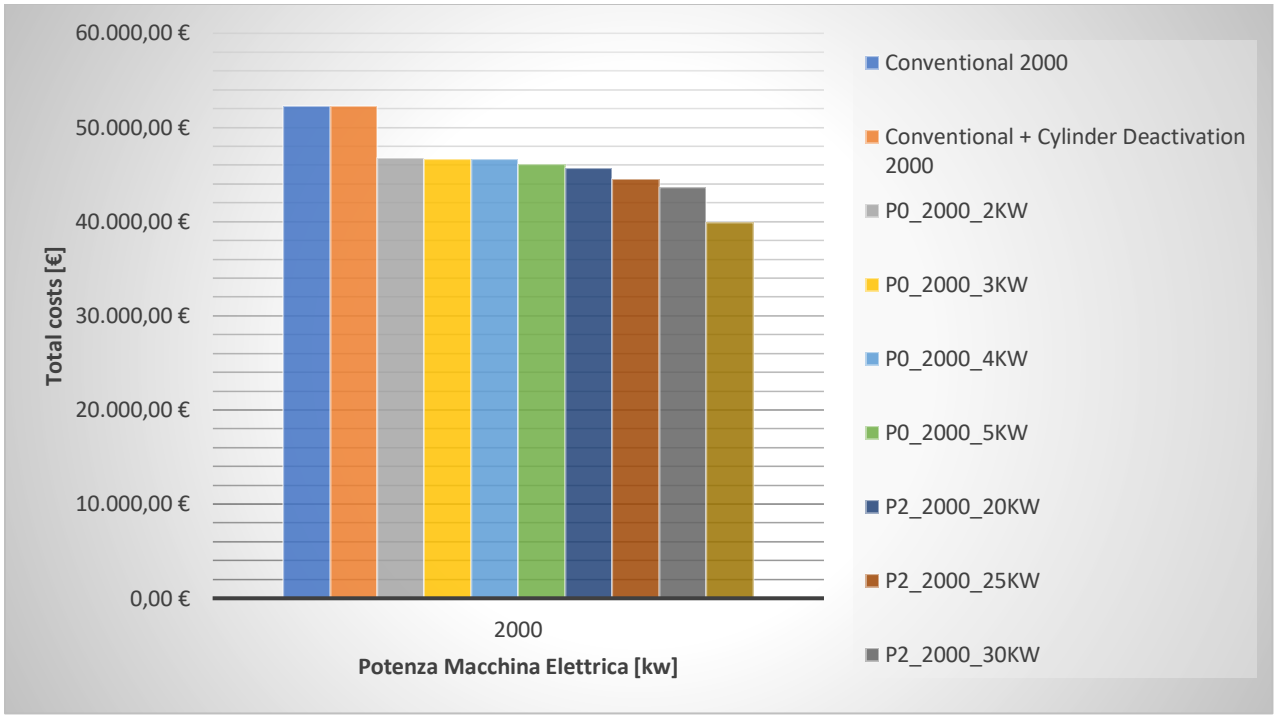


Figura 85: Andamento dei costi totali 2000 cm^3 - 200.000 km percorsi

❖ 300.000 km percorsi in 10 anni
  - I costi totali sono:
    - 1300 cm^3

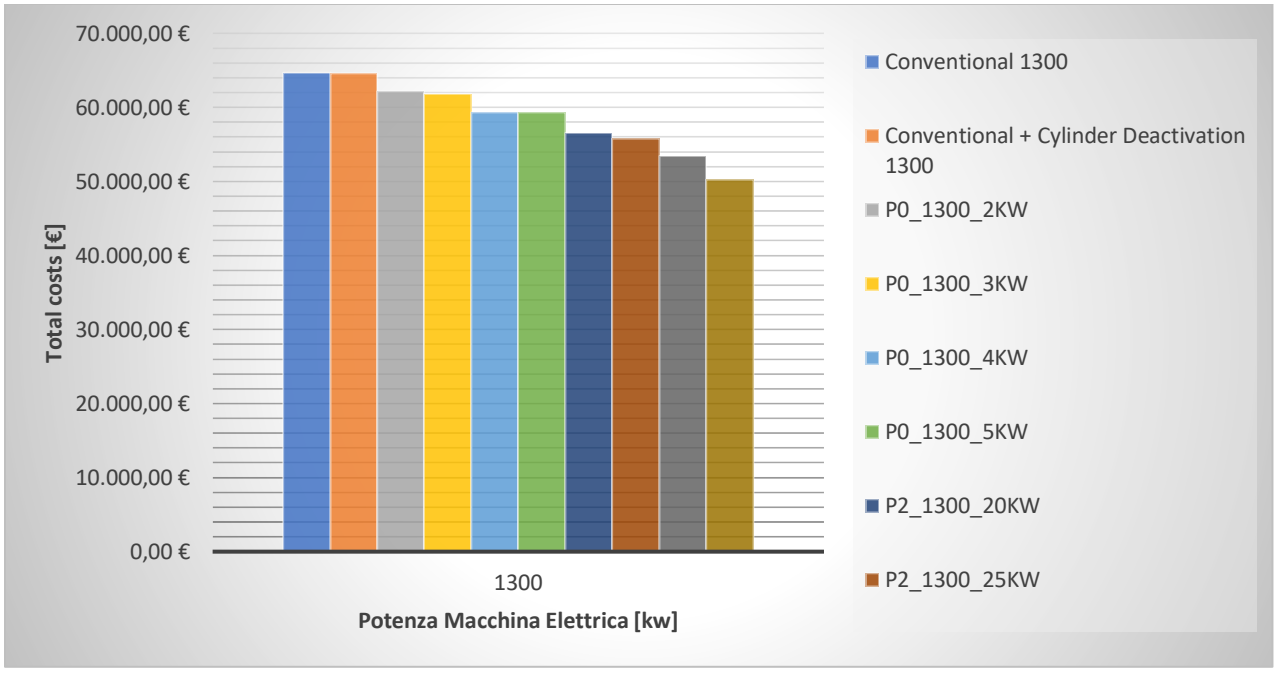


Figura 86: Andamento dei costi totali 1300 cm^3 - 300.000 km percorsi

- 1600 cm^3

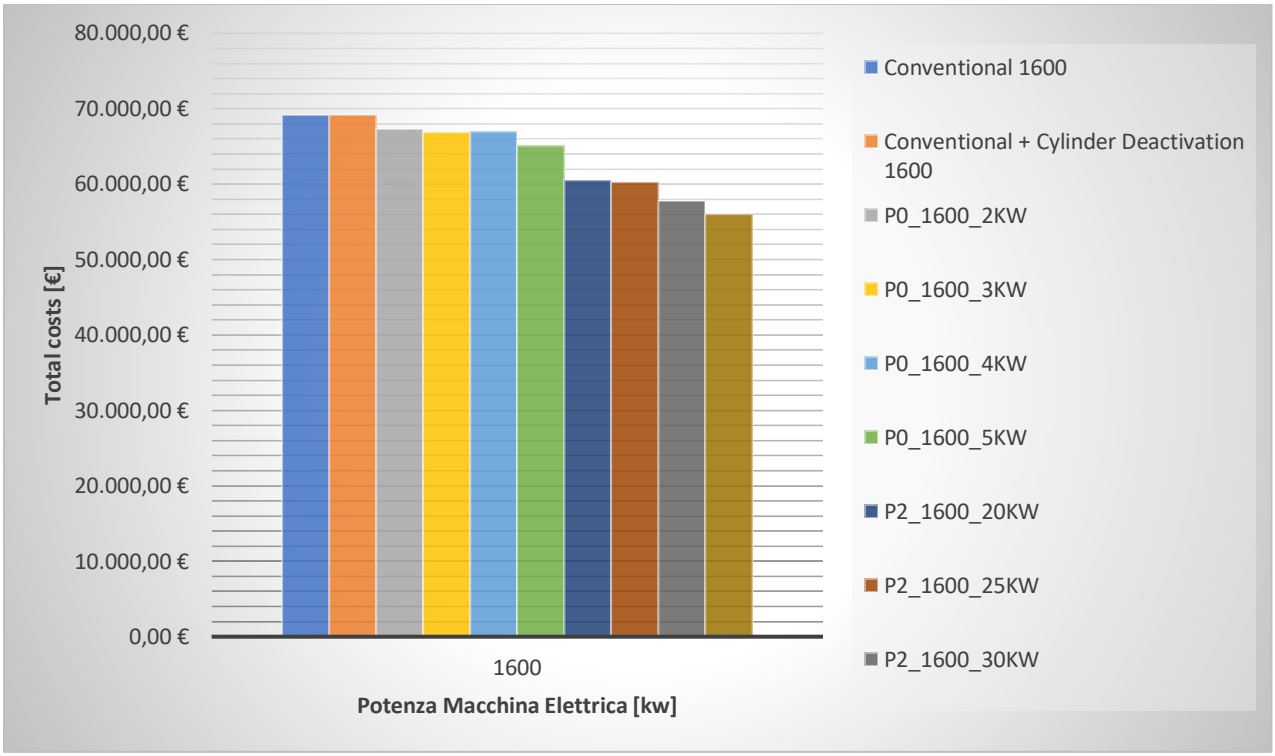


Figura 87: Andamento dei costi totali 2000 cm3 - 200.000 km percorsi

- 2000 cm^3

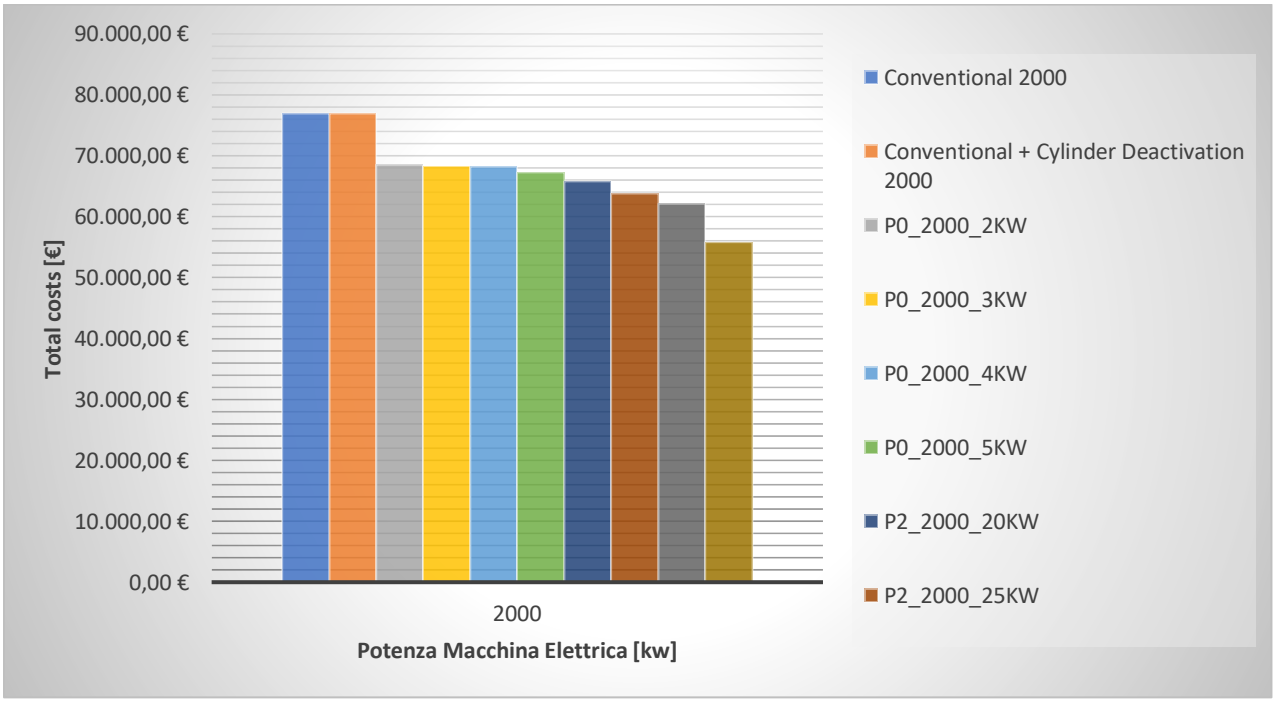


Figura 88: Andamento dei costi totali 2000 cm3 - 300.000 km percorsi

Per poter avere una panoramica globale dei costi in funzione dei chilometri percorsi dalla vettura, vengono elencate di seguito le tabelle riassuntive dove si possono osservare tutti i pesi delle voci che compongono il costo totale:

- Chilometraggio: 0 km
  - Costi Conventional

	1300	***1600***	***2000***
Power maximum engine [KW]	51,5	88	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	0	0	0
Energy content of the battery [KWh]	0	0	0
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.480,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	425,00 €	425,00 €	425,00 €
Cost battery - C_bat [€]	680,00 €	680,00 €	680,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.147,00 €	2.585,00 €	2.939,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	0	0	0
Time horizon - N [year]	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,96711	1,02985	1,14460
Infation index - i [%]	0,17	0,17	0,17
I [-]	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/m^3]	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Discharge battery [A]	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	5,8645	5,8645	5,8645
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	0 €	0 €	0 €
Battery cost' - Cb' [€]	-1.841 €	-1.841 €	-1.841 €
Battery cost- Cb [€]	0 €	0 €	0 €
Deal with cost - OEM [€]	2.147 €	2.585 €	2.939 €
User cost- C_usr [€]	-1.841 €	-1.841 €	-1.841 €
Operating cost - C_op [€]	0 €	0 €	0 €
Total Cost - C_tot [€]	**2.147,00 €**	**2.585,00 €**	**2.939,00 €**

Tabella 19: Elenco costi Coventional - 0 km

- Costi Conventional + Cylinder Deactivation

	1300	*1600*	*2000*
Power maximum engine [KW]	51,5	88	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	0	0	0
Energy content of the battery [KWh]	0	0	0
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.480,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	425,00 €	425,00 €	425,00 €
Cost battery - C_bat [€]	680,00 €	680,00 €	680,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.147,00 €	2.585,00 €	2.939,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	0	0	0
Time horizon - N [year]	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,96592	1,02984	1,14459
Infation index - i [%]	0,17	0,17	0,17
I [-]	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/m^3]	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Discharge battery [A]	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	5,8645	5,8645	5,8645
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	0 €	0 €	0 €
Battery cost' - Cb' [€]	-1.841 €	-1.841 €	-1.841 €
Battery cost- Cb [€]	0 €	0 €	0 €
Deal with cost - OEM [€]	2.147 €	2.585 €	2.939 €
User cost- C_usr [€]	-1.841 €	-1.841 €	-1.841 €
Operating cost - C_op [€]	0 €	0 €	0 €
Total Cost - C_tot [€]	**2.147,00 €**	**2.585,00 €**	**2.939,00 €**

Tabella 20: Elenco costi Coventional + Cylinder Deactivation - 0 km

- P0

	1300			
Power maximum engine [KW]	51,5	51,5	51,5	51,5
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €
Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.435,40 €	2.527,10 €	2.653,80 €	2.780,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	0	0	0	0
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,92308	0,91711	0,87611	0,87417
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Battery cost' - Cb' [€]	-2.504,84 €	-2.694,40 €	-2.978,73 €	-3.263,07 €
Battery cost- Cb [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Deal with cost - OEM [€]	2.435,40 €	2.527,10 €	2.653,80 €	2.780,50 €
User cost- C_usr [€]	-2.504,84 €	-2.694,40 €	-2.978,73 €	-3.263,07 €
Operating cost - C_op [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Total Cost - C_tot [€]	**2.435,40 €**	**2.527,10 €**	**2.653,80 €**	**2.780,50 €**

	1600			
Power maximum engine [KW]	88	88	88	88
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €

Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.873,40 €	2.965,10 €	3.091,80 €	3.218,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	0	0	0	0
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,99624	0,98883	0,98713	0,95652
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Battery cost' - Cb' [€]	-2.504,84 €	-2.694,40 €	-2.978,73 €	-3.263,07 €
Battery cost- Cb [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Deal with cost - OEM [€]	2.873,40 €	2.965,10 €	3.091,80 €	3.218,50 €
User cost- C_usr [€]	-2.504,84 €	-2.694,40 €	-2.978,73 €	-3.263,07 €
Operating cost - C_op [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Total Cost - C_tot [€]	**2.873,40 €**	**2.965,10 €**	**3.091,80 €**	**3.218,50 €**

	2000			
Power maximum engine [KW]	117,5	117,5	117,5	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €
Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	3.227,40 €	3.319,10 €	3.445,80 €	3.572,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	0	0	0	0
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	1,00991	1,00472	1,00112	0,98547
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08

density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Battery cost' - Cb' [€]	-2.504,84 €	-2.694,40 €	-2.978,73 €	-3.263,07 €
Battery cost- Cb [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Deal with cost - OEM [€]	3.227,40 €	3.319,10 €	3.445,80 €	3.572,50 €
User cost- C_usr [€]	-2.504,84 €	-2.694,40 €	-2.978,73 €	-3.263,07 €
Operating cost - C_op [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Total Cost - C_tot [€]	**3.227,40 €**	**3.319,10 €**	**3.445,80 €**	**3.572,50 €**

Tabella 21: Elenco costi P0 - 0 km

- P2

	1300			
Power maximum engine [KW]	51,5	51,5	51,5	51,5
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	4.681,00 €	5.314,50 €	5.948,00 €	7.215,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	0	0	0	0
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,80154	0,78032	0,73413	0,66547
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	- €	- €	- €	- €

Battery cost' - Cb' [€]	- 7.528,07 €	- 8.949,74 €	- 10.371,41 €	- 13.214,74 €
Battery cost- Cb [€]	- €	- €	- €	- €
Deal with cost - OEM [€]	4.681,00 €	5.314,50 €	5.948,00 €	7.215,00 €
User cost- C_usr [€]	- 7.528,07 €	- 8.949,74 €	- 10.371,41 €	- 13.214,74 €
Operating cost - C_op [€]	- €	- €	- €	- €
Total Cost - C_tot [€]	**4.681,00 €**	**5.314,50 €**	**5.948,00 €**	**7.215,00 €**

	1600			
Power maximum engine [KW]	88	88	88	88
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	5.119,00 €	5.752,50 €	6.386,00 €	7.653,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	0	0	0	0
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,85652	0,84224	0,79548	0,74785
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	- €	- €	- €	- €
Battery cost' - Cb' [€]	- 7.528,07 €	- 8.949,74 €	- 10.371,41 €	- 13.214,74 €
Battery cost- Cb [€]	- €	- €	- €	- €
Deal with cost - OEM [€]	5.119,00 €	5.752,50 €	6.386,00 €	7.653,00 €
User cost- C_usr [€]	- 7.528,07 €	- 8.949,74 €	- 10.371,41 €	- 13.214,74 €
Operating cost - C_op [€]	- €	- €	- €	- €
Total Cost - C_tot [€]	**5.119,00 €**	**5.752,50 €**	**6.386,00 €**	**7.653,00 €**

	2000			
Power maximum engine [KW]	117,5	117,5	117,5	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	5.473,00 €	6.106,50 €	6.740,00 €	8.007,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	0	0	0	0
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,93187	0,89134	0,85569	0,73970
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	- €	- €	- €	- €
Battery cost' - Cb' [€]	- 7.528,07 €	- 8.949,74 €	- 10.371,41 €	- 13.214,74 €
Battery cost- Cb [€]	- €	- €	- €	- €
Deal with cost - OEM [€]	5.473,00 €	6.106,50 €	6.740,00 €	8.007,00 €
User cost- C_usr [€]	- 7.528,07 €	- 8.949,74 €	- 10.371,41 €	- 13.214,74 €
Operating cost - C_op [€]	- €	- €	- €	- €
Total Cost - C_tot [€]	**5.473,00 €**	**6.106,50 €**	**6.740,00 €**	**8.007,00 €**

Tabella 22: Elenco costi P2 - 0 km

- Chilometraggio: 50.000 km
  - Conventional

	1300	*1600*	*2000*
Power maximum engine [KW]	51,5	88	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	0	0	0
Energy content of the battery [KWh]	0	0	0
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.480,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	425,00 €	425,00 €	425,00 €
Cost battery - C_bat [€]	680,00 €	680,00 €	680,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.147,00 €	2.585,00 €	2.939,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	50000	50000	50000
Time horizon - N [year]	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,96711	1,02985	1,14460
Infation index - i [%]	0,17	0,17	0,17
I [-]	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/m^3]	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	10.425,83 €	11.102,16 €	12.339,25 €
Discharge battery [A]	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	5,8645	5,8645	5,8645
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	1 €	1 €	1 €
Battery cost' - Cb' [€]	-681 €	-681 €	-681 €
Battery cost- Cb [€]	0 €	0 €	0 €
Deal with cost - OEM [€]	2.147 €	2.585 €	2.939 €
User cost- C_usr [€]	9.745 €	10.421 €	11.658 €
Operating cost - C_op [€]	10.426 €	11.102 €	12.339 €
Total Cost - C_tot [€]	**12.572,83 €**	**13.687,16 €**	**15.278,25 €**

Tabella 23: Elenco costi Conventional - 50.000 km

- Conventional + Cylinder Deactivation

	1300	*1600*	*2000*
Power maximum engine [KW]	51,5	88	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	0	0	0
Energy content of the battery [KWh]	0	0	0
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.480,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	425,00 €	425,00 €	425,00 €
Cost battery - C_bat [€]	680,00 €	680,00 €	680,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.147,00 €	2.585,00 €	2.939,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	50000	50000	50000
Time horizon - N [year]	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,96592	1,02984	1,14459
Infation index - i [%]	0,17	0,17	0,17
I [-]	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/m^3]	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	10.413,00 €	11.102,09 €	12.339,14 €
Discharge battery [A]	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	5,8645	5,8645	5,8645
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	1 €	1 €	1 €
Battery cost' - Cb' [€]	-681 €	-681 €	-681 €
Battery cost- Cb [€]	0 €	0 €	0 €
Deal with cost - OEM [€]	2.147 €	2.585 €	2.939 €
User cost- C_usr [€]	9.732 €	10.421 €	11.658 €
Operating cost - C_op [€]	10.413 €	11.102 €	12.339 €
Total Cost - C_tot [€]	**12.560,00 €**	**13.687,09 €**	**15.278,14 €**

Tabella 24: Elenco costi Conventional + Cylinder Deactivation - 50.000 km

- P0

	1300			
Power maximum engine [KW]	51,5	51,5	51,5	51,5
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €
Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.435,40 €	2.527,10 €	2.653,80 €	2.780,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	50000	50000	50000	50000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,92308	0,91711	0,87611	0,87417
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	9.951,22 €	9.886,86 €	9.444,79 €	9.423,92 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	0,43 €	0,63 €	0,63 €	0,63 €
Battery cost' - Cb' [€]	-1.427,01 €	-996,50 €	-1.101,66 €	-1.206,82 €
Battery cost- Cb [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Deal with cost - OEM [€]	2.435,40 €	2.527,10 €	2.653,80 €	2.780,50 €
User cost- C_usr [€]	8.524,21 €	8.890,36 €	8.343,13 €	8.217,10 €
Operating cost - C_op [€]	9.951,22 €	9.886,86 €	9.444,79 €	9.423,92 €
Total Cost - C_tot [€]	**12.386,62 €**	**12.413,96 €**	**12.098,59 €**	**12.204,42 €**

	1600			
Power maximum engine [KW]	88	88	88	88
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €

Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €
Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.873,40 €	2.965,10 €	3.091,80 €	3.218,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	50000	50000	50000	50000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,99624	0,98883	0,98713	0,95652
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	10.739,92 €	10.659,97 €	10.641,68 €	10.311,70 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	0,43 €	0,63 €	0,63 €	0,63 €
Battery cost' - Cb' [€]	-1.427,01 €	-996,50 €	-1.101,66 €	-1.206,82 €
Battery cost- Cb [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Deal with cost - OEM [€]	2.873,40 €	2.965,10 €	3.091,80 €	3.218,50 €
User cost- C_usr [€]	9.312,91 €	9.663,47 €	9.540,02 €	9.104,88 €
Operating cost - C_op [€]	10.739,92 €	10.659,97 €	10.641,68 €	10.311,70 €
Total Cost - C_tot [€]	**13.613,32 €**	**13.625,07 €**	**13.733,48 €**	**13.530,20 €**

	2000			
Power maximum engine [KW]	117,5	117,5	117,5	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €
Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	3.227,40 €	3.319,10 €	3.445,80 €	3.572,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	50000	50000	50000	50000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	1,00991	1,00472	1,00112	0,98547
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169

I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	10.887,21 €	10.831,31 €	10.792,46 €	10.623,71 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	0,43 €	0,63 €	0,63 €	0,63 €
Battery cost' - Cb' [€]	-1.427,01 €	-996,50 €	-1.101,66 €	-1.206,82 €
Battery cost- Cb [€]	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Deal with cost - OEM [€]	3.227,40 €	3.319,10 €	3.445,80 €	3.572,50 €
User cost- C_usr [€]	9.460,20 €	9.834,81 €	9.690,79 €	9.416,89 €
Operating cost - C_op [€]	10.887,21 €	10.831,31 €	10.792,46 €	10.623,71 €
Total Cost - C_tot [€]	**14.114,61 €**	**14.150,41 €**	**14.238,26 €**	**14.196,21 €**

Tabella 25: Elenco Costi P0 - 50.000 km

- P2

	1300			
Power maximum engine [KW]	51,5	51,5	51,5	51,5
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	4.681,00 €	5.314,50 €	5.948,00 €	7.215,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	50000	50000	50000	50000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,80154	0,78032	0,73413	0,66547
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	8.640,95 €	8.412,19 €	7.914,18 €	7.174,02 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000

Price of sostitution battery [€]	0,48 €	0,48 €	0,48 €	0,44 €
Battery cost' - Cb' [€]	- 3.913,58 €	- 4.677,01 €	- 5.438,90 €	- 7.446,85 €
Battery cost- Cb [€]	- €	- €	- €	- €
Deal with cost - OEM [€]	4.681,00 €	5.314,50 €	5.948,00 €	7.215,00 €
User cost- C_usr [€]	4.727,37 €	3.735,17 €	2.475,27 €	- 272,84 €
Operating cost - C_op [€]	8.640,95 €	8.412,19 €	7.914,18 €	7.174,02 €
Total Cost - C_tot [€]	**13.321,95 €**	**13.726,69 €**	**13.862,18 €**	**14.389,02 €**

	1600			
Power maximum engine [KW]	88	88	88	88
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	5.119,00 €	5.752,50 €	6.386,00 €	7.653,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	50000	50000	50000	50000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,85652	0,84224	0,79548	0,74785
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	9.233,59 €	9.079,66 €	8.575,54 €	8.062,15 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	0,48 €	0,48 €	0,48 €	0,44 €
Battery cost' - Cb' [€]	- 3.913,58 €	- 4.677,01 €	- 5.438,90 €	- 7.446,85 €
Battery cost- Cb [€]	- €	- €	- €	- €
Deal with cost - OEM [€]	5.119,00 €	5.752,50 €	6.386,00 €	7.653,00 €
User cost- C_usr [€]	5.320,01 €	4.402,65 €	3.136,64 €	615,29 €
Operating cost - C_op [€]	9.233,59 €	9.079,66 €	8.575,54 €	8.062,15 €
Total Cost - C_tot [€]	**14.352,59 €**	**14.832,16 €**	**14.961,54 €**	**15.715,15 €**

	2000			
Power maximum engine [KW]	117,5	117,5	117,5	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	5.473,00 €	6.106,50 €	6.740,00 €	8.007,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	50000	50000	50000	50000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,93187	0,89134	0,85569	0,73970
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	10.045,93 €	9.609,02 €	9.224,67 €	7.974,23 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	0,48 €	0,48 €	0,48 €	0,44 €
Battery cost' - Cb' [€]	- 3.913,58 €	- 4.677,01 €	- 5.438,90 €	- 7.446,85 €
Battery cost- Cb [€]	- €	- €	- €	- €
Deal with cost - OEM [€]	5.473,00 €	6.106,50 €	6.740,00 €	8.007,00 €
User cost- C_usr [€]	6.132,35 €	4.932,00 €	3.785,76 €	527,38 €
Operating cost - C_op [€]	10.045,93 €	9.609,02 €	9.224,67 €	7.974,23 €
Total Cost - C_tot [€]	**15.518,93 €**	**15.715,52 €**	**15.964,67 €**	**15.981,23 €**

Tabella 26: Elenco Costi P2 - 50.000 km

- Chilometraggio: 100.000 km
  - Conventional

	1300	*1600*	*2000*
Power maximum engine [KW]	51,5	88	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	0	0	0
Energy content of the battery [KWh]	0	0	0
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.480,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	425,00 €	425,00 €	425,00 €
Cost battery - C_bat [€]	680,00 €	680,00 €	680,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.147,00 €	2.585,00 €	2.939,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	100000	100000	100000
Time horizon - N [year]	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,96711	1,02985	1,14460
Infation index - i [%]	0,17	0,17	0,17
I [-]	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/m^3]	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	20.851,67 €	22.204,33 €	24.678,49 €
Discharge battery [A]	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	5,8645	5,8645	5,8645
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	1 €	1 €	1 €
Battery cost' - Cb' [€]	479 €	479 €	479 €
Battery cost- Cb [€]	479 €	479 €	479 €
Deal with cost - OEM [€]	2.387 €	2.825 €	3.179 €
User cost- C_usr [€]	21.091 €	22.444 €	24.918 €
Operating cost - C_op [€]	21.331 €	22.684 €	25.158 €
Total Cost - C_tot [€]	**22.998,67 €**	**24.789,33 €**	**27.617,49 €**

Tabella 27: Elenco Costi Conventional - 100.000 km

- Conventional + Cylinder Deactivation

	1300	1600	2000
Power maximum engine [KW]	51,5	88	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	0	0	0
Energy content of the battery [KWh]	0	0	0
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.480,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	425,00 €	425,00 €	425,00 €
Cost battery - C_bat [€]	680,00 €	680,00 €	680,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.147,00 €	2.585,00 €	2.939,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	100000	100000	100000
Time horizon - N [year]	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,96592	1,02984	1,14459
Infation index - i [%]	0,17	0,17	0,17
I [-]	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/m^3]	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	20.826,01 €	22.204,18 €	24.678,28 €
Discharge battery [A]	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	5,8645	5,8645	5,8645
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	1 €	1 €	1 €
Battery cost' - Cb' [€]	479 €	479 €	479 €
Battery cost- Cb [€]	479 €	479 €	479 €
Deal with cost - OEM [€]	2.387 €	2.825 €	3.179 €
User cost- C_usr [€]	21.066 €	22.444 €	24.918 €
Operating cost - C_op [€]	21.305 €	22.684 €	25.158 €
Total Cost - C_tot [€]	**22.973,01 €**	**24.789,18 €**	**27.617,28 €**

Tabella 28: Elenco Costi Conventional + Cylinder Deactivation - 100.000 km

- P0

	1300			
Power maximum engine [KW]	51,5	51,5	51,5	51,5
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5

Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €
Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.435,40 €	2.527,10 €	2.653,80 €	2.780,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	100000	100000	100000	100000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,92308	0,91711	0,87611	0,87417
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	19.902,44 €	19.773,72 €	18.889,58 €	18.847,84 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	0,86 €	1,26 €	1,26 €	1,26 €
Battery cost' - Cb' [€]	-349,17 €	701,39 €	775,41 €	849,43 €
Battery cost- Cb [€]	0,00 €	701,39 €	775,41 €	849,43 €
Deal with cost - OEM [€]	2.435,40 €	2.877,80 €	3.041,51 €	3.205,21 €
User cost- C_usr [€]	19.553,27 €	20.124,42 €	19.277,29 €	19.272,55 €
Operating cost - C_op [€]	19.902,44 €	20.475,12 €	19.664,99 €	19.697,27 €
Total Cost - C_tot [€]	**22.337,84 €**	**22.300,82 €**	**21.543,38 €**	**21.628,34 €**

	1600			
Power maximum engine [KW]	88	88	88	88
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €
Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.873,40 €	2.965,10 €	3.091,80 €	3.218,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	100000	100000	100000	100000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,99624	0,98883	0,98713	0,95652

Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	21.479,83 €	21.319,94 €	21.283,36 €	20.623,40 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	0,86 €	1,26 €	1,26 €	1,26 €
Battery cost' - Cb' [€]	-349,17 €	701,39 €	775,41 €	849,43 €
Battery cost- Cb [€]	0,00 €	701,39 €	775,41 €	849,43 €
Deal with cost - OEM [€]	2.873,40 €	3.315,80 €	3.479,51 €	3.643,21 €
User cost- C_usr [€]	21.130,66 €	21.670,64 €	21.671,07 €	21.048,12 €
Operating cost - C_op [€]	21.479,83 €	22.021,34 €	22.058,77 €	21.472,83 €
Total Cost - C_tot [€]	**24.353,23 €**	**24.285,04 €**	**24.375,16 €**	**23.841,90 €**

	2000			
Power maximum engine [KW]	117,5	117,5	117,5	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €
Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	3.227,40 €	3.319,10 €	3.445,80 €	3.572,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	100000	100000	100000	100000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	1,00991	1,00472	1,00112	0,98547
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	21.774,42 €	21.662,62 €	21.584,91 €	21.247,43 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	0,86 €	1,26 €	1,26 €	1,26 €

Battery cost' - Cb' [€]	-349,17 €	701,39 €	775,41 €	849,43 €
Battery cost- Cb [€]	0,00 €	701,39 €	775,41 €	849,43 €
Deal with cost - OEM [€]	3.227,40 €	3.669,80 €	3.833,51 €	3.997,21 €
User cost- C_usr [€]	21.425,25 €	22.013,32 €	21.972,62 €	21.672,14 €
Operating cost - C_op [€]	21.774,42 €	22.364,01 €	22.360,32 €	22.096,85 €
Total Cost - C_tot [€]	**25.001,82 €**	**24.981,72 €**	**25.030,71 €**	**24.819,93 €**

Tabella 29: Elenco Costi P0 - 100.000 km

- P2

	1300			
Power maximum engine [KW]	51,5	51,5	51,5	51,5
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	4.681,00 €	5.314,50 €	5.948,00 €	7.215,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	100000	100000	100000	100000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,80154	0,78032	0,73413	0,66547
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	17.281,89 €	16.824,38 €	15.828,35 €	14.348,03 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	0,96 €	0,95 €	0,95 €	0,87 €
Battery cost' - Cb' [€]	- 299,08 €	- 404,29 €	- 506,40 €	- 1.678,96 €
Battery cost- Cb [€]	- €	- €	- €	- €
Deal with cost - OEM [€]	4.681,00 €	5.314,50 €	5.948,00 €	7.215,00 €
User cost- C_usr [€]	16.982,81 €	16.420,09 €	15.321,95 €	12.669,07 €
Operating cost - C_op [€]	17.281,89 €	16.824,38 €	15.828,35 €	14.348,03 €
Total Cost - C_tot [€]	**21.962,89 €**	**22.138,88 €**	**21.776,35 €**	**21.563,03 €**

	1600			
Power maximum engine [KW]	88	88	88	88
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	5.119,00 €	5.752,50 €	6.386,00 €	7.653,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	100000	100000	100000	100000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,85652	0,84224	0,79548	0,74785
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	18.467,17 €	18.159,32 €	17.151,08 €	16.124,29 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	0,96 €	0,95 €	0,95 €	0,87 €
Battery cost' - Cb' [€]	- 299,08 €	- 404,29 €	- 506,40 €	- 1.678,96 €
Battery cost- Cb [€]	- €	- €	- €	- €
Deal with cost - OEM [€]	5.119,00 €	5.752,50 €	6.386,00 €	7.653,00 €
User cost- C_usr [€]	18.168,09 €	17.755,03 €	16.644,68 €	14.445,33 €
Operating cost - C_op [€]	18.467,17 €	18.159,32 €	17.151,08 €	16.124,29 €
Total Cost - C_tot [€]	**23.586,17 €**	**23.911,82 €**	**23.537,08 €**	**23.777,29 €**

	2000			
Power maximum engine [KW]	117,5	117,5	117,5	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	5.473,00 €	6.106,50 €	6.740,00 €	8.007,00 €

Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	100000	100000	100000	100000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,93187	0,89134	0,85569	0,73970
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	20.091,86 €	19.218,03 €	18.449,33 €	15.948,46 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	0,96 €	0,95 €	0,95 €	0,87 €
Battery cost' - Cb' [€]	- 299,08 €	- 404,29 €	- 506,40 €	- 1.678,96 €
Battery cost- Cb [€]	- €	- €	- €	- €
Deal with cost - OEM [€]	5.473,00 €	6.106,50 €	6.740,00 €	8.007,00 €
User cost- C_usr [€]	19.792,78 €	18.813,75 €	17.942,93 €	14.269,50 €
Operating cost - C_op [€]	20.091,86 €	19.218,03 €	18.449,33 €	15.948,46 €
Total Cost - C_tot [€]	**25.564,86 €**	**25.324,53 €**	**25.189,33 €**	**23.955,46 €**

Tabella 30: Elenco Costi P2 - 100.000 km

- Chilometraggio: 150.000 km
  - Conventional

	1300	***1600***	***2000***
Power maximum engine [KW]	51,5	88	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	0	0	0
Energy content of the battery [KWh]	0	0	0
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.480,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	425,00 €	425,00 €	425,00 €
Cost battery - C_bat [€]	680,00 €	680,00 €	680,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.147,00 €	2.585,00 €	2.939,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	150000	150000	150000
Time horizon - N [year]	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,96711	1,02985	1,14460
Infation index - i [%]	0,17	0,17	0,17

I [-]	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/m^3]	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	31.277,50 €	33.306,49 €	37.017,74 €
Discharge battery [A]	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	5,8645	5,8645	5,8645
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	2 €	2 €	2 €
Battery cost' - Cb' [€]	1.640 €	1.640 €	1.640 €
Battery cost- Cb [€]	1.640 €	1.640 €	1.640 €
Deal with cost - OEM [€]	2.967 €	3.405 €	3.759 €
User cost- C_usr [€]	32.097 €	34.126 €	37.838 €
Operating cost - C_op [€]	32.917 €	34.946 €	38.657 €
Total Cost - C_tot [€]	**33.424,50 €**	**35.891,49 €**	**39.956,74 €**

Tabella 31: Elenco Costi Conventional - 150.000 km

- Conventional + Cylinder Deactivation

	1300	***1600***	***2000***
Power maximum engine [KW]	51,5	88	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	0	0	0
Energy content of the battery [KWh]	0	0	0
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.480,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	425,00 €	425,00 €	425,00 €
Cost battery - C_bat [€]	680,00 €	680,00 €	680,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.147,00 €	2.585,00 €	2.939,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	150000	150000	150000
Time horizon - N [year]	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,96592	1,02984	1,14459
Infation index - i [%]	0,17	0,17	0,17
I [-]	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/m^3]	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	31.239,01 €	33.306,26 €	37.017,42 €
Discharge battery [A]	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	5,8645	5,8645	5,8645
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000

Price of sostitution battery [€]	2 €	2 €	2 €
Battery cost' - Cb' [€]	1.640 €	1.640 €	1.640 €
Battery cost- Cb [€]	1.640 €	1.640 €	1.640 €
Deal with cost - OEM [€]	2.967 €	3.405 €	3.759 €
User cost- C_usr [€]	32.059 €	34.126 €	37.837 €
Operating cost - C_op [€]	32.879 €	34.946 €	38.657 €
Total Cost - C_tot [€]	**33.386,01 €**	**35.891,26 €**	**39.956,42 €**

Tabella 32: Elenco Costi Conventional +Cylinder Deactivation - 150.000 km

- P0

	1300			
Power maximum engine [KW]	51,5	51,5	51,5	51,5
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €
Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.435,40 €	2.527,10 €	2.653,80 €	2.780,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	150000	150000	150000	150000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,92308	0,91711	0,87611	0,87417
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	29.853,67 €	29.660,59 €	28.334,37 €	28.271,76 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	1,29 €	1,89 €	1,89 €	1,89 €
Battery cost' - Cb' [€]	728,66 €	2.399,29 €	2.652,48 €	2.905,67 €
Battery cost- Cb [€]	728,66 €	2.399,29 €	2.652,48 €	2.905,67 €
Deal with cost - OEM [€]	2.799,73 €	3.726,75 €	3.980,04 €	4.233,34 €
User cost- C_usr [€]	30.218,00 €	30.860,23 €	29.660,62 €	29.724,60 €
Operating cost - C_op [€]	30.582,33 €	32.059,88 €	30.986,86 €	31.177,43 €
Total Cost - C_tot [€]	**32.289,07 €**	**32.187,69 €**	**30.988,17 €**	**31.052,26 €**

	1600			
Power maximum engine [KW]	88	88	88	88
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €
Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.873,40 €	2.965,10 €	3.091,80 €	3.218,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	150000	150000	150000	150000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,99624	0,98883	0,98713	0,95652
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	32.219,75 €	31.979,92 €	31.925,05 €	30.935,11 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	1,29 €	1,89 €	1,89 €	1,89 €
Battery cost' - Cb' [€]	728,66 €	2.399,29 €	2.652,48 €	2.905,67 €
Battery cost- Cb [€]	728,66 €	2.399,29 €	2.652,48 €	2.905,67 €
Deal with cost - OEM [€]	3.237,73 €	4.164,75 €	4.418,04 €	4.671,34 €
User cost- C_usr [€]	32.584,08 €	33.179,56 €	33.251,29 €	32.387,94 €
Operating cost - C_op [€]	32.948,41 €	34.379,21 €	34.577,53 €	33.840,78 €
Total Cost - C_tot [€]	**35.093,15 €**	**34.945,02 €**	**35.016,85 €**	**34.153,61 €**

	2000			
Power maximum engine [KW]	117,5	117,5	117,5	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €
Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	3.227,40 €	3.319,10 €	3.445,80 €	3.572,50 €

Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	150000	150000	150000	150000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	1,00991	1,00472	1,00112	0,98547
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	32.661,64 €	32.493,93 €	32.377,37 €	31.871,14 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	1,29 €	1,89 €	1,89 €	1,89 €
Battery cost' - Cb' [€]	728,66 €	2.399,29 €	2.652,48 €	2.905,67 €
Battery cost- Cb [€]	728,66 €	2.399,29 €	2.652,48 €	2.905,67 €
Deal with cost - OEM [€]	3.591,73 €	4.518,75 €	4.772,04 €	5.025,34 €
User cost- C_usr [€]	33.025,97 €	33.693,58 €	33.703,61 €	33.323,98 €
Operating cost - C_op [€]	33.390,30 €	34.893,22 €	35.029,85 €	34.776,81 €
Total Cost - C_tot [€]	**35.889,04 €**	**35.813,03 €**	**35.823,17 €**	**35.443,64 €**

Tabella 33: Elenco Costi P0 - 150.000 km

- P2

	1300			
Power maximum engine [KW]	51,5	51,5	51,5	51,5
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	4.681,00 €	5.314,50 €	5.948,00 €	7.215,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	150000	150000	150000	150000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,80154	0,78032	0,73413	0,66547
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08

density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	25.922,84 €	25.236,56 €	23.742,53 €	21.522,05 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	1,44 €	1,43 €	1,43 €	1,31 €
Battery cost' - Cb' [€]	3.315,41 €	3.868,44 €	4.426,10 €	4.088,93 €
Battery cost- Cb [€]	3.315,41 €	3.868,44 €	4.426,10 €	4.088,93 €
Deal with cost - OEM [€]	6.338,71 €	7.248,72 €	8.161,05 €	9.259,46 €
User cost- C_usr [€]	27.580,54 €	27.170,78 €	25.955,58 €	23.566,51 €
Operating cost - C_op [€]	29.238,25 €	29.105,00 €	28.168,63 €	25.610,97 €
Total Cost - C_tot [€]	**30.603,84 €**	**30.551,06 €**	**29.690,53 €**	**28.737,05 €**

	1600			
Power maximum engine [KW]	88	88	88	88
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	5.119,00 €	5.752,50 €	6.386,00 €	7.653,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	150000	150000	150000	150000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,85652	0,84224	0,79548	0,74785
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	27.700,76 €	27.238,98 €	25.726,63 €	24.186,44 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	1,44 €	1,43 €	1,43 €	1,31 €
Battery cost' - Cb' [€]	3.315,41 €	3.868,44 €	4.426,10 €	4.088,93 €
Battery cost- Cb [€]	3.315,41 €	3.868,44 €	4.426,10 €	4.088,93 €

Deal with cost - OEM [€]	6.776,71 €	7.686,72 €	8.599,05 €	9.697,46 €
User cost- C_usr [€]	29.358,47 €	29.173,20 €	27.939,68 €	26.230,90 €
Operating cost - C_op [€]	31.016,17 €	31.107,42 €	30.152,73 €	28.275,36 €
Total Cost - C_tot [€]	**32.819,76 €**	**32.991,48 €**	**32.112,63 €**	**31.839,44 €**

	2000			
Power maximum engine [KW]	117,5	117,5	117,5	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	5.473,00 €	6.106,50 €	6.740,00 €	8.007,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	150000	150000	150000	150000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,93187	0,89134	0,85569	0,73970
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	30.137,79 €	28.827,05 €	27.674,00 €	23.922,70 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	1,44 €	1,43 €	1,43 €	1,31 €
Battery cost' - Cb' [€]	3.315,41 €	3.868,44 €	4.426,10 €	4.088,93 €
Battery cost- Cb [€]	3.315,41 €	3.868,44 €	4.426,10 €	4.088,93 €
Deal with cost - OEM [€]	7.130,71 €	8.040,72 €	8.953,05 €	10.051,46 €
User cost- C_usr [€]	31.795,50 €	30.761,27 €	29.887,05 €	25.967,16 €
Operating cost - C_op [€]	33.453,21 €	32.695,49 €	32.100,10 €	28.011,62 €
Total Cost - C_tot [€]	**35.610,79 €**	**34.933,55 €**	**34.414,00 €**	**31.929,70 €**

Tabella 34: Elenco Costi P2 - 150.000 km

- Chilometraggio: 200.000 km
  - Conventional

	1300	1600	2000
Power maximum engine [KW]	51,5	88	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	0	0	0
Energy content of the battery [KWh]	0	0	0
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.480,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	425,00 €	425,00 €	425,00 €
Cost battery - C_bat [€]	680,00 €	680,00 €	680,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.147,00 €	2.585,00 €	2.939,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	200000	200000	200000
Time horizon - N [year]	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,96711	1,02985	1,14460
Infation index - i [%]	0,17	0,17	0,17
I [-]	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/m^3]	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	41.703,33 €	44.408,65 €	49.356,99 €
Discharge battery [A]	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	5,8645	5,8645	5,8645
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	3 €	3 €	3 €
Battery cost' - Cb' [€]	2.800 €	2.800 €	2.800 €
Battery cost- Cb [€]	2.800 €	2.800 €	2.800 €
Deal with cost - OEM [€]	3.547 €	3.985 €	4.339 €
User cost- C_usr [€]	43.103 €	45.809 €	50.757 €
Operating cost - C_op [€]	44.503 €	47.209 €	52.157 €
Total Cost - C_tot [€]	**43.850,33 €**	**46.993,65 €**	**52.295,99 €**

Tabella 35: Elenco Costi Conventional - 200.000 km

  - Conventional + Cylinder Deactivation

	1300	1600	2000
Power maximum engine [KW]	51,5	88	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	0	0	0
Energy content of the battery [KWh]	0	0	0

Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.480,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	425,00 €	425,00 €	425,00 €
Cost battery - C_bat [€]	680,00 €	680,00 €	680,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.147,00 €	2.585,00 €	2.939,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	200000	200000	200000
Time horizon - N [year]	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,96592	1,02984	1,14459
Infation index - i [%]	0,17	0,17	0,17
I [-]	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/m^3]	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	41.652,02 €	44.408,35 €	49.356,56 €
Discharge battery [A]	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	5,8645	5,8645	5,8645
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	3 €	3 €	3 €
Battery cost' - Cb' [€]	2.800 €	2.800 €	2.800 €
Battery cost- Cb [€]	2.800 €	2.800 €	2.800 €
Deal with cost - OEM [€]	3.547 €	3.985 €	4.339 €
User cost- C_usr [€]	43.052 €	45.808 €	50.757 €
Operating cost - C_op [€]	44.452 €	47.208 €	52.157 €
Total Cost - C_tot [€]	**43.799,02 €**	**46.993,35 €**	**52.295,56 €**

Tabella 36: Elenco Costi Conventional + Cylinder Deactivation - 200.000 km

- P0

	1300			
Power maximum engine [KW]	51,5	51,5	51,5	51,5
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €
Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.435,40 €	2.527,10 €	2.653,80 €	2.780,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	200000	200000	200000	200000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10

Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,92308	0,91711	0,87611	0,87417
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	39.804,89 €	39.547,45 €	37.779,17 €	37.695,68 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	1,72 €	2,52 €	2,52 €	2,52 €
Battery cost' - Cb' [€]	1.806,50 €	4.097,19 €	4.529,55 €	4.961,92 €
Battery cost- Cb [€]	1.806,50 €	4.097,19 €	4.529,55 €	4.961,92 €
Deal with cost - OEM [€]	3.338,65 €	4.575,69 €	4.918,58 €	5.261,46 €
User cost- C_usr [€]	40.708,14 €	41.596,04 €	40.043,94 €	40.176,64 €
Operating cost - C_op [€]	41.611,39 €	43.644,64 €	42.308,72 €	42.657,60 €
Total Cost - C_tot [€]	**42.240,29 €**	**42.074,55 €**	**40.432,97 €**	**40.476,18 €**

	1600			
Power maximum engine [KW]	88	88	88	88
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €
Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.873,40 €	2.965,10 €	3.091,80 €	3.218,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	200000	200000	200000	200000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,99624	0,98883	0,98713	0,95652
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	42.959,67 €	42.639,89 €	42.566,73 €	41.246,81 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86

Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	1,72 €	2,52 €	2,52 €	2,52 €
Battery cost' - Cb' [€]	1.806,50 €	4.097,19 €	4.529,55 €	4.961,92 €
Battery cost- Cb [€]	1.806,50 €	4.097,19 €	4.529,55 €	4.961,92 €
Deal with cost - OEM [€]	3.776,65 €	5.013,69 €	5.356,58 €	5.699,46 €
User cost- C_usr [€]	43.862,92 €	44.688,48 €	44.831,50 €	43.727,77 €
Operating cost - C_op [€]	44.766,17 €	46.737,08 €	47.096,28 €	46.208,73 €
Total Cost - C_tot [€]	**45.833,07 €**	**45.604,99 €**	**45.658,53 €**	**44.465,31 €**

	2000			
Power maximum engine [KW]	117,5	117,5	117,5	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €
Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	3.227,40 €	3.319,10 €	3.445,80 €	3.572,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	200000	200000	200000	200000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	1,00991	1,00472	1,00112	0,98547
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	43.548,85 €	43.325,24 €	43.169,82 €	42.494,85 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	1,72 €	2,52 €	2,52 €	2,52 €
Battery cost' - Cb' [€]	1.806,50 €	4.097,19 €	4.529,55 €	4.961,92 €
Battery cost- Cb [€]	1.806,50 €	4.097,19 €	4.529,55 €	4.961,92 €
Deal with cost - OEM [€]	4.130,65 €	5.367,69 €	5.710,58 €	6.053,46 €
User cost- C_usr [€]	44.452,10 €	45.373,84 €	45.434,60 €	44.975,81 €
Operating cost - C_op [€]	45.355,35 €	47.422,43 €	47.699,38 €	47.456,77 €
Total Cost - C_tot [€]	**46.776,25 €**	**46.644,34 €**	**46.615,62 €**	**46.067,35 €**

Tabella 37: Elenco Costi P0 - 200.000 km

- P2

	1300			
Power maximum engine [KW]	51,5	51,5	51,5	51,5
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	4.681,00 €	5.314,50 €	5.948,00 €	7.215,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	200000	200000	200000	200000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,80154	0,78032	0,73413	0,66547
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	34.563,78 €	33.648,75 €	31.656,70 €	28.696,06 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	1,92 €	1,91 €	1,90 €	1,75 €
Battery cost' - Cb' [€]	6.929,91 €	8.141,16 €	9.358,61 €	9.856,82 €
Battery cost- Cb [€]	6.929,91 €	8.141,16 €	9.358,61 €	9.856,82 €
Deal with cost - OEM [€]	8.145,95 €	9.385,08 €	10.627,30 €	12.143,41 €
User cost- C_usr [€]	38.028,74 €	37.719,33 €	36.336,00 €	33.624,47 €
Operating cost - C_op [€]	41.493,69 €	41.789,91 €	41.015,31 €	38.552,88 €
Total Cost - C_tot [€]	**39.244,78 €**	**38.963,25 €**	**37.604,70 €**	**35.911,06 €**

	1600			
Power maximum engine [KW]	88	88	88	88
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €

Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	5.119,00 €	5.752,50 €	6.386,00 €	7.653,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	200000	200000	200000	200000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,85652	0,84224	0,79548	0,74785
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	36.934,35 €	36.318,64 €	34.302,17 €	32.248,58 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	1,92 €	1,91 €	1,90 €	1,75 €
Battery cost' - Cb' [€]	6.929,91 €	8.141,16 €	9.358,61 €	9.856,82 €
Battery cost- Cb [€]	6.929,91 €	8.141,16 €	9.358,61 €	9.856,82 €
Deal with cost - OEM [€]	8.583,95 €	9.823,08 €	11.065,30 €	12.581,41 €
User cost- C_usr [€]	40.399,30 €	40.389,22 €	38.981,47 €	37.176,99 €
Operating cost - C_op [€]	43.864,25 €	44.459,80 €	43.660,77 €	42.105,40 €
Total Cost - C_tot [€]	**42.053,35 €**	**42.071,14 €**	**40.688,17 €**	**39.901,58 €**

	2000			
Power maximum engine [KW]	117,5	117,5	117,5	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	5.473,00 €	6.106,50 €	6.740,00 €	8.007,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	200000	200000	200000	200000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,93187	0,89134	0,85569	0,73970
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08

density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	40.183,72 €	38.436,07 €	36.898,67 €	31.896,93 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	1,92 €	1,91 €	1,90 €	1,75 €
Battery cost' - Cb' [€]	6.929,91 €	8.141,16 €	9.358,61 €	9.856,82 €
Battery cost- Cb [€]	6.929,91 €	8.141,16 €	9.358,61 €	9.856,82 €
Deal with cost - OEM [€]	8.937,95 €	10.177,08 €	11.419,30 €	12.935,41 €
User cost- C_usr [€]	43.648,68 €	42.506,65 €	41.577,97 €	36.825,34 €
Operating cost - C_op [€]	47.113,63 €	46.577,23 €	46.257,27 €	41.753,74 €
Total Cost - C_tot [€]	**45.656,72 €**	**44.542,57 €**	**43.638,67 €**	**39.903,93 €**

Tabella 38: Elenco Costi P2 - 200.000 km

- Chilometraggio: 300.000 km
  - Conventional

	1300	***1600***	***2000***
Power maximum engine [KW]	51,5	88	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	0	0	0
Energy content of the battery [KWh]	0	0	0
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.480,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	425,00 €	425,00 €	425,00 €
Cost battery - C_bat [€]	680,00 €	680,00 €	680,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.147,00 €	2.585,00 €	2.939,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	300000	300000	300000
Time horizon - N [year]	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,96711	1,02985	1,14460
Infation index - i [%]	0,17	0,17	0,17
I [-]	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/m^3]	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	62.555,00 €	66.612,98 €	74.035,48 €
Discharge battery [A]	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	5,8645	5,8645	5,8645
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000

Price of sostitution battery [€]	4 €	4 €	4 €
Battery cost' - Cb' [€]	5.121 €	5.121 €	5.121 €
Battery cost- Cb [€]	5.121 €	5.121 €	5.121 €
Deal with cost - OEM [€]	4.707 €	5.145 €	5.499 €
User cost- C_usr [€]	65.115 €	69.173 €	76.596 €
Operating cost - C_op [€]	67.676 €	71.734 €	79.156 €
Total Cost - C_tot [€]	**64.702,00 €**	**69.197,98 €**	**76.974,48 €**

Tabella 39: Elenco Costi Conventional - 300.000 km

- Conventional + Cylinder Deactivation

	1300	***1600***	***2000***
Power maximum engine [KW]	51,5	88	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	0	0	0
Energy content of the battery [KWh]	0	0	0
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.480,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	425,00 €	425,00 €	425,00 €
Cost battery - C_bat [€]	680,00 €	680,00 €	680,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.147,00 €	2.585,00 €	2.939,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	300000	300000	300000
Time horizon - N [year]	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,96592	1,02984	1,14459
Infation index - i [%]	0,17	0,17	0,17
I [-]	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/m^3]	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	62.478,03 €	66.612,53 €	74.034,83 €
Discharge battery [A]	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	5,8645	5,8645	5,8645
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	4 €	4 €	4 €
Battery cost' - Cb' [€]	5.121 €	5.121 €	5.121 €
Battery cost- Cb [€]	5.121 €	5.121 €	5.121 €
Deal with cost - OEM [€]	4.707 €	5.145 €	5.499 €
User cost- C_usr [€]	65.038 €	69.173 €	76.595 €
Operating cost - C_op [€]	67.599 €	71.733 €	79.156 €
Total Cost - C_tot [€]	**64.625,03 €**	**69.197,53 €**	**76.973,83 €**

Tabella 40: Elenco Costi Conventional + Cylinder Deactivation - 300.000 km

- P0

	1300			
Power maximum engine [KW]	51,5	51,5	51,5	51,5
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €
Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.435,40 €	2.527,10 €	2.653,80 €	2.780,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	300000	300000	300000	300000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,92308	0,91711	0,87611	0,87417
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	59.707,33 €	59.321,17 €	56.668,75 €	56.543,52 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	2,58 €	3,78 €	3,78 €	3,78 €
Battery cost' - Cb' [€]	3.962,17 €	7.492,98 €	8.283,70 €	9.074,41 €
Battery cost- Cb [€]	3.962,17 €	7.492,98 €	8.283,70 €	9.074,41 €
Deal with cost - OEM [€]	4.416,49 €	6.273,59 €	6.795,65 €	7.317,71 €
User cost- C_usr [€]	61.688,42 €	63.067,66 €	60.810,60 €	61.080,72 €
Operating cost - C_op [€]	63.669,50 €	66.814,16 €	64.952,45 €	65.617,93 €
Total Cost - C_tot [€]	**62.142,73 €**	**61.848,27 €**	**59.322,55 €**	**59.324,02 €**

	1600			
Power maximum engine [KW]	88	88	88	88
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €

Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	2.873,40 €	2.965,10 €	3.091,80 €	3.218,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	300000	300000	300000	300000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,99624	0,98883	0,98713	0,95652
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	64.439,50 €	63.959,83 €	63.850,09 €	61.870,21 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	2,58 €	3,78 €	3,78 €	3,78 €
Battery cost' - Cb' [€]	3.962,17 €	7.492,98 €	8.283,70 €	9.074,41 €
Battery cost- Cb [€]	3.962,17 €	7.492,98 €	8.283,70 €	9.074,41 €
Deal with cost - OEM [€]	4.854,49 €	6.711,59 €	7.233,65 €	7.755,71 €
User cost- C_usr [€]	66.420,58 €	67.706,32 €	67.991,94 €	66.407,42 €
Operating cost - C_op [€]	68.401,67 €	71.452,81 €	72.133,79 €	70.944,63 €
Total Cost - C_tot [€]	**67.312,90 €**	**66.924,93 €**	**66.941,89 €**	**65.088,71 €**

	2000			
Power maximum engine [KW]	117,5	117,5	117,5	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	2	3	4	5
Energy content of the battery [KWh]	0,7	0,9	1,2	1,5
Cost engine - C_e [€]	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	468,40 €	490,10 €	511,80 €	533,50 €
Cost battery - C_bat [€]	925,00 €	995,00 €	1.100,00 €	1.205,00 €
Cost production - C_prod [€]	3.227,40 €	3.319,10 €	3.445,80 €	3.572,50 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	300000	300000	300000	300000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	1,00991	1,00472	1,00112	0,98547
Infation index - i [-]	0,169	0,169	0,169	0,169
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08

density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	65.323,27 €	64.987,86 €	64.754,74 €	63.742,28 €
Discharge battery [A]	8,01	11,729	11,729	11,729
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	4,00	5,86	5,86	5,86
Λ durability of battery [Ah]	20000	20000	20000	20000
Price of sostitution battery [€]	2,58 €	3,78 €	3,78 €	3,78 €
Battery cost' - Cb' [€]	3.962,17 €	7.492,98 €	8.283,70 €	9.074,41 €
Battery cost- Cb [€]	3.962,17 €	7.492,98 €	8.283,70 €	9.074,41 €
Deal with cost - OEM [€]	5.208,49 €	7.065,59 €	7.587,65 €	8.109,71 €
User cost- C_usr [€]	67.304,36 €	68.734,35 €	68.896,58 €	68.279,49 €
Operating cost - C_op [€]	69.285,44 €	72.480,84 €	73.038,43 €	72.816,70 €
Total Cost - C_tot [€]	**68.550,67 €**	**68.306,96 €**	**68.200,54 €**	**67.314,78 €**

Tabella 41: Elenco Costi P0 - 300.000 km

- P2

	1300			
Power maximum engine [KW]	51,5	51,5	51,5	51,5
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €	1.042,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	4.681,00 €	5.314,50 €	5.948,00 €	7.215,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	300000	300000	300000	300000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,80154	0,78032	0,73413	0,66547
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	51.845,68 €	50.473,13 €	47.485,05 €	43.044,09 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	2,88 €	2,86 €	2,85 €	2,62 €

Battery cost' - Cb' [€]	14.158,90 €	16.686,61 €	19.223,61 €	21.392,60 €
Battery cost- Cb [€]	14.158,90 €	16.686,61 €	19.223,61 €	21.392,60 €
Deal with cost - OEM [€]	11.760,45 €	13.657,81 €	15.559,81 €	17.911,30 €
User cost- C_usr [€]	58.925,13 €	58.816,43 €	57.096,86 €	53.740,39 €
Operating cost - C_op [€]	66.004,57 €	67.159,74 €	66.708,66 €	64.436,69 €
Total Cost - C_tot [€]	**56.526,68 €**	**55.787,63 €**	**53.433,05 €**	**50.259,09 €**

	1600			
Power maximum engine [KW]	88	88	88	88
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €	1.480,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	5.119,00 €	5.752,50 €	6.386,00 €	7.653,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	300000	300000	300000	300000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,85652	0,84224	0,79548	0,74785
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	55.401,52 €	54.477,96 €	51.453,25 €	48.372,87 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	2,88 €	2,86 €	2,85 €	2,62 €
Battery cost' - Cb' [€]	14.158,90 €	16.686,61 €	19.223,61 €	21.392,60 €
Battery cost- Cb [€]	14.158,90 €	16.686,61 €	19.223,61 €	21.392,60 €
Deal with cost - OEM [€]	12.198,45 €	14.095,81 €	15.997,81 €	18.349,30 €
User cost- C_usr [€]	62.480,97 €	62.821,27 €	61.065,06 €	59.069,17 €
Operating cost - C_op [€]	69.560,42 €	71.164,58 €	70.676,87 €	69.765,47 €
Total Cost - C_tot [€]	**60.520,52 €**	**60.230,46 €**	**57.839,25 €**	**56.025,87 €**

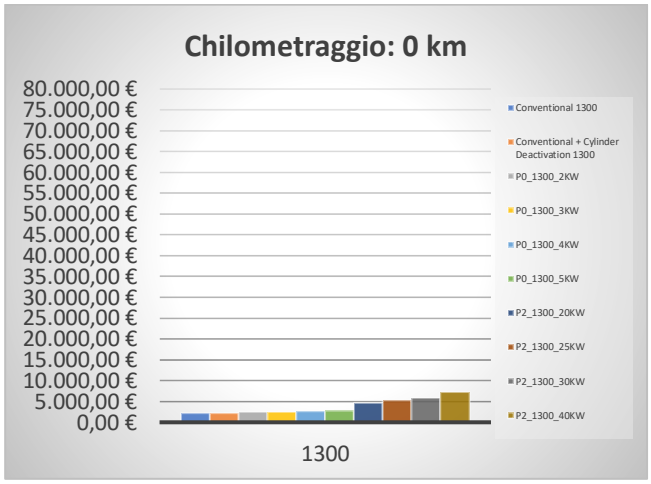
	2000			
Power maximum engine [KW]	117,5	117,5	117,5	117,5
Power maximum Electric motor [KW]	20	25	30	40
Energy content of the battery [KWh]	6	7,5	9	12
Cost engine - C_e [€]	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €	1.834,00 €
Cost electric motor - C_em [€]	859,00 €	967,50 €	1.076,00 €	1.293,00 €
Cost battery - C_bat [€]	2.780,00 €	3.305,00 €	3.830,00 €	4.880,00 €
Cost production - C_prod [€]	5.473,00 €	6.106,50 €	6.740,00 €	8.007,00 €
Fuel Diesel Price - FP [€/kg]	1,5468	1,5468	1,5468	1,5468
Distance Life - D [km]	300000	300000	300000	300000
Time horizon - N [year]	10	10	10	10
Distance of mission - d [km]	23,266	23,266	23,266	23,266
Cumulated fuel consumption - FC [Kg]	0,93187	0,89134	0,85569	0,73970
Infation index - i [-]	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
I [-]	27,08	27,08	27,08	27,08
density of Diesel [kg/L]	0,835	0,835	0,835	0,835
Cost fuel - C_fc [€]	60.275,59 €	57.654,10 €	55.348,00 €	47.845,39 €
Discharge battery [A]	13,405	13,329	13,278	12,186
Reference C-rate [1/h]	0,5	0,5	0,5	0,5
λ effective consumption battery [Ah]	6,7025	6,6645	6,639	6,093
Λ durability of battery [Ah]	30000	30000	30000	30000
Price of sostitution battery [€]	2,88 €	2,86 €	2,85 €	2,62 €
Battery cost' - Cb' [€]	14.158,90 €	16.686,61 €	19.223,61 €	21.392,60 €
Battery cost- Cb [€]	14.158,90 €	16.686,61 €	19.223,61 €	21.392,60 €
Deal with cost - OEM [€]	12.552,45 €	14.449,81 €	16.351,81 €	18.703,30 €
User cost- C_usr [€]	67.355,03 €	65.997,41 €	64.959,81 €	58.541,69 €
Operating cost - C_op [€]	74.434,48 €	74.340,72 €	74.571,61 €	69.237,99 €
Total Cost - C_tot [€]	**65.748,59 €**	**63.760,60 €**	**62.088,00 €**	**55.852,39 €**

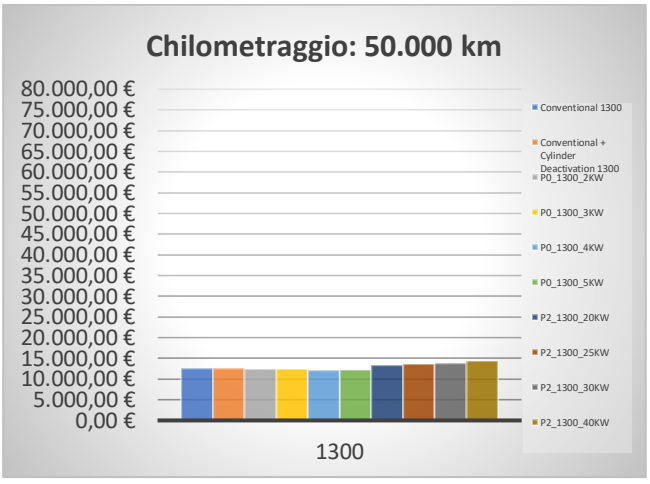
Tabella 42: Elenco Costi P2 - 300.000 km

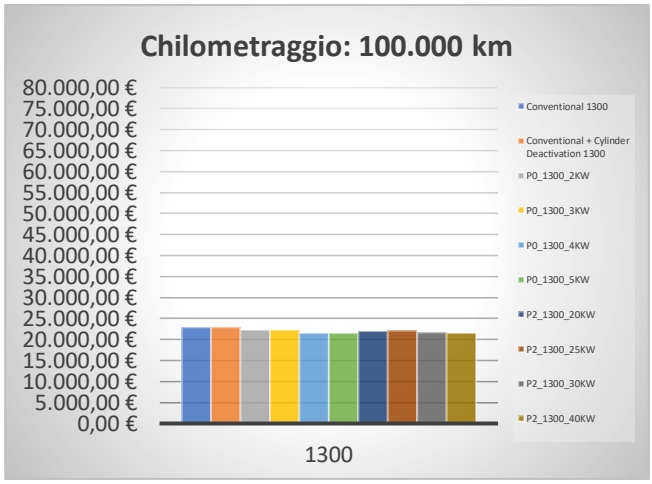
Capitolo 12: Comparazione tra i costi per ogni motorizzazione

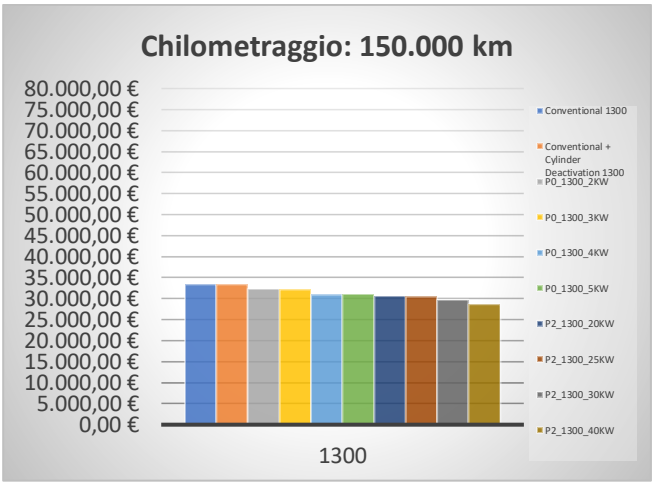
È possibile osservare di seguito una comparazione dei costi totali che ogni motorizzazione ha in funzione dell'architettura adottata (nonché della macchina elettrica utilizzata).

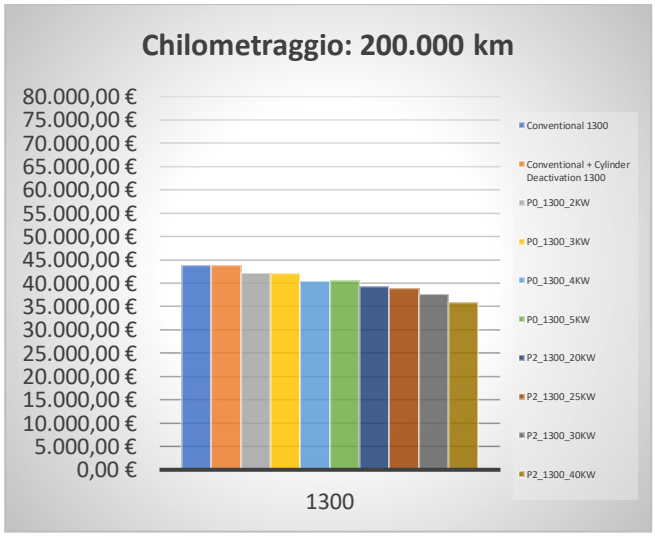
- Motorizzazione 1300 cm^3

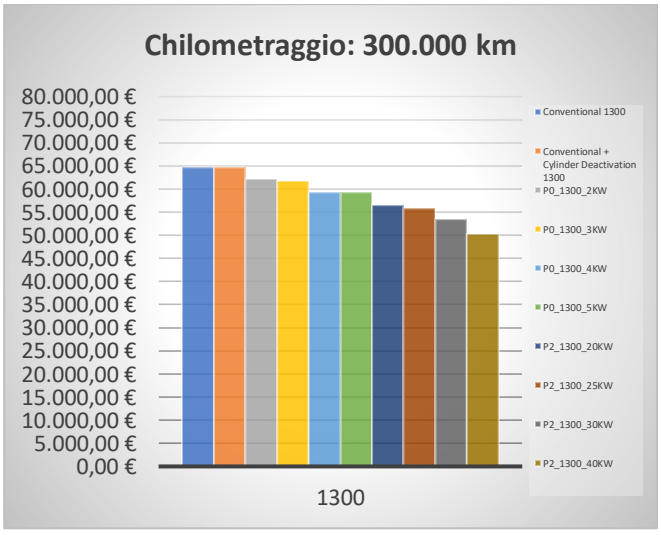




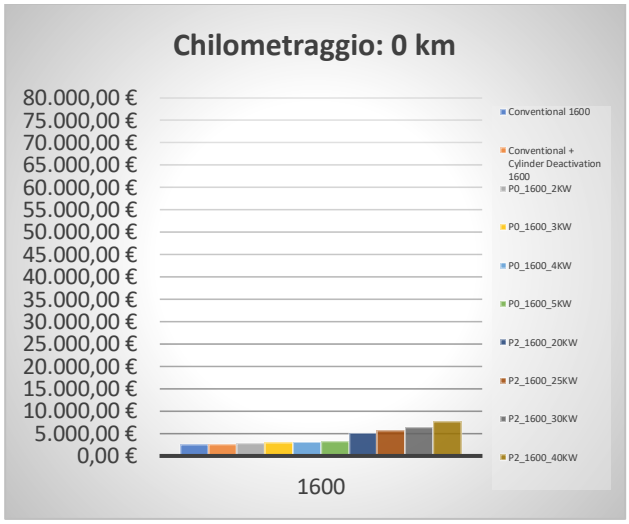


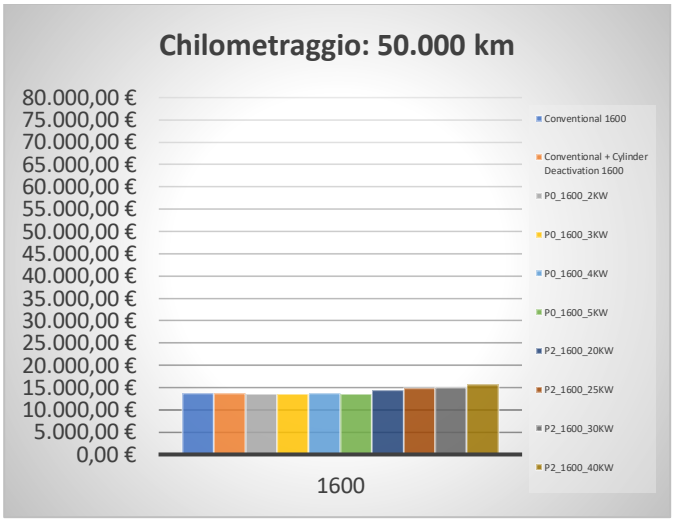


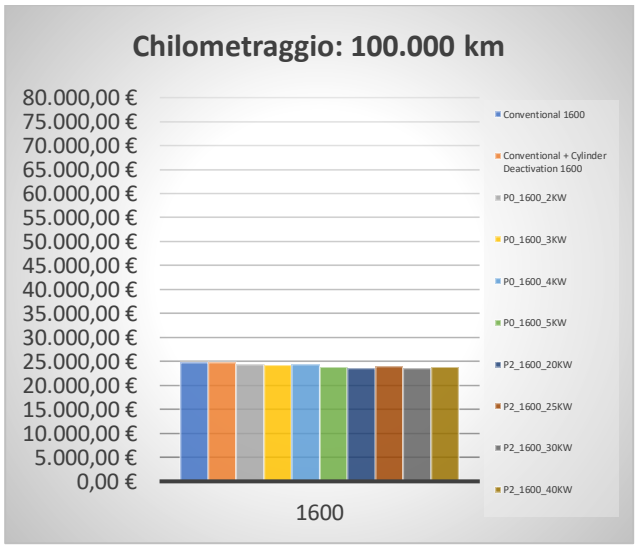


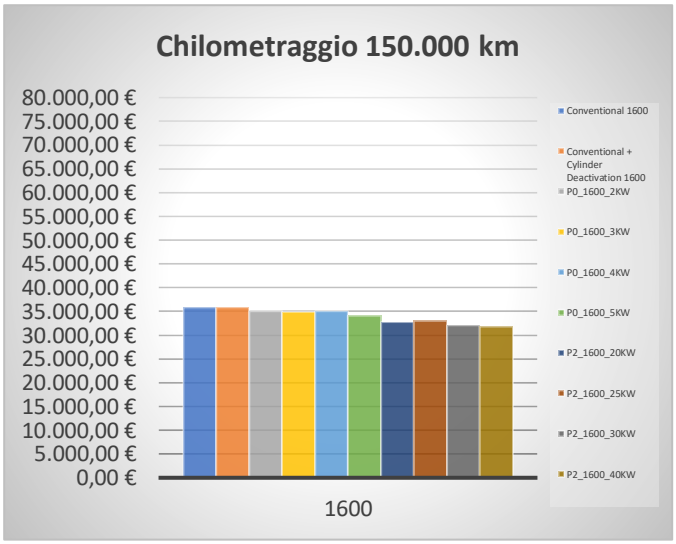


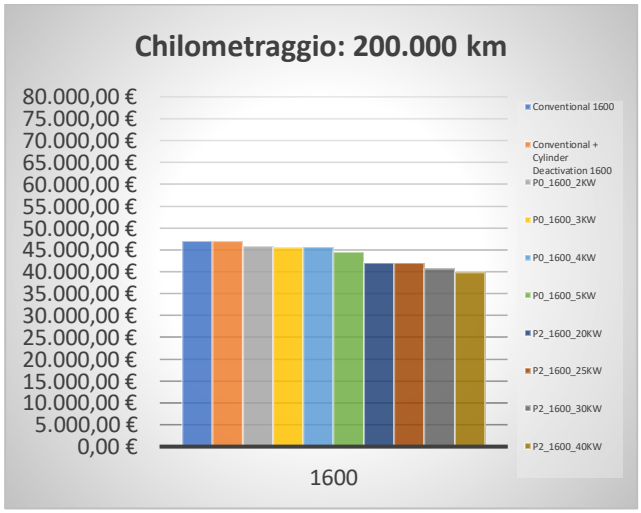
❖ Motorizzazione 1600 cm^3

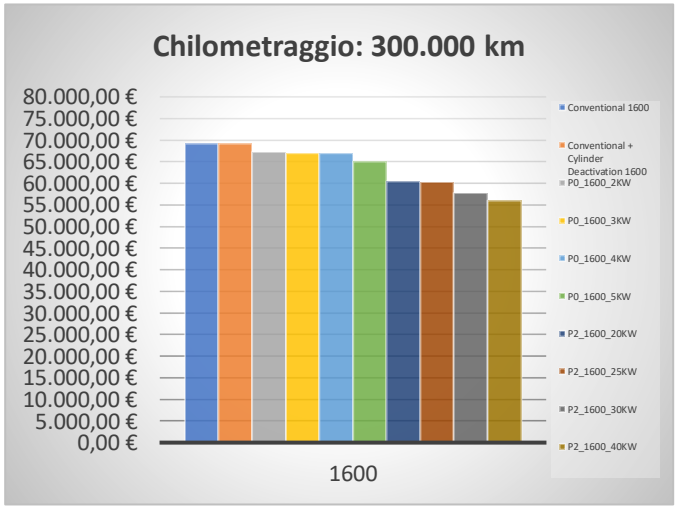




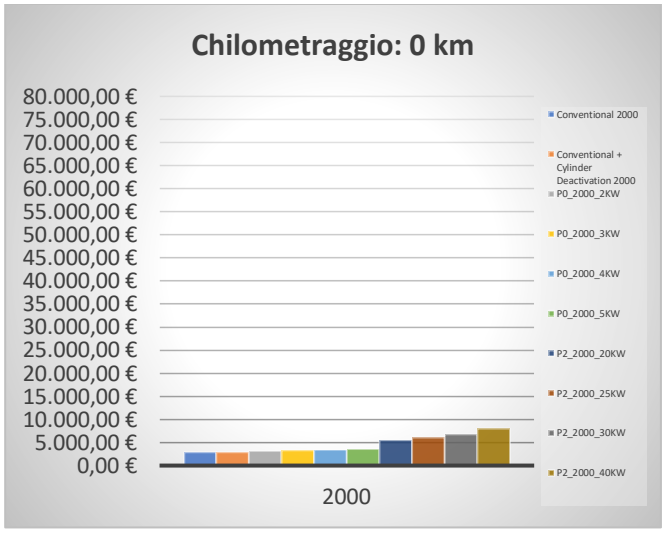


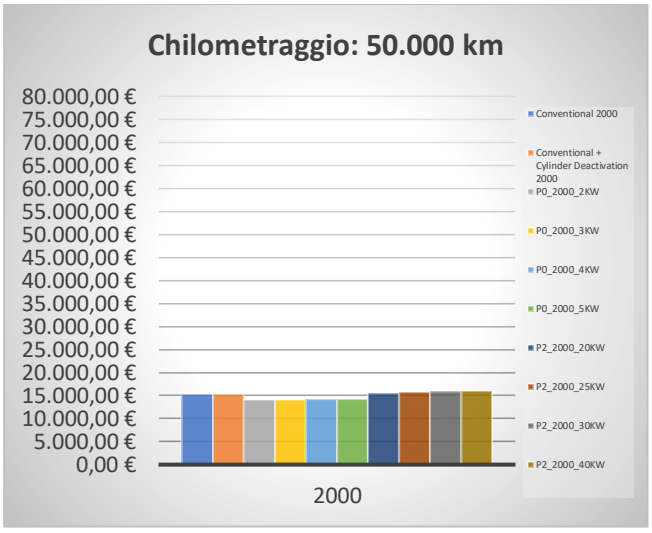


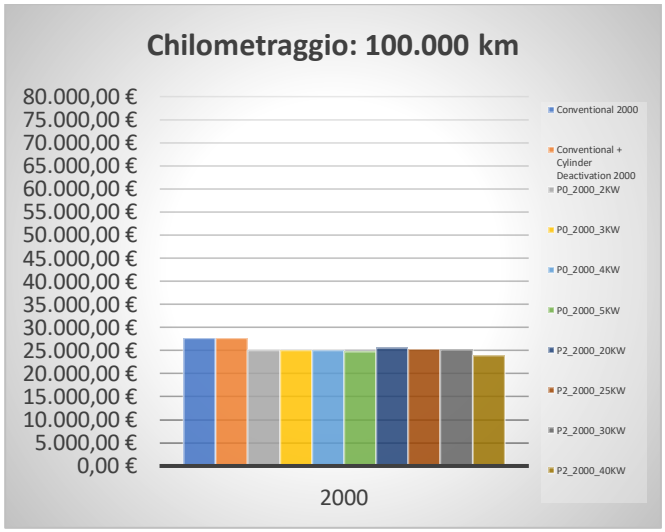


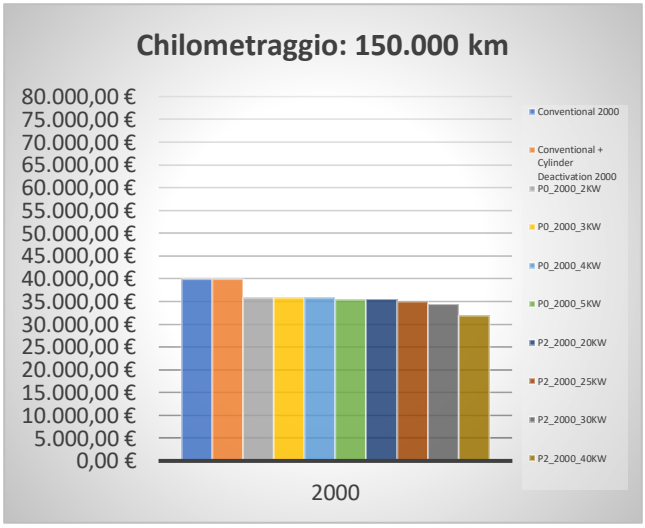


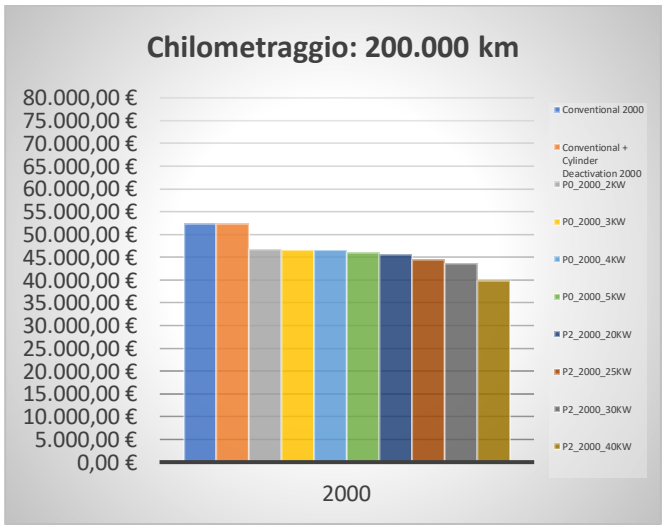
❖ Motorizzazione 2000 cm^3

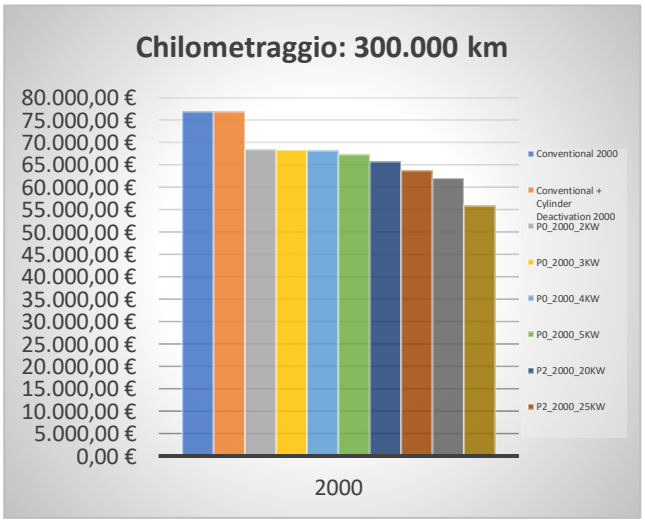












Capitolo 13: Risultati ottenuti

I punti cardine per poter adottare o scartare le varie simulazioni per avere un ottimo benchmark tra propulsione termica Diesel in combinazione con una diversa taglia di macchina elettrica sono legati sotto diversi fattori, quali:

- Tecnico: minor emissioni allo scarico
- Economico: minor costo possibile
- Tecnico + Economico: si cerca l'ottimo tra i due aspetti

Attraverso la metodologia del Full Factorial, applicata al modello per le tre variabili assunte: Final ratio, Speed ratio e taglia del motore elettrico, sono state adottate tutte quelle prove affidabili, mentre, sono state scartate le non affidabili. I fattori che hanno determinato l'esclusione sono stati:

1. Differenza di velocità di 3 km/h rispetto al ciclo WLTP
2. Maggior quantitativo di CO_2 [g/km]

Considerando comunque come valida, una strategia di controllo non propriamente ottimale per l'implementazione all'interno della ECU dei comuni veicoli, i valori di emissioni ottenuti dalle prove e i relativi costi in funzione dei chilometri percorsi sono:

❖ Chilometri percorsi: 0 km

Conventional										
Size Engine	Size Electrical Motor	Potenza batteria	Potenza/Energy ratio	Final Drive (FD)	Torque Coupling	Emission CO2	Price		Goal Emission	Goal Price
[cm^3]	[KW]	[KW]	[-]	[-]	[-]	[g/km]	[€]		[%]	[%]
1300	-	-	-	2,4	-	127,2	2.147,00		-	-
1600	-	-	-	3,5	-	139,8	2.585,00		-	-
2000	-	-	-	2,4	-	146,0	2.939,00		-	-
Cilinder Deactivation										
1300	-	-	-	2,4	-	127,1	2.147,00		-0,11%	0,00%
1600	-	-	-	3,5	-	139,8	2.585,00		-0,03%	0,00%
2000	-	-	-	2,4	-	146,0	2.939,00		-0,02%	0,00%
P0										
1300	2	2	3,3333	4,2	2,1	124,10	2.435,40		-2,47%	13,43%
1300	3	3	3,3333	4,0	2,1	123,30	2.527,10		-3,10%	17,70%
1300	4	4	3,3333	3,8	1,8	117,78	2.653,80		-7,43%	23,61%
1300	5	5	3,3333	3,7	2,0	117,52	2.780,50		-7,64%	29,51%
1600	2	2	3,3333	3,8	2,9	133,93	2.873,40		-4,20%	11,16%
1600	3	3	3,3333	3,8	2,8	132,94	2.965,10		-4,91%	14,70%
1600	4	4	3,3333	3,8	3,0	132,71	3.091,80		-5,07%	19,61%
1600	5	5	3,3333	3,8	2,8	128,59	3.218,50		-8,02%	24,51%
2000	2	2	3,3333	4,0	2.8	135,77	3.227,40		-7,01%	9,81%
2000	3	3	3,3333	4,0	2,8	135,07	3.319,10		-7,48%	12,93%
2000	4	4	3,3333	4,0	2,4	134,59	3.445,80		-7,82%	17,24%
2000	5	5	3,3333	3,7	2,8	132,48	3.572,50		-9,26%	21,55%

P2										
1300	20	20	3,3333	2,3	1,6	107,8	4.681,00		-15,31%	118,03%
1300	25	25	3,3333	2,3	1,6	104,9	5.314,50		-17,55%	147,53%
1300	30	30	3,3333	2,4	1,6	98,7	5.948,00		-22,43%	177,04%
1300	40	40	3,3333	2,0	2,8	89,5	7.215,00		-29,69%	236,05%
1600	20	20	3,3333	3,0	2,4	115,1	5.119,00		-17,63%	98,03%
1600	25	25	3,3333	2,7	3,0	113,2	5.752,50		-19,01%	122,53%
1600	30	30	3,3333	2,7	2,6	106,9	6.386,00		-23,50%	147,04%
1600	40	40	3,3333	2,7	2,6	100,5	7.653,00		-28,08%	196,05%
2000	20	20	3,3333	3,0	2,0	125,3	5.473,00		-14,19%	86,22%
2000	25	25	3,3333	2,9	1,2	119,8	6.106,50		-17,92%	107,77%
2000	30	30	3,3333	2,9	1,2	115,0	6.740,00		-21,21%	129,33%
2000	40	40	3,3333	3,5	1,2	99,4	8.007,00		-31,89%	172,44%

Tabella 43: Risultati ottenuti 0 km

In seguito, vengono rappresentati i grafici relativi ai dati in tabella:

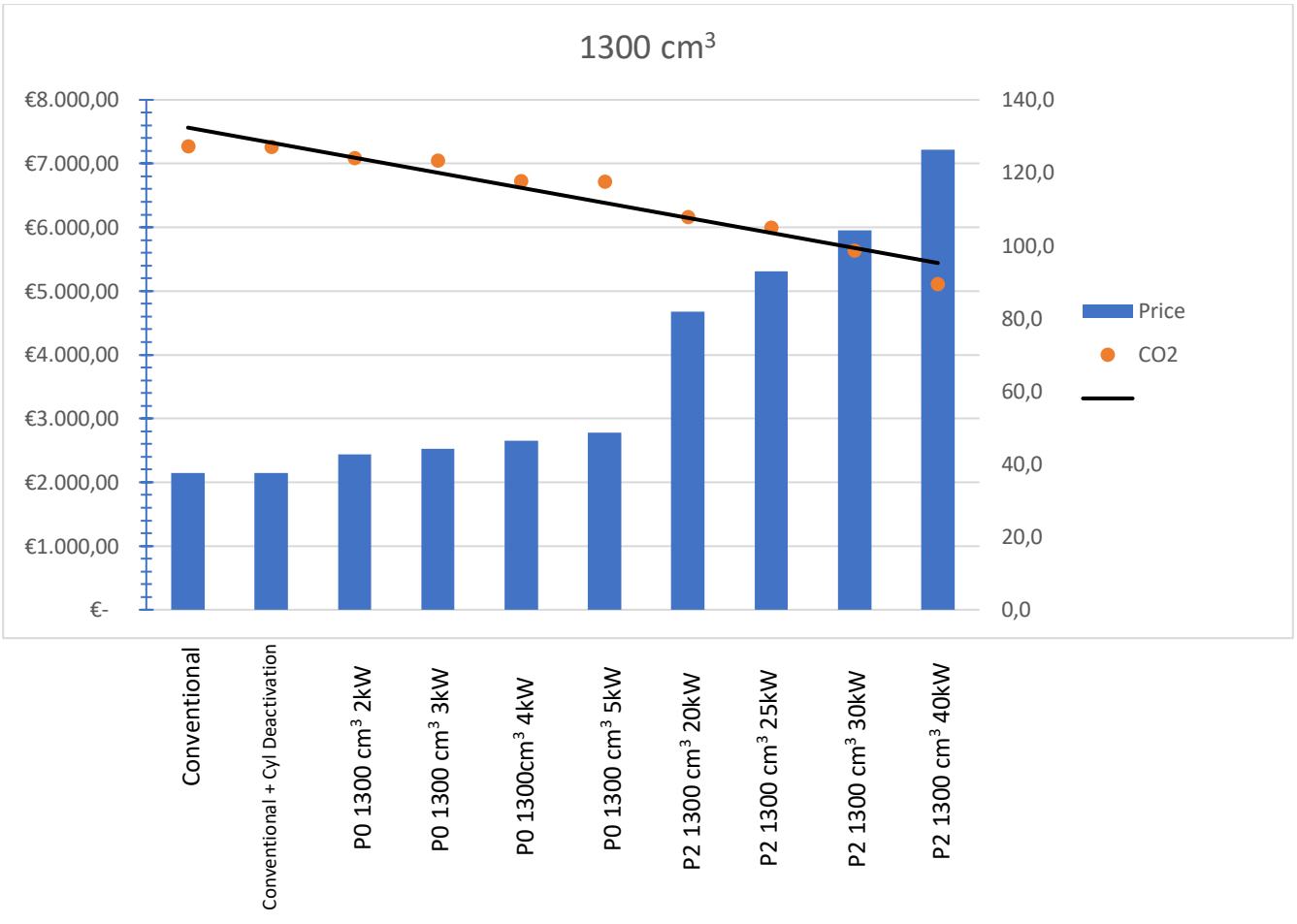


Figura 89: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 1300 cm^3; chilometri percorsi: 0 km

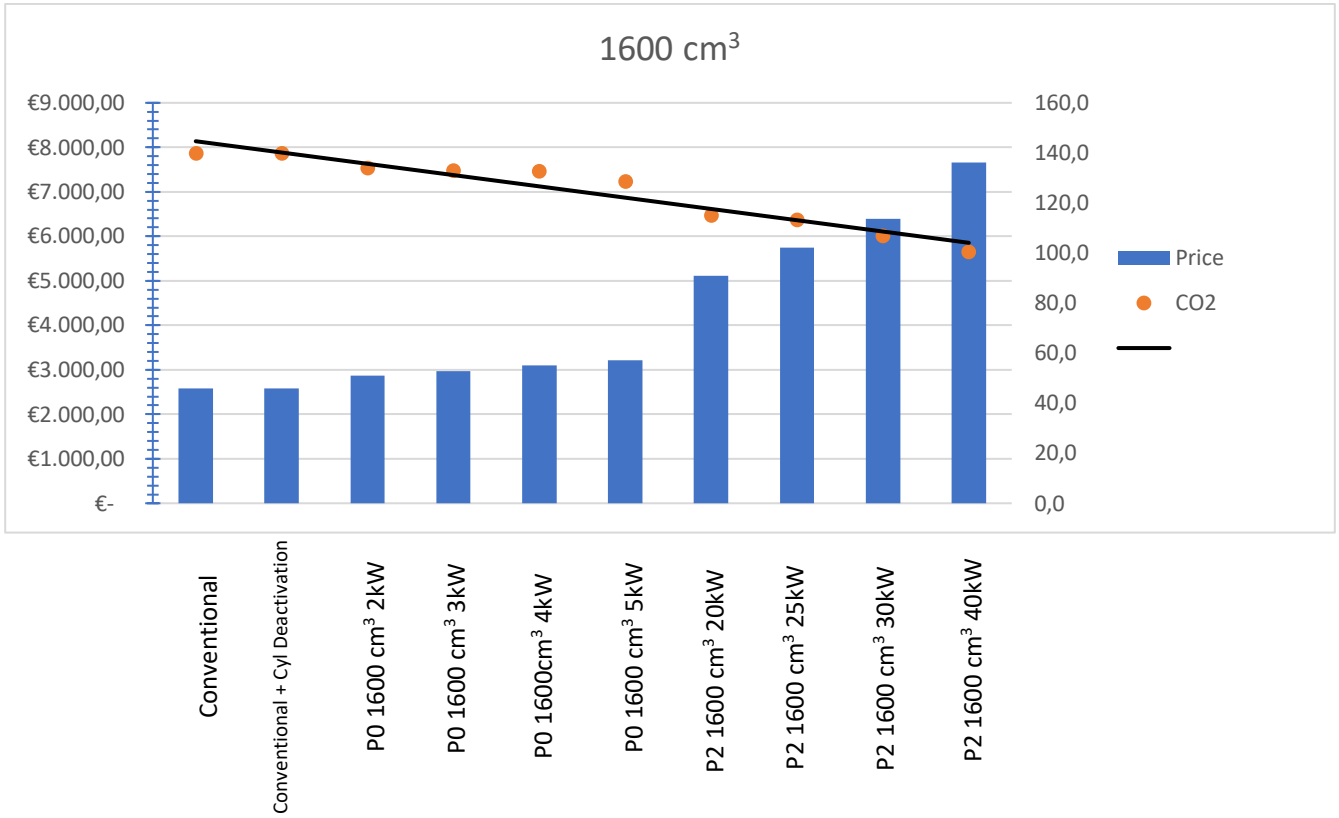


Figura 90: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 1600 cm^3; chilometri percorsi: 0 km

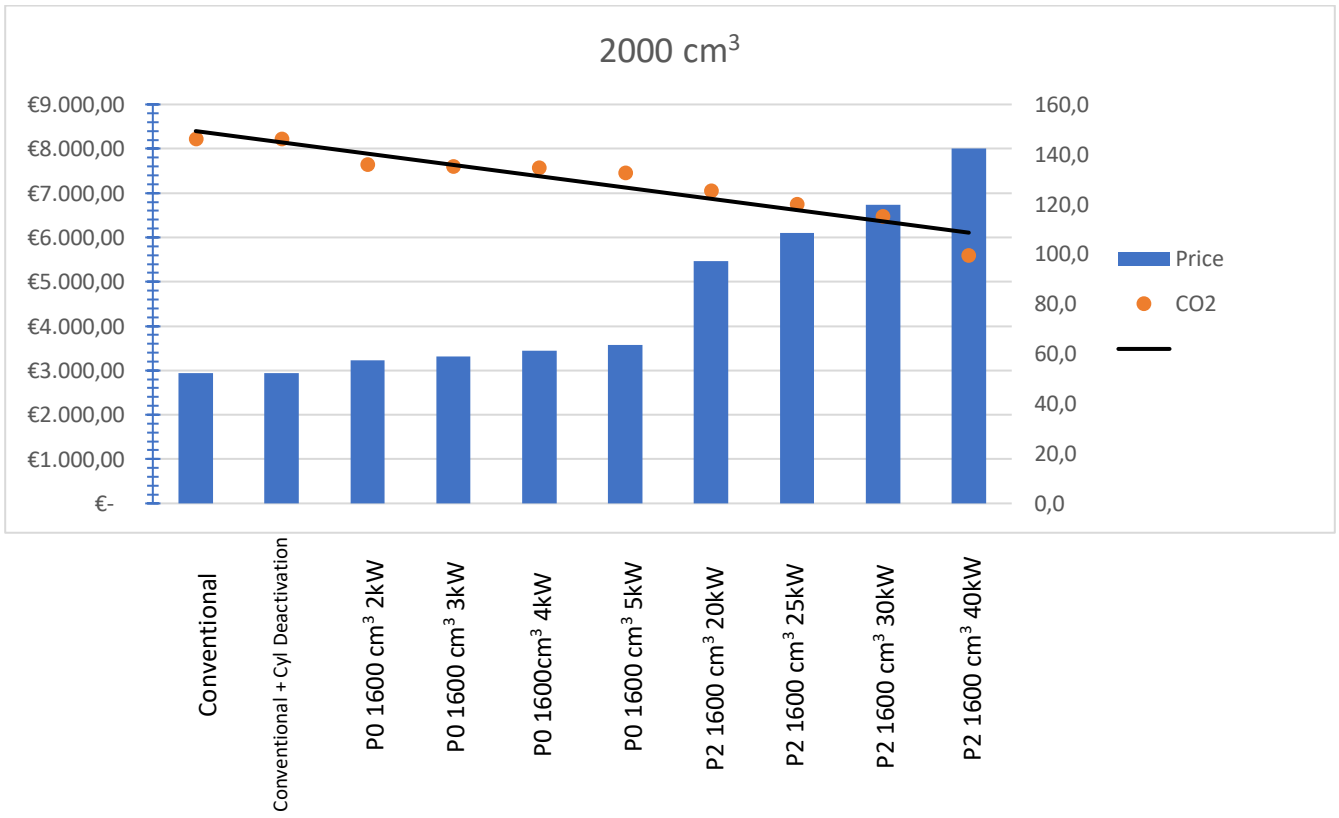


Figura 91: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 2000 cm^3; chilometri percorsi: 0 km

Conventional										
Size Engine	Size Electrical Motor	Potenza batteria	Potenza/Energy ratio	Final Drive (FD)	Torque Coupling	Emission CO2	Price		Goal Emission	Goal Price
[cm^3]	[KW]	[KW]	[-]	[-]	[-]	[g/km]	[€]		[%]	[%]
1300	-	-	-	2,4	-	127,2	12.572,83		-	-
1600	-	-	-	3,5	-	139,8	13.687,16		-	-
2000	-	-	-	2,4	-	146,0	15.278,25		-	-
Cilinder Deactivation										
1300	-	-	-	2,4	-	127,1	12.560,00		-0,11%	-0,10%
1600	-	-	-	3,5	-	139,8	13.687,16		-0,03%	0,00%
2000	-	-	-	2,4	-	146,0	15.278,25		-0,02%	0,00%
P0										
1300	2	2	3,3333	4,2	2,1	124,10	12.386,62		-2,47%	-1,48%
1300	3	3	3,3333	4,0	2,1	123,30	12.413,96		-3,10%	-1,26%
1300	4	4	3,3333	3,8	1,8	117,78	12.098,59		-7,43%	-3,77%
1300	5	5	3,3333	3,7	2,0	117,52	12.204,42		-7,64%	-2,93%
1600	2	2	3,3333	3,8	2,9	133,93	13.613,32		-4,20%	-0,54%
1600	3	3	3,3333	3,8	2,8	132,94	13.625,07		-4,91%	-0,45%
1600	4	4	3,3333	3,8	3,0	132,71	13.733,48		-5,07%	0,34%
1600	5	5	3,3333	3,8	2,8	128,59	13.530,20		-8,02%	-1,15%
2000	2	2	3,3333	4,0	2.8	135,77	14.114,61		-7,01%	-7,62%
2000	3	3	3,3333	4,0	2,8	135,07	14.150,41		-7,48%	-7,38%
2000	4	4	3,3333	4,0	2,4	134,59	14.238,26		-7,82%	-6,81%
2000	5	5	3,3333	3,7	2,8	132,48	14.196,21		-9,26%	-7,08%
P2										
1300	20	20	3,3333	2,3	1,6	107,8	13.321,95		-15,31%	5,96%
1300	25	25	3,3333	2,3	1,6	104,9	13.726,69		-17,55%	9,18%
1300	30	30	3,3333	2,4	1,6	98,7	13.862,18		-22,43%	10,25 %
1300	40	40	3,3333	2,0	2,8	89,5	14.389,02		-29,69%	14,45 %
1600	20	20	3,3333	3,0	2,4	115,1	14.352,59		-17,63%	4,86%
1600	25	25	3,3333	2,7	3,0	113,2	14.832,16		-19,01%	8,37%
1600	30	30	3,3333	2,7	2,6	106,9	14.961,54		-23,50%	9,31%
1600	40	40	3,3333	2,7	2,6	100,5	15.715,15		-28,08%	14,82 %
2000	20	20	3,3333	3,0	2,0	125,3	15.518,93		-14,19%	1,58%
2000	25	25	3,3333	2,9	1,2	119,8	15.715,52		-17,92%	2,86%
2000	30	30	3,3333	2,9	1,2	115,0	15.964,67		-21,21%	4,49%
2000	40	40	3,3333	3,5	1,2	99,4	15.981,23		-31,89%	4,60%

Tabella 44: Risultati ottenuti 50.000 km

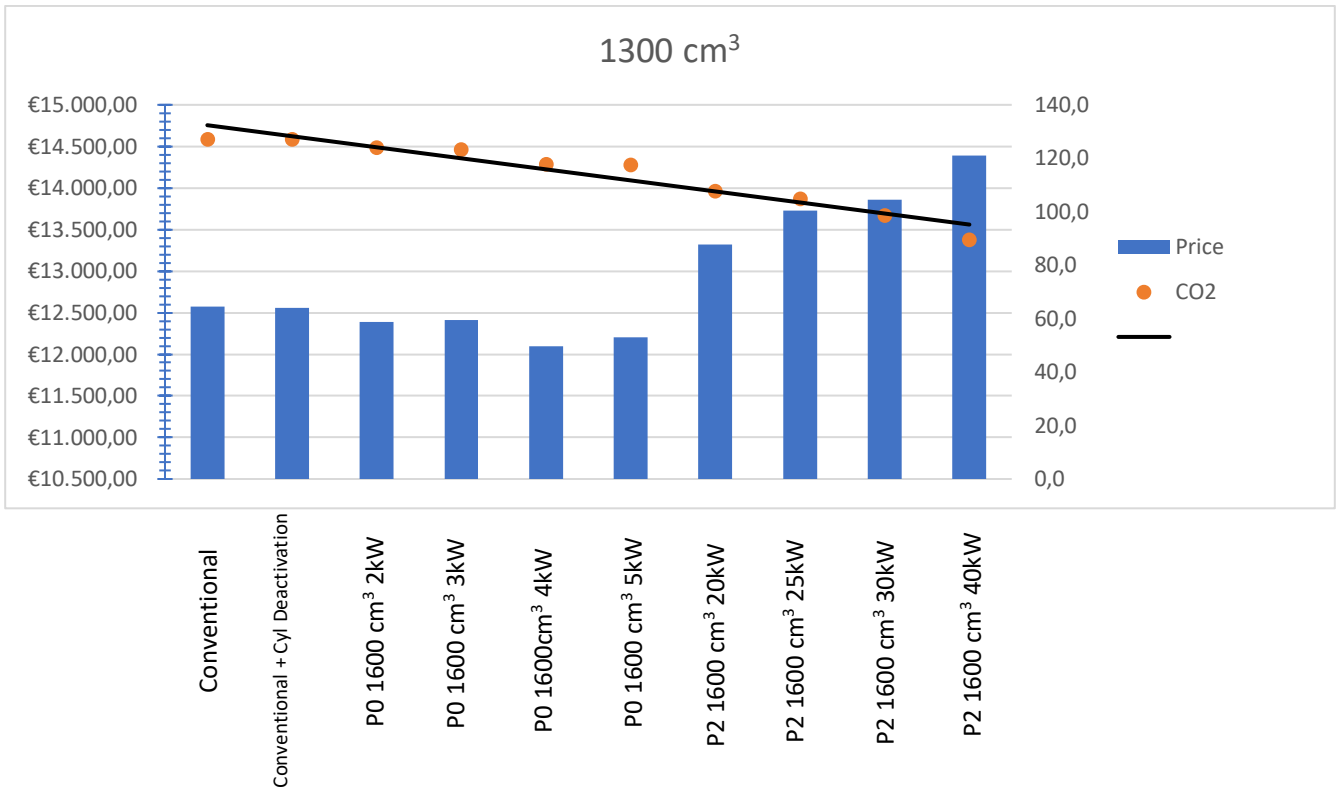


Figura 92: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 1300 cm^3; chilometri percorsi: 50.000 km

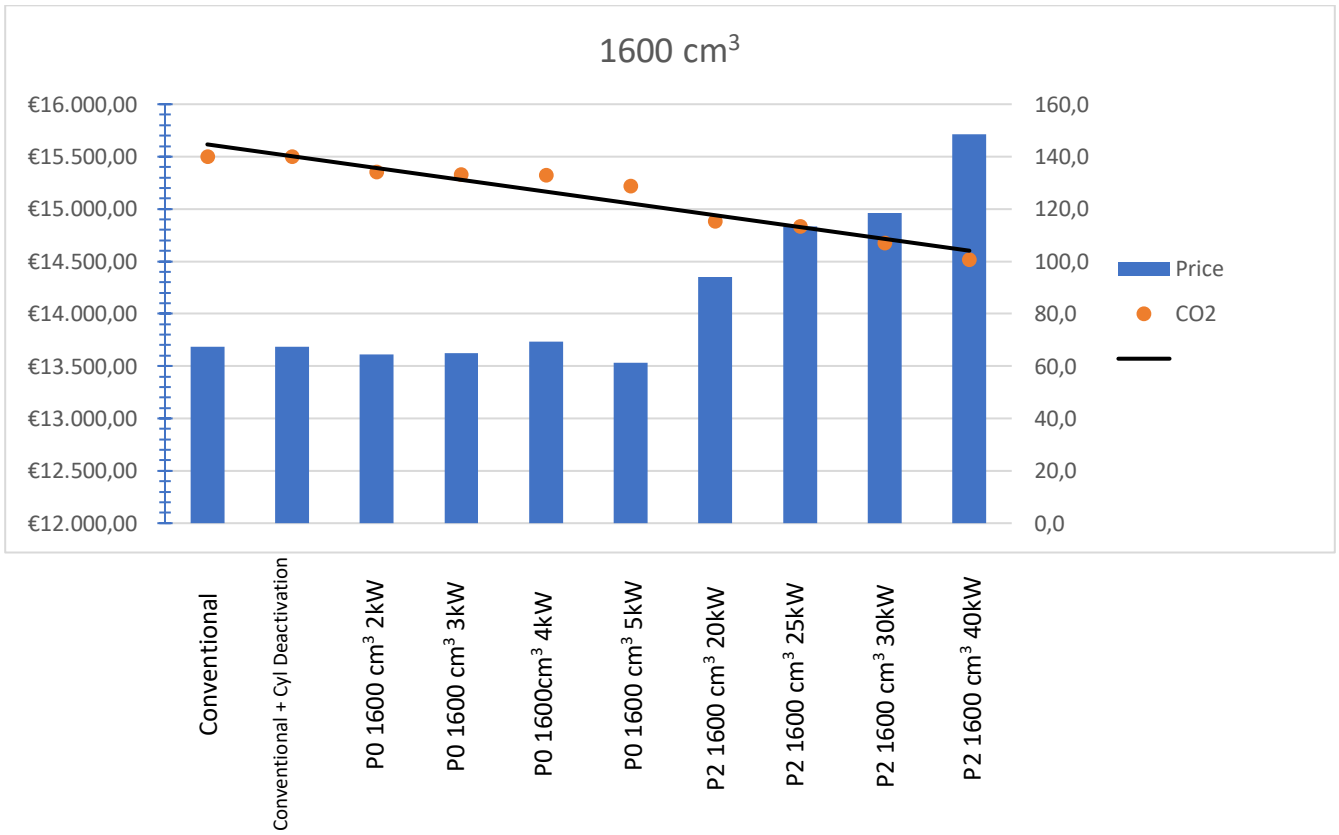


Figura 93: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 1600 cm^3; chilometri percorsi: 50.000 km

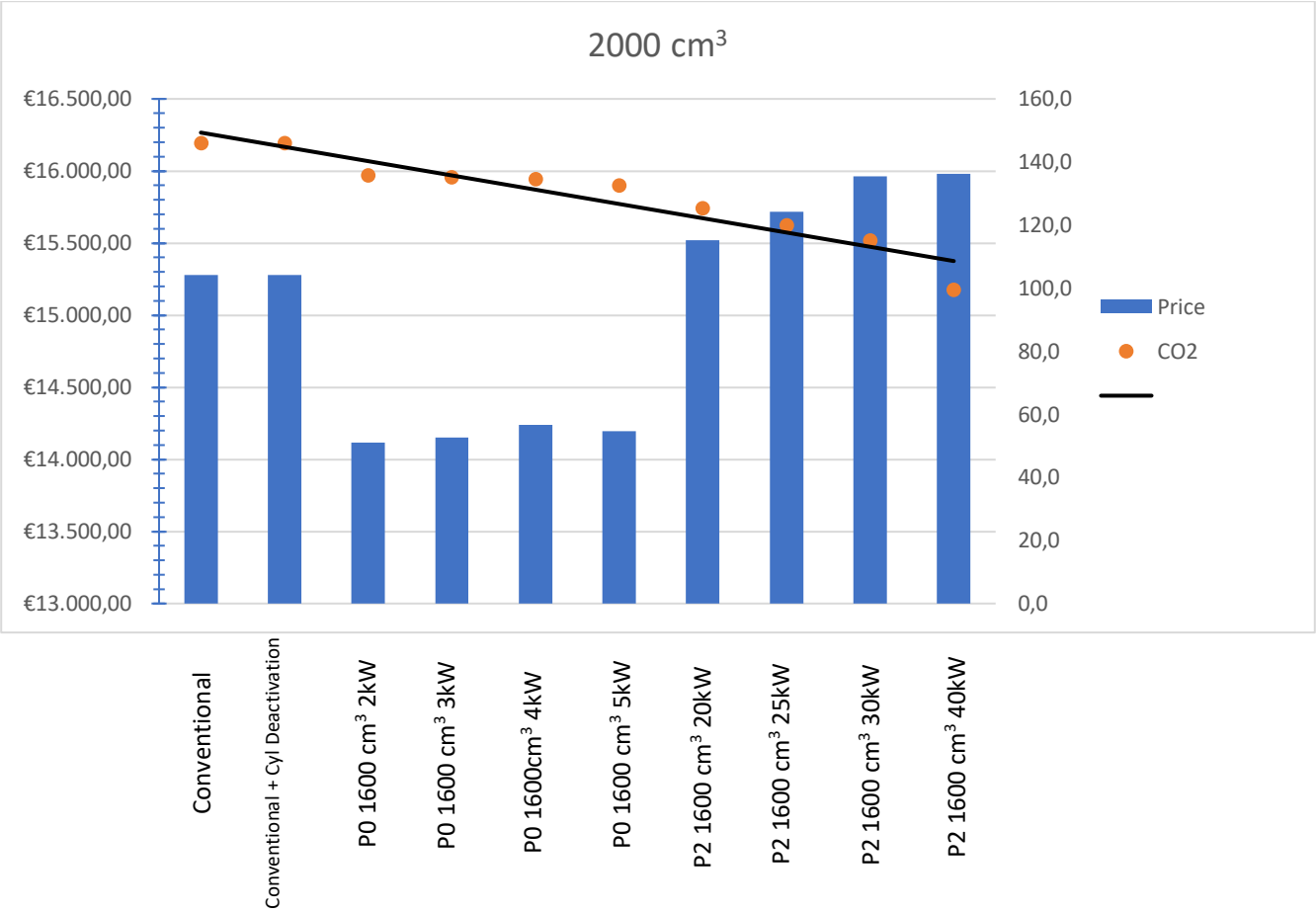


Figura 94: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 2000 cm^3; chilometri percorsi: 50.000 km

❖ Chilometri percorsi: 100.000 km

Conventional										
Size Engine	Size Electrical Motor	Potenza batteria	Potenza /Energy ratio	Final Drive (FD)	Torque Coupling	Emission CO2	Price		Goal Emission	Goal Price
[cm^3]	[KW]	[KW]	[-]	[-]	[-]	[g/km]	[€]		[%]	[%]
1300	-	-	-	2,4	-	127,2	22.998,67		-	-
1600	-	-	-	3,5	-	139,8	24.789,33		-	-
2000	-	-	-	2,4	-	146,0	27.617,49		-	-
Cilinder Deactivation										
1300	-	-	-	2,4	-	127,1	22.973,01		-0,11%	-0,11%
1600	-	-	-	3,5	-	139,8	24.789,33		-0,03%	0,00%
2000	-	-	-	2,4	-	146,0	27.617,49		-0,02%	0,00%
P0										
1300	2	2	3,3333	4,2	2,1	124,10	22.337,84		-2,47%	-2,87%
1300	3	3	3,3333	4,0	2,1	123,30	22.300,82		-3,10%	-3,03%
1300	4	4	3,3333	3,8	1,8	117,78	21.543,38		-7,43%	-6,33%
1300	5	5	3,3333	3,7	2,0	117,52	21.628,34		-7,64%	-5,96%
1600	2	2	3,3333	3,8	2,9	133,93	24.353,23		-4,20%	-1,76%
1600	3	3	3,3333	3,8	2,8	132,94	24.285,04		-4,91%	-2,03%
1600	4	4	3,3333	3,8	3,0	132,71	24.375,16		-5,07%	-1,67%
1600	5	5	3,3333	3,8	2,8	128,59	23.841,90		-8,02%	-3,82%
2000	2	2	3,3333	4,0	2.8	135,77	25.001,82		-7,01%	-9,47%
2000	3	3	3,3333	4,0	2,8	135,07	24.981,72		-7,48%	-9,54%
2000	4	4	3,3333	4,0	2,4	134,59	25.030,71		-7,82%	-9,37%
2000	5	5	3,3333	3,7	2,8	132,48	24.819,93		-9,26%	-10,13%
P2										
1300	20	20	3,3333	2,3	1,6	107,8	21.962,89		-15,31%	-4,50%
1300	25	25	3,3333	2,3	1,6	104,9	22.138,88		-17,55%	-3,74%
1300	30	30	3,3333	2,4	1,6	98,7	21.776,35		-22,43%	-5,31%
1300	40	40	3,3333	2,0	2,8	89,5	21.563,03		-29,69%	-6,24%
1600	20	20	3,3333	3,0	2,4	115,1	23.586,17		-17,63%	-4,85%
1600	25	25	3,3333	2,7	3,0	113,2	23.911,82		-19,01%	-3,54%
1600	30	30	3,3333	2,7	2,6	106,9	23.537,08		-23,50%	-5,05%
1600	40	40	3,3333	2,7	2,6	100,5	23.777,29		-28,08%	-4,08%
2000	20	20	3,3333	3,0	2,0	125,3	25.564,86		-14,19%	-7,43%
2000	25	25	3,3333	2,9	1,2	119,8	25.324,53		-17,92%	-8,30%
2000	30	30	3,3333	2,9	1,2	115,0	25.189,33		-21,21%	-8,79%
2000	40	40	3,3333	3,5	1,2	99,4	23.955,46		-31,89%	-13,26%

Tabella 45: Risultati ottenuti 100.000 km

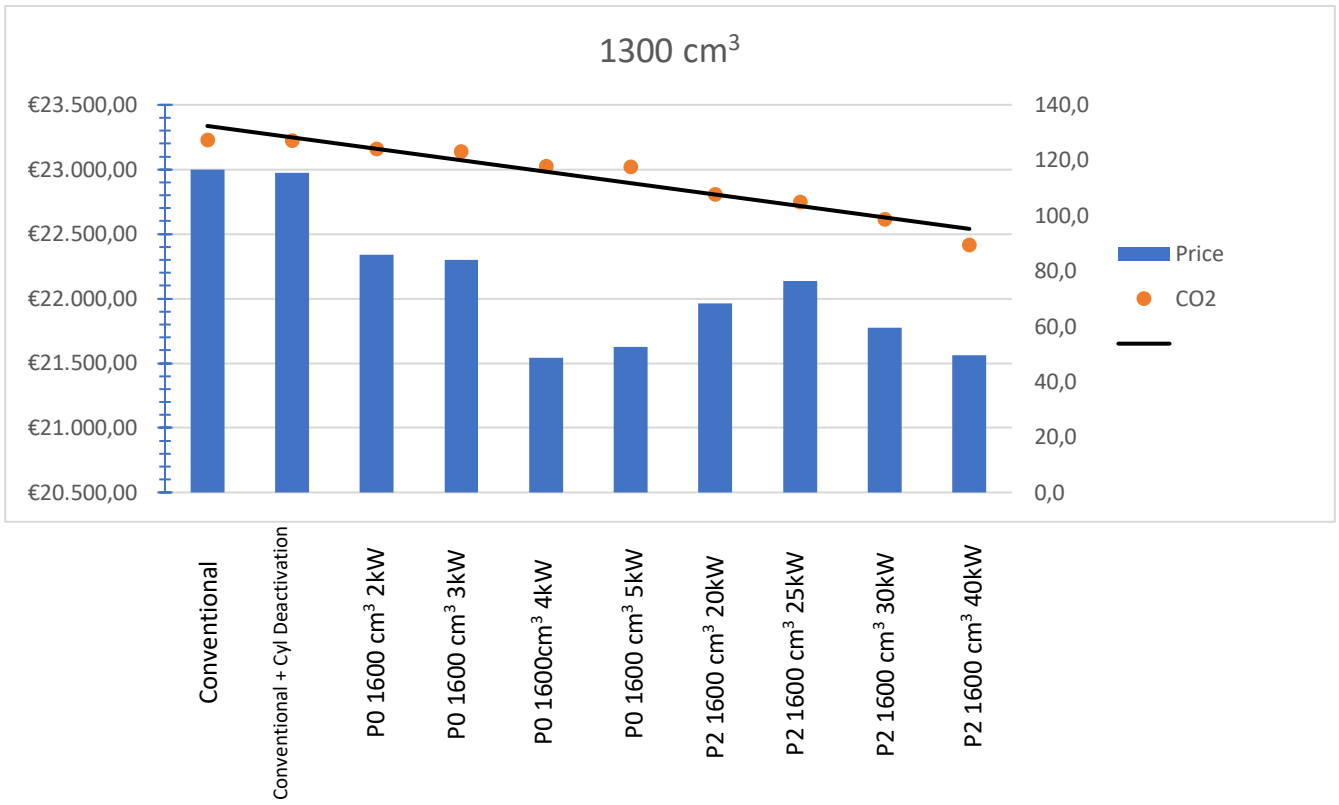


Figura 95: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 1300 cm^3; chilometri percorsi: 100.000 km

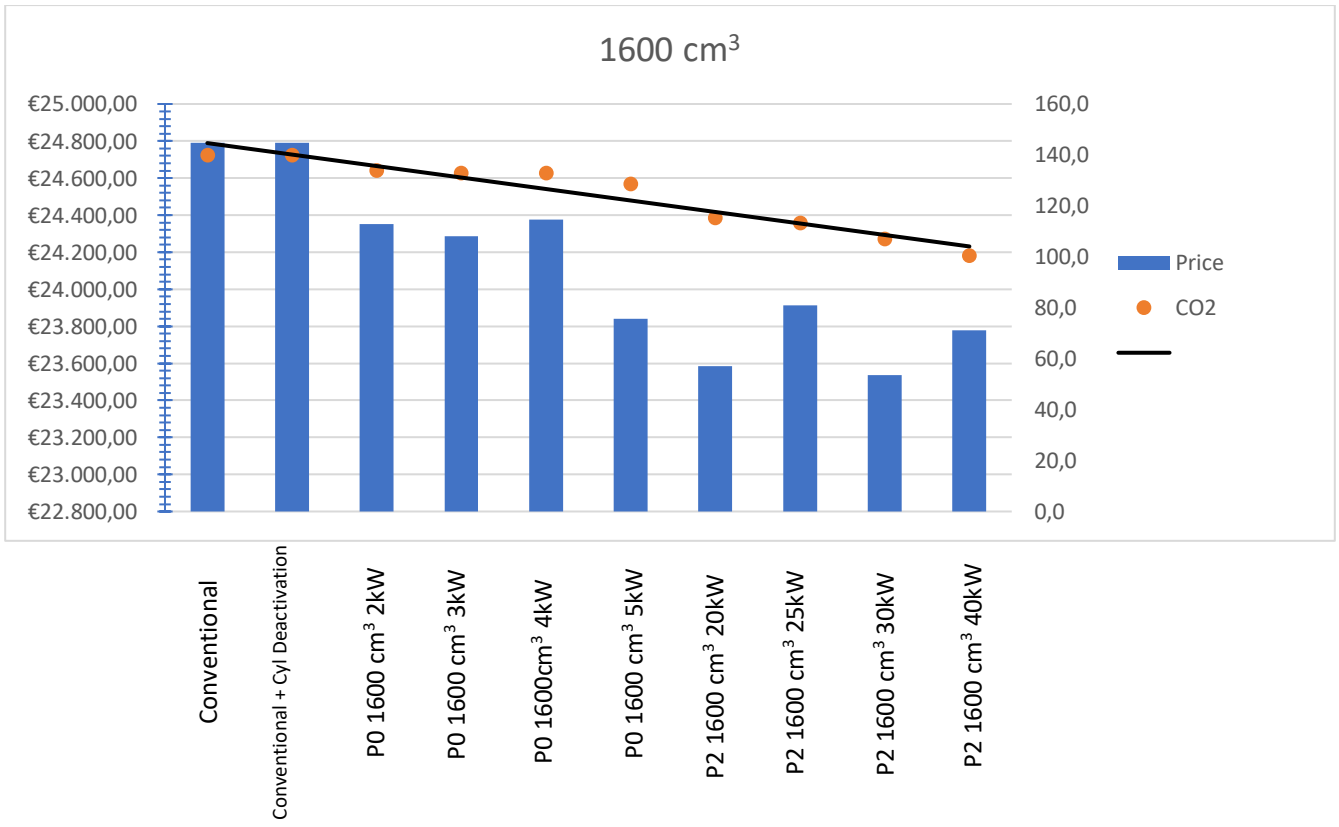


Figura 96: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 1600 cm^3; chilometri percorsi: 100.000 km

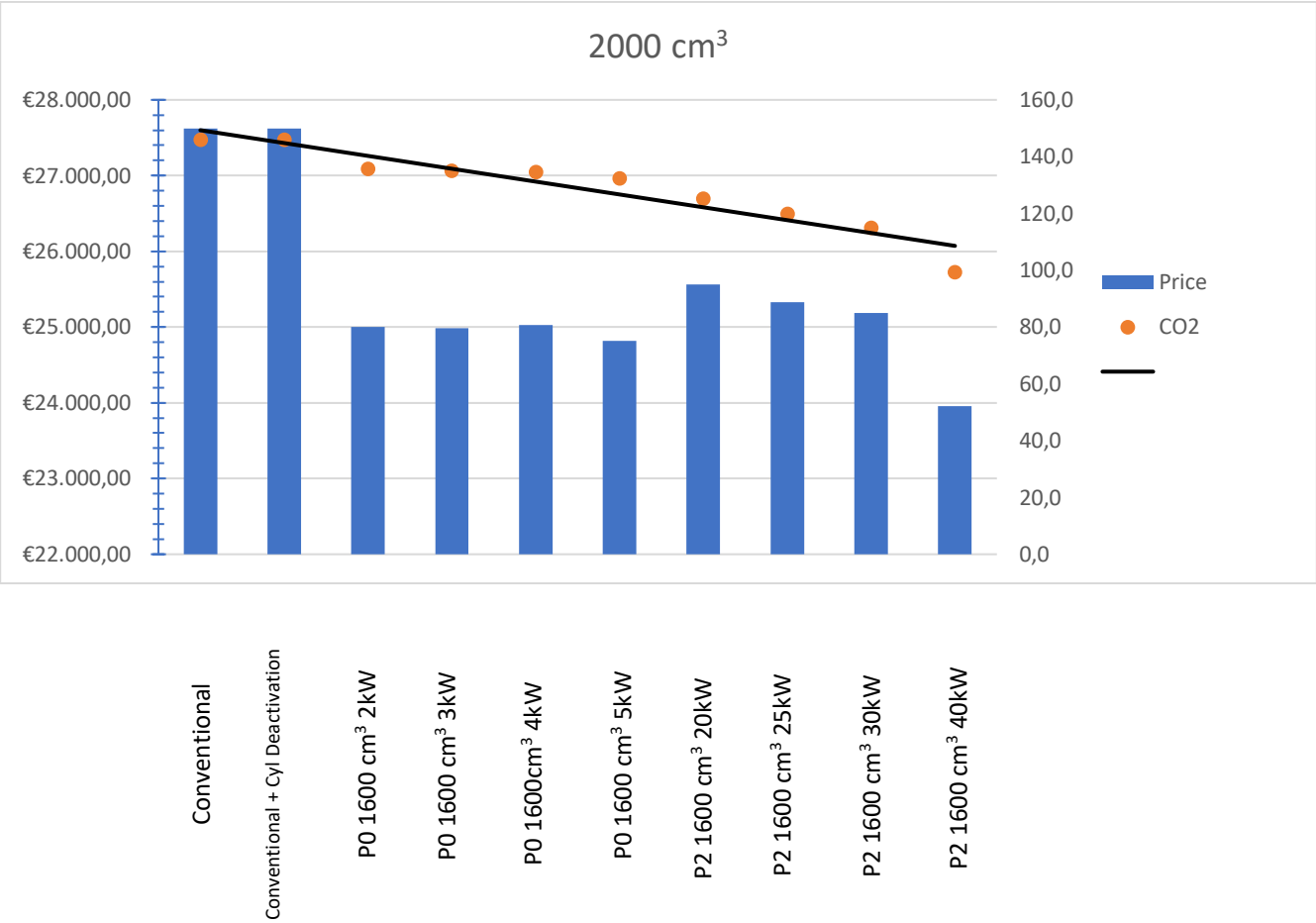


Figura 97: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 2000 cm^3; chilometri percorsi: 100.000 km

❖ Chilometri percorsi: 150.000 km

Conventional										
Size Engine	Size Electrical Motor	Potenza batteria	Potenza /Energy ratio	Final Drive (FD)	Torque Coupling	Emission CO2	Price		Goal Emissio n	Goal Price
[cm^3]	[KW]	[KW]	[-]	[-]	[-]	[g/km]	[€]		[%]	[%]
1300	-	-	-	2,4	-	127,2	33.424,50		-	-
1600	-	-	-	3,5	-	139,8	35.891,49		-	-
2000	-	-	-	2,4	-	146,0	39.956,74		-	-
Cilinder Deactivation										
1300	-	-	-	2,4	-	127,1	33.386,01		-0,11%	-0,12%
1600	-	-	-	3,5	-	139,8	35.891,49		-0,03%	0,00%
2000	-	-	-	2,4	-	146,0	39.956,74		-0,02%	0,00%
P0										
1300	2	2	3,3333	4,2	2,1	124,10	32.289,07		-2,47%	-3,40%
1300	3	3	3,3333	4,0	2,1	123,30	32.187,69		-3,10%	-3,70%
1300	4	4	3,3333	3,8	1,8	117,78	30.988,17		-7,43%	-7,29%
1300	5	5	3,3333	3,7	2,0	117,52	31.052,26		-7,64%	-7,10%
1600	2	2	3,3333	3,8	2,9	133,93	35.093,15		-4,20%	-2,22%

1600	3	3	3,3333	3,8	2,8	132,94	34.945,02	-4,91%	-2,64%
1600	4	4	3,3333	3,8	3,0	132,71	35.016,85	-5,07%	-2,44%
1600	5	5	3,3333	3,8	2,8	128,59	34.153,61	-8,02%	-4,84%
2000	2	2	3,3333	4,0	2.8	135,77	35.889,04	-7,01%	-10,18%
2000	3	3	3,3333	4,0	2,8	135,07	35.813,03	-7,48%	-10,37%
2000	4	4	3,3333	4,0	2,4	134,59	35.823,17	-7,82%	-10,35%
2000	5	5	3,3333	3,7	2,8	132,48	35.443,64	-9,26%	-11,29%
P2									
1300	20	20	3,3333	2,3	1,6	107,8	30.603,84	-15,31%	-8,44%
1300	25	25	3,3333	2,3	1,6	104,9	30.551,06	-17,55%	-8,60%
1300	30	30	3,3333	2,4	1,6	98,7	29.690,53	-22,43%	-11,17%
1300	40	40	3,3333	2,0	2,8	89,5	28.737,05	-29,69%	-14,02%
1600	20	20	3,3333	3,0	2,4	115,1	32.819,76	-17,63%	-8,56%
1600	25	25	3,3333	2,7	3,0	113,2	32.991,48	-19,01%	-8,08%
1600	30	30	3,3333	2,7	2,6	106,9	32.112,63	-23,50%	-10,53%
1600	40	40	3,3333	2,7	2,6	100,5	31.839,44	-28,08%	-11,29%
2000	20	20	3,3333	3,0	2,0	125,3	35.610,79	-14,19%	-10,88%
2000	25	25	3,3333	2,9	1,2	119,8	34.933,55	-17,92%	-12,57%
2000	30	30	3,3333	2,9	1,2	115,0	34.414,00	-21,21%	-13,87%
2000	40	40	3,3333	3,5	1,2	99,4	31.929,70	-31,89%	-20,09%

Tabella 46: Risultati ottenuti 150.000 km

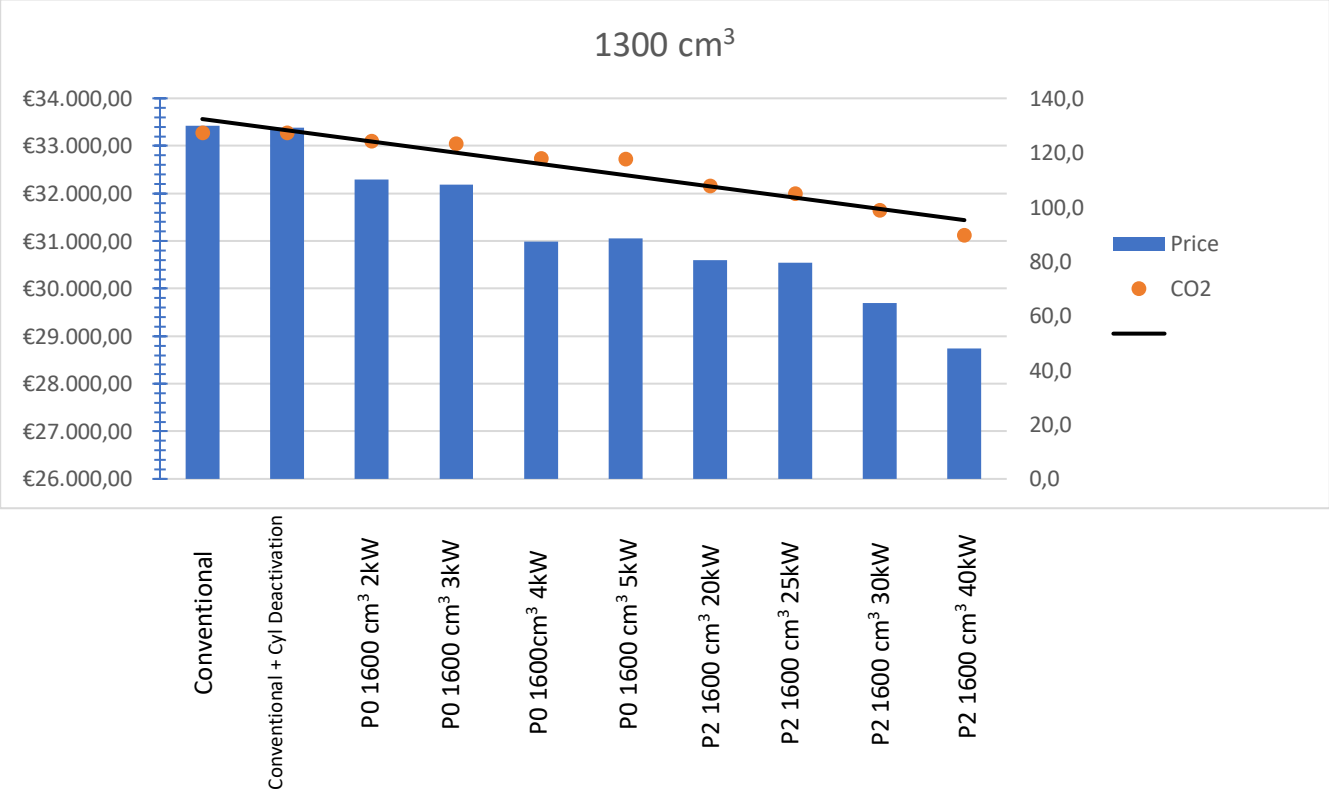


Figura 98: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 1300 cm^3; chilometri percorsi: 150.000 km

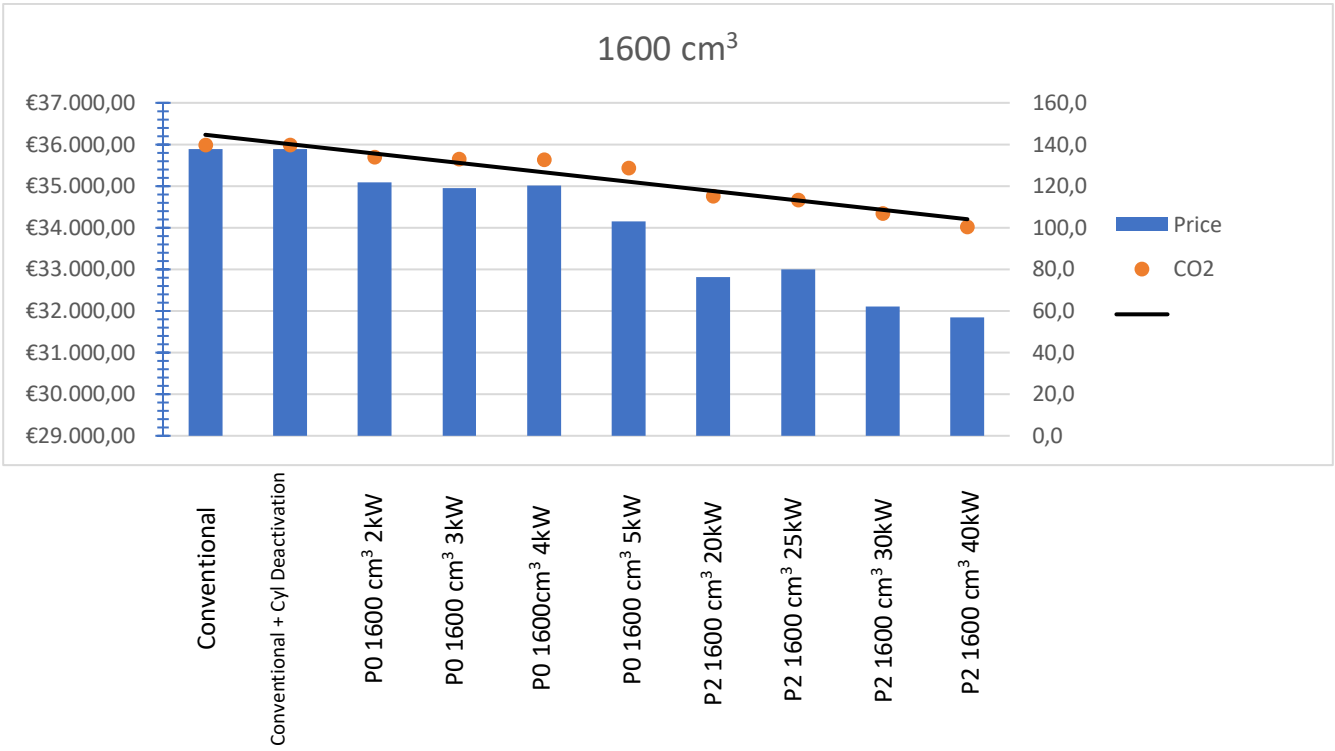


Figura 99: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 1600 cm^3; chilometri percorsi: 150.000 km

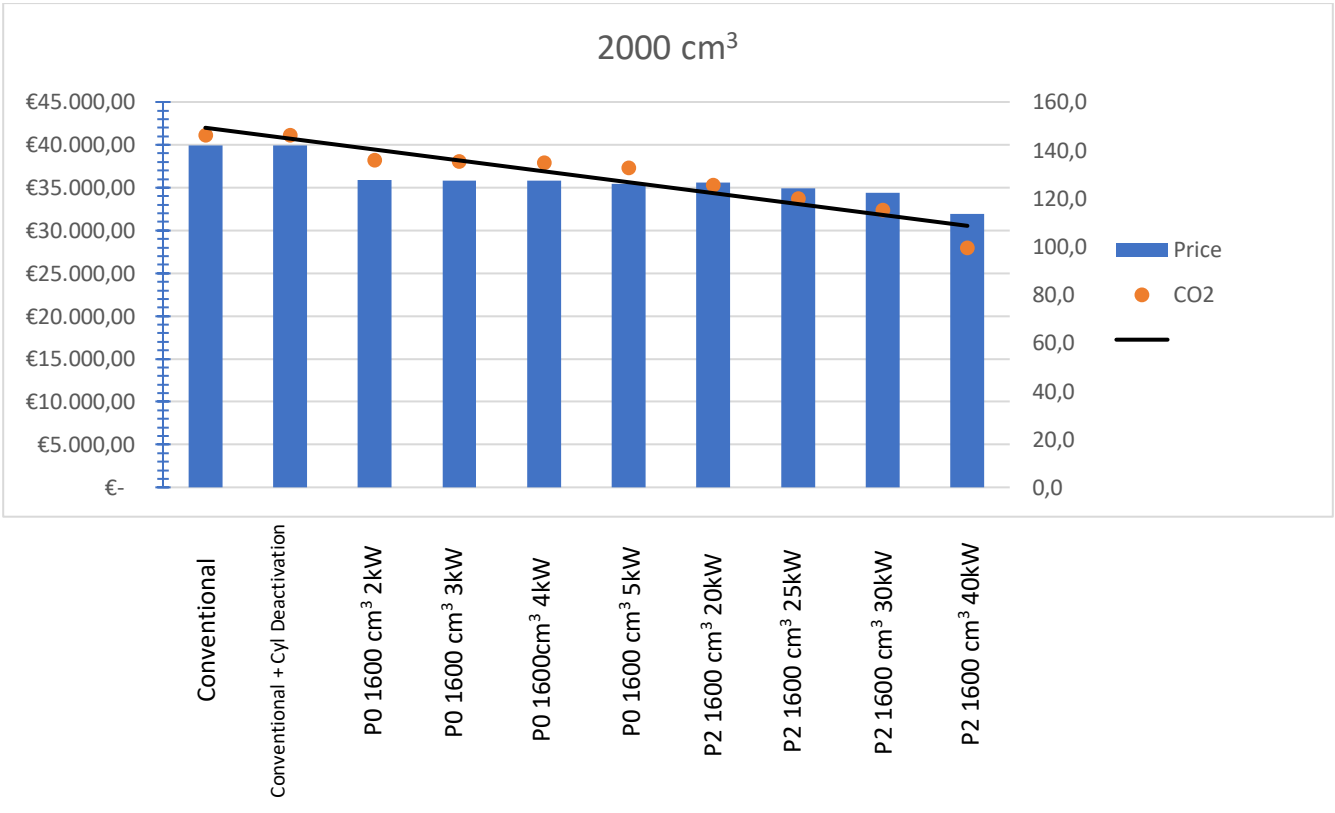


Figura 100: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 2000 cm^3; chilometri percorsi: 150.000 km

❖ Chilometri percorsi: 200.000 km

Conventional										
Size Engine	Size Electrical Motor	Potenza batteria	Potenza/Energy ratio	Final Drive (FD)	Torque Coupling	Emission CO2	Price		Goal Emission	Goal Price
[cm^3]	[KW]	[KW]	[-]	[-]	[-]	[g/km]	[€]		[%]	[%]
1300	-	-	-	2,4	-	127,2	43.850,33		-	-
1600	-	-	-	3,5	-	139,8	46.993,65		-	-
2000	-	-	-	2,4	-	146,0	52.295,99		-	-
Cilinder Deactivation										
1300	-	-	-	2,4	-	127,1	43.799,02		-0,11%	-0,12%
1600	-	-	-	3,5	-	139,8	46.993,65		-0,03%	0,00%
2000	-	-	-	2,4	-	146,0	52.295,99		-0,02%	0,00%
P0										
1300	2	2	3,3333	4,2	2,1	124,10	42.240,29		-2,47%	-3,67%
1300	3	3	3,3333	4,0	2,1	123,30	42.074,55		-3,10%	-4,05%
1300	4	4	3,3333	3,8	1,8	117,78	40.432,97		-7,43%	-7,79%
1300	5	5	3,3333	3,7	2,0	117,52	40.476,18		-7,64%	-7,69%
1600	2	2	3,3333	3,8	2,9	133,93	45.833,07		-4,20%	-2,47%
1600	3	3	3,3333	3,8	2,8	132,94	45.604,99		-4,91%	-2,96%
1600	4	4	3,3333	3,8	3,0	132,71	45.658,53		-5,07%	-2,84%
1600	5	5	3,3333	3,8	2,8	128,59	44.465,31		-8,02%	-5,38%
2000	2	2	3,3333	4,0	2.8	135,77	46.776,25		-7,01%	-10,55%
2000	3	3	3,3333	4,0	2,8	135,07	46.644,34		-7,48%	-10,81%
2000	4	4	3,3333	4,0	2,4	134,59	46.615,62		-7,82%	-10,86%
2000	5	5	3,3333	3,7	2,8	132,48	46.067,35		-9,26%	-11,91%
P2										
1300	20	20	3,3333	2,3	1,6	107,8	39.244,78		-15,31%	-10,50%
1300	25	25	3,3333	2,3	1,6	104,9	38.963,25		-17,55%	-11,14%
1300	30	30	3,3333	2,4	1,6	98,7	37.604,70		-22,43%	-14,24%
1300	40	40	3,3333	2,0	2,8	89,5	35.911,06		-29,69%	-18,11%
1600	20	20	3,3333	3,0	2,4	115,1	42.053,35		-17,63%	-10,51%
1600	25	25	3,3333	2,7	3,0	113,2	42.071,14		-19,01%	-10,47%
1600	30	30	3,3333	2,7	2,6	106,9	40.688,17		-23,50%	-13,42%
1600	40	40	3,3333	2,7	2,6	100,5	39.901,58		-28,08%	-15,09%
2000	20	20	3,3333	3,0	2,0	125,3	45.656,72		-14,19%	-12,70%
2000	25	25	3,3333	2,9	1,2	119,8	44.542,57		-17,92%	-14,83%
2000	30	30	3,3333	2,9	1,2	115,0	43.638,67		-21,21%	-16,55%
2000	40	40	3,3333	3,5	1,2	99,4	39.903,93		-31,89%	-23,70%

Tabella 47: Risultati ottenuti 200.000 km

I grafici, di seguito riportati, descrivono meglio l'andamento dei costi e delle quantità di emissione stimati di CO_2, avendo così una panoramica di insieme tra le varie architetture e poter realizzare un

confronto:

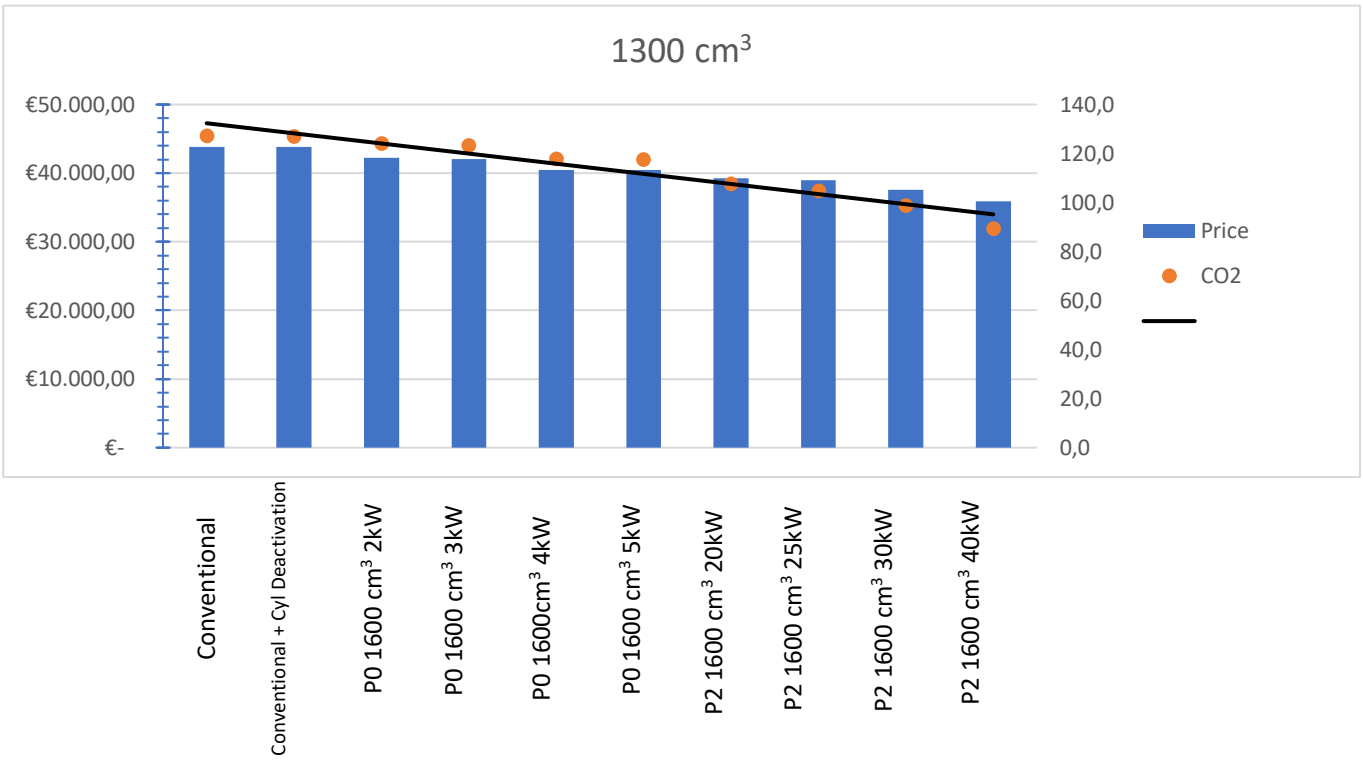


Figura 101: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 1300 cm^3; chilometri percorsi: 200.000 km

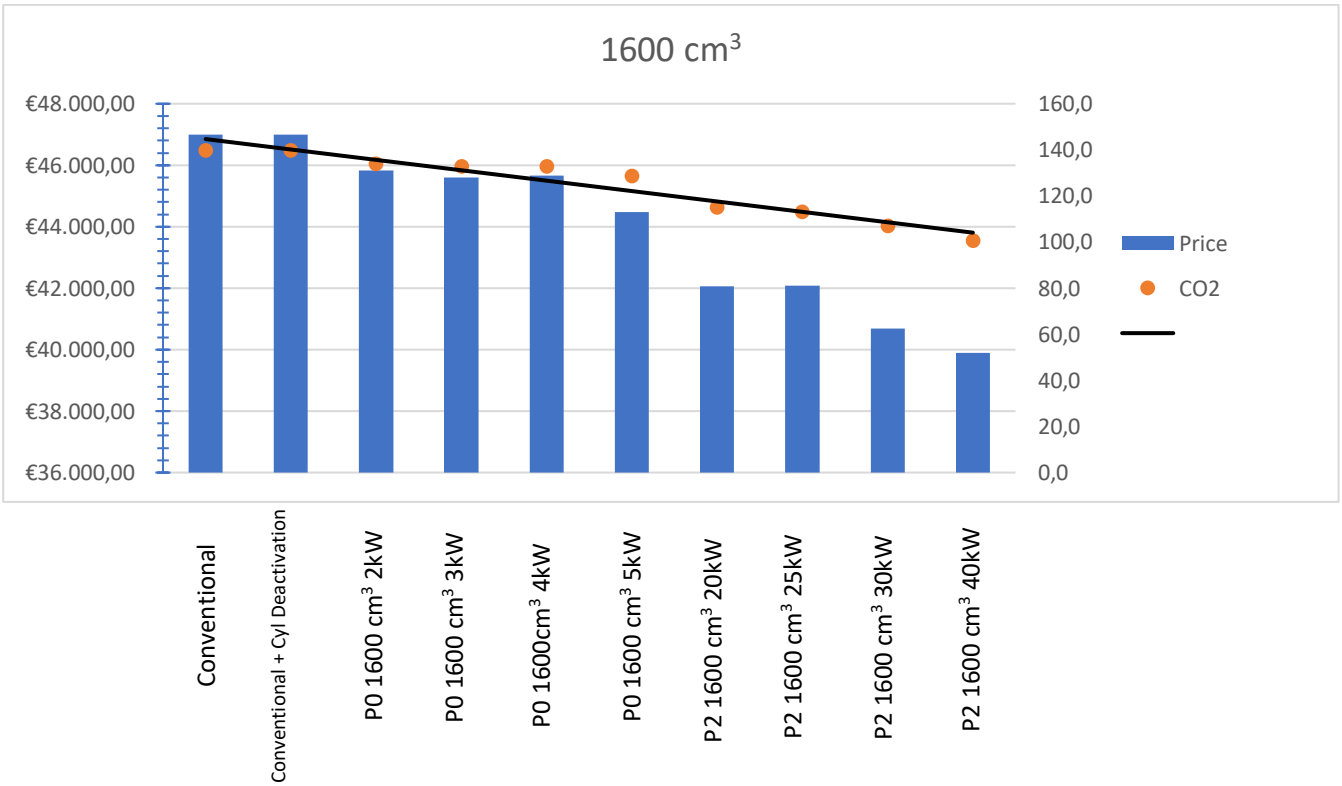


Figura 102: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 1600 cm^3; chilometri percorsi: 200.000 km

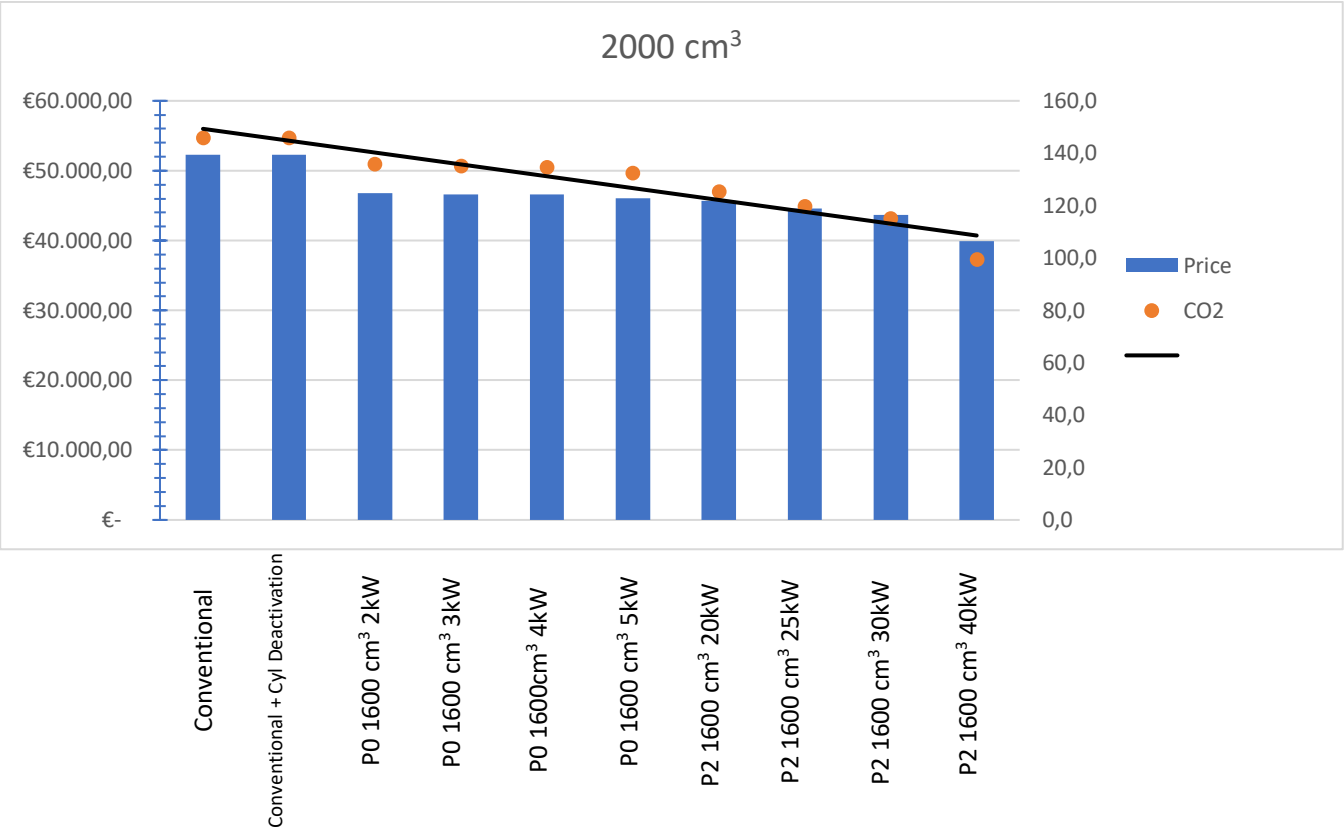


Figura 103: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 2000 cm^3; chilometri percorsi: 200.000 km

❖ Chilometri percorsi: 300.000 km

Conventional										
Size Engine	Size Electrical Motor	Potenza batteria	Potenza/Energy ratio	Final Drive (FD)	Torque Coupling	Emission CO2	Price		Goal Emission	Goal Price
[cm^3]	[KW]	[KW]	[-]	[-]	[-]	[g/km]	[€]		[%]	[%]
1300	-	-	-	2,4	-	127,2	64.702,00		-	-
1600	-	-	-	3,5	-	139,8	69.197,98		-	-
2000	-	-	-	2,4	-	146,0	76.974,48		-	-
Cilinder Deactivation										
1300	-	-	-	2,4	-	127,1	64.625,03		-0,11%	-0,12%
1600	-	-	-	3,5	-	139,8	69.197,98		-0,03%	0,00%
2000	-	-	-	2,4	-	146,0	76.974,48		-0,02%	0,00%
P0										
1300	2	2	3,3333	4,2	2,1	124,10	62.142,73		-2,47%	-3,96%
1300	3	3	3,3333	4,0	2,1	123,30	61.848,27		-3,10%	-4,41%
1300	4	4	3,3333	3,8	1,8	117,78	59.322,55		-7,43%	-8,31%
1300	5	5	3,3333	3,7	2,0	117,52	59.324,02		-7,64%	-8,31%
1600	2	2	3,3333	3,8	2,9	133,93	67.312,90		-4,20%	-2,72%
1600	3	3	3,3333	3,8	2,8	132,94	66.924,93		-4,91%	-3,28%

1600	4	4	3,3333	3,8	3,0	132,71	66.941,89		-5,07%	-3,26%
1600	5	5	3,3333	3,8	2,8	128,59	65.088,71		-8,02%	-5,94%
2000	2	2	3,3333	4,0	2.8	135,77	68.550,67		-7,01%	-10,94%
2000	3	3	3,3333	4,0	2,8	135,07	68.306,96		-7,48%	-11,26%
2000	4	4	3,3333	4,0	2,4	134,59	68.200,54		-7,82%	-11,40%
2000	5	5	3,3333	3,7	2,8	132,48	67.314,78		-9,26%	-12,55%
P2										
1300	20	20	3,3333	2,3	1,6	107,8	56.526,68		-15,31%	-12,64%
1300	25	25	3,3333	2,3	1,6	104,9	55.787,63		-17,55%	-13,78%
1300	30	30	3,3333	2,4	1,6	98,7	53.433,05		-22,43%	-17,42%
1300	40	40	3,3333	2,0	2,8	89,5	50.259,09		-29,69%	-22,32%
1600	20	20	3,3333	3,0	2,4	115,1	60.520,52		-17,63%	-12,54%
1600	25	25	3,3333	2,7	3,0	113,2	60.230,46		-19,01%	-12,96%
1600	30	30	3,3333	2,7	2,6	106,9	57.839,25		-23,50%	-16,41%
1600	40	40	3,3333	2,7	2,6	100,5	56.025,87		-28,08%	-19,04%
2000	20	20	3,3333	3,0	2,0	125,3	65.748,59		-14,19%	-14,58%
2000	25	25	3,3333	2,9	1,2	119,8	63.760,60		-17,92%	-17,17%
2000	30	30	3,3333	2,9	1,2	115,0	62.088,00		-21,21%	-19,34%
2000	40	40	3,3333	3,5	1,2	99,4	55.852,39		-31,89%	-27,44%

Tabella 48: Risultati ottenuti 300.000 km

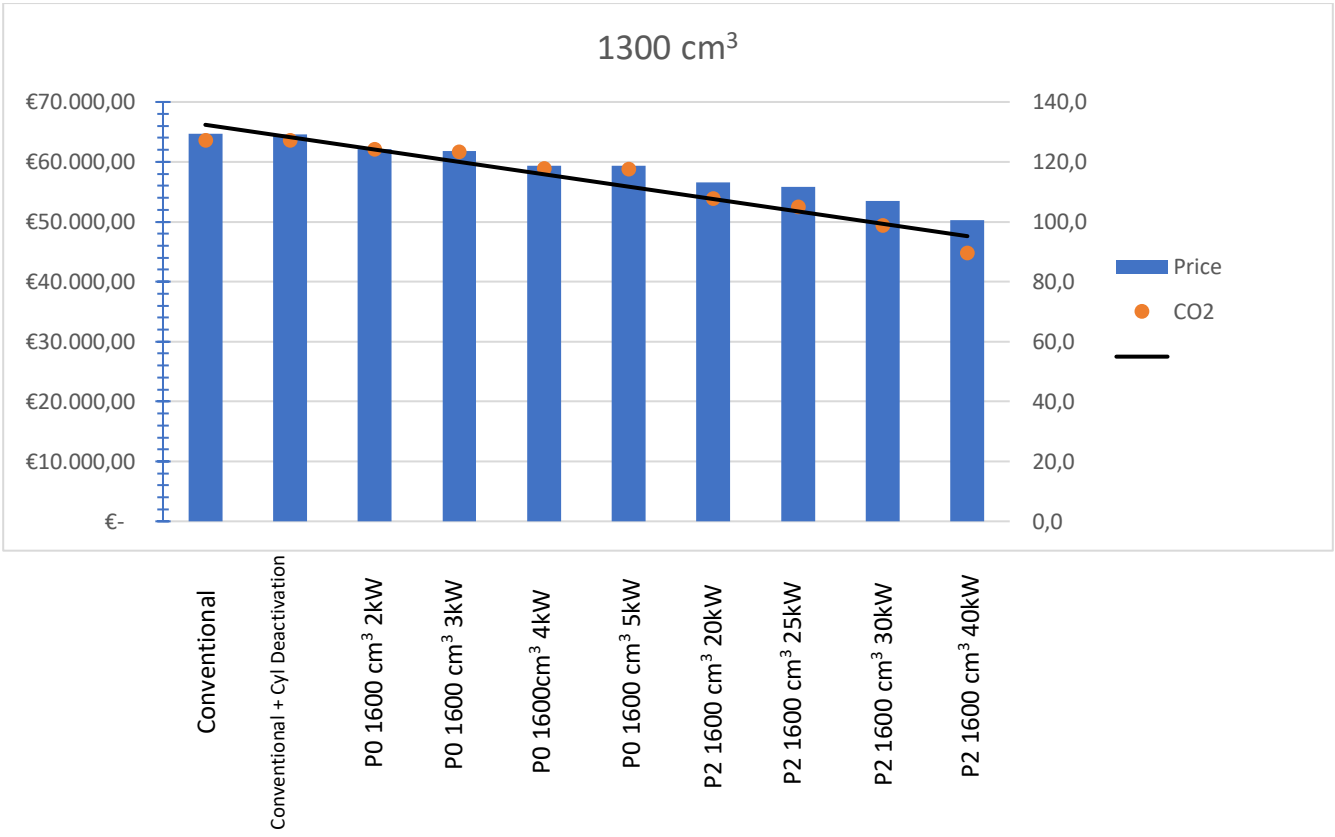


Figura 104: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 1300 cm^3; chilometri percorsi: 300.000 km

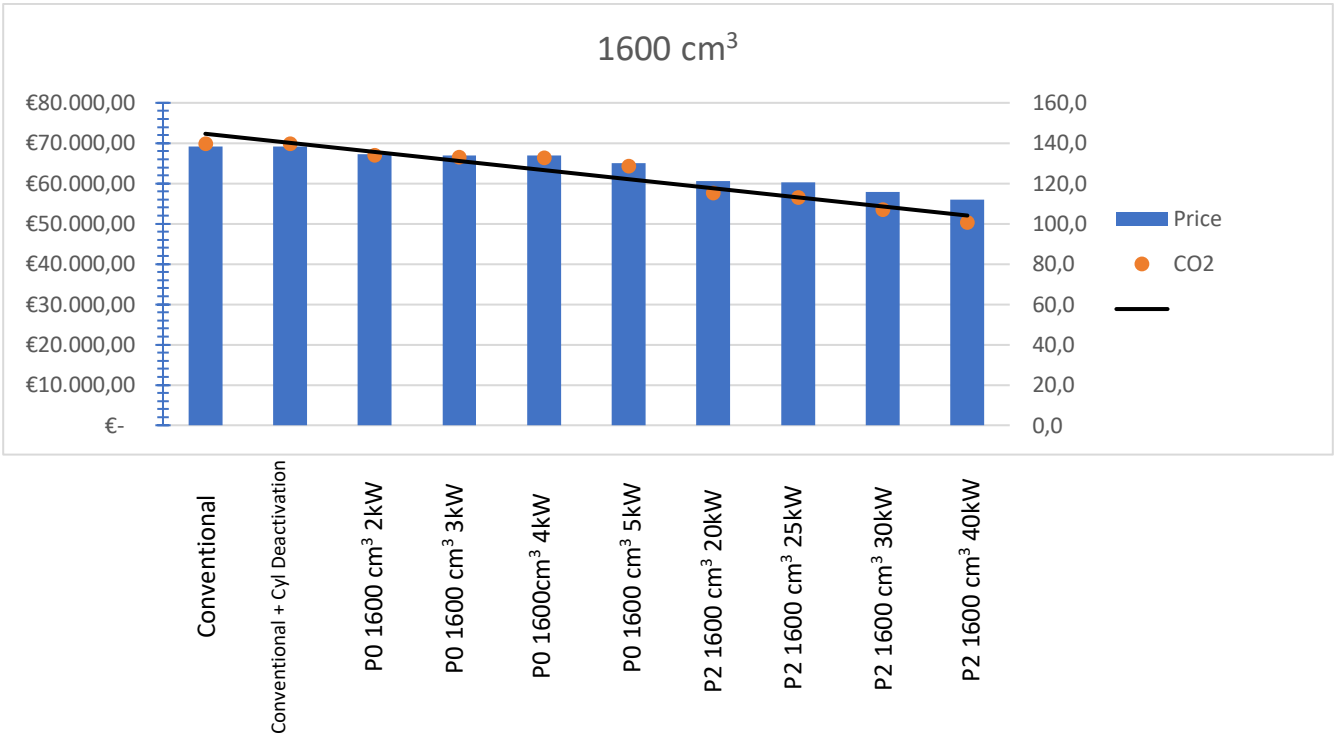


Figura 105: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 1600 cm^3; chilometri percorsi: 300.000 km

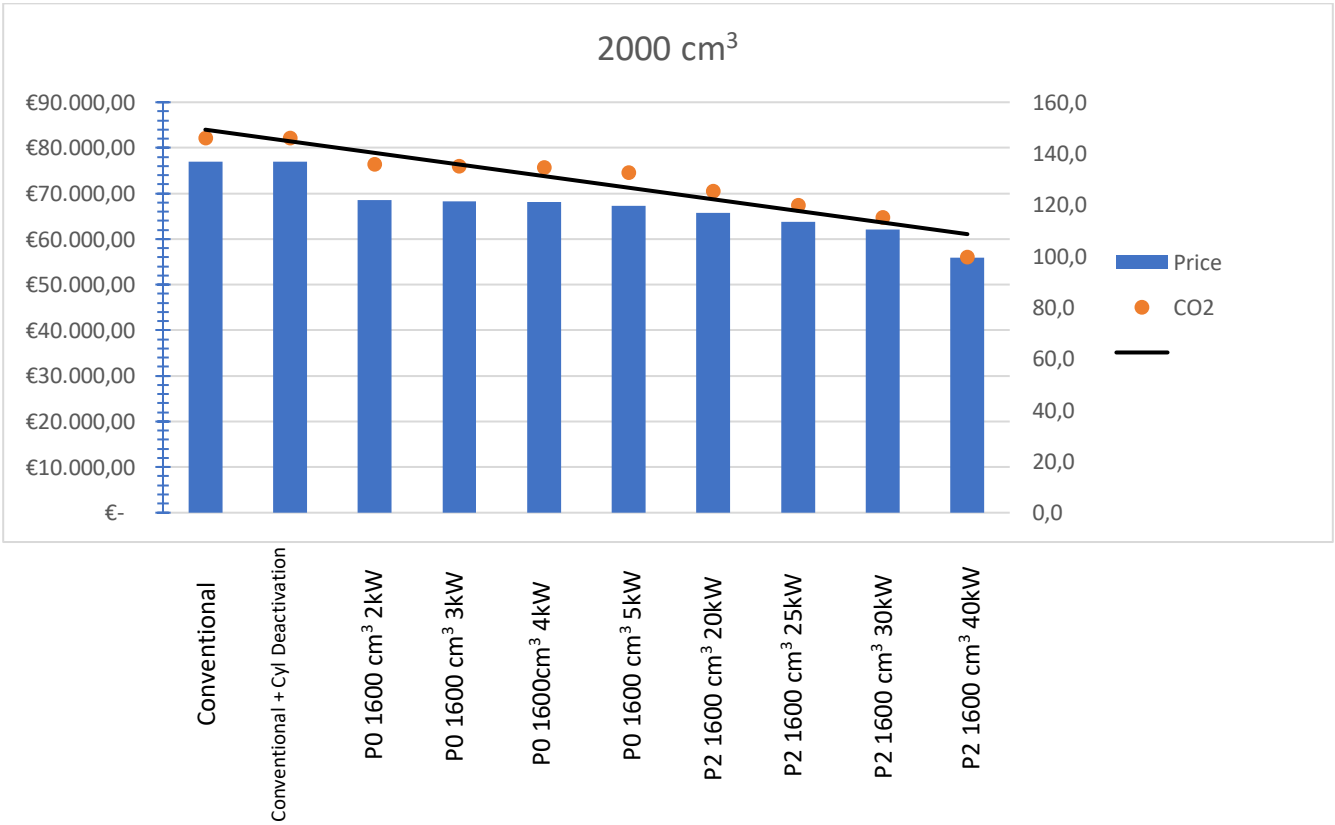


Figura 106: Analisi costi / Benefici in termini di CO_2 - 2000 cm^3; chilometri percorsi: 300.000 km

Dalla sequenza dei grafici riportati si riesce a dedurre che il periodo iniziale con un attivo di 0 – 50.000 km, descrive uno scenario dove l'architettura convenzionale risulta essere la più vantaggiosa. Mentre, analizzando i costi – benefici relativi ad un chilometraggio compreso tra 100.000 – 150.000 km avviene l'inversione della curva dei costi dove la vettura con architettura ibrida risulta essere decisamente la più vantaggiosa. La conferma dell'inversione della curva e quindi del beneficio che si ha è dato dal grafico relativo ai 300.000km.

Per le tre motorizzazioni, osservate a distanza di 10 anni (età massima considerata per ciascun veicolo) e di range di chilometri percorsi, il veicolo ad architettura convenzionale, dopo un corposo utilizzo oltre ad avere un costo elevato ha comunque un quantitativo di emissioni decisamente alto. Al contrario, invece, per l'ibrido P2 con una macchina elettrica di 40 kW a parità di anni di vita e anche essa con una quantità cospicua di chilometri in attivo, avrà un costo decisamente inferiore che ripaga l'investimento adottato, inoltre, c'è una riduzione delle emissioni che a livello tecnologico, di omologazione ed anche etico ha un valore non indifferente.

Capitolo 13: Conclusioni

La sfida iniziale di riduzione del quantitativo di combustibile e delle emissioni di CO_2 allo scarico ha avuto un ottimo riscontro.

Così come esposto nell'introduzione, gli obiettivi per garantire la realizzazione del ciclo WLTP avendo il minor quantitativo di CO_2 è stato suddiviso in tre diversi aspetti, riepilogati di seguito:

- Tecnico
- Economico
- Tecnico + Economico

Molto spesso per questo tipo di analisi, non è possibile definire a priori quale di questi tre punti sia la miglior soluzione per un costruttore. In base alle politiche interne è possibile quindi definire quale sia la più adatta per il proprio obiettivo. Proprio per questo non si è voluto studiare il singolo caso, proprio per non limitare i punti di scelta, ma fornire un pacchetto di informazioni molto più ampio.

Questa analisi si può fare su molte variabili che entrano in gioco, ma conoscendo le risorse e la potenzialità degli HW di calcolo a disposizione, non è possibile poterle considerarle tutte. Ciò avviene anche per un costo di impiego della macchina che simula tutte le varie possibilità. Per poter eliminare del lavoro che in un primo momento può sembrare indispensabile è necessario analizzarlo attraverso una ben determinata metodologia. Nel caso studio è stato utilizzato il full factorial con più livelli, solo su determinati parametri ritenuti di rilievo per il raggiungimento dell'obiettivo finale.

Dopo attente e scrupolose considerazioni assunte in fase di creazione del modello, pur considerando una strategia di controllo ECMS in cui è nota a priori la missione e quindi l'ottimizzazione risulta essere globale.

Considerando che la normativa di omologazione fa riferimento all'intera flotta e non al singolo veicolo, che un costruttore possa produrre, avere una riduzione globalmente del 5% minimo (P0) o del 30% massimo (P2) di combustibile, sono valori decisamente importanti, sia per l'omologazione della vettura ma anche per il rispetto dell'ambiente e degli esseri viventi che popolano il pianeta. La questione di considerare diverse taglie di motore termico, specialmente diesel, non è stato un caso, anzi, conferma un'ipotesi iniziale che se la motorizzazione diesel possa avere ancora margini di vita utile oppure no. Considerando i vari utilizzi che si fanno dell'autovettura è possibile scegliere le varie taglie e le varie combinazioni in funzione dell'utilizzo.

A titolo di esempio se considerassimo un tassista che percorre prevalentemente un circuito urbano, sarebbe opportuno fornirgli una motorizzazione Diesel con cilindrata 1300 cm^3, mentre, la taglia della macchina elettrica è subordinata ai chilometri percorsi. Viceversa, se la percorrenza è prevalentemente extraurbana o autostradale è consigliabile adottare una motorizzazione con una cilindrata superiore (1600 cm^3 o 2000 cm^3).

Una parentesi che riguarda il Software di simulazione Amesim Simcenter è sostanzialmente legata all'utilizzo e l'interfaccia utente. È risultato un programma molto pratico per chi alle prime esperienze vorrebbe implementare un modello al suo interno. La questione di avere un'interfaccia che ti guida passo passo nella creazione del modello, spesso limita lo studio di fattori importanti come per la taglia della batteria nel caso studio affrontato.

Riprendendo le analisi, concludo che non va assolutamente trascurato, comunque, che in alcuni stati come l'Italia, non avendo una situazione economica e sociale delle più rosee, si ha un rallentamento dell'insediamento delle tecnologie più avanzate che potrebbero rivoluzionare, in parte, la situazione ambientale attuale. Nel breve termine non si avvertiranno i benefici che questa tecnologia può apportare, ma lo si vedrà nel lungo periodo poiché l'autovettura per una famiglia comune, diventa un investimento oneroso che solo pochi riescono a sostenere nell'immediato.

Come si è potuto osservare dall'analisi dei costi, un veicolo ibrido, ha una importante spesa iniziale con un gap non indifferente rispetto ad un veicolo convenzionale. Il maggior utilizzo della vettura nel tempo, oltre a permettere di recuperare il gap iniziale, comporta una situazione di netto vantaggio.

In pratica, considerando la motorizzazione 1300 cm^3 P0 ha un costo iniziale (batteria + produzione+ fuel consumption a 0 km) di 2.780,50€, mentre per il P2 è di 7.215,00€. Se con questi valori adottassimo un confronto a parità di condizioni, con il veicolo convenzionale vedremo che il costo totale è di 2.147,00€ inferiore di quanto visto per il caso P0 e P2.

A distanza di 10 anni, analizzando un diverso utilizzo in chilometri del veicolo, troveremo che ci sarà un'inversione della curva dei costi, definito break-even point (nell'intorno dei 50.000 – 150.000 km) che quindi permetterà di avvalere la tesi che l'ibrido risulta conveniente, anche sotto un punto di vista economico.

Bibliografia

Amsim, S. (s.d.). Help -HOT.

Auto, N. (s.d.). *News Auto*. Tratto da News Auto: https://www.newsauto.it/guide/full-hybrid-auto-ibrida-come-funziona-2019-194662/

Continental. (s.d.). *Continental Automotive*. Tratto da Continental: https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Powertrain/Electrification/12-Volt-Micro-Hybrid

DieselNet. (2019, 01 01). *Emission test Cycles*. Tratto da DieselNet: https://www.dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php

Ferrari, G. (2016). Motori a combustione interna. In G. Ferrari, *Motori a combustione interna* (p. Brossura). Esculapio.

Gomez, P. (s.d.). *Il fatto quotidiano*. Tratto da Il fatto quotidiano: https://www.ilfattoquotidiano.it/2019/08/30/auto-addio-euro-6-dal-primo-settembre-scattano-le-norme-euro-6d-temp/5419823/

Jean-Charles Dabadie, A. S. (09/04/2017). Automatic Generation of Online Optimal Energy. *SAE Internetional*, 9.

M. Ehsani, Y. G. (2005). Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. CRC PRESS.

Marco Sorrentino, F. M. (09/06/2015). Application of Willans Line Method for Internal Combustion Engines Scalability towards the Design and Optimization of Eco-Innovation Solutions. *SAE International*, 11.

Roberto Finesso, E. S. (2016). An Unsupervised Machine-Learning Technique for the Definition. *Sae Internetional*.

Roberto Finesso, E. S. (2016). Cost-optimized design of a dual-mode diesel parallel hybrid electric. *ScienceDirect*.

Wikipedia. (2019, Aprile 08). *Wikipedia*. Tratto da Wikipedia: https://it.wikipedia.org/wiki/Procedura_di_prova_per_veicoli_leggeri_armonizzata_a_livello_mondiale

x-engineer. (s.d.). *x-engineer engineering tutorials*. Tratto da x-engineer: https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/hybrid/mild-hybrid-electric-vehicle-mhev-introduction/