

**Università degli Studi di Roma  
“Sapienza”**

**Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile  
ed Ambientale**



Dottorato di Ricerca in Infrastrutture e

Trasporti XXXII Ciclo

Curriculum: Pianificazione dei Trasporti e del Territorio

**Manutenzione e Sviluppo Sostenibile  
della Flotta**

Tutor: Prof. Luca Persia

Co-Tutor: Prof. Adriano Alessandrini

Dottorando: Ing. Edoardo Chiulli

## Ringraziamenti

Vorrei ringraziare in queste poche righe tutte le persone che, in varie occasioni, hanno contribuito a questo mio lavoro. Dal punto di vista scientifico devo ringraziare innanzitutto per l'opportunità, la disponibilità e il grande supporto scientifico il mio Tutor, Prof. Luca Persia ed il mio Co-Tutor Prof. Adriano Alessandrini.

*Nella vita le battaglie che bisogna combattere non sono quelle che si è sicuri di vincere, ma quelle in cui si crede.*

A mia Moglie Alma, Alla Mia famiglia,

Al Magnifico Rettore Prof. Luciano D'Amico

Agli Ingg. Bottazzi Andrea & Raffaele Ambrosini

Al PhD Albert Hajnaj

## Sommario

Ringraziamenti .....	1
Indice delle Figure .....	5
Indice delle Tabelle.....	10
Premessa.....	11
INTRODUZIONE.....	20
Inquadramento della Ricerca .....	20
Scopo ed Obiettivo della ricerca .....	23
CAPITOLO 1 – Le “BUS OPTION” .....	27
1.1 Autobus DIESEL (Euro V ed Euro VI).....	27
1.2 Bus CNG (Compressed Natural Gas) .....	33
1.3 Autobus LNG (Liquefied Natural Gas) .....	38
1.3.1 I sistemi “Dual Fuel” .....	42
1.4 Biofuels .....	45
1.5 Bus elettrici.....	49
1.6 Trolley BUS .....	53
1.7 Bus Diesel Hybrid – Hybrid/Electric.....	56
1.7.1 Proiezioni tecnologiche per autobus ibridi e autobus elettrici.....	60
1.8 Tecnologie ibride per gli autobus .....	62
1.8.1 Ibrido seriale .....	65
1.8.2 Ibrido parallelo .....	66
1.8.3 Ibrido misto.....	66
1.9 Autobus Fuel Cell.....	67
CAPITOLO 2 Analisi del Total Cost Ownership dei BUS per il Trasporto pubblico locale	76
2.1 Costi ambientali per il TPL: inquadramento normativo .....	76
2.2 Environmental challenges in public transport.....	84
2.3 L’inquinamento atmosferico da traffico stradale .....	89
2.4 I principali inquinanti da traffico.....	93
2.5 Andamento del Total Cost of Ownership (TCO) delle tecnologie sostenibili per l’autobus .....	99
CAPITOLO 3 - Sviluppo di un modello per l’individuazione di parametri nell’introduzione di sistemi di trazione sostenibili nelle flotte per il trasporto pubblico locale .....	113
3.1 Confronto tra le diverse “bus option” .....	118

3.2 L'analisi dei dati L.C.C. (Life Cycle Cost) come orientamento nell'introduzione di sistemi di trazione sostenibili nelle flotte per il trasporto pubblico locale .....	123
3.3 Targets a breve e lungo termine.....	138
3.4 Influenza della pendenza del tracciato .....	141
CAPITOLO 4 Il WELL-TO-WHEEL .....	145
4.1 Il Well To Wheel (WTW): Well To Tank (WTT) e Tank to Wheel (TTW).....	148
4.1.1 Il Well-To-Tank (WTT).....	150
4.1.2 Il Tank-To-Wheel (TTW).....	151
4.1.3 Il Well-To-Wheel (WTW) .....	152
4.2 La relazione fra il consumo di energia del Well-To-Wheel e i gas serra.....	154
4.2.1 Considerazioni valide per i combustibili e le tecnologie convenzionali e per quelle ibride. ....	155
4.2.2 Il WTW per il Gas Naturale Compresso (CNG).....	157
4.2.3 Il WTW per il Biogas Compresso (CBG).....	160
4.2.4 Il WTW per le tecnologie dell'idrogeno.....	162
4.2.5 Relazione finale fra WTW e emissioni GHG per i combustibili analizzati.....	165
CAPITOLO 5 - Costi standard quale soluzione efficace per la sostenibilità economica ed ambientale .....	167
5.1 I modelli di costi standard .....	169
5.2 La velocità commerciale nel calcolo del costo standard.....	173
5.3 Il numero di veicoli-chilometri nel calcolo del costo standard .....	175
5.4 L'ammodernamento della flotta nel calcolo del costo standard .....	176
5.5 L'influenza dei parametri inquinanti sui costi standard.....	177
5.6 Metodologia di calcolo dei costi di esercizio durante l'intero arco di vita.....	178
5.7 I consumi dei veicoli adibiti al trasporto pubblico locale .....	181
5.8 Le emissioni dei veicoli adibiti al trasporto pubblico locale.....	182
5.8.1 European Steady Cycle .....	183
5.8.2 European Transient Cycle.....	185
5.9 La metodologia SORT (Standardized On-Road Test).....	185
5.10 Cicli SORT-Hy per veicoli ibridi .....	190
CAPITOLO 6 - La gestione della flotta attraverso la metodologia L.C.C. (life cycle cost). Analisi aziendali di costi energetici, ambientali e di manutenzione .....	193
6.1 I vantaggi apportati dall'L.C.C. nella gestione della flotta per Tpl .....	199
6.2 I sistemi informativi per la gestione integrata delle flotte per il Tpl .....	202



6.3 I costi di manutenzione: il metodo del Life Cycle Cost (LCC) .....	206
6.3.1 I costi manutentivi del parco mezzi .....	210
6.4 I costi esterni: energia ed emissioni .....	212
6.5 I COSTI CHILOMETRICI della flotta .....	215
CAPITOLO 7- Elaborazione dei dati di manutenzione .....	216
7.1 Analisi dei dati manutentivi .....	216
7.2 Elaborazione incidenza Costo Ricambi .....	219
7.3 Utilizzo dell’L.C.C. per comparare i diversi sistemi di trazione in ottica di sostenibilità dello sviluppo della Flotta .....	224
7.4 Impatto della Metodologia Life Cycle Cost sulla gestione del magazzino ricambi in un’azienda di trasporto pubblico locale .....	229
CAPITOLO 8 - Infrastrutture per i sistemi di trazione nel TPL .....	236
8.1.1 Flessibilità della trazione elettrica e dell’infrastruttura filoviaria .....	241
8.1.2 I sistemi di ricarica elettrica per veicoli TPL .....	242
8.2.3 La stazione di metano liquido .....	244
8.2.4 Applicazione della modalità di scelta strategica all’offerta del mercato dei veicoli .....	247
8.2.5 Economie di scala nell’alimentazione di autobus a metano, elettrici, a batteria e filoviaria .....	250
9.0 La valutazione dei risultati conseguiti .....	254
10.0 Applicazioni .....	256
11.0 CONCLUSIONI .....	260
12.0 Appendice .....	269
12.1 <i>Appendice: Different application and Weight classes will see varyng breakeven points for electric vehicle TCO</i> .....	269
12.2 <i>Appendice: Filiera integrata del Biometano – Economia circolare</i> .....	270
12.3 <i>Appendice: Comparison of BUS technologies on a set of indicators</i> .....	271
12.4 <i>Appendice: Confronto sistemi di trazione Autobus</i> .....	273
12.5 <i>Appendice: Costi LCC delle flotte analizzate (parte del database)</i> .....	274
12.5 <i>Appendice: Costi LCC delle flotte analizzate (parte del database)</i> .....	276
12.6 <i>Appendice: Busworld experience – Bruxelles, October 2019</i> .....	278
Acronyms .....	281
Bibliografia .....	282

## Indice delle Figure

Figura 1.1: Il processo di gestione della Flotta .....	11
Figura 1.2: Strategie aziendali d’inserimento bus in Flotta .....	12
Figura 1.3: Obiettivi PULL della UE .....	17
Figura 1.4: Fleet Strategy – Helsinki Region Transport .....	21
Figura 1.5: Sviluppo telaio autobus attraverso le diverse motorizzazioni .....	27
Figura 1.6: Euro VI powertrain with integrated silencer and exhaust aftertreatment.....	28
Figura 1.7: Aree di maggior produzione d’inquinanti nel motore Diesel in funzione della temperatura di combustione .....	29
Figura 1.8: Fuel Injection System – Multijet” .....	30
Figura 1.9: Layout di scarico SCR di un motore Diesel .....	31
Figura 1.10: CNG fuel line equipment installed on the bus .....	33
Figura 1.11: Schema funzionamento marmitta catalitica.....	35
Figura 1.12: Diagramma di stato dell’LNG.....	39
Figura 1.13: Trasporto dell’ LNG .....	39
Figura 1.14: Serbatoio criogenico per LNG .....	40
Figura 1.15: Why LNG .....	41
Figura 1.16: Tank principle.....	42
Figura 1.17: CO2 reduction in function of substitution level LNG whit diesel.....	43
Figura 1.18: Serbatoio LNG sul mezzo .....	44
Figura 1.19: L’autobus elettrico 12m Aptis di Alstom .....	50
Figura 1.20: Il sistema TOSA di ABB a Ginevra basato su telaio HESS.....	50
Figura 1.21: Technology adoption Lifecycle of Electric Buses .....	51
Figura 1.22: Worldwide trend of Electric buses – Source Bloomberg New Energy Finance	52
Figura 1.23: Trolley bus in Lyon .....	54
Figura 1.24: I motori montati sul mozzo Civis sui due assi posteriori.....	54
Figura 1.25: Confronto dei diversi sistemi di accumulo .....	59
Figura 1.26: Intensità media CO <sub>2</sub> per la produzione di energia in vari paesi, fonte Ecofys ..	61
Figura 1.27: Schema funzionale sistema di trazione elettrico ibrido .....	63
Figura 1.28: Schema funzionale sistema di trazione Ibrido seriale.....	65
Figura 1.29: Schema funzionale sistema di trazione ibrido parallelo.....	66
Figura 1.30: Schema funzionale dei sistemi Power-split .....	67
Figura 1.31: Layout tipo di un autobus alimentato ad Idrogeno .....	68
Figura 1.32: Current FC buses in Europe and numbers of buses deployed, source CHIC project – Elementy Energy .....	69
Figura 1.33: Il flusso dell’energia negli autobus ad idrogeno .....	69
Figura 1.34: Hydrogen value chain and FC bus layout (simplified representation) .....	70
Figura 1.35: Purchase price development of standard FC buses-source Roland Berger.....	73
Figura 1.36: High-level comparison of operational performance of different zero emission bus concepts .....	74
Figura 1.37: Summary of operational advantages of fuel cell buses .....	75
Figura 1.38: TCO development of FC buses compared to conventional diesel buses .....	76

<i>Figura 2.39: Costi esterni dei trasporti in Europa – Source CE Delft</i> .....	77
<i>Figura 2.40: Possibile evoluzione della grid e dell'autobus elettrico</i> .....	82
<i>Figura 2.41: Quota di energia rinnovabile del consumo di energia in Europa-Source Eurostat</i> .....	82
<i>Figura 2.42 GHG emissions by transportation mode in EU28 –Source: Integrated fuels and vehicles, roadmap to 2030.</i> .....	85
<i>Figura 2.43: GHG Emission to 2030</i> .....	86
<i>Figura 2.44: WTW GHG efficiencies by technology powertrain, Source IEC, Roland Berger</i> .....	87
<i>Figura 2.45: European cities focusing on clean powertrain for public transport, Source CIVITAS, Clean buses for your city</i> .....	88
<i>Figura 2.46: Summary of public perception of environmental challenges in public transport</i> .....	89
<i>Figura 2.47: Bus technologies for different energy carriers</i> .....	90
<i>Figura 2.48: Schema del processo di inquinamento atmosferico</i> .....	92
<i>Figura 2.49: Andamento qualitativo della concentrazione di CO e del flusso di traffico in [veicoli/ora] nell'arco di una giornata in una strada urbana</i> .....	95
<i>Figura 2.50: Andamento qualitativo della concentrazione di CO in una sezione stradale – Fonte [Horowitz]</i> .....	95
<i>Figura 2.51: Andamento qualitativo delle concentrazioni di NO, NO2 e O3 in una sezione stradale – Fonte [Horowitz]</i> .....	98
<i>Figura 2.52: Richiesta mondiale barili di petrolio</i> .....	99
<i>Figura 2.53 Composizione del Total Cost Ownership</i> .....	100
<i>Figura 2.54 Summary of the most influential factors that cause the change of TCO</i> .....	101
<i>Figura 2.55 Il TCO comparativo tra alcuni sistemi di alimentazione in uno studio della TfL</i> .....	102
<i>Figura 2.56: Sketching the sequence of how methods on the research are used</i> .....	103
<i>Figura 2.57 TCO con dati in ingresso studio n°1 del Politecnico di Torino</i> .....	104
<i>Figura 2.58 TCO con dati in ingresso tabella n°4, al 2030 con sviluppo bus elettrici e fuel cell- Fonte: Politecnico di Torino</i> .....	105
<i>Figura 2.59 TCO con dati in ingresso tabella n°5, al 2030 con basso sviluppo bus elettrici e fuel cell- Fonte: Politecnico di Torino</i> .....	106
<i>Figura 2.60 TCO con dati in ingresso tabella n°6, scenario attuale con introduzione di una nuova tassa sulle emissioni prodotte</i> .....	107
<i>Figura 2.61 TCO attuale, inclusi i costi per le infrastrutture per un LCC di 10 anni – Fonte, European Copper institute</i> .....	108
<i>Figura 2.62 TCO al 2026 considerando una diminuzione dei costi dei sistemi di trazione elettrici, inclusi i costi per le infrastrutture per un LCC di 10 anni</i> .....	109
<i>Figura 2.63 Comparazione economica dei diversi sistemi di trazione: tradizionali, alimentati da biocarburanti, elettrico, idrogeno</i> .....	110
<i>Figura 2.64 Andamento dei consumi kwh/km dei diversi sistemi di trazione</i> .....	110
<i>Figura 2.65: TCO calculation</i> .....	111
<i>Figura 2.66: Confronto operativo dei diversi sistemi di trazione sostenibili</i> .....	112
<i>Figura 3.67: Value Chain Integrator</i> .....	115

<i>Figura 3.68 Make high level section of possible fuel solution .....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 3.69: Fleet scenario transition .....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 3.70: Comparison of bus technologies on some operational characteristic, where green represent the most environmentally friendly option, red the less option and orange an option in between – source CIVITAS, Clean buses for your city.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 3.71: Comparison of bus technologies on their environmental performance, where green represent the most environmentally friendly option, red the less option and orange an option in between – source CIVITAS, Clean buses for your city .....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 3.72: Comparison of bus technologies by economics performance, where green represent the most environmentally friendly option, red the less option and orange an option in between – source CIVITAS, Clean buses for your city.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 3.73 Break Even Point BUS Elettrico/Diesel convenzionale .....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 3.74: Interfaccia Autobus / sistema di ricarica.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 3.75 Scheda di riepilogo Costi manutentivi LCC.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 3.76: Regressione lineare dei dati LCC indipendentemente dal sistema di trazione</i>	<i>128</i>
<i>Figura 3.77: Incidenza dei costi dei ricambi su flotta CNG.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 3.78 How Front suspensions work.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 3.79: Verifica percorrenza ammortizzatori 1° asse per i diversi sistemi di trazione</i>	<i>131</i>
<i>Figura 3.80: Regressione lineare della percorrenza effettiva Ammortizzatori I° Asse .....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 3.81: How the intercooler works.....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 3.82 Verifica percorrenza intercooler per i diversi sistemi di trazione.....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 3.83 Regressione lineare della percorrenza effettiva intercooler.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 3.84 How the air compressor works .....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 3.85: Dato di percorrenza contrattuale errato in fase di progetto .....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 3.86: Regressione lineare delle sostituzioni del generatore di trazione .....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 3.87 Fasi di sviluppo del metodo LCC nel tempo .....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 3.88 I costi di manutenzione dei diversi sistemi di trazione .....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 3.89: Resistenza alla pendenza .....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 3.90: Autobus non impiegato correttamente .....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 3.91: Organi dell'autobus sollecitati su linee impegnative.....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 3.92: Andamento dei costi di manutenzione su linee a diversa conformazione .....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 4.93 Combustibili alternativi, source IEA,2011 .....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 4.94 Schema del WTW .....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 4.95 Combinazione di sistemi di trazione .....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 4.96 Combinazione di sistemi di trazione .....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 4.97:WTW .....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 4.98: WTW energy &amp; WTW GHG .....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 4.99: WTW energy &amp; WTW GHG for PISI configuration.....</i>	<i>160</i>
<i>Figura 4.100: WTW energy &amp; WTW GHG for Biogas CBG .....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 4.101: WTW energy &amp; WTW GHG for Hydrogen ICE, source pipeline 4000 km .</i>	<i>164</i>
<i>Figura 4.102: Efficienza di una fuel cell a confronto con l'efficienza di una macchina termica in funzione della temperatura. ....</i>	<i>165</i>
<i>Figura 4.103: Relazione WTW e GHG .....</i>	<i>166</i>

<i>Figura 5.104: L'influenza della Vc sul costo standard di un esercente il TPL</i> .....	174
<i>Figura 5.105 Economie di scala per operatore di TPL</i> .....	176
<i>Figura 5.106: Comparison emission of different bus technologies</i> .....	183
<i>Figura 5.107 Criteri di prova al banco di motori diesel</i> .....	183
<i>Figura 5.108: Variazione di velocità e carico</i> .....	185
<i>Figura 5.109 Schema prove</i> .....	186
<i>Figura 5.110 Influenza dei parametri sulla velocità commerciale</i> .....	187
<i>Figura 5.111 Relazione consumi/velocità commerciale</i> .....	188
<i>Figura 5.112: Ciclo di prova Standard</i> .....	189
<i>Figura 6.113: Confronto tra tecnica tradizionale e L.C.C.</i> .....	196
<i>Figura 6.114: Correlazione tra la metodologia del costo del ciclo di vita e le diverse fasi gestionali</i> .....	198
<i>Figura 6.115 Le retroazioni indotte dall'applicazione dell'L.C.C. nei rapporti acquirente-fornitore.</i> .....	201
<i>Figura 6.116: Le soglie di percorrenza raggiunta che determinano le diverse azioni nei confronti del costruttore.</i> .....	204
<i>Figura 6.117: I sistemi informativi e i dati necessari per la gestione dell'L.C.C</i> .....	205
<i>Figura 6.118: Scheda di riepilogo dati manutentivi L.C.C</i> .....	207
<i>Figura 6.119: Costi L.C.C</i> .....	208
<i>Figura 6.120: La totalità dei costi di LCC</i> .....	208
<i>Figura 6.121: Costo chilometrico manutentivo Flotta</i> .....	211
<i>Figura 6.122: Composizione della flotta analizzata</i> .....	211
<i>Figura 6.123: Costi chilometri della flotta –Emissioni, Energia, Manutenzione</i> .....	215
<i>Figura 6.124 Ripartizione costi euro/km e % voci di costo sul totale flotta</i> .....	215
<i>Figura 6.125: Costo chilometrico totale diviso per sistema di trazione</i> .....	216
<i>Figura 7.126 Organigramma generale della manutenzione secondo norma UNI EN13306:2003.</i> .....	217
<i>Figura 7.127: Andamento dei Costi [€/Km] della flotta numero 1</i> .....	222
<i>Figura 7.128: Andamento dei Costi [€/Km] della flotta numero 9</i> .....	223
<i>Figura 7.129 Andamento Totale Costi Totali [€/Km] dei bus a Gasolio e di quelli a Metano.</i> .....	225
<i>Figura 7.130: Rette di regressione lineare dei dati LCC dei diversi sistemi di trazione negli anni</i> .....	226
<i>Figura 7.131: Riscontro dell'influenza della Vc sui costi della manutenzione</i> .....	228
<i>Figura 7.132: Confronto percorrenza reale/dichiarata per il componente disco Freno</i> .....	228
<i>Figura 7.133: Andamento temporale dei fermi tecnici suddivisi per causale</i> .....	232
<i>Figura 7.134 Composizione costo €/km del Life Cycle Cost</i> .....	235
<i>Figura 7.135 Metodologia di analisi del Life Cycle Cost</i> .....	236
<i>Figura 8.136: Sistema Autobus più sistema di ricarica</i> .....	240
<i>Figura 8.137: Le attività connesse con l'esercizio di un sistema su gomma innovativo a batteria</i> .....	241
<i>Figura 8.138: La flessibilità dell'infrastruttura elettrica autobus/filobus</i> .....	242
<i>Figura 8.139: Sistema di ricarica a Pantografo</i> .....	243
<i>Figura 8.140: Caratteristiche stazione di ricarica L-GNC / GNL</i> .....	244

<i>Figura 8.141: Impianto LNG</i> .....	246
<i>Figura 8.142: Break even point di un investimento su impianto LNG</i> .....	246
<i>Figura 8.143 Relazione tra flessibilità in esercizio in ambito urbano e sistema di trazione</i>	248
<i>Figura 8.144: Correlazione tra contenimento del livello di emissioni e sistema di trazione</i>	249
<i>Figura 8.145: Andamento dei costi per un impianto a Metano (CNG/LNG) in un deposito con flotta significativa</i> .....	250
<i>Figura 8.146: Un compressore per una stazione di rifornimento di gas metano per il deposito di un operatore TPL</i> .....	251
<i>Figura 8.147: La relazione di linearità tra il costo d'infrastruttura e numero di veicoli in parco nel caso della trazione elettrica</i> .....	253
<i>Figura 8.148: Andamento dei costi d'infrastruttura per l'avvio di un sistema filoviario in caso di nuovi impianti</i> .....	253
<i>Figura 9.149: Correlazione Innovazione tecnologica/manutenzione/impatto ambientale...</i>	256
<i>Figura 10.150: S<sub>0</sub> - Composizione Flotta iniziale di un operatore TPL</i> .....	257
<i>Figura 10.151: Differenza tra percorrenza dichiarata ed effettiva di batterie di trazione plugin/ Ibrid</i> .....	258
<i>Figura 10.152: Andamento corretto della retta di regressione lineare dei dati percorrenza effettiva</i> .....	258
<i>Figura 10.153: Indicazioni della politica energetica sui trasporti della UE</i> .....	259
<i>Figura 10.154: Trasformazione di una linea DIESEL in una linea parzialmente IMC</i> .....	260
<i>Figura 11.155: Andamento corretto della retta di regressione lineare</i> .....	266
<i>Figura 11.156: In rosso linea che mostra corretto impiego dell'autobus sulla linea</i> .....	266
<i>Figura 11.157: No "Silver bullets"</i> .....	267
<i>Figura 12.158: Decarbonizzazione del settore trasporti sulla base della proposta di direttiva EU del 11.02.2019</i> .....	278
<i>Figura 12.159: Total Cost Ownership di alcuni bus elettrici con durata spinta ai 20 anni</i>	278
<i>Figura 12.160: Architettura innovativa di un autobus elettrico</i> .....	278
<i>Figura 12.161: Elementi costruttivi per la riduzione del TCO (competizione in atto tra costruttori di autobus)</i> .....	279
<i>Figura 12.162: Sviluppo dei progetti pilota in Europa di autobus Fuel Cell</i> .....	279
<i>Figura 12.163: L'esperienza dell'architettura tramviaria riconvertita sulla trazione ad idrogeno</i> .....	279
<i>Figura 12.164: Al busworld 2019 i costruttori puntano sulla trazione elettrica</i>	280
<i>Figura 12.165: Tecnologia Ibrida diesel/elettrico MAN</i> .....	280
<i>Figura 12.166: Sistema di recupero energia in frenata</i> .....	280

## Indice delle Tabelle

<i>Tabella 1: Prescrizioni relative ai combustibili alternativi per i veicoli pesanti – proposta UE N°A8-321/2018</i> .....	80
<i>Tabella 2: Obiettivi minimi per la quota di veicoli pesanti di categoria M3, N2, N3 rispetto alle acquisizioni totali di veicoli pesanti tramite appalti pubblici a livello di Stato membro*</i> 81	
<i>Tabella 3: Dati in ingresso studio n°1- Fonte: Politecnico di Torino</i> .....	103
<i>Tabella 4: Dati in ingresso studio n°2 al 2030 con sviluppo bus elettrici e fuel cell- Fonte: Politecnico di Torino</i> .....	104
<i>Tabella 5: Dati in ingresso studio n°3 al 2030 con basso sviluppo bus elettrici e fuel cell- Fonte: Politecnico di Torino</i> .....	105
<i>Tabella 6 Dati in ingresso studio n°4, scenario attuale con introduzione di una nuova tassa sulle emissioni prodotte- Fonte: Politecnico di Torino</i> .....	106
<i>Tabella 7: Fuel cost per Technology- Fonte: European Copper institute</i> .....	107
<i>Tabella 8: Dati in ingresso studio n°5, - Fonte: European Copper institute</i> .....	108
<i>Tabella 9: Model parameters for fleet comparison</i> .....	117
<i>Tabella 10: Variabili in ingresso per valutazione della flotta</i> .....	117
<i>Tabella 11: Modifiche necessarie all’infrastruttura in base al sistema di trazione scelto</i> ....	125
<i>Tabella 12: Chilometraggio percorso da un veicolo nell’intero arco di vita</i> .....	178
<i>Tabella 13: Contenuti energetici dei carburanti</i> .....	179
<i>Tabella 14: Costo specifico di ogni fattore emissivo</i> .....	179
<i>Tabella 15: Foglio di calcolo per i fattori emissivi</i> .....	180
<i>Tabella 16: Combinazioni di prova del motore diesel</i> .....	184
<i>Tabella 17: Caratteristiche di ogni ciclo SORT</i> .....	190
<i>Tabella 18: Ciclo SORT Hybrid pista rettilinea</i> .....	192
<i>Tabella 19: Ciclo SORT Hybrid pista circolare</i> .....	192
<i>Tabella 20: I tre principali ambiti di monitoraggio di un contratto L.C.C.</i> .....	203
<i>Tabella 21: Costi esterni, ambientali ed energetici per tipologia di sistemi di trazione</i> .....	214
<i>Tabella 22 Scheda L.C.C. della flotta di autobus numero 21</i> .....	218
<i>Tabella 23: Costi [€/Km] della flotta di autobus numero 1</i> .....	220
<i>Tabella 24: Costi [€/Km] di manodopera, ricambi e totali della flotta numero 1</i> .....	221
<i>Tabella 25: Costi [€/Km] della flotta di autobus numero 9.</i> .....	222
<i>Tabella 26: Costi [€/Km] di manodopera, ricambi e totali della flotta numero 9</i> .....	223
<i>Tabella 27: Totale Costi Totali [€/Km] di Flotte a Gasolio e di Flotte a Metano</i> .....	224
<i>Tabella 28: Costo dei sistemi di ricarica per flotte di autobus su gomma necessari per lo sviluppo della sostenibilità</i> .....	237
<i>Tabella 29: Upfront cost per technology</i> .....	238
<i>Tabella 30: Overview of fuel costs per technology</i> .....	239
<i>Tabella 31: I sistemi di ricarica per flotte di autobus su gomma necessari per lo sviluppo della sostenibilità</i> .....	240
<i>Tabella 32: Le scelte operative possibili per i vari tipi di esercizio</i> .....	247

## Premessa

Il presente lavoro di ricerca nasce dal Piano Strategico di Sviluppo 2016-2019 che comprende un Piano Straordinario di Formazione, nel quale si inserisce la convenzione con le Università «La Sapienza» e la «D'Annunzio» per complessive 4 borse di dottorato industriale.

La mia attività lavorativa si svolge nell'ambito della DIVISIONE GOMMA in qualità di responsabile della Manutenzione dei mezzi e impianti nell'Unità di Produzione di Giulianova (TE) e della Logistica della divisione gomma e ferroviaria.

TUA Spa (Trasporto Unico Abruzzese nasce nel luglio 2015 dalla fusione per incorporazione delle due società regionali Gestione Traporti Metropolitan e Ferrovia Adriatico Sangritana nelle Autolinee Regionali Pubbliche Abruzzesi (ARPA) Spa. È una società a totale capitale pubblico che ha dichiarato nello statuto la natura dell'IN HOUSE PROVIDING nei confronti della REGIONE ABRUZZO, unico socio. TUA Spa ha una produzione di 35,8 mln di bus-km su gomma e 0,9 mln di treni-km ed ha a disposizione una flotta di circa 870 autobus. Nel corso del lavoro di ricerca si analizzerà in particolar modo il cambio di paradigma manutentivo provocato dall'adozione integrale della metodologia di gestione della flotta basata sul costo del ciclo di vita (Life Cycle Cost). L'adozione del nuovo paradigma definisce, per ogni lotto di autobus acquistati, ex-ante e cioè al momento dell'acquisto, attraverso il metodo basato sul LCC, la politica di manutenzione più corretta da adottare.

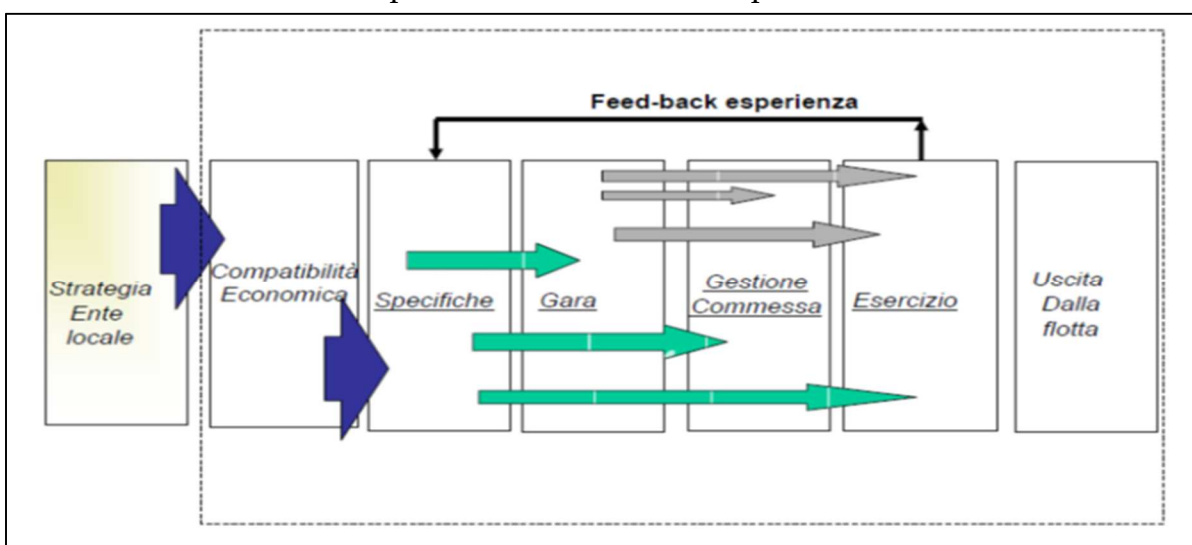


Figura 1.1: Il processo di gestione della Flotta



Come mostrato in figura 1.1 si è imparato inoltre a gestire correttamente il processo di gestione della flotta attraverso la definizione di una strategia dettata da una politica manutentiva. Il processo di gestione delle flotte passa attraverso la definizione di specifiche tecniche, gestione della gara d'appalto, successiva gestione della commessa, messa in esercizio e conseguente feed-back che alimenta il loop dell'esperienza al quale ogni funzione aziendale partecipa fino all'uscita dal parco rotabile del mezzo o lotto.

È possibile dopo il nulla di fatto di molte aziende sin dagli anni '90, monitorando le aziende leader europee ed alcuni player italiani, definire lo scenario strategico per la manutenzione di flotte su gomma.

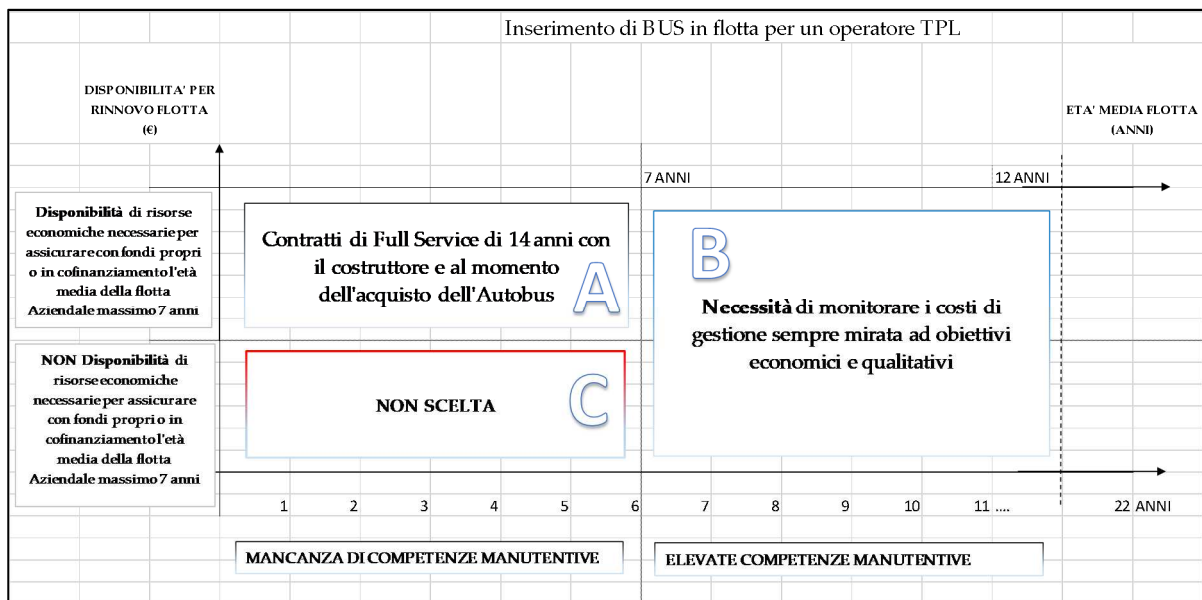


Figura 1.2: Strategie aziendali d'inserimento bus in Flotta

In figura 1.2 sono riportate le due strategie possibili A e B e l'insieme di non scelte C per le aziende che non avendo operato alcuna scelta manageriale si trovano ora in una situazione molto critica ancora di più se consideriamo i doverosi vincoli sulla sostenibilità delle flotte che sono già cogenti dal giugno 2018 per il 25% di ogni insieme di lotti acquistato, ma che paiono rilevanti alla luce del grande interesse ad esempio per la trazione elettrica nel mondo autobus. Ognuna delle due strategie A e B ha pregi e rischi nella sua adozione che possiamo sintetizzare nel seguente modo:

- \* Con l'acquisto del full service è necessario comunque avere una struttura di controllo delle attività extra contratto e per le azioni di modifica parco e gestione

dei nuovi bus in particolare. Questa strategia richiede certezza di disponibilità di denaro perché se l'età media sale oltre i 7 anni i costi vanno fuori controllo.

- \* Con la gestione interna della manutenzione, anche con un elevato livello di attività in out-sourcing, il sistema è più flessibile, si può capitalizzare la competenza sui sistemi sostenibili, si controllano i costi di tutte le attività sull'autobus non solo quelli del full service. I rischi sono quelli connessi alla governance di una struttura interna.

Esaminate le strategie di gestione della manutenzione della flotta e la cultura organizzativa, si è passati ad un approfondimento delle scelte tecnologiche per il trasporto pubblico sostenibile del futuro.

Si è proceduto ad un studio sulla sostenibilità ambientale partendo dall'analisi delle raccomandazioni del PUMS della città di Pescara dove TUA assicura il TPL in riferimento al miglioramento della qualità dell'aria.

La sostenibilità delle flotte dei veicoli è sempre più un tema centrale nella gestione di lungo periodo. Attraverso una robusta metodologia d'analisi si sono illustrati gli sviluppi potenziali di una flotta/sistemi per un TPL che, allo stesso tempo sia orientato alla sostenibilità e al contenimento dei costi. Si sono approfonditi i seguenti argomenti:

- \* il well to wheel;
- \* la correlazione tra il sistema di trazione e lo sviluppo della flotta;
- \* le strategie di sviluppo della flotta di tipo sostenibile.

Il well to wheel WTW (dal pozzo alla ruota), cioè la valutazione dell'intera catena energetica sistemi di trazione che va dalla produzione del combustibile sino alle ruote fa già parte, da tempo, delle analisi relative alla sostenibilità. Con il WTW si è arricchita l'analisi dei sistemi di trasporto, che per poter essere completa deve basarsi sui seguenti aspetti:

- \* life cycle assessment (LCA);
- \* life cycle cost (LCC);
- \* well to wheel (WTW) energetico;

\*emissioni dei sistemi nelle fasi WTW (WTT e TTW).

Per quanto riguarda LCA è importante che sin dalla progettazione siano definite le modalità di smaltimento del dispositivo progettato. Il WTW sarà quindi un elemento importante del LCA della vita del veicolo, sistema, ma la composizione del veicolo in termini tecnici avrà un suo percorso di LCA. In altre parole, un veicolo a batterie sarà analizzato per il suo WTW energetico, ma al tempo stesso si dovrà considerare nel suo WTW il peso delle batterie di trazione da sostituire mediamente ogni 3 anni.

L'LCC è un elemento fondamentale per la progettazione, lo sviluppo e la successiva gestione del veicolo proponendo un insieme di dati condivisi tra costruttore ed esercente capace di migliorare il mezzo in termini di performance economiche.

Il WTW si compone a sua volta di due parti specifiche il WTT che si riferisce ai consumi energetici necessari per estrarre e trasportare il carburante con il suo contenuto energetico sino ai serbatoi del veicolo ed il TTW che prende in analisi i consumi energetici utilizzati in specifico per percorrere una distanza. La situazione cambia sostanzialmente quando si passa dai veicoli ai sistemi. I sistemi per i TPL sono:

-in deposito

\* stazione di ricarica gas metano;

\* colonnine di ricarica per autobus elettrici ed ibridi;

\* stazione di ricarica per autobus ad idrogeno.

-in linea

\* filovie;

\* sistemi di ricarica delle batterie lungo la linea di trasporto.

Insieme al punto di vista della filiera energetica, ha assunto da tempo un'importanza cruciale in ottica di sostenibilità dei sistemi di trasporto il fattore emissivo.

L'operatore TPL deve porre la massima attenzione in termini di sviluppo della flotta, cercando, inoltre, di fornire adeguate risposte agli effetti che accompagnano fenomeni di inquinamento sempre più frequenti di grosse concentrazioni in sub-aree delle città che sarà sempre più il tema del futuro. Il trasporto pubblico rappresenta

tra l'altro un modo importante di contenere l'inquinamento delle aree urbane densamente popolate.

Alla luce dello sviluppo di ulteriori gasdotti e di un numero significativo di rigassificatori e di impianti che operano con il gas metano liquido LNG, è possibile portare la trazione a metano a livelli di convenienza tali da rompere anche gli ultimi indugi. La comparazione dei sistemi di trazione in relazione al loro well to wheel (ASME, atti del convegno Energetica, Somedia) mostra che il miglior well to wheel è quello della trazione ibrida. In questo momento però le barriere che rendono complicato questo sviluppo sono rappresentati:

- \* dalle poche risorse disponibili per il rinnovo della flotta;
- \* dalle perplessità degli operatori di TPL nell'acquistare veicoli innovativi giustificata dal timore di veder aumentare i costi di gestione;
- \* dai vincoli ancora passivi da parte delle istituzioni, in particolare delle regioni, che al momento solo in qualche caso forniscono coperture più elevate per l'acquisto di nuovi autobus ibridi, filobus, veicoli elettrici e a metano.

Nel momento in cui i volumi crescenti degli autobus ibridi determineranno, nel rispetto delle più elementari leggi economiche una riduzione dei prezzi di questi mezzi, fino a portarli vicino al costo dell'autobus a gasolio ci sarà l'alternanza economica tra trazione ibrida e trazione a gasolio.

Si può inoltre osservare che i sistemi filoviari o autobus alimentati a metano non potranno avere la stessa dimensione di mercato prevista per i veicoli ibridi, essendo la loro diffusione limitata alla capacità delle relative infrastrutture (filovie e stazioni di ricarica).

Peraltro la crisi economica che ha rallentato il rinnovo delle flotte ha di fatto molto rallentato lo sviluppo degli autobus ibridi e ha permesso che le scelte ancora più stringenti in termini emissivi portino all'intersezione dello sviluppo dell'ibrido con la nascita di progetti di autobus completamente elettrici che sono il fine di importanti progetti della UE come Horizon 2020. In questo momento ad esempio gli autobus a metano sono molto più numerosi di quelli ibridi. Si sottolinea inoltre come

L'alimentazione ad idrogeno si sta allontanando nel tempo tanto che, in questo momento non può essere considerata una strategia reale per nessun operatore di TPL. TUA Spa ha attualmente una flotta composta da una parte di veicoli a CNG. Lo sviluppo quindi del piano d'acquisto degli autobus ibridi deve essere quindi correlato alla saturazione dell'impianto di ricarica del gas metano.

L'industria automotive europea è impegnata nell'innovazione del settore dei trasporti, soprattutto in quelle tecnologie a favore dell'ambiente. Si continuerà ad innovare per una riduzione delle emissioni inquinanti e di CO<sub>2</sub> e una maggiore efficienza energetica e già oggi si dispone di una tecnologia consolidata a gas naturale, metano e biometano, in grado di restituire efficienza energetica e benefici ambientali e sociali per il trasporto su strada.

L'innovazione del veicolo deve tener conto dell'intero spettro di fattori che influenzano le emissioni durante l'uso del veicolo. Nel campo dell'autobus TPL, ciò include il contenuto di carbonio dei carburanti, la gestione dei servizi, il comportamento dei conducenti, le infrastrutture.

Attraverso l'adozione di tale approccio, le misure a favore di una riduzione delle emissioni potranno essere più bilanciate a livello globale senza che la competitività del settore automotive ne venga minacciata e possa continuare a mantenere la guida nell'innovazione tecnologica.

Un approccio orientato al mercato è essenziale per raggiungere alle soluzioni più economiche. Queste ultime, a loro volta sono essenziali per raggiungere gli obiettivi ambientali ed efficienza energetica con i costi più bassi per la società, guidando l'innovazione. Si tratta di un assunto che ha un valore ancor più evidente per i servizi TPL, dove è in atto un'importante azione di risanamento del comparto.

Al fine di meglio inquadrare lo scenario dello sviluppo sostenibile della flotta si è proceduto allo studio del contesto normativo ed in particolare il recepimento della DIRETTIVA 2014/94/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO e dell'impatto che tale direttiva ha sulla società TUA Spa.

In riferimento alla flotta TUA Spa si è proceduto ad inquadrare la società all'interno di una strategia manutentiva ed a ipotizzare uno sviluppo della flotta nello scenario CNG/LNG. Il metano CNG ha risolto il problema dell'autonomia grazie al passaggio negli autobus, della quantità di gas metano da 1180 litri per le bombole tipo II a 1480 litri per le bombole tipo III e tipo IV; queste ultime con autonomie paragonabili a quelle dell'alimentazione a gasolio. L'evoluzione delle bombole per il metano ha tolto il grande motivo dell'attacco degli anni '90 contro il CNG cioè quello della ridotta autonomia. Discorso diverso per il metano liquido LNG poiché la filiera di questo carburante è esattamente uguale a quella del gasolio perché deve essere trasportato su strada.

Dal vecchio modello "push" volontario si deve ora sviluppare il modello "pull" con la giusta attenzione all'ambiente. Gli effettivi cambiamenti climatici hanno ribaltato completamente la situazione e si è passati ora alla strategia pull ove le nazioni e di conseguenza gli operatori TPL tramite le istituzioni locali(PUMS), vengono tirate per il raggiungimento degli obiettivi del 2025 e 2030. La prima differenza sostanziale è costituita dal fatto che mentre il modello push era volontario, il modello pull è obbligatorio (si veda il 25% di autobus sostenibili nelle gare dal 30.06.2018).

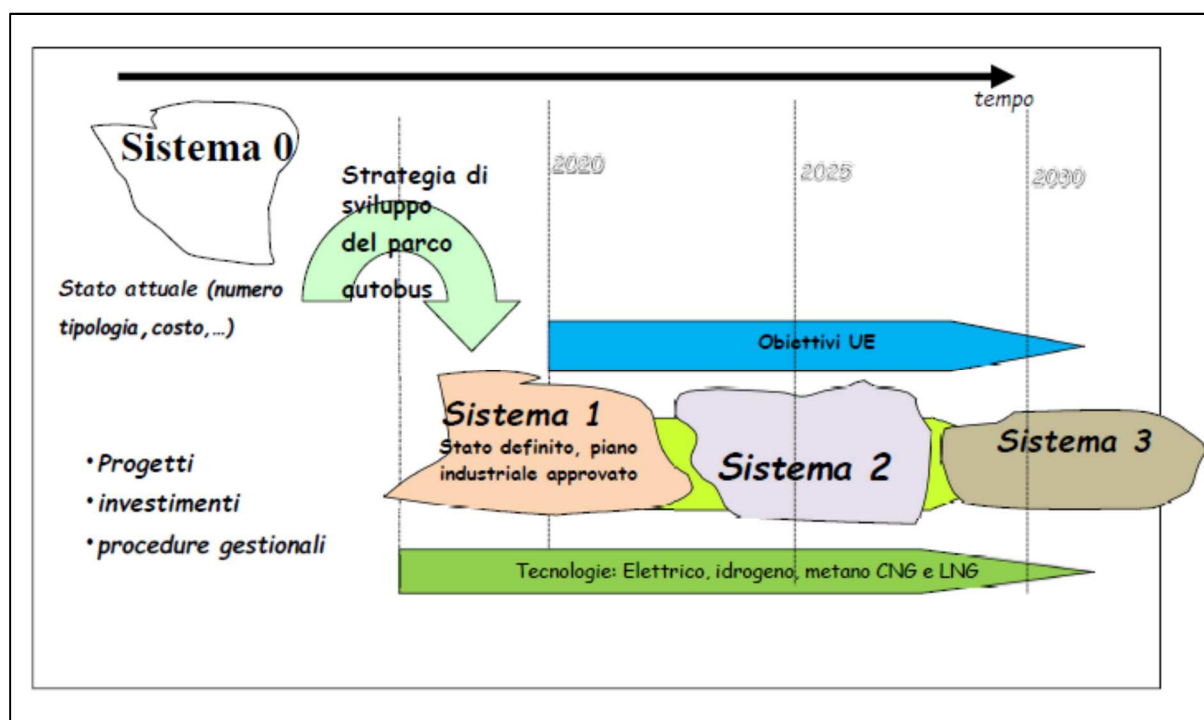


Figura 1.3: Obiettivi PULL della UE

In figura 1.3 osserviamo che un operatore TPL deve decidere le sue strategie di sviluppo flotta da qui al 2030, infatti, sia per l'elettrificazione che per il metano (CNG o LNG) che per l'idrogeno servono infrastrutture importanti che non possono essere gestite nell'attività corrente.

L'evoluzione degli scenari di offerta del TPL influisce sullo sviluppo strategico del parco che deve necessariamente partire dalla definizione dello stato iniziale del sistema di offerta ( $S_0$  in figura 1.3). Una distorsione sull'assessment del parco attuale può tradursi in un drammatico incremento dei costi relativamente allo sviluppo delle configurazioni future. Detto questo, appare evidente che la definizione del sistema di offerta  $S_0$  sarà determinato oltre che sulla base di elementi di monitoraggio e di gestione del parco, anche in riferimento all'elencazione dei veicoli/sistemi disponibili al momento attuale  $t_0$  e più precisamente attraverso il numero della tipologia di veicoli. Solo dopo aver delineato la situazione attuale  $S_0$  è possibile prefigurare quale evoluzione possa conoscere il sistema al momento  $t_1$ , arrivando a definire il sistema di offerta  $S_1$ .

Un'azienda eccellente quindi, conosce in modo molto preciso ed in termini di costi, non solo attuali ma anche futuri, la configurazione  $S_0$ , ad esempio attraverso il modello dell'L.C.C. Tale evoluzione potrebbe ad esempio, prevedere di procedere attraverso le seguenti azioni:

- \* inserimento di veicoli nuovi con classe di emissione inquinante inferiore;
- \* inserimento di linee filoviarie;
- \* inserimento di un sistema intermedio dove l'orizzonte temporale che separa  $t_0$  da  $t_1$  varierà in maniera sensibile a seconda del tipo di sviluppo considerato (alcuni mesi nel caso di inserimento di veicoli meno inquinanti, diversi anni nel caso della linea metropolitana). Un'azienda eccellente conosce in modo preciso ed in termini di costi (attuali e futuri) la configurazione  $S_0$  ad esempio attraverso il modello dell'L.C.C., definisce, programma e pianifica tutte le attività che portano la configurazione  $S_0$  verso la configurazione  $S_1$ .

Lo sviluppo della strategia evolutiva del parco dei veicoli, oltre a dover essere coerente con la gestione delle attività di manutenzione deve essere necessariamente definito in relazione agli scenari di offerta del TPL. Ciò sta a significare che la pianificazione della rete, fasata su standard di tipo trasportistico relativi tanto alla domanda quanto all'offerta di trasporto, espressi quindi in termini di passeggeri/ora per le varie linee e di km/passeggeri rispetto alla potenzialità dell'offerta giornaliera (tenendo ovviamente conto di ciascuna variazione giornaliera e periodale), deve portare a coerenti scenari del sistema di offerta veicoli. Quanto affermato, oltre a rappresentare un modo di procedere corretto e rigoroso da un punto di vista ingegneristico, trova anche riscontro e coerenza con quanto proposto dal modello Generalizzato dei Trasporti, secondo il quale lo scenario di offerta trasportistico necessita di dispositivi di trasporto che siano in grado di supportare l'effettiva erogazione. Detto questo, preme osservare come la situazione appena descritta finisca per assumere una notevole rilevanza rispetto delle caratteristiche di emissione complessive di un sistema di offerta, rilevanza resa ancora più evidente, negli ultimi tempi, a seguito di una accresciuta tensione ambientale.

In questo ambito, un approccio che voglia poggiare sul tentativo di mediare sulla rete delle caratteristiche emissive per giungere alla configurazione complessiva del sistema di offerta è da ritenersi assolutamente inaccettabile, soprattutto in quelle realtà in cui sino state adottate strategie ambientali forti. La progettualità che si rende necessaria sia a livello di pianificazione sia a livello di sviluppo del parco dovrà essere collegata a singole linee di esercizio. La singola linea assume dunque il significato ed il valore di "mattone" che permette di progettare in maniera incrementale lo sviluppo del parco dei veicoli in ottica di pianificazione dell'intero sistema.

Il progetto di ricerca proposto mira a valutare il modello di sviluppo della flotta ritenuto più idoneo alla neonata TUA Spa in considerazione della sostenibilità ambientale (emissioni e consumi) e della struttura dei costi di gestione della manutenzione (confronto per diverse modalità d'esercizio). In tal senso si vuole



mettere a confronto il Total Cost Ownership dei bus con diversi sistemi di trazione sostenibili. La sostenibilità ambientale deve essere anche economica.

## INTRODUZIONE

---

### **Inquadramento della Ricerca**

Il settore dei trasporti è uno dei settori più impattanti dal punto di vista energetico ed ambientale: per soddisfare le direttive comunitarie e instaurare un mercato di veicoli puliti e a basso consumo, si deve promuovere lo sviluppo di un mercato in cui agli enti pubblici ed agli altri operatori viene imposto di tener conto, al momento di aggiudicare appalti pubblici per veicoli adibiti al trasporto, dell'impatto di tali veicoli nell'arco della loro vita sia dei costi di esercizio energetici che di quelli ambientali, con fogli di calcolo specifici. Per soddisfare tali requisiti, gli operatori di servizi pubblici di trasporto scelgono di fissare specifiche tecniche in materia di prestazioni energetiche ed ambientali nella documentazione tecnica per l'acquisto di veicoli oppure di integrare nella decisione di acquisto l'impatto energetico e l'impatto ambientale.

La sostenibilità di una grande flotta non si costruisce nel breve periodo, perché richiede scelte strutturali importanti e le scelte che portano a grandi impatti sono di sistema e non di singolo veicolo. Dal punto di vista della scelta ottimale di alimentazione e del sistema di trazione, si deve tener conto delle performance Well-To-Wheel, che sono risultate migliori per le tecnologie con veicolo ibrido (alimentato a gasolio o gas naturale), o alimentato da una miscela di gas naturale e gasolio, con efficienze complessive di oltre il 30 %. In generale, si è anche notato che le opzioni che nel WTW ambientale riportano basse emissioni di gas serra sono proprio quelle che hanno un elevato WTW energetico (ad esempio il CBG), e anche se le emissioni di gas serra sono di primaria importanza oggi, sono anche obiettivi desiderabili il risparmio energetico e l'uso efficiente delle risorse energetiche.

Nel contesto attuale il trasporto pubblico locale oltre a costituire uno dei volani dello sviluppo dell'economia urbana e regionale, si pone come strumento necessario al

raggiungimento degli obiettivi ambientali fissati dalle direttive comunitarie europee. Il trasporto pubblico locale rappresenta una valida soluzione per lo sviluppo della mobilità sostenibile, per il contenimento delle emissioni inquinanti, per la riduzione della congestione e dell'incidentalità, per il miglioramento della salute e della qualità della vita dei cittadini. Infatti, dal punto di vista della congestione stradale, un autobus classico di 12 metri, in media trasporta l'equivalente di 30 automobili "complete" e il doppio se si considera un solo passeggero per auto.

Dal punto di vista dei consumi energetici, gli investimenti nel trasporto pubblico locale possono consentire un risparmio energetico che ha conseguenti risvolti anche sul lato inquinamento. Si osserva infatti che un solo autobus anni '80/'90 (Euro 0, 1) può inquinare quanto 30 autobus di oggi (estremizzando, un motore Euro 6 odierno ripulisce l'aria dai gas di scarico prodotti da un veicolo che lo precede di datata classe ambientale); i filobus non producono inquinamento localizzato e sono considerati ZEV (Zero Emission Vehicle) e a ridottissimo (quasi nullo) inquinamento acustico.

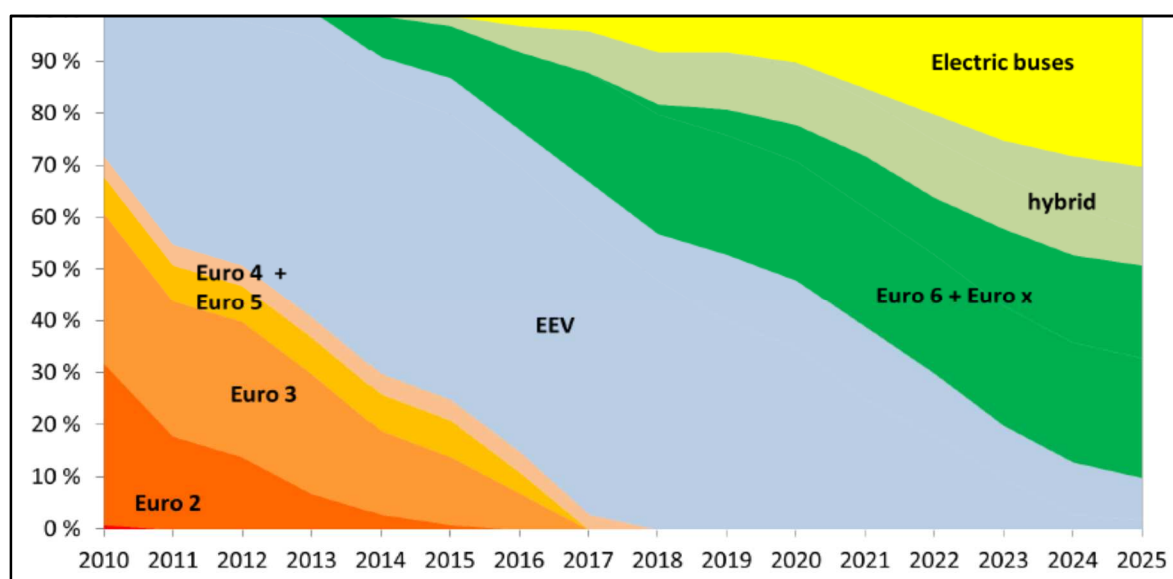


Figura 1.4: Fleet Strategy – Helsinki Region Transport

Molte città e regioni stanno sviluppando delle strategie di sviluppo della flotta elaborando grafici come quello riportato in figura 1.4 (STD per molti operatori del Trasporto pubblico locale) al fine di governare la transizione legata all'abbandono delle fonti fossili. Analizzeremo quindi gli effetti sui costi di manutenzione dell'introduzione di lotti di autobus all'interno della flotta con un'aumentata

tecnologia a bordo autobus legata alla variabile significativa della “sostenibilità ambientale. Si osserva in particolare in riferimento al tracciato delle linee da esercire, ai costi di manutenzione con contratto L.C.C. e al Total cost ownership dei nuovi sistemi di trazione, che si ottengono importanti risultati.

Sul fronte costi specifici chilometrici (€/km):

- Mantenendo costante il numero di veicoli della flotta, dismettendo veicoli più vecchi in favore di nuove immatricolazioni, il costo ENERGETICO rimane costante per ogni categoria. Se da una parte la radiazione di veicoli vecchi ed inquinanti diesel euro 0 o 1, consente consumi ed emissioni minori in valore assoluto, dall'altra fa diminuire il chilometraggio percorso dai veicoli di queste categorie, rapportando così i costi ad un chilometraggio minore complessivo, ed il valore di costo specifico che ne risulta è pressoché costante.
- Grazie ai cambiamenti aggressivi nella composizione della flotta, i costi AMBIENTALI chilometrici diminuiscono. Le emissioni di veicoli filoviari e di veicoli elettrici essendo nulle, non contribuiscono in nessun modo al costo chilometrico ambientale. I veicoli alimentati a metano hanno costi chilometrici paragonabili agli ibridi che, confrontati con quelli dei veicoli a gasolio, sono pari a circa la metà.
- I costi MANUTENTIVI hanno un andamento prevedibile sulla base della filosofia del Life Cycle Cost. Questo permette di valutare puntualmente di anno in anno il costo chilometrico imputato alla manutenzione di ogni veicolo. Si riscontra il costo specifico maggiore per la categoria filobus: questo è dato dal fatto che la manutenzione per questa tipologia di veicoli ha un elevato grado di specializzazione dal punto di vista della manodopera, ed anche i materiali di ricambio hanno un costo del tutto differente da quelli impiegati per le tecnologie convenzionali dei mezzi a gasolio.

Sul fronte costi totali (€):

- Dal punto di vista del costo ENERGETICO tenendo sempre costante il numero totale di veicoli in analisi, variandone la composizione in funzione dell'alimentazione non viene apprezzata una significativa differenza di costo complessivo di flotta.

Inoltre, il consumo dei veicoli, a prescindere dalla classe ambientale di appartenenza si è rivelato piuttosto costante.

- Dal punto di vista del costo AMBIENTALE, la differenza della composizione della flotta è evidente: il costo ambientale scende notevolmente con l'introduzione di autobus "sostenibili". Il fattore che determina le emissioni è funzione dalla tipologia del veicolo e perciò dipende dall'alimentazione, dal sistema di trazione e soprattutto dalla classe ambientale. L'aumento della quantità di veicoli ZEV e dei veicoli con motore termico o ibridi di classe ambientale Euro VI a ridottissimo impatto ambientale, determina la diminuzione del costo totale ambientale di flotta. I veicoli a gasolio diminuendo via via la loro quantità contribuiranno sempre meno alla spesa complessiva e i veicoli a metano al contrario, aumentando la propria numerosità, contribuiranno alla stessa in maniera più evidente.

- Dal punto di vista dei costi MANUTENTIVI, essi aumentano del 29 % fra gli scenari estremi analizzati. Il motivo di tale riscontro è da imputarsi ai costi manutentivi variabili annualmente dei diversi piani LCC, soprattutto per i filobus, motivato dalla onerosità dei costi di manodopera specializzata messi in conto e dai costi dei materiali maggiori rispetto a quelli impiegati per tecnologie convenzionali. Sommando il costo medio manutentivo di un veicolo a gasolio, uno ibrido e uno a metano si ottiene una cifra vicina al costo di manutenzione di un filobus.

In ultima analisi, gli sviluppi futuri riguardanti l'adozione delle stazioni di ricarica rapida previste per i veicoli elettrici, e la costruzione di stazione di metano liquido GNL o Idrogeno, a fronte di un investimento consistente, potranno portare ad un abbassamento dei costi energetici e ambientali della flotta.

## **Scopo ed Obiettivo della ricerca**

Come mostrato in figura 1.4 molte municipalità si trovano di fronte alla necessità di rinnovare la flotta di autobus in considerazione degli obiettivi ed ormai obblighi imposti dalla comunità Europea. Si è assistito negli anni all'introduzione attraverso progetti "pilota" di un numero di autobus con sistemi di trazione definiti "green" e

che sono poi non utilizzati al meglio. Il mercato attraverso forme d'incentivazione economica propone prodotti e soluzioni immediate non indicando però i costi latenti che si possono manifestare nel corso della vita di un autobus con tecnologia avanzata e a basso impatto ambientale. Per fare luce su questo aspetto si è adottato il metodo del Life Cycle Cost, creando un database per i sistemi di trazione tradizionali (diesel, CNG ed ormai anche Ibrido Diesel/elettrico) ed analizzando i dati manutentivi dei nuovi sistemi di trazione con LCC in fase di progetto al fine di offrire alle aziende di TPL, stazioni appaltanti ed operatori del settore un valido strumento di supporto nelle scelte in termini di costi cumulati e chilometrici e del corretto impiego dei nuovi sistemi di trazione su linee ad orografia e profilo di missione differente.

Nel corso della ricerca, anche su indicazione del collegio dei docenti si è approfondita l'analisi sul confronto del Total Cost Ownership dei diversi sistemi di trazione al fine d'includere anche i costi energetici ed ambientali. Nella situazione attuale si trovano in letteratura o in proposte dei vari costruttori di autobus diverse valutazioni di TCO attuali o previsioni future in base ai diversi scenari che si pensa possano realizzarsi.

Lo scopo di questo lavoro di ricerca è quello di confrontarli ed arrivare a risultati fruibili dagli operatori di TPL.

Ripartiamo comunque dalla manutenzione dei veicoli che rappresenta per un'azienda di trasporto pubblico uno degli aspetti economici più rilevanti, dal momento che attraverso essa si deve garantire un servizio efficiente, sicuro e regolare, in grado di mantenere inoltre il parco mezzi in condizioni idonee per il maggior numero di anni possibile.

La valutazione di quale sia la politica manutentiva che meglio interpreta il contesto in cui opera l'azienda è piuttosto delicata; occorre infatti inserirsi nelle posizioni aziendali adottate, sia in tema di programmazione (quali e quante risorse vengono destinate alla manutenzione dei veicoli), sia in termini di individuazione degli obiettivi di servizio che si intendono perseguire.

Le fasi di gestione della flotta con metodologia LCC vedono:

- 1) Strategie e sviluppo flotta (livello politico);

2) Strategie di sviluppo gestione e manutenzione;

3) Esecuzione della manutenzione;

Tutte e tre le fasi sono legate alle performance di flotta.

Mentre con il metodo di gestione tradizionale l'operatore di servizi di trasporto pubblico è il solo interessato alla ottimizzazione dei piani di manutenzione per contenere i costi, con il modello LCC al momento dell'offerta il costruttore del veicolo si impegna con un proprio piano sia dal punto di vista tecnico sia per l'impatto economico, specificando e quantificando il costo euro/km dell'adozione di tale piano. Con la metodologia LCC se un costruttore per non rischiare dichiara costi di manutenzione molto elevati dovrà riconoscere uno sconto maggiore sul prezzo d'acquisto per vendere il lotto di veicoli. Oppure se l'intervallo temporale di manutenzione è troppo ampio, e quindi le parti non riescono a raggiungere la percorrenza dichiarata in offerta, con il modello LCC sarà il costruttore a pagare l'effettuazione più ravvicinata della manutenzione.

Il piano di manutenzione, che andremo ad analizzare in alcune sue parti nel nostro lavoro, diventa quindi un input determinante per la gestione delle attività di manutenzione. La metodologia LCC dunque obbliga l'operatore di servizio di trasporto pubblico ad integrare la fase di gestione della manutenzione con la fase di sviluppo della flotta, già dalla fase di acquisto, poichè si riesce a procedere solo verificando che essi abbiano specifiche idonee, ovvero soltanto qualora si abbiano i minori costi di manutenzione nel corso dell'intero ciclo di vita.

Nello specifico il lavoro consiste nell'aver analizzato i contratti LCC di acquisto dei veicoli dell'azienda per il trasporto pubblico Tper, Tua ecc... Per ogni lotto si è avuto accesso ai documenti inerenti, riguardanti il bando di gara, l'offerta, il capitolato, le schede tecniche, economiche e manutentive.

Lo svolgimento dell'elaborato, basato su robuste metodologie, si è fondato, per quanto concerne la parte empirica, sull'analisi dei dati provenienti dalle effettive offerte di gara dei costruttori (quindi mediante dati LCC). Ciò ha permesso di analizzare il seguente ordine di dati/obiettivi:

- 1) una prima analisi che consente di valutare, per ognuna delle sub-Flotte analizzate le filosofie di progetto dei nuovi autobus, definendo quindi l'intensità del costo dei Ricambi rispetto ai Costi Totali annuali.
- 2) una seconda parte di elaborazioni che riporta, per ognuna delle sub-Flotte analizzate, l'andamento del costo nel periodo di contratto LCC, cui si aggiunge un criterio di valutazione per comparare i costi manutentivi dei diversi sistemi di trazione tradizionale a Metano e a Gasolio.

Da queste prime osservazioni, è stato possibile giungere a due ordini di conclusioni:

- il modello si può sviluppare, da un lato, secondo un'analisi Diacronica, in termini di Lungo Periodo e come somma dei diversi parametri considerati degli n lotti, dall'altro, secondo un'analisi Sincronica, in termini di Breve Periodo, secondo il quale vengono presi in considerazione i parametri caratteristici di ogni singolo lotto monitorato con LCC;
- dall'analisi Sincronica dei valori monitorati nel Breve Periodo è possibile ottenere il calcolo del Budget, inteso anche come Fabbisogno all'anno della Flotta. Allo stesso tempo, infatti, questi dati consentono una quantificazione delle attività necessarie per gestire il processo logistico dei ricambi. È stato verificato che il metodo LCC consente di ridurre le scorte di magazzino e ridurre contestualmente il numero dei fermi tecnici almeno del 10%.

Considerata la moltitudine di dati costituenti il database si è proceduto a realizzare delle rette di regressione lineare dei dati di manutenzione valutando anche l'influenza della velocità commerciale e dell'orografia della linea sui costi di manutenzione.

L'analisi previsionale dei costi globali per il Budget (somma dei vari costi LCC) sarà utile all'azienda di Tpl per capire come dovrà indirizzare le proprie risorse umane e quali politiche di gestione del personale sarà più giusto intraprendere per un corretto dimensionamento (ad esempio, sistemi a rete tramite esternalizzazione parziale di attività a fornitori esterni, assunzioni, corsi di formazione e sviluppo, etc...).

## CAPITOLO 1 – Le “BUS OPTION”

### 1.1 Autobus DIESEL (Euro V ed Euro VI)

Come anticipato nell'introduzione di questo lavoro di ricerca l'operatore di TPL ed il costruttore dell'autobus per ottenere un miglioramento continuo devono operare a stretto contatto anche dopo l'aggiudicazione della gara d'acquisto del prodotto autobus. Una modalità progettuale utilizzata dai migliori costruttori per ottenere una grande affidabilità è costituita dal mantenimento di un modello base che poi si evolve in tutte le varie motorizzazioni come si è visto nell'evoluzione da Euro II a Euro VI. Nella figura 1.5 si osserva come il modello base sconta tutte le problematiche legate al primo sviluppo dell'autobus. Nei modelli successivi invece, si cambiano la motorizzazione, le sospensioni dell'assale anteriore e si sviluppano elettronica e diagnostica ottenendo un miglioramento della tecnologia e delle prestazioni del prodotto. Ad ogni nuova versione si manifestano guasti per le nuove parti che possono essere risolti velocemente attraverso il monitoraggio con i clienti evitando che vengano rimessi in circolazione autobus di nuova motorizzazione con gli stessi

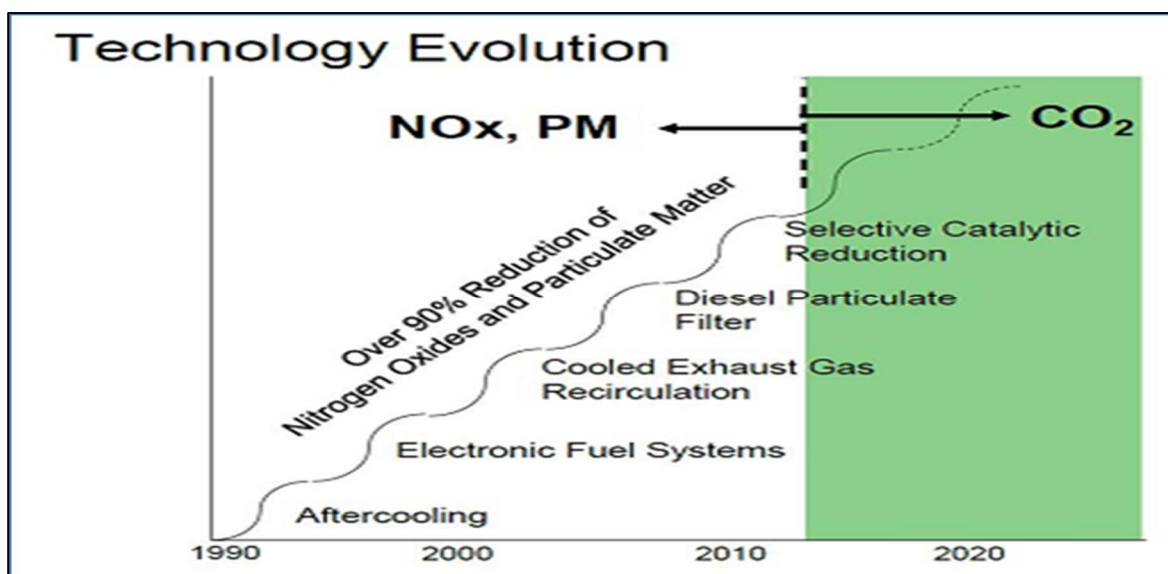


Figura 1.5: Sviluppo telaio autobus attraverso le diverse motorizzazioni

problemi del modello precedente. Solo in questo modo si possono ottenere disponibilità maggiori del 92%.

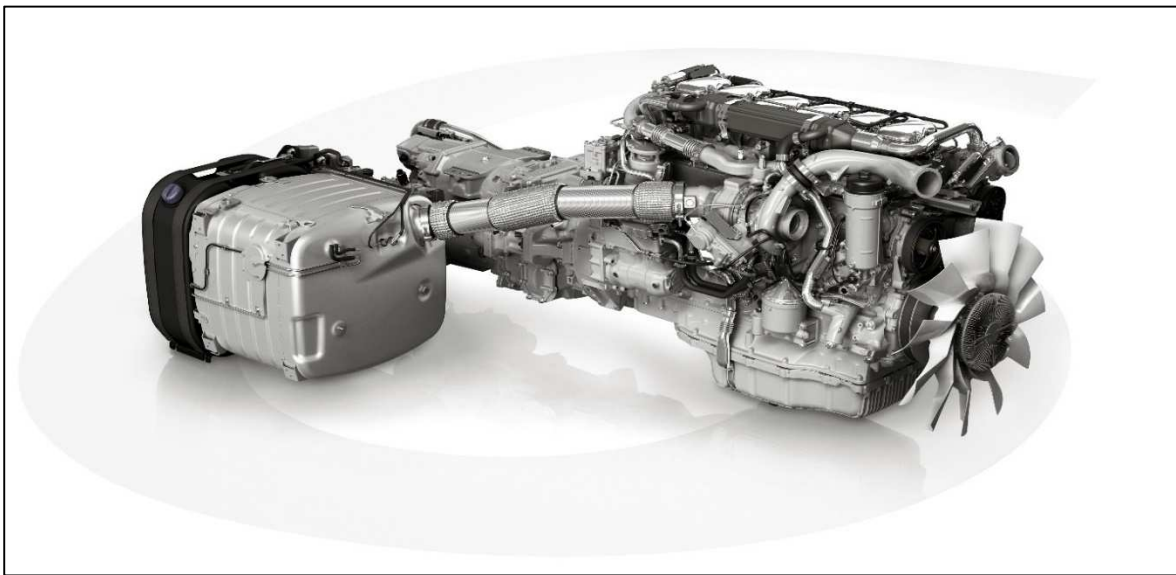
Oltre all'affidabilità che per le motorizzazioni diesel ha raggiunto buoni standard, il



problema principale è che dalla combustione di combustibili fossili all'interno dei motori diesel viene rilasciata nell'aria una quantità più alta di gas GHG (in particolare CO<sub>2</sub>) rispetto ad altre fonti energetiche utilizzate per altri sistemi di trazione.

Con l'introduzione dello standard Euro VI però, le emissioni per gli autobus a gasolio sono più contenute permettendo ancora il loro utilizzo nell'attuale periodo di transizione dalle fonti fossili a quelle alternative. Gli autobus Euro VI per prestazioni operative ed esigenze infrastrutturali sono identici a quelli Euro V (nella figura 1.6 riportiamo il 3D del motore diesel con relativo sistema di trattamento dei gas esausti). Gli autobus diesel possono produrre meno emissioni utilizzando una miscela di gasolio con biocarburanti. La riduzione della CO<sub>2</sub> emessa può essere ottenuta migliorando l'efficienza del motore e lo stile di guida.

In considerazione della lunga tradizione d'utilizzo dei motori diesel si riesce ad avere



*Figura 1.6: Euro VI powertrain with integrated silencer and exhaust aftertreatment.*

con certezza i costi di efficienza, manutenzione ed esercizio degli autobus diesel. Gli autobus diesel possono essere facilmente adattati per l'uso di biocarburanti senza apportare significative modifiche all'infrastruttura di rifornimento.

Il motore diesel è il motore per eccellenza dei veicoli pesanti di tutto il mondo, compresi gli autobus. Ha raggiunto questa posizione grazie al suo migliore rendimento rispetto ai motori a benzina e presenta ormai elevata affidabilità. In Europa, viene spesso impiegato anche in veicoli leggeri. Il lato negativo di questo tipo

di propulsione “convenzionale” è l’elevata emissione di particelle (PM10, PM2,5 e PM1) e ossidi di azoto (NOx). Pertanto, si può dire che deve affrontare sfide maggiori nel soddisfare le normative antinquinamento future rispetto al motore con alimentazione a benzina o a gas. È diventato così sempre più complesso, con vari dispositivi di post-trattamento aggiunti allo scarico del motore, e molti produttori sono alla ricerca di modi alternativi per affrontare le sfide future: ora si stanno progettando nuovi elementi di combustione a bassa temperatura ed omogenea (per evitare picchi di calore che produrrebbero elevati ossidi di azoto) o analizzando diversi combustibili sintetici speciali come il gasolio paraffinico affinché si verifichi una migliore miscelazione locale e globale per evitare l’emissione del particolato (soot). Questi due importanti concetti sono riassunti nella figura 1.7.

Ecco che si spiega come il gas naturale nelle flotte dei mezzi pesanti (compresi gli autobus urbani e non) potrebbe diventare sempre più competitivo.

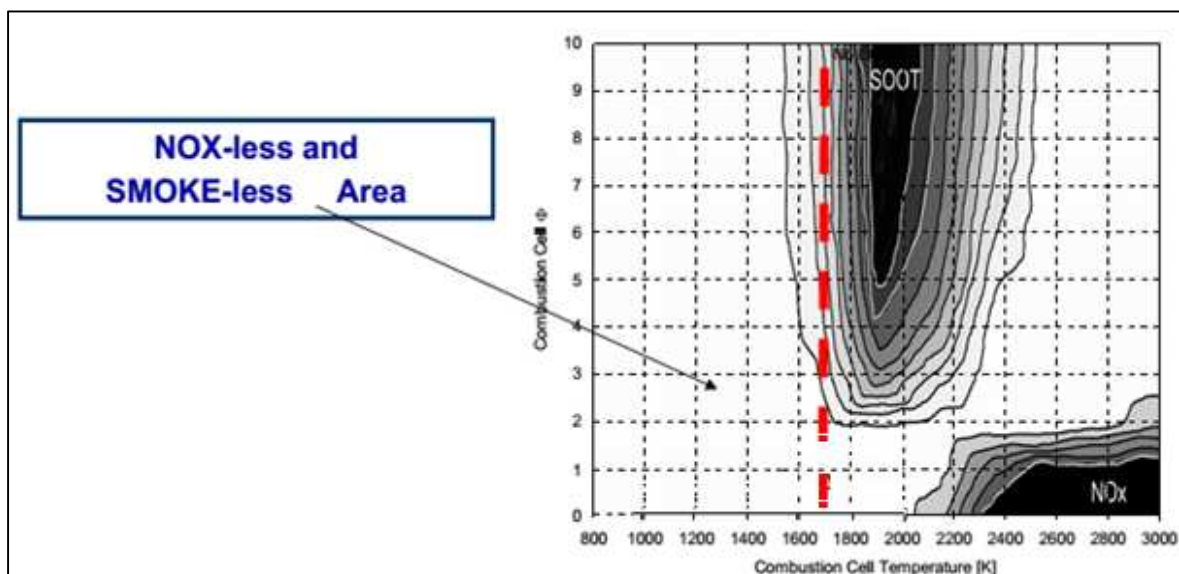


Figura 1.7: Aree di maggior produzione d’inquinanti nel motore Diesel in funzione della temperatura di combustione

Addentrando nel funzionamento del motore si scopre che i controlli elettronici hanno potuto far evolvere e rendere sempre più pulito questo genere di alimentazione: le aumentate pressioni di iniezione ed il controllo accurato dell’iniezione (tramite iniettori elettromeccanici e piezoelettrici) hanno migliorato le prestazioni in modo significativo. La tecnologia d’iniezione predominante ad oggi,

come detto, è il sistema common rail, che comprende una pompa di bassa pressione per garantire la portata, ed una ad alta pressione per raggiungere le pressioni adeguate in ogni condizione di funzionamento del motore. È presente poi un accumulatore idraulico (il rail), collegato tramite tubazioni agli iniettori che vengono comandati elettronicamente dalla centralina. Tutto questo permette un azionamento molto veloce dell'iniezione, ed è così possibile suddividerla in più fasi distinte per ottimizzare le prestazioni del motore garantendo le minime emissioni (figura 1.8). Per garantire l'affidabilità, la costanza delle prestazioni nel tempo ed evitare malfunzionamenti, sono necessari combustibili di alta qualità e soprattutto privi di impurità. Quasi tutti gli attuali motori diesel per autoveicoli hanno un turbocompressore con intercooler per migliorare le prestazioni, ma il numero di variabili di controllo e degli attuatori (turbocompressori a geometria variabile, fasatura, dispositivi di controllo di scarico, ecc.) aumenta continuamente.

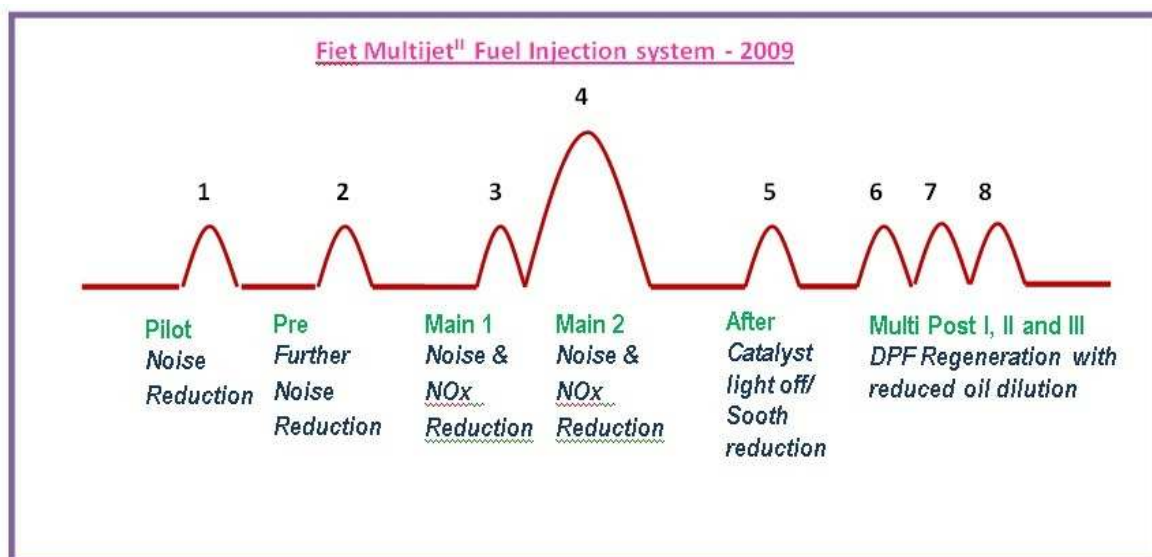


Figura 1.8: Fuel Injection System – Multijet<sup>II</sup>

Per i motori convenzionali, il problema fondamentale è garantire contemporaneamente la riduzione degli ossidi di azoto e del particolato, in quanto vi è un noto effetto di “compromesso” tra questi due macro inquinanti (come pure il consumo di carburante). L'unico modo per rompere davvero questo trade-off, è quello di porre allo scarico alcune tecnologie di post-trattamento dei gas combusti.

Il ricircolo dei gas di scarico (EGR) viene comunemente utilizzato per tenere le temperature di combustione più basse e quindi sopprimere la formazione di NO<sub>x</sub>. Tuttavia adottare elevati rapporti di EGR comporta l'aumento di emissioni di particolato e contemporaneamente viene richiesto un miglior raffreddamento.

Una tecnologia alternativa per ridurre gli NO<sub>x</sub> è la riduzione catalitica selettiva (SCR) descritta in figura 1.9.

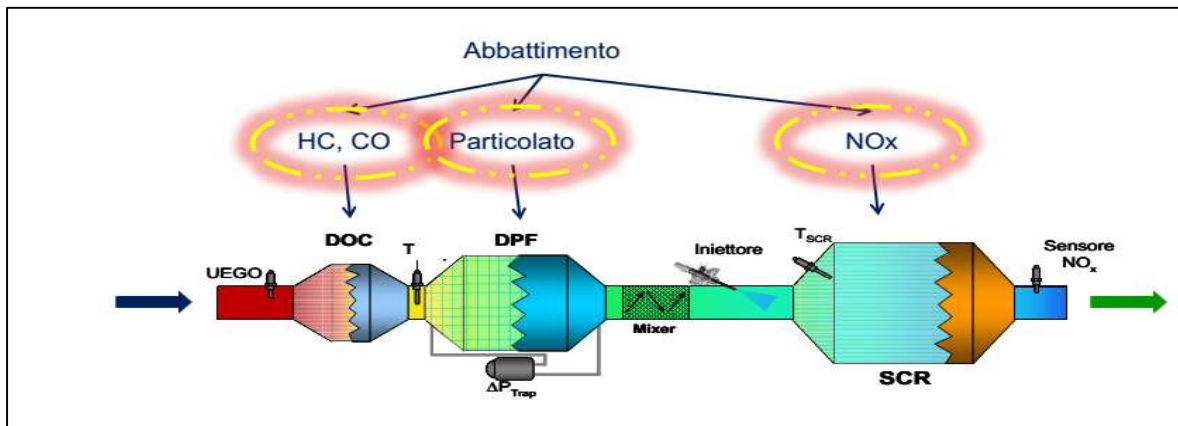


Figura 1.9: Layout di scarico SCR di un motore Diesel

È richiesto però un elemento catalizzante riducente, l'urea (commercializzata col nome di "AdBlue"), che viene immessa a valle del catalizzatore DOC e del DPF. L'urea è necessaria perché la combustione nel motore diesel è globalmente sempre magra (con eccesso d'aria) quindi la conversione degli ossidi di azoto in azoto atmosferico è praticamente impossibile. La tecnologia SCR consente di ridurre le emissioni di NO<sub>x</sub> di oltre l'80%. Il vantaggio della tecnologia SCR è che i motori possono essere progettati aumentandone il rendimento (aumentando il rapporto di compressione e alzando le temperature di combustione) affinché si abbiano emissioni molto basse di particolato e bassi consumi. Gli ossidi di azoto prodotti da queste temperature verranno ridotti grazie al SCR stesso. Gli inconvenienti riguardano l'aggiunta di un fluido aggiuntivo a bordo, e che l'urea non può essere iniettata quando la temperatura di scarico è bassa: in tal caso il sistema di riduzione non funziona. Inoltre, i sistemi SCR possono generare emissioni di N<sub>2</sub>O che è un altro potenziale gas serra.

Le emissioni di PM dai motori diesel possono, in una certa misura, essere controllate migliorando il trattamento dell'aria, le prestazioni del sistema di iniezione, e la qualità del carburante. Tuttavia, sono necessari dispositivi di post-trattamento per ottenere i livelli di emissione previsti dalle normative attuali (e a maggior ragione quelle future). Le principali alternative per la riduzione del PM sono rappresentate, come detto poc'anzi, dall'aumento di temperature in camera di combustione, affinché durante la combustione non si produca o venga istantaneamente ossidato il PM, oppure utilizzando dei filtri a flusso continuo (FTF, chiamati anche filtri anti particolato parziale p-DPF o CRT – Continuously Regeneration Trap) e i filtri di tipo "wall-flow" in commercio oggi (FAP e DPF).

Il nome FAP (Filtres à Particules) è la definizione commerciale dei filtri anti particolato, utilizzati dalle vetture del gruppo Peugeot-Citroen (Gruppo PSA). In campo tecnico, il FAP appartiene alla tipologia di filtri che utilizzano vari additivi per essere rigenerati, a base ossidi di cerio e ferro (l'additivo commercialmente è noto con il nome "Eolys"). Essendo tali filtri i primi storicamente installati a bordo di autovetture, sono anche quelli dove le problematiche, ed i metodi di manutenzione e riparazione, sono più noti. Con il nome di FAP si classifica quindi quella tipologia di filtri che utilizzano un additivo per eseguire la rigenerazione attiva. Come detto in precedenza, la rigenerazione del filtro è il processo di combustione del particolato depositato al proprio interno. La combustione di tale particolato avviene alla temperatura di all'incirca 600 – 650 °C.

Per raggiungere tali temperature, le moderne motorizzazioni diesel effettuano post iniezioni dopo il punto morto superiore, che bruciano sul catalizzatore ossidante posto davanti al filtro ceramico con lo scopo di aumentare la temperatura dei gas di scarico. Per abbassare la soglia di rigenerazione, il carburante nel sistema è additivato opportunamente per ridurre la temperatura di combustione del particolato a 450°C circa. Mediante post iniezioni la temperatura dei gas raggiunge quindi i 450°C, in modo da avviare la combustione del particolato presente all'interno del filtro ed eseguirne la rigenerazione. Il DPF (Diesel Particulate Filter) non utilizza l'additivo

perché innalza maggiormente la temperatura dei gas di scarico, fino a 600-650°C. L'innalzamento della temperatura viene effettuato attraverso una serie di post-iniezioni con conseguenti post-combustioni, che in parte avvengono nei collettori di scarico e nei catalizzatori ossidanti; tali valori di temperatura sono più che sufficienti a bruciare completamente il particolato accumulato nel filtro. Sempre per agevolare il processo di combustione del particolato accumulato, sulle pareti del filtro sono inseriti dei metalli nobili che operano da catalizzatori. Il sistema senza additivo ha il vantaggio di non richiedere il rifornimento dell'additivo che, oltre ad essere un prodotto pericoloso per la salute umana, è anche piuttosto costoso. Per contro il filtro senza additivo lavora a temperature di innesco rigenerazione più elevate. Inoltre, il filtro senza additivo, a causa della maggiore post-iniezione richiesta soffre di una certa contaminazione (diluizione) dell'olio motore. In funzione del numero delle rigenerazioni e quindi dello stile guida adottato, l'olio motore può deteriorarsi più rapidamente del normale a causa della diluizione dovuta al gasolio.

## 1.2 Bus CNG (Compressed Natural Gas)

Sugli autobus CNG sono installati i convenzionali motori a combustione interna a metano. I principali componenti di un sistema alimentato con combustibile gassoso sono: i serbatoi di carburante (bombole appositamente progettate), i regolatori di pressione e il sistema di alimentazione del gas. Tuttavia, per raggiungere emissioni di scarico complessivamente basse, devono essere applicate tutte le tecnologie e

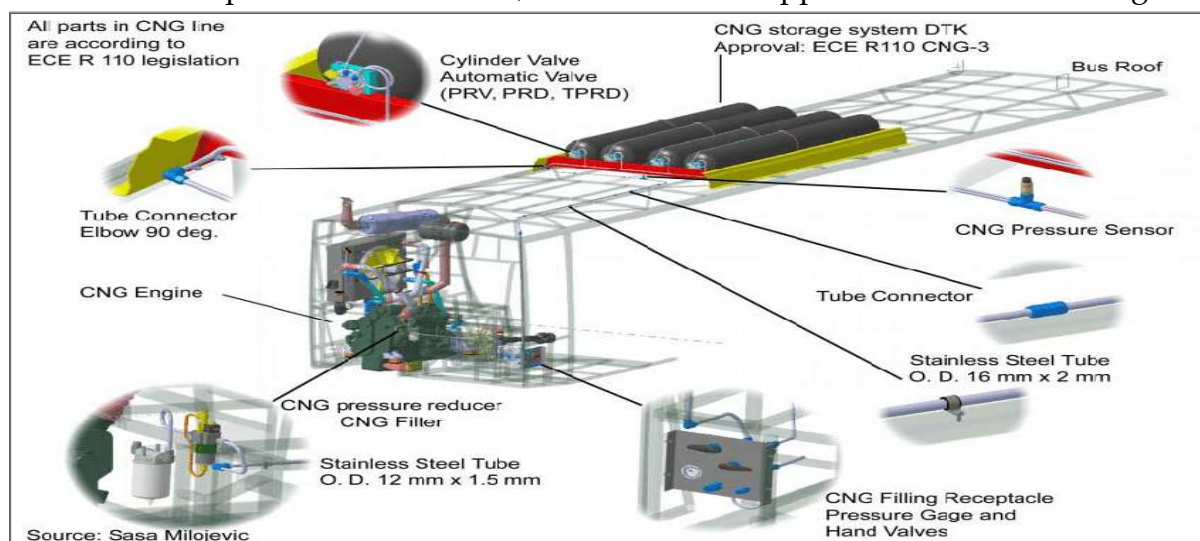


Figura 1.10: CNG fuel line equipment installed on the bus



sistemi di controllo avanzati. In figura 1.10 viene riportato un layout di un autobus a metano con evidenza dei principali componenti che caratterizzano il sistema di trazione. Il gas è proveniente da una normale rete di distribuzione municipale ed è compresso per consentire il rifornimento del veicolo.

La differenza principale tra un autobus diesel e uno con alimentazione CNG consiste nella quantità di inquinanti emessi e della loro concentrazione locale. Gli attuali standard Euro VI hanno ridotto la portata di questo vantaggio per gli autobus CNG che da loro canto possono utilizzare il biogas per ridurre globalmente le loro emissioni di GHG. Il sistema di trazione CNG offre vantaggi legati alla diversità del vettore energetico poiché non si fonda sul petrolio e potenzialmente, considerando che le stazioni di rifornimento del gas possono essere trasformate in stazioni di rifornimento di idrogeno, questa tecnologia potrebbe rappresentare la transizione tra il diesel e l'idrogeno.

Le preoccupazioni principali legate all'utilizzo di questa tecnologia sono rappresentate dai maggiori standard di sicurezza richiesti a causa di possibili perdite di gas e loro infiammabilità. I bus CNG introdotti nelle città europee erano legati alla necessità di ammodernamento delle vecchie flotte di autobus ed al miglioramento d'immagine degli operatori di TPL attraverso l'uso di veicoli ecologicamente sostenibili. L'introduzione in flotta di autobus CNG presuppone una strategia di sistema che non trascuri la realizzazione di stazioni di rifornimento interni ai depositi con le relative difficoltà per l'ottenimento dell'autorizzazione necessaria per la costruzione di stazioni di rifornimento CNG. Una delle applicazioni ideali nell'uso del metano nel TPL è quella che si ottiene con un'adozione che si estenda a tutta la flotta. Se si volesse infatti tracciare l'andamento dei costi da sostenere per un impianto di rifornimento a metano in relazione al numero dei veicoli in parco, si otterrebbe un andamento rappresentato nella figura 8.145 del capitolo 8 di questo lavoro di ricerca che mostra la diminuzione dei costi al crescere del numero dei veicoli riforniti. Questo andamento è reso ancora più interessante dalla dinamica dei finanziamenti di carattere pubblico sui quali si è già potuto contare in passato.

I combustibili gassosi come il metano, propano, butano sono intrinsecamente combustibili puliti, che in condizioni favorevoli danno una combustione priva di fuliggine e con basse concentrazioni di componenti dannosi rispetto ai tradizionali idrocarburi liquidi. Tuttavia, essi non offrono la stessa flessibilità dei combustibili liquidi: la maggior parte dei motori che utilizza combustibili gassosi comprende o motori dedicati ed ottimizzati per uno specifico carburante (veicoli pesanti) o motori bi-fuel (veicoli leggeri) in grado di funzionare sia a benzina o a gas.

La maggior parte dei motori a gas pesanti di oggi si basano su motori diesel convertiti in motori ad accensione comandata. Principalmente, le conversioni sono eseguite dai costruttori dei motori stessi, affinché si possa garantire la durata nel tempo di tutti i componenti, grazie alla progettazione con materiali rinforzati e resistenti ai maggiori carichi termici. I motori ad accensione comandata per applicazioni heavy duty sono abbastanza comuni nelle applicazioni di autobus urbani in tutto il mondo, e quasi tutti i costruttori sono ormai in grado di offrire veicoli con motore a gas naturale.

Come anticipato nel primo capoverso anche questa tecnologia necessita di sistemi di trattamento dei gas di scarico. Per questo sono applicati due sistemi di combustione principali, ovvero con combustione magra in cui la formazione di  $\text{NO}_x$  è controllata nel processo di combustione grazie all'aria in eccesso, o la combustione stechiometrica in combinazione con un catalizzatore a tre vie (figura 1.11).

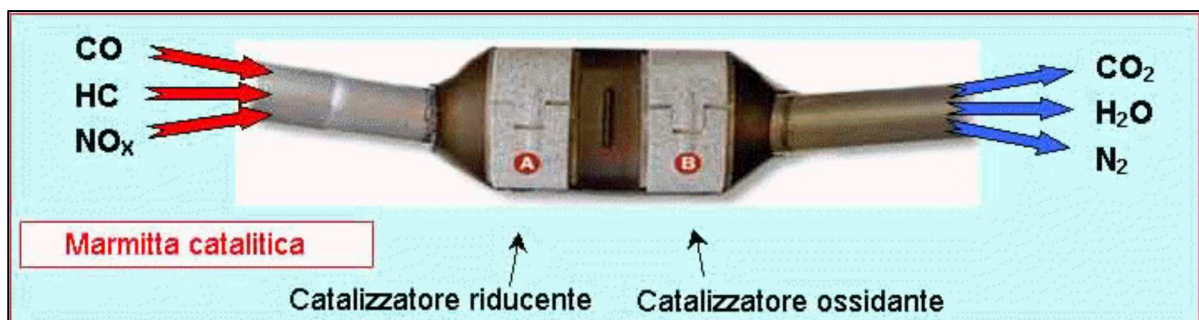


Figura 1.11: Schema funzionamento marmitta catalitica

Per questo genere di veicoli vi è comunque ancora un certo margine di miglioramento per quanto riguarda le prestazioni, le emissioni, l'efficienza, e in qualche modo, anche l'affidabilità. Nel normale servizio, i motori a gas possono consumare il 25-35% in più di energia rispetto ai loro omologhi diesel. Le nuove tecnologie dei motori e



l'elettronica come la fasatura variabile delle valvole, l'EGR, etc... possono aiutare a migliorare le prestazioni dei motori a gas. In definitiva, quando il livello di sofisticazione tecnica dei motori a gas sarà allo stesso livello delle tecnologie convenzionali attuali, i motori a gas naturale avranno evidenti vantaggi dal punto di vista ambientale, delle emissioni tossiche e della CO<sub>2</sub>.

La società di tecnologia canadese Westport Innovations ha ultimamente sviluppato l'iniezione diretta per motori a gas naturale per migliorare l'efficienza del carburante. I sistemi ad iniezione diretta del gas forniscono a fine ciclo l'iniezione ad alta pressione del gas in camera di combustione. Tuttavia è necessaria una accensione comandata poiché il gas naturale ha una temperatura di accensione superiore al diesel. Fondamentalmente il motore funziona come un motore diesel, e fornisce quindi maggiore efficienza rispetto ai motori a gas ad accensione comandata. La tecnologia HPDI (*High Pressure Direct Injection*) di Westport ora è stata commercializzata con cilindrata complessiva di 15 litri e fornisce 400 – 475 CV, tuttavia questa tecnologia non è ancora disponibile per applicazioni per gli autobus. Il metano viene normalmente conservato sotto pressione (200 bar in genere, perciò viene chiamato gas naturale compresso CNG). In veicoli leggeri e autobus urbani il CNG può fornire un'autonomia sufficiente, ma il metano non è adatto per applicazioni interurbane o per camion per impieghi su lungo raggio. Il gas naturale liquido (LNG) offre più flessibilità, e viene già utilizzato in alcune operazioni di autotrasporto svolte negli Stati Uniti. Sono stati approvati degli standard internazionali per garantire la sicurezza legata all'alta pressione a cui sono sottoposti i componenti e gli impianti di metano.

Per avere un'ampia diffusione un carburante deve assicurare alti standard di sicurezza e facilità di utilizzo ed il metano risponde a queste caratteristiche. La sicurezza del metano dipende in larga parte dalle sue qualità intrinseche: Esso presenta infatti il più alto punto di infiammabilità rispetto a tutti gli altri carburanti. La temperatura di autoaccensione (650 °C) è il doppio rispetto a quella dei carburanti liquidi e la concentrazione di carburante nell'aria necessaria perché si possa avere una

combustione è molto maggiore di quella della benzina e del gasolio. Si tratta di fattori che contribuiscono ad abbassare notevolmente il rischio di incidente con sviluppo di incendio. Il metano ha una densità minore rispetto a quella dell'aria, e quindi, se fuoriesce nell'ambiente, tende a disperdersi verso l'alto senza formare pericolose concentrazioni o accumuli al suolo ed infine si riporta che non è pericoloso per la salute nemmeno in concentrazioni elevate, in quanto non velenoso.

Gli impianti di stoccaggio e trasporto del gas naturale sono ermetici e realizzati con standard qualitativi elevati. È provato (Fonte: Bureau Veritas Norvegese) che il metano per autotrazione è sicuro almeno quanto il gasolio in caso di gravi incidenti stradali. Le valvole di sicurezza a fusibile inoltre, in caso di incendio e di aumento della temperatura, permettono la fuoriuscita controllata di gas evitando sovrappressioni. Nel caso in cui la tubatura a bordo si dovesse rompere, la valvola di sicurezza contro l'eccesso di flusso impedisce la fuoriuscita incontrollata del gas. Sui prototipi realizzati dai costruttori d'auto, sono inoltre previste prove di resistenza termica e meccanica, come il crash test e il "bonfire test" o prove di incendio: la bombola deve scaricarsi attraverso il fusibile senza scoppiare. Tali tests sono svolti in collaborazione anche con i Vigili del Fuoco, per verificare, con le più sofisticate attrezzature, l'efficienza e il grado di sicurezza di sistemi e serbatoi. Il metano per autotrazione è contenuto in bombole che operano a una pressione di 220 bar, sono collaudate a 300 bar, e sono costruite per resistere almeno fino a 450 bar. Il margine di sicurezza è più che doppio rispetto alla pressione di esercizio. Sottoposti a crash test (incidenti simulati), i serbatoi del gas sono risultati essere i componenti di gran lunga più resistenti a bordo del veicolo, incluse le parti strutturali. L'industria italiana è all'avanguardia in Europa per quanto riguarda la produzione di apparecchiature meccaniche e di componentistica d'impianto per l'impiego del metano sicure ed affidabili. Il regolamento d'indirizzo facoltativo di riferimento per la sicurezza di impianti metano e la loro installazione sui veicoli è l'ECE/ONU 110 (entrato in vigore da dicembre 2000), perciò le norme nazionali risultano ancora vigenti e quindi alternative alle norme internazionali (cosa che non avviene per il GPL, dove

l'ECE/ONU 67 ha sostituito le norme nazionali). Concludiamo riportando le principali norme che regolano il settore in Italia:

\* Vecchio Codice della Strada: DPR 15 giugno 1959 n°393, DPR 30 giugno 1959 n°420;

\* Articoli dal 341 al 351 del Regolamento ECE/ONU 110: definizioni, prescrizioni generali, metodologia di prova per quanto riguarda la costruzione dei singoli componenti e la loro installazione sui veicoli. Collaudo del veicolo: visita e prova presso gli Uffici Provinciali della M.C.T.C.

### 1.3 Autobus LNG (Liquefied Natural Gas)

L'utilizzo del metano per autotrazione è stato trattato nel paragrafo precedente, ottenendo la piena dimostrazione del fatto che, oltre a un vantaggio in termini economici, si ha un vantaggio dal punto di vista ambientale, poiché produce quantità molto limitate di emissioni (PM<sub>10</sub> e NO<sub>x</sub> in primis).

Considerato che per quest'innovativa tecnologia di sistema di trazione non si dispone di dati manutentivi reali da analizzare e che per il trasporto extraurbano sta avendo una buona diffusione, procederemo in questo paragrafo ad un approfondimento di questa tecnologia sulla base di quanto dichiarato dai costruttori.

Fino ad oggi il limite sull'utilizzo di questo combustibile è stato causato dall'impiego nella sua forma gassosa e compressa, che di per sé comporta un considerevole aumento di peso dovuto ai serbatoi a bordo ed una ridotta capacità di carico e di conseguenza anche una bassa autonomia del veicolo. Questo limite si può oggi superare utilizzando il metano nella sua forma liquida adottando recipienti criogenici come serbatoi di carburante con ingombri e pesi di gran lunga minori rispetto alle bombole per il metano compresso. Il metano liquido è 600 volte più denso del gassoso a bassa pressione (3 volte più denso del metano gassoso a 200 bar), il che consente notevoli benefici in termini di volume trasportabile e di conseguenza in termini di autonomia del mezzo.

Il Gas Naturale Liquefatto (GNL o LNG, con acronimo inglese) si ottiene sottoponendo il gas naturale, dopo opportuni trattamenti di depurazione, a successive fasi di raffreddamento e condensazione, fino alla temperatura di circa -160 °C (vedi diagramma di figura 1.12)

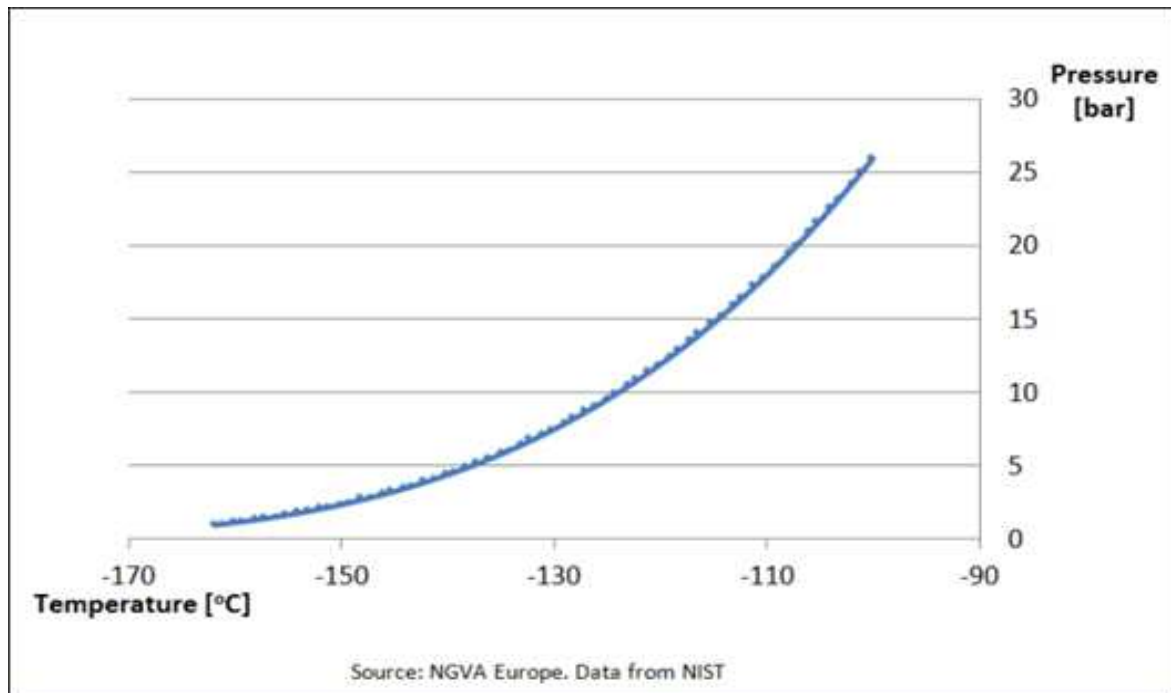


Figura 1.12: Diagramma di stato dell'LNG

Il processo di liquefazione rende il prodotto più puro poiché viene depurato sia della parte umida che della maggior parte di altri gas in miscela. Ne deriva un liquido puro



Figura 1.13: Trasporto dell' LNG

fino al 99 %, inodore e trasparente, con un potere calorifico di 13.000 kcal/kg, valore che attesta il GNL tra quelli con il più alto potere energetico. L'utilizzo di LNG consente il trasporto mediante navi dette "metaniere"; il GNL deve essere poi riportato allo stato gassoso mediante rigassificatori, per l'inserimento nella rete gas Nazionale (figura 1.13).

La disponibilità di stoccaggi di LNG permette l'impiego nel settore dei trasporti, in sostituzione del gasolio o del gas naturale compresso (CNG); tale sostituzione avviene utilizzando serbatoi criogenici (figura 1.14) che consentono di mantenere la temperatura all'interno del serbatoio a -160°C, valore al di sotto della temperatura di ebollizione del gas naturale.

I vantaggi relativi all'impiego dell'LNG in sostituzione del CNG sono:

- \* peso dei serbatoi ridotto del 90 %;
- \* percorrenza superiore (oltre il doppio di quella del CNG);
- \* le stazioni di rifornimento di LNG hanno minori costi di installazione e manutenzione rispetto alle stazioni di CNG;
- \* le stazioni di rifornimento del LNG non hanno bisogno di elettricità mentre il CNG richiede 0,07 €/Kg per comprimere il metano.

**PRINCIPALI CARATTERISTICHE:**

- Serbatoio orizzontale per utilizzo a metano liquido (GNL);
- Massime prestazioni in termini di affidabilità, robustezza, durata del serbatoio;
- Predisposizione per attacchi di riempimento destro o sinistro;
- Manometro;
- Super isolamento termico in alto vuoto e multistrato, a garanzia di un basso tasso di evaporazione;
- Costruito in acciaio inox, con superficie interna a specchio per limitare la componente radiativa di scambio termico;
- Indicatore di livello elettronico;
- Valvola automatica di flusso eccessivo;
- Coperchio di protezione attacchi di riempimento;
- Switch di sicurezza per l'arresto motore se il coperchio di protezione è aperto.



*Figura 1.14: Serbatoio criogenico per LNG*

Il natural gas viene immagazzinato nel serbatoio in uno stato di equilibrio liquido-gas a una determinata temperatura-pressione determinata nel momento di riempimento del serbatoio.

La pressione stessa pompa il liquido, quando richiesto dal motore (sottopressione provocata) al vaporizzatore dove viene riscaldato con il liquido di raffreddamento del motore per farlo trasformare in gas, pronto per essere regolato alla giusta pressione di mandata al motore ed essere bruciato come nel motore a metano. In effetti, il motore brucia GN, indipendentemente dalla fonte GNC o GNL. In figura 1.15 riportiamo il confronto delle caratteristiche fisiche, dei consumi standard e degli attuali range operativi del CNG e del LNG.



Figura 1.15: Why LNG

A causa della bassa temperatura del liquido l'isolamento termico è necessario per prevenire l'effetto ebollizione (ebollizione liquida). Questo non può essere completamente evitato se l'economizzatore non consente l'iniezione di gas nel vaporizzatore per alimentare il motore quando la pressione aumenta. Se il motore non è in funzione e viene raggiunta la pressione massima del serbatoio, le valvole di sicurezza si aprono all'atmosfera per mantenere la pressione sotto i limiti.

Quindi l'economizzatore manterrà la pressione-temperatura al valore di funzionamento di progetto (vedi figura 1.16)

Il GNL è un carburante che richiede il monitoraggio e il controllo della temperatura

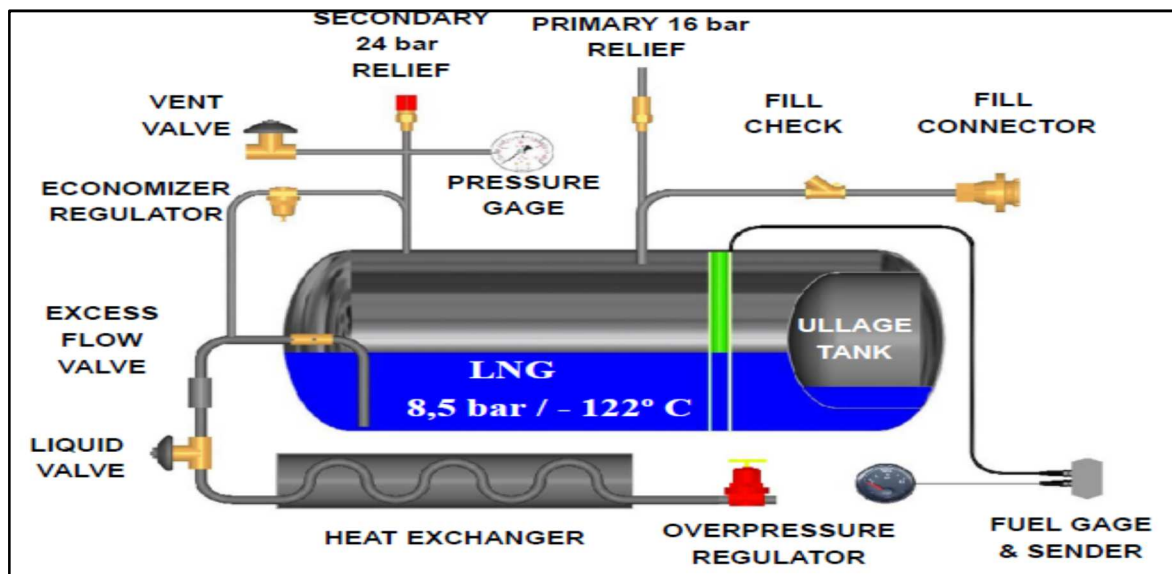


Figura 1.16: Tank principle

e della pressione a causa del riscaldamento continuo del combustibile che si verifica per l'elevata differenza tra la temperatura ambiente e quella del GNL (-120 °C). Anche con serbatoi isolati in modo ottimale, si verificheranno aumenti continui di pressione. Il vapore scaricato nell'atmosfera si traduce in un peggioramento dei consumi di carburante. La costante vaporizzazione del combustibile influisce negativamente anche sulle sue proprietà. Il metano nel carburante raggiungerà l'ebollizione prima degli altri idrocarburi nella miscela, come propano e butano per esempio. Pertanto, se il gas naturale liquefatto viene conservato per lunghi periodi senza essere estratto e riempito, il tasso di metano continuerà a diminuire e le caratteristiche fisiche potrebbe non soddisfare i requisiti di progettazione del motore. Al fine di evitare questo fenomeno, noto come degrado del carburante è consigliato il rifornimento di carburante immediatamente prima dell'uso normale del veicolo dopo periodi di inattività.

### 1.3.1 I sistemi "Dual Fuel"

Attualmente è possibile installare un impianto a metano CNG o LNG, anche su un veicolo a gasolio di vecchia concezione (anche Euro 1), in modo da consentire un'alimentazione cosiddetta "Dual Fuel", in cui vengono a trovarsi in camera di combustione sia metano che gasolio. Infatti convertendo un motore ad accensione spontanea a gasolio in un propulsore "Dual Fuel", non è necessaria l'installazione



delle candele d'accensione sulla testa motore, poiché sarà sempre immessa in camera di combustione una minima quantità di gasolio per provocare l'accensione della miscela di aria e metano preformata nel collettore di aspirazione.

Il controllo dinamico dell'iniezione primaria di gasolio e il dosaggio accurato della miscela aria-gas, sono i punti di forza del sistema, costantemente controllato da una centralina intelligente capace di colloquiare con il motore in tempo reale per garantire il perfetto funzionamento e la sicurezza dell'impianto.

L'impiego di LNG nel settore dei trasporti pesanti richiede, in caso di sistemi "Dual Fuel":

- \* l'installazione di un kit sui veicoli;
- \* la realizzazione di stazioni di stoccaggio e rifornimento di LNG.

Dalle sperimentazioni eseguite, si ricava che con un'alimentazione siffatta si possono ottenere ratei di sostituzione in gas naturale del 90 % in condizioni "Stady State", ovvero a carico costante, mentre con un utilizzo dinamico la sostituzione media scende attorno al 40 %. Tramite un'apposita centralina elettronica è possibile far funzionare il motore con una miscela dinamica controllata di gasolio e gas naturale compresso, liquido, syngas, o biogas (figura 1.17).

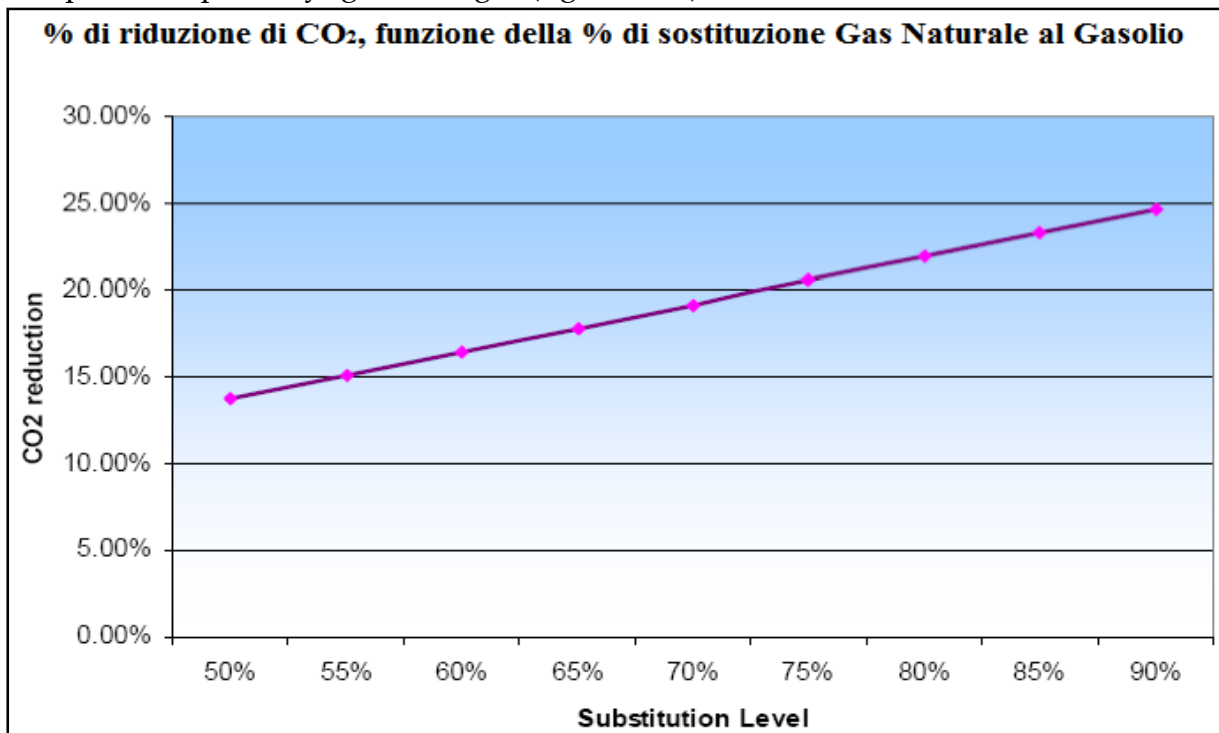


Figura 1.17: CO<sub>2</sub> reduction in function of substitution level LNG whit diesel



I vantaggi relativi all'impiego dell'LNG in sostituzione del diesel sono la riduzione del prezzo (circa 40 % in meno), la riduzione emissione acustiche; e la riduzione delle emissioni in atmosfera che consentirebbero di portare un motore di classe Euro 3 in classe Euro 5.

I veicoli (autobus o autotreni) vengono equipaggiati con un kit costituito da un serbatoio criogenico appositamente realizzato per l'impiego di LNG, da un sistema di riempimento e da un sistema di sicurezza. (figura 1.18); inoltre è necessario eseguire alcune modifiche su alcune parti del motore.



*Figura 1.18: Serbatoio LNG sul mezzo*

Per quanto riguarda la realizzazione di stazioni di stoccaggio e rifornimento, il LNG è facilmente trasportabile mediante autocisterne, e viene stoccato in cisterne dalle quali è possibile effettuare il rifornimento.

Si deve notare che a bordo veicolo (e presso la stazione di rifornimento), non è necessario un sistema frigorifero criogenico. Il metano liquido fornito a  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$  rimane in quello stato e a quella temperatura grazie sia agli accorgimenti isolanti apportati al serbatoio (vuoto spinto e bassa riflettività delle superfici in modo da evitare scambi di calore di ogni tipo), sia al processo di travaso del combustibile dalla stazione al veicolo o dall'estrazione di combustibile liquido dal serbatoio all'alimentazione al motore. Infatti il processo di questi spillamenti, provocando una diminuzione del volume di liquido presente all'interno dei contenitori, porta ad una diminuzione di pressione interna. Per compensare il disequilibrio, una parte di

liquido evapora apportando una diminuzione di temperatura del liquido che quindi viene garantita costante.

Si stima infine che un veicolo rifornito di metano liquido che non venga utilizzato e non consumi il liquido combustibile, può rimanere fermo per circa 7 giorni. Entro tale lasso di tempo deve necessariamente essere usato per diversi chilometri, e, in caso non lo si possa fare, le valvole di sicurezza disperderanno in ambiente il combustibile, con ovvie ricadute dal punto di vista ambientale (il metano è un gas che provoca un effetto serra 25 volte maggiore dell'anidride carbonica) ed economico (perdita di combustibile utile).

## 1.4 Biofuels

Nella spasmodica ricerca di nuovi carburanti più puliti che permettessero una drastica riduzione delle emissioni e nel contempo garantissero una certa diversificazione delle fonti di approvvigionamento, slegandosi dalla schiavitù degli idrocarburi (in particolare prodotti raffinati del petrolio), si sono cercate vie alternative. Questa ricerca è stata sospinta anche dall'aumento del costo al barile del petrolio, che ha reso competitivi altri carburanti rispetto ai tradizionali.

La scelta è caduta sull'utilizzo delle biomasse dalle quali, con diverse tecniche è stato possibile produrre biocombustibili utilizzabili in motori a ciclo otto (bioetanolo) e Ciclo Diesel (biodiesel). In qualsiasi motore diesel può essere utilizzato biodiesel puro (BD100 o B100), anche se più comunemente viene utilizzato gasolio con concentrazioni inferiori di biodiesel. Usato come additivo al gasolio, ne migliora il potere lubrificante. In alcune zone è richiesto l'uso di gasolio a bassissimo contenuto di zolfo, che riduce la naturale viscosità e lubrificazione del combustibile poiché sono stati rimossi lo zolfo e altri additivi. Quindi, per far sì che si assicuri la necessaria lubrificazione nei motori sono richiesti degli additivi, e il biodiesel è una popolare alternativa. Concentrazioni fino al 2% (BD2 o B2) si sono mostrate in grado di restituire la lubrificazione. I maggiori produttori di biodiesel hanno effettuato numerosi test utilizzando varie percentuali di miscelazione con gasolio, a partire dal

5% passando per il 20 ed il 30% fino ad arrivare al biodiesel puro. Le prove effettuate hanno evidenziato che le miscele con gasolio, sino al 30% in volume (B30), possono essere utilizzate senza alcuna modifica al motore, con una performance del motore analoga all'alimentazione a gasolio convenzionale e senza differenze apprezzabili nei consumi. Non si riscontrano variazioni di durata del motore ed usure anomale, così come non sono necessarie variazioni alle normali pratiche manutentive.

Già parecchi paesi ne fanno uso e la direttiva 2003/30/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 8 maggio 2003 si fa carico di promuovere l'uso dei biocarburanti o di altri carburanti rinnovabili nei trasporti, in particolare ha fissato degli obiettivi per il settore dei trasporti che prevedono la miscelazione di biocarburanti a carburanti fossili in percentuale del 5.75% in contenuto energetico già dal 2010.

Il bioetanolo è un etanolo (formula bruta  $C_2H_5OH$ ) prodotto mediante da un processo di fermentazione delle biomasse, di prodotti agricoli ricchi di zucchero (canna da zucchero, barbabietola, sorgo dolce) oppure ricchi di amidi (granoturco, orzo, riso).

Il bioetanolo presenta caratteristiche fisico-chimiche simili alla benzina e questo permette un suo utilizzo nelle miscele in percentuali fino al 20% (senza modificare il motore) o anche un utilizzo puro nel caso di motori Flex (motore in grado di utilizzare indifferentemente benzina, bioetanolo o una miscela dei due).

Per quanto riguarda il discorso emissioni, il bioetanolo si trova in netto vantaggio rispetto alle benzine tradizionali, infatti sebbene le emissioni di carbonio provenienti da un veicolo alimentato a bioetanolo siano equivalenti a quelle causate dalla benzina, nel caso del bioetanolo si tratta di carbonio assorbito durante la crescita di piante, che dunque - a differenza dei carburanti di origine fossile - non va ad aumentare l'effetto serra. Infatti la  $CO_2$  rilasciata durante la combustione è quella sottratta all'atmosfera durante la crescita della materia prima vegetale. In realtà il ciclo non è completamente chiuso perché viene consumata energia, e quindi emessa  $CO_2$ , nel processo di trasformazione e nelle fasi di trasporto, ma il bilancio ambientale risulta nettamente positivo.

Infine, i veicoli alimentati a bioetanolo, emettono meno ossidi di azoto  $SO_x$  (ridotti del

70%), poiché l'alcool brucia a una temperatura inferiore rispetto a quella della benzina, riducono le emissioni di idrocarburi aromatici complessi come il benzene del 50% rispetto alla benzina e anche le emissioni di particolato e di NO<sub>x</sub> risultano inferiori. Per non parlare del fatto che il bassissimo, se non nullo, contenuto di zolfo del bioetanolo azzerava le emissioni di anidride solforosa (SO<sub>2</sub>) e migliora l'efficienza delle marmitte catalitiche. Come si detto si fa ricorso a etanolo da biomassa perché può essere prodotto localmente, riducendo la dipendenza energetica dai paesi in cui sono concentrate le riserve di combustibili fossili, e a partire da diverse materie prime, aumentando la sicurezza dell'approvvigionamento energetico e favorendo l'occupazione agricola. Questo è uno dei motivi della sua diffusione in paesi con grandi estensioni agricole (USA e Brasile) o totalmente privi di riserve di idrocarburi come la Svezia. Il termine generico "biocarburanti" è usato per descrivere i combustibili derivati da materiale organico. Sono disponibili diversi processi per la produzione di biocarburanti che spiega la diversità della loro forma: biodiesel, bioetanolo, biogas. La qualità dei biocarburanti è caratterizzata anche da dai due modi in cui viene generato. La prima generazione è più economica ma offre meno qualità, mentre la 2<sup>a</sup> generazione vanta un più sofisticato processo produttivo ed è più pulito ma più costoso. Il biodiesel di prima generazione (Fatty Acid Methyl Esters, o FAME) è uno dei biocarburanti di prima generazione più utilizzati per alimentare gli autobus. A causa della produzione insostenibile dal punto di vista economico non è raccomandato per l'uso a lungo termine, ma è ancora disponibile in considerazione del fatto che la produzione di biocarburanti di seconda generazione non è ancora diffusa. La ricerca e sviluppo di oggi si concentra sulla 2<sup>o</sup> generazione di biocarburanti e in particolare sul HVO (Hydrogenated Vegetable Oil: biodiesel avanzato fatto trattando verdura, olio o grasso animale con idrogeno). Autobus alimentati con FAME e HVO sono altamente comparabili nelle prestazioni operative, nelle esigenze infrastrutturali e nei costi con gli autobus con alimentazione convenzionale, ma differiscono nelle emissioni di inquinanti.

Il biometano infine può essere usato per alimentare gli autobus CNG, convalidando

la produzione sostenibile di gas e migliorando le prestazioni ambientali complessive. Più in generale i biocarburanti sono quasi sempre miscelati con i carburanti convenzionali. Pertanto quando un operatore di TPL decide di voler utilizzare uno specifico biocarburante dovrà fare attenzione alle specifiche tecniche dello stesso poiché saranno sicuramente necessarie dei settaggi specifici o piccole modifiche ai bus che lo utilizzeranno.

Il duplice obiettivo dell'UE di aumentare per ciò che concerne il trasporto la quota dell'energia derivante da fonti rinnovabili e quello di aumentare l'uso di biocarburanti si realizza attraverso una maggiore diffusione dei biocarburanti nel trasporto pubblico locale. Solo il 7% di FAME in miscela con il diesel è consentito secondo le specifiche tecniche del carburante. Miscele con una percentuale più alta di FAME nel diesel non è supportata dai costruttori che avanzano riserve sulla qualità e stabilità del carburante.

Per quanto riguarda invece l'HVO (Hydrogenated Vegetable Oil) il suo approvvigionamento risulta molto limitato. L'attuale produzione equivale a solo l'1% della domanda diesel europea (prodotto da Nestle Oil in Finlandia, nei Paesi Bassi e Singapore). Si prevede pertanto che questo biocarburante rimanga un combustibile di nicchia fino al 2020 a causa di bassi volumi di approvvigionamento. Per essere sicuri che gli autobus possano funzionare bene senza problemi utilizzando del biocarburante pulito, gli operatori del trasporto pubblico locale devono richiedere la relativa certificazione ai loro fornitori. Tra i principali vantaggi per l'operatore di TPL che utilizza una flotta alimentata con biodiesel/bioetanolo si annovera che sono necessarie solo lievi modifiche al motore del bus diesel per poter utilizzare i biocarburanti e per poter quindi conseguire una significativa riduzione delle emissioni. Allo stesso tempo, le principali barriere sono costituite dalla mancanza di sostegno politico (introduzione di leggi pertinenti sui biocarburanti e miscele di biocarburanti e di installazione di stazioni di rifornimento di biocarburanti), dalla mancanza di esperienza nell'operare con i biocarburanti da parte dei costruttori di autobus, dei gestori dell'infrastrutture e dai dubbi sulla qualità del carburante.

## 1.5 Bus elettrici

Gli autobus elettrici rappresentano attualmente la tecnologia più pulita disponibile sul mercato, producendo zero emissioni locali possono avere il miglior impatto sulla qualità dell'aria locale. Per questo motivo si pensa che il trasporto pubblico nelle aree urbane densamente popolate sarà basato sulla trazione elettrica con orizzonte 2025 e 2030. Essi sono di solito anche caratterizzati da un basso livello di rumore. Per quanto riguarda le emissioni di CO<sub>2</sub> dei veicoli alimentati a energia elettrica è importante considerare la fonte dell'energia elettrica e il suo processo produttivo.

Al fine d'avere un approccio scientifico costruttivo al tema dell'autobus elettrico al momento mancano ancora alcuni elementi fondanti di seguito riportati:

- \*Gli autobus elettrici che saranno presenti nel 2025 saranno disponibili con batterie molto diverse da quelle attuali e layout completamente diversi non derivati dagli autobus diesel come la maggior parte degli autobus elettrici attuali;
- \*Sistemi di ricarica standard: attualmente esistono tanti sistemi di ricerca diversi tra loro che derivano da diverse applicazioni pilota.
- \*Evoluzione dei sistemi digitalizzati per il Tpl: è certo che la digitalizzazione già presente aumenterà ma non sono ancora definiti standard espandibili;
- \*L'elettrificazione unita alla digitalizzazione porterà impatti nelle future gare per il TPL così come sta già accadendo in Olanda, Danimarca, UK e Francia.

Gli operatori del TPL dovranno quindi programmare strategicamente lo sviluppo della conoscenza relativa a questi sistemi assumendo sempre più importanza la scelta strategica tra il make or buy soprattutto attraverso l'uso della metodologia LCC.

Come confermato da tutte le agenzie pubbliche che si occupano di contratti di servizio di TPL con gli operatori TPL (Olanda, UK, Danimarca, Francia, Belgio, ...) gli attuali autobus elettrici, salvo alcune eccezioni, nulla hanno a che fare con quelli che saranno in produzione nel 2025 e principalmente per due motivi:

- \*Le batterie non saranno più quelle attuali poiché costi e potenzialità hanno rispettivamente una riduzione ed uno sviluppo quasi quotidiano;
- \*Il layout degli autobus elettrici non sarà più come oggi (salvo qualche rara

eccezione) derivato dagli autobus alimentati a gasolio, ma saranno realizzati autobus con layout specifici che sfrutteranno le caratteristiche della trazione elettrica con più spazio interno grazie a motori asincroni (minore manutenzione) sulle ruote motrici.

Nel seguito (figura 1.19) si mostra un autobus elettrico che è in fase di sperimentazione, l'Aptis di Alstom prodotto in fase di test in diverse città che è stato progettato specificatamente per la trazione elettrica



*Figura 1.19: L'autobus elettrico 12m Aptis di Alstom*

L'Aptis di Alstom ha un lay-out completamente diverso dagli autobus attuali e una motorizzazione che non prevede più ma catena cinematica tradizionale. L'Aptis è un prodotto in fase di inserimento associato al sistema di ricarica conduttiva in linea sempre di Alstom denominato SRS.



*Figura 1.20: Il sistema TOSA di ABB a Ginevra basato su telaio HESS*

Esistono poi tecnologie già integrate (autobus più linea mostrate in figura 1.20) quale

il sistema TOSA in funzione a Ginevra derivato da filobus HESS (21 autobus) o la linea di bus elettrici di VDL recentemente entrati in funzione ad Amsterdam su telaio Citea con una flotta di 100 autobus.

L'esito di questa evoluzione futura, ma già certa, sarà che tutte le flotte di autobus elettrici attualmente in servizio saranno dei sistemi non più realizzati e probabilmente finì a sé stessi con gravi rischi di obsolescenza tecnologica precoce e di reperibilità dei ricambi e con costi molto importanti nel caso di manutenzioni straordinarie come la sostituzione delle batterie. Se per ridurre i rischi nel corso del progetto pilota è stato acquistato anche il servizio di full service per 14 anni (autobus) e 18 anni (autobus elettrici e filobus) questi costi importanti saranno un onere sistematico, molto alto e per molti anni, per mantenere una tecnologia già obsoleta che permetterà autonomie di servizio non accettabili e con un effetto memoria sulle batterie ridotto ma esistente. Un recente appalto dell'operatore Movia in Danimarca per degli autobus elettrici 12 m da 66 posti con ricarica Over Night ha un costo di 8,175 euro/km per il servizio di full service ed energia elettrica. Nel corso di questi diversi progetti pilota gli operatori TPL possono acquisire competenze nella gestione di flotte di autobus elettrici. Questo sarebbe importante per la gestione delle grandi flotte future di autobus elettrici, che certamente andranno in servizio 2025-2030.

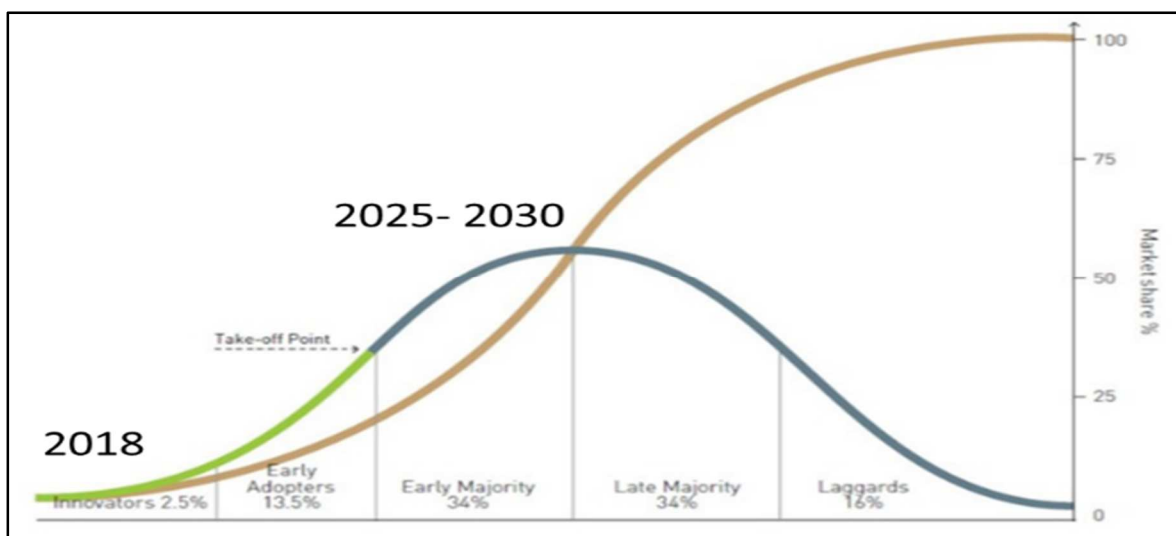


Figura 1.21: Technology adoption Lifecycle of Electric Buses

È evidente che l'autobus elettrico in questo momento si trova nella fase più a sinistra del diagramma di figura 1.21 e quindi ancora lontano dalla diffusione. Questo si



rileva anche dai modelli in circolazione che sono in massima parte derivati da autobus tradizionali.

Si vede inoltre dal grafico riportato in figura 1.21 che il 2,5% che fa passare dalla fase innovators a quella early adopter non è ancora raggiunta perché appunto il tasso di diffusione in Europa è dell'1,7% ( $1,7\% < 2,5\%$ ). Questo è da considerarsi come il mercato di riferimento Europeo poiché autobus cinesi non hanno molto rilievo per lo sviluppo di prodotti in Europa. A titolo conoscitivo riportiamo il trend della distribuzione di autobus elettrici nel mondo secondo una previsione della Bloomberg New Energy Finance (figura 1.22).

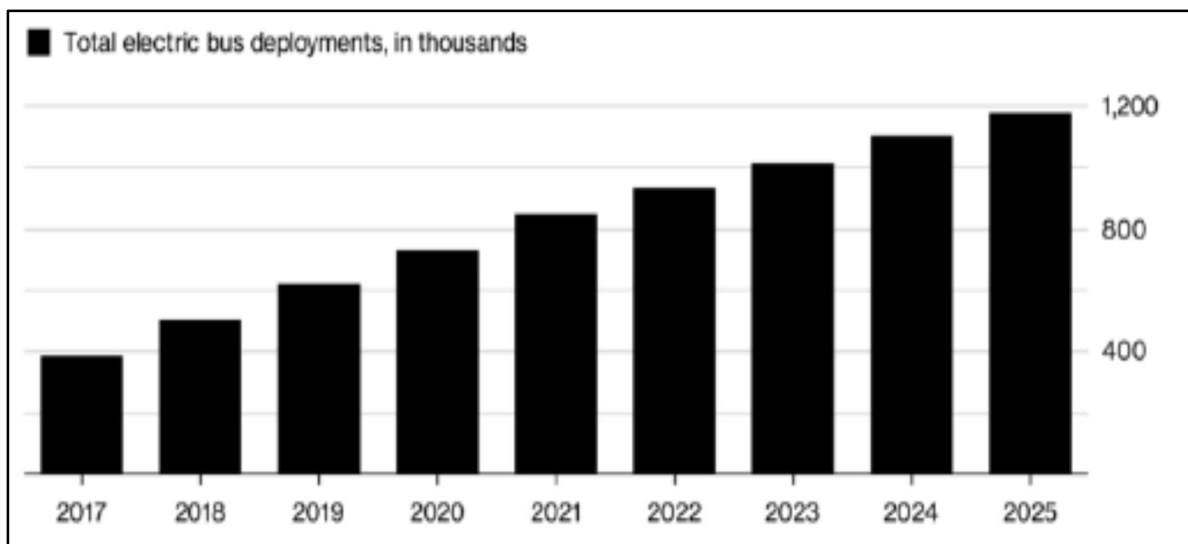


Figura 1.22: Worldwide trend of Electric buses – Source Bloomberg New Energy Finance

Concludiamo il paragrafo riportando i principali parametri necessari al dimensionamento di impianti di ricarica di autobus elettrici:

- \*Numero di autobus da 12m e il profilo di missione km/gg;
- \*La quantità di kwh immagazzinati nelle batterie di trazione;
- \*Il livello di State of Charge minimo (SOC) che non deve essere superato per non danneggiare le batterie (es. 40%);
- \*Potenza di ricarica in deposito in Kw, al capolinea ed alle fermate intermedie;
- \*Tempo di sosta al capolinea non superiore ai 2' per una ricarica, non superiore ai 20' in fermata e tempo di ricarica in h in deposito;
- \*Rendimento teorico di carica  $\eta$  (dipende dalle batterie).

## 1.6 Trolley BUS

Il filobus è un filoveicolo stradale a trazione elettrica atto al trasporto di persone e alimentato tramite una doppia linea aerea chiamata bifilare, sospesa sulla sede stradale, da cui il veicolo capta l'energia elettrica a corrente continua, tramite due aste di captazione.

I sistemi filoviari sono basati sull'impiego di veicoli su gomma a propulsione elettrica alimentati attraverso un'infrastruttura di distribuzione dell'energia elettrica denominata filovia; la captazione della corrente dai conduttori elettrici avviene mediante appositi dispositivi denominati aste filoviarie.

La tensione di alimentazione presente nella linea aerea è tipicamente al valore standard di 750 V in corrente continua. Poiché viaggia su gomma, non essendo quindi disponibile il secondo conduttore costituito dai binari, la linea aerea è necessariamente bifilare.

Alcuni filobus sono equipaggiati per la marcia autonoma, attuabile mediante le seguenti soluzioni:

- \* trazione bimodale grazie a un motogeneratore che fornisce corrente elettrica al motore elettrico di trazione;
- \* trazione Diesel-elettrica mediante un secondo propulsore con interposizione di opportuno cambio (soluzione adatta ai filoarticolati e filosnodati);
- \* marcia a batteria, grazie ad accumulatori elettrici che forniscono l'energia elettrica necessaria ad alimentare i motori assicurando la marcia autonoma, talora integrati da sistemi di accumulo rapido mediante super capacitori.

A seconda delle diverse legislazioni la marcia autonoma può essere attuata in condizioni di eccezionalità o essere prevista nel normale servizio di linea, consentendo di ampliare il servizio svolto rispetto all'effettiva presenza della rete bifilare. In figura 1.23 su riporta un filobus della città di Lione.



*Figura 1.23: Trolley bus in Lyon*

Il filobus elettrico è una forma consolidata di trasporto pubblico urbano che avuto un periodo di massimo splendore tra gli anni 1930 e 1940 in sostituzione dei tram. Le sue fortune iniziarono a declinare negli anni '50 quando i diesel diventarono economicamente convenienti e la "mancanza di flessibilità" di un'infrastruttura fissa venne percepita come uno svantaggio. A quel tempo, la riduzione del numero dei passeggeri nel trasporto pubblico era spesso accettata come inevitabile e le problematiche ambientali erano di scarsa preoccupazione. Con l'esaurimento delle attrezzature, molti. I mercati per i filobus in calo e l'aumento dei costi delle loro attrezzature necessarie alla manutenzione hanno accelerato il declino favorendo la



*Figura 1.24: I motori montati sul mozzo Ciovis sui due assi posteriori*

sostituzione di sistemi di filoviari con autobus diesel.

Il filobus invece, oltre ad essere molto affidabile e con una vita utile mediamente più alta degli altri sistemi di trazione, è quasi esente da manutenzione rispetto ai motori e alle trasmissioni degli autobus diesel. La maggior parte delle frenate di servizio può essere ottenuta elettricamente, il che significa che la manutenzione del freno di servizio è molto inferiore rispetto ai modelli diesel convenzionali. La frenata rigenerativa nei moderni filobus - riportando l'energia che altrimenti verrebbe dissipata come calore nella linea di contatto - può consentire un risparmio energetico dell'ordine del 30%. La migliore disponibilità e affidabilità e i minori requisiti di manutenzione ed energia dei moderni filobus e le prestazioni più elevate, significano flotte operative più piccole rispetto ai progetti di mobilità con autobus diesel e costi di consumo di energia significativamente inferiori. In figura 1.24 è riportata la semplicità costruttiva del mozzo che include i motori elettrici.

A motivo del mercato ristretto, i veicoli filoviari sono generalmente realizzati in piccole serie, rappresentando di fatto prodotti semi artigianali rispetto agli autobus con i quali spesso possiedono particolari costruttivi comuni.

I filobus forniscono emissioni zero reali (ZEV). Ciò è garantito in tutte le circostanze, incluso il funzionamento al minimo, il funzionamento a freddo, in condizioni transitorie, in condizioni di manutenzione subottimale, ecc., per tutta la vita del veicolo. Questo è impossibile con i motori diesel o altri motori a combustione interna. I veicoli elettrici introducono solo indirettamente sostanze inquinanti nell'ambiente nel suo insieme. La natura e il livello di questi inquinanti dipendono dalla fonte dell'energia elettrica. Tuttavia le moderne centrali elettriche producono livelli di inquinanti molto più bassi rispetto ai motori dei veicoli e gli inquinanti delle centrali elettriche non vengono rilasciati direttamente nell'aria per essere respirati per le strade. Oltre all'NO<sub>x</sub> e al particolato, destano serie preoccupazioni i gas a effetto serra (GHG ovvero Greenhouse Gases) Il GHG principale è l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>). La combustione di combustibili fossili nelle moderne centrali elettriche è più efficiente rispetto ai motori dei veicoli e riduce le emissioni di CO<sub>2</sub>.

## 1.7 Bus Diesel Hybrid – Hybrid/Electric

Il veicolo diesel Hybrid, Hybrid/Electric è mosso da un motore elettrico asincrono trifase, collegato alle ruote senza cambio di velocità. Il motore asincrono preleva energia da batterie di accumulatori elettrochimici, con l'interposizione di un inverter che converte la corrente continua in alternata. Le batterie, di capacità limitata rispetto alle esigenze della missione tipica del veicolo, consentono di ridurre la massa del veicolo rispetto al sistema di trazione elettrico a batterie. Comunque il sistema consente, grazie alla reversibilità del motore elettrico ed alla presenza dei dispositivi di accumulo, il recupero di energia in frenata. Gli accumulatori possono essere ricaricati dalla rete elettrica (ricarica da terra) a veicolo fermo in rimessa, o da un gruppo diesel-generatore durante il servizio. Il motore diesel è dimensionato per la potenza media (anziché massima, a differenza dei veicoli convenzionali) richiesta durante il servizio. Sono possibili due modalità di funzionamento:

- \* marcia elettrica, con motore diesel fermo;
- \* marcia ibrida, con motore diesel funzionante a velocità costante e carico quasi costante.

Il veicolo si comporta come uno ZEV (zero emission vehicle) durante la marcia elettrica, da attuarsi preferibilmente nelle aree ad elevato livello di inquinamento. Questo modo operativo è di norma limitato al 30-40% del servizio, e comunque a non oltre 20 km consecutivi. Nella marcia ibrida le emissioni sono enormemente ridotte rispetto ai veicoli convenzionali perché:

- \* le condizioni di funzionamento del diesel in transitorio sono pressoché assenti;
- \* il motore ha dimensioni minori (cilindrata 1/4) del veicolo convenzionale;
- \* la condizione di funzionamento (fissa) è scelta nel campo di minime emissioni specifiche ed è ottimizzata.

Il consumo di combustibile beneficia dei vantaggi derivanti dagli ultimi due punti. Si attua inoltre il recupero di energia in frenatura. Il funzionamento a velocità costante del motore diesel permette un miglior isolamento acustico, e nella marcia elettrica l'autobus trae beneficio dalla silenziosità intrinseca del motore asincrono. I livelli di

emissione acustica sono inferiori a quelli di un veicolo convenzionale di circa 15 dB. Il veicolo presenta autonomia non limitata dalla capacità delle batterie (la cui ricarica in deposito richiede almeno 6 h), ma solo dal volume del serbatoio del combustibile. L'autobus ha quindi operatività illimitata, fintantoché viene impiegato nelle condizioni di traffico (urbano e suburbano) per cui è stato progettato. In particolare è estremamente più flessibile ed economico del filobus, non dovendo sottostare ai vincoli (e costi) della linea aerea. A seconda delle esigenze, anche temporanee, dettate dai livelli di inquinamento e dal traffico, può sostituire gli autobus convenzionali, di volta in volta, su diverse linee, e consentire dirottamenti e deviazioni. Rispetto ai veicoli elettrici a batterie, l'ibrido presenta autonomia indipendente dalle batterie e maggiore capacità di carico. Rispetto a tutti i veicoli elettrici (filobus e batterie), che impiegano energia prelevata dalla rete elettrica, l'inquinamento globale prodotto dal veicolo ibrido risulta inferiore, salvo nei casi (molto rari) di reti alimentate prevalentemente da centrali idrauliche o di origine BIO.

Il principale vantaggio di questo sistema di trazione è rappresentato dal basso valore di TCO e buona riduzione delle emissioni. Di contro è più costoso di un autobus diesel ed essendo più pesante presenta una maggiore usura degli pneumatici e a parità di dimensione un numero ridotto di passeggeri.

Anticipando quanto verrà dettagliatamente riportato nel successivo capitolo 4 all'inizio dell'analisi WTW, si riporta che tutti i tipi di veicoli beneficiano dell'ibridazione. In termini relativi, il risparmio più grande di carburante e anche di efficienza si ottiene per i motori a benzina e motori a gas ad accensione comandata. Nel settore dei veicoli pesanti, i sistemi di propulsione ibrida sono per lo più utilizzati in autobus urbani in aggiunta ai tradizionali motori a gasolio le cui tecnologie di abbattimento di emissioni sono state trattate poche righe sopra.

Si ricorda che il miglioramento dell'efficienza della tecnologia ibrida (HEV) combinata ai motori a combustione interna (MCI o ICE) è dovuta a due importanti vantaggi: innanzitutto, la tecnologia ibrida rende possibile il funzionamento dell'ICE nel suo/suoi punti di massimo rendimento ed in secondo luogo il recupero di energia

durante le fasi di frenata. Energia altrimenti dissipata in attrito e calore che contribuisce invece alla maggiore efficienza globale del sistema di trazione. Il risparmio di carburante per i sistemi ibridi dipende dai cicli di lavoro. I servizi di autobus della città, con stop-and-go regolare, sono ideali per le applicazioni ibride. Può essere raggiunto un risparmio di carburante di oltre il 30% (Chandler e Walkowicz 2006).

Poiché ci sono diversi tipi di veicoli ibridi, la definizione trazione ibrida-elettrica è generica in quanto in realtà le modalità di trazione con sistemi ibridi sono diverse. La distinzione a livello macroscopico può essere fatta sulla base del flusso di potenza nella catena cinematica. Questo divide i veicoli in due categorie –ibridi seriali e ibridi paralleli. Entrambi sono attualmente commercializzati, e ognuno ha i suoi vantaggi e svantaggi. Nel sistema ibrido in serie il motore termico ed il motore elettrico forniscono quantità equivalenti di lavoro. Nel sistema ibrido parallelo il motore a combustione interna domina mentre il motore elettrico fornisce assistenza. Nei sistemi misti il rapporto è variabile. I sistemi utilizzati per gli autobus possono essere sia in serie sia in parallelo, ma generalmente non misti.

Un veicolo ibrido è più complicato e più difficile da fabbricare rispetto ai veicoli convenzionali. La batteria e il riciclo delle stesse sono di importanza cruciale in tutto il processo. Ad esempio le batterie a piombo-acido sono state sostituite da altri tipi di batterie migliori, come le batterie agli ioni di litio o al Ni-MH (Nichel Metal idruri). Nelle applicazioni ibride, l'enfasi è posta sulla elevata densità di potenza (rapporto tra potenza erogabile dalla/e batteria/e il proprio peso [KW/kg]); allo stesso modo i veicoli puramente elettrici a batteria danno importanza alla densità di energia (come rapporto tra l'energia erogabile dalla/e batteria/e il proprio peso [KWh/kg]). Le batterie al litio possono essere tarate in diversi tipi di applicazioni. Le due definizioni di densità di energia e di potenza appena utilizzate, sono utili al fine di confrontare i diversi sistemi di accumulo o di generazione (vedi caratteristiche in figura 1.25). Entrambi possono essere espressi sia in termini volumetrici (utile se si vuole avere

un'idea dello spazio occupato) sia in termini di massa (utile per avere un'idea del peso del sistema).

$$\text{Densità di energia: } \rho_e = \frac{\text{Energia}}{\text{Volume (massa)}} = \frac{\text{KWh}}{\text{m}^3(\text{kg})}$$

$$\text{Densità di potenza: } \rho_p = \frac{\text{Potenza}}{\text{Volume (massa)}} = \frac{\text{KW}}{\text{m}^3(\text{kg})}$$

Il concetto di densità di potenza si usa soprattutto per confrontare diversi generatori di potenza, ad esempio un motore endotermico con uno elettrico.

Quando si vogliono confrontare due sistemi di accumulo di energia, per esempio una batteria al piombo e una batteria agli ioni di litio, torna utile il concetto di densità di energia: per esempio, una batteria agli ioni di litio possiede una  $\rho_{p\_ioni\_litio} = 0.12 \frac{\text{KWh}}{\text{kg}}$  mentre quella di una batteria al piombo è circa  $\rho_{p\_piombo} = 0.03 \frac{\text{KWh}}{\text{kg}}$ , circa un quarto. Ciò significa che a parità di peso, le batterie agli ioni di litio immagazzinano quattro volte l'energia accumulata da una batteria al piombo.

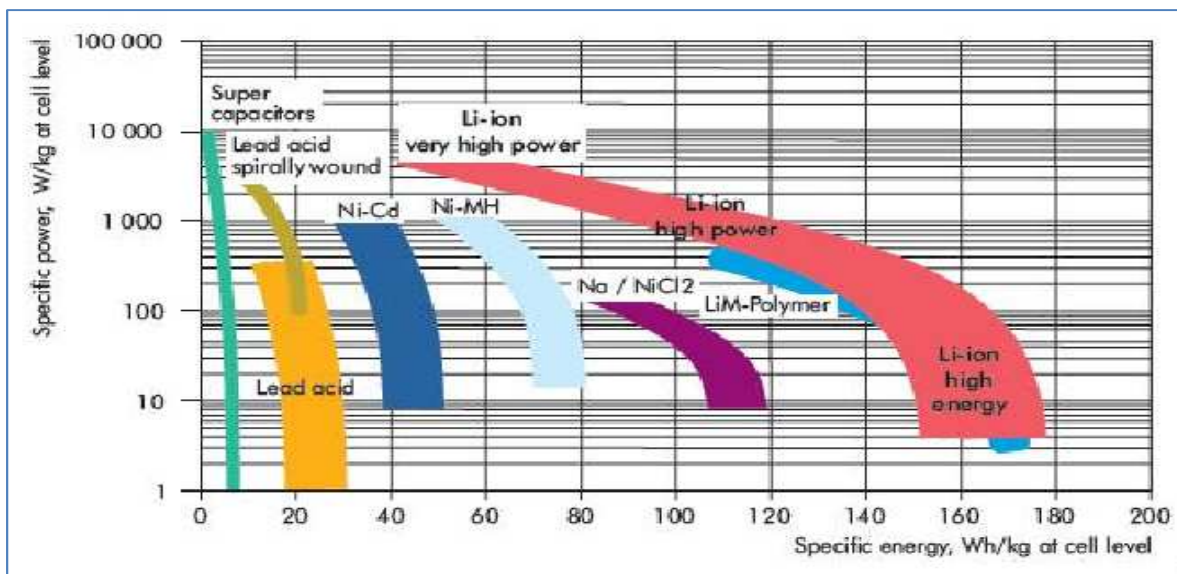


Figura 1.25: Confronto dei diversi sistemi di accumulo

I super-capacitori possono essere una soluzione per lo stoccaggio di energia quando la densità di potenza e il numero di cicli elevati necessari sono più rilevanti rispetto all'alta densità di energia. Questi speciali condensatori immagazzinano l'energia in un campo elettrostatico piuttosto che chimicamente all'interno di batterie. Essi assomigliano molto alle batterie come principio, ma hanno una bassa densità energetica inferiore a 15 Wh/kg e una densità di potenza molto elevata di 4000 W/kg.



Essi sono molto veloci nei processi di carica e scarica ed hanno una durata prevista di più di 500.000 cicli.

### 1.7.1 Proiezioni tecnologiche per autobus ibridi e autobus elettrici

Le categorie attualmente presenti sul mercato degli autobus ecosostenibili sono di tipo filobus; ibridi diesel-elettrici, ibridi in parallelo, ibridi in serie, fuel-cells.

L'ibridazione e l'elettrificazione in generale sono mezzi che consentono di migliorare l'efficienza dei veicoli. L'ibridazione può essere vista come uno sviluppo naturale nella tecnologia dei veicoli: rende possibile recuperare l'energia cinetica altrimenti persa come calore nei freni delle ruote, consente il ridimensionamento e il funzionamento del motore a combustione interna costantemente nei punti di maggior efficienza, ed infine come risultato, contribuisce alla riduzione dei consumi. Un ibrido autonomo (non rifornito di energia elettrica dalla rete) non permette notevoli spostamenti in puro elettrico, ma riduce il consumo energetico complessivo.

I veicoli che utilizzano l'energia elettrica dalla rete, sia direttamente (filobus) o tramite accumulo di energia a bordo, permettono il passaggio da combustibili fossili a fonti energetiche alternative: infatti l'elettricità può essere generata da una moltitudine di fonti di energia primaria, tra cui idroelettrico, solare ed eolico, offrendo l'opportunità di considerare la mobilità ad emissioni zero.

I veicoli a celle a combustibile (Fuel-Cells) possono essere considerati una sottocategoria di veicoli ibridi o elettrici: la configurazione di trasmissione è equivalente a quella di un ibrido in serie o di un veicolo elettrico a batteria, ma l'energia elettrica proviene da una cella a combustibile, non da un generatore azionato da un motore a combustione interna, o una batteria d'accumulo (ricaricata tramite la cella a combustibile stessa). I propulsori elettrici sono caratterizzati da alte efficienze e caratteristiche di coppia favorevoli e come nel caso degli ibridi, il propulsore elettrico rende possibile il recupero di energia cinetica.

Secondo l'UITP (Union International des Transports Public) nel ciclo SORT ("Standardized On-Road Test cycle" che sarà trattato nel paragrafo 5.9) il consumo

medio di carburante di un autobus diesel 12 metri è circa il 42 l/100 km (ovvero 2,4 km/l, circa 15 MJ/km o 4,2 kWh di energia termica/km). Il dato è stato confermato anche dalle analisi svolte sul parco mezzi di TPER: il consumo medio di questa tipologia di autobus è di 2,3 km/l, (1,95 km/l – 52 l/100 km su percorsi urbani e 2,53 km/l – 39 l/100 km su percorsi extra urbani).

Le ricerche hanno portato a considerare il consumo energetico di un autobus elettrico a batteria di 12 metri pari a 1,2 kWh/km (senza aria condizionata). Il consumo di energia di un bus elettrico batteria è solo circa il 30% di quello di un autobus diesel convenzionale (1,2 kWh/km di un autobus elettrico a batteria contro 4,2 kWh/km dell'autobus a gasolio con motore convenzionale). Tuttavia, l'alta efficienza da sola non garantisce basse emissioni di carbonio, dato che le emissioni di anidride carbonica sono un prodotto della normale generazione di energia elettrica.

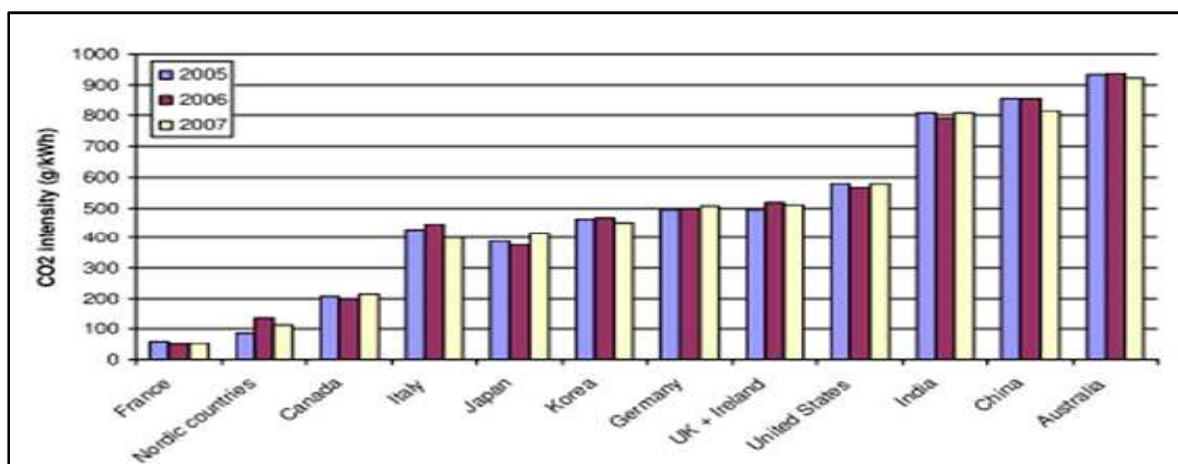


Figura 1.26: Intensità media CO<sub>2</sub> per la produzione di energia in vari paesi, fonte Ecofys

La figura 1.26 mostra l'intensità media di biossido di carbonio per la produzione di energia in vari paesi. I valori vanno da circa 50 g CO<sub>2</sub>/kWh (Francia) a 900 g CO<sub>2</sub>/kWh (Australia). Le perdite nella rete di trasmissione sono stimati a circa il 5%. Così, se il consumo di energia di un bus elettrico batteria è di 1,25 kWh/km, per calcolare le emissioni di CO<sub>2</sub> nel WTW, saranno utilizzati i valori di figura 4.97 d'intensità media di produzione di CO<sub>2</sub>. Si trovano risultati che vanno da circa 65 a 1150 g CO<sub>2</sub>/km. Questi valori dovrebbero essere confrontati con i valori WTW per un autobus diesel

normale, che vanno da circa 30 g CO<sub>2</sub>/km con un biocarburante) a circa 1400 g CO<sub>2</sub>/km (gasolio normale).

## 1.8 Tecnologie ibride per gli autobus

I sistemi ibridi utilizzano due sorgenti di alimentazione per la trazione del veicolo unendo i vantaggi dell'una e dell'altra alimentazione per raggiungere il minor consumo di carburante. Tipicamente, le due sorgenti di alimentazione sono costituite dal motore a combustione interna a gasolio, ed un sistema di motore/generatore elettrico e accumulatori (batterie) o altri dispositivi elettrici particolari. Ci sono anche alcuni veicoli sul mercato che utilizzano sistemi ibridi Plug-In con motori a CNG con possibilità di autonomia di 30-40km in puro elettrico. Per ottenere una maggiore efficienza si possono seguire diverse strade:

1. Prelevare una porzione dell'energia cinetica del veicolo in fase di decelerazione, nota come "frenata rigenerativa";
2. Agevolare il MCI nei transitori di accelerazione elevata (per esempio, ripartenze da fermo e sorpassi);
3. Aumentare la coppia del motore per manovre transitorie (ad esempio, brevi accelerazioni) con il sistema di alimentazione secondaria, che permette ai progettisti di ridimensionare il motore a combustione interna in modo che possa funzionare ad un carico corrispondente ad una maggiore efficienza;
4. Soddisfare la domanda di alimentazione degli accessori o ausiliari, che all'arresto utilizzando il sistema di alimentazione secondario, consentendo di spegnere il motore termico;
5. Operare in zone a emissioni zero (ad esempio centri urbani).

L'alimentazione principale in un sistema elettrico ibrido è quasi sempre un motore a combustione interna, anche se sono state sperimentate altre opzioni, come celle a combustibile o microturbine a gas (figura 1.27).

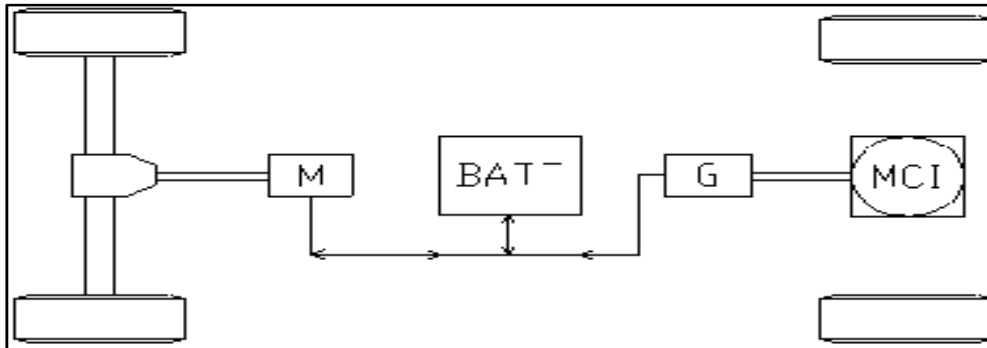


Figura 1.27: Schema funzionale sistema di trazione elettrico ibrido

L'alimentazione secondaria è tipicamente un motore elettrico collegato ad un sistema di batterie. Le batterie al piombo-acido sono state utilizzate in passato, ma sono ormai state soppiantate per tali applicazioni dai più efficienti accumulatori al nichel-metallo idruro o agli ioni di litio.

Anche i super capacitori sono stati utilizzati con successo in alcune applicazioni ibride, sebbene questi sistemi non abbiano una notevole densità di energia, che è l'ideale per alcune applicazioni ibride. È stato dimostrato che ciò che fa del super capacitori una scelta vincente sono i cicli di Stop-&-Go giornalieri: infatti ad esempio, un autotrasportatore di rifiuti che fa circa un migliaio di arresti al giorno, trae un vantaggio maggiore da questo sistema anziché dalle batterie, e perciò ne rende preferibile l'impiego (Business Wire 2006). Una domanda simile per i super capacitori la si può vedere sugli autobus ibridi in città, avendo anch'essi Stop-&-Go piuttosto frequenti. Kabus & VTT & Aalto, hanno mostrato che il consumo di carburante è stato abbattuto di circa il 25% grazie all'ibridizzazione e circa il 20 % grazie all'impiego di materiali ultra leggeri. Molto spesso la distanza fra le fermate in un'applicazione autobus è tra 300 e 500 metri. Lo Stop-&-Go permanente tra le fermate dei bus, produce una quantità di energia che deve essere immagazzinata in pochissimo tempo, cosa che una batteria non può fare. Altrettanto in poco tempo l'energia stoccata verrà rilasciata (durante le partenze o in supporto al motore termico durante le accelerazioni); questo tipo di modalità non permette quindi di percorrere distanze

in puro elettrico come avverrebbe nel caso venissero usate le batterie, ma il motore termico viene sempre utilizzato per la trazione.

Ci possono essere combinazioni di sistemi di stoccaggio dell'energia ibridi che combinano le batterie ai super capacitori, facendo ottenere i vantaggi di entrambi: il ciclo di vita e l'elevata densità di potenza del super capacitore e l'alta densità di energia della batteria. Tuttavia le implementazioni commerciali di successo di tale tecnologia non sono stati ancora applicate e dimostrate.

Fatta questa premessa, è necessario considerare i tre principali sottotipi di configurazione di un veicolo ibrido, ovvero:

- \*Ibrido seriale;

- \*Ibrido parallelo;

- \*Ibrido misto serie/parallelo (power-split).

Le principali differenze tra questi sottotipi si riferisce a come arrivano i flussi d'energia dal serbatoio alle ruote. Per gli autobus sono stati utilizzati tipicamente tipologie sia in parallelo sia in serie. Il sistema power-split è considerato una soluzione a costo troppo elevato, considerato anche che i veicoli pesanti hanno numeri di produzione notevolmente più piccoli se confrontati a quelle delle automobili.

### 1.8.1 Ibrido seriale

In un ibrido seriale (schematizzato in figura 1.28), l'energia fluisce da una sorgente di alimentazione attraverso tutti i componenti posti in serie (cioè, uno dopo l'altro). In questa configurazione, il motore termico primario a combustione interna (o di altro tipo) è disaccoppiato meccanicamente dalla strada e genera tutta la potenza che viene trasmessa ad un motore elettrico per alimentare le ruote, od inviata alle batterie. L'energia chimica contenuta nel carburante (ad esempio, diesel, idrogeno, etanolo, benzina, etc.) è rilasciata come risultato di una reazione chimica in una camera di combustione o in quella di una cella a combustibile. Questa reazione produrrà elettricità grazie ad un motogeneratore (nel caso il combustibile sia fossile) che

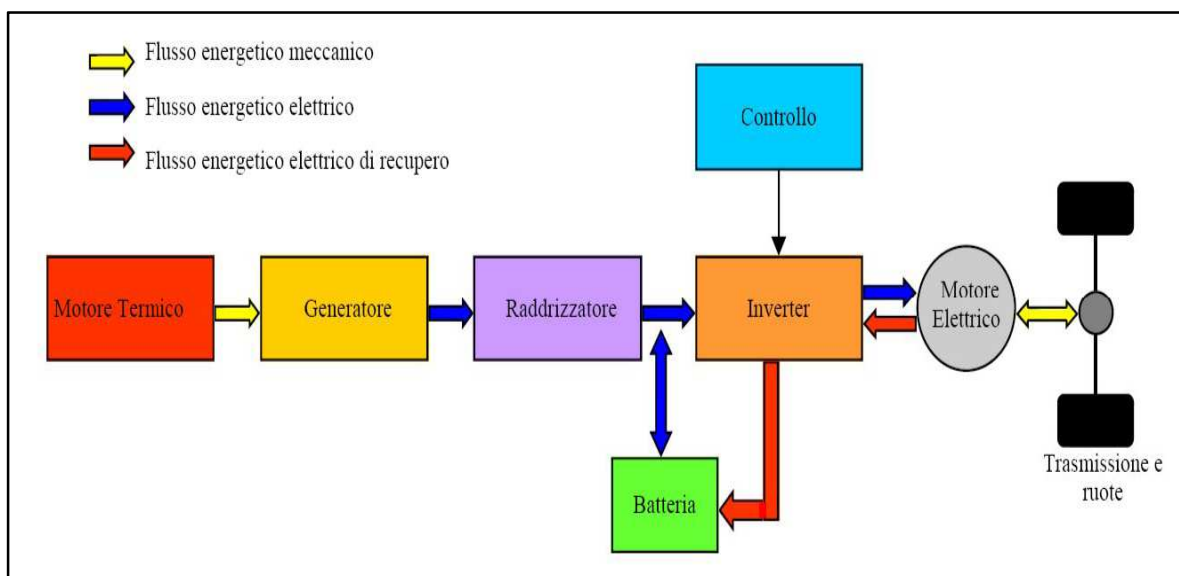


Figura 1.28: Schema funzionale sistema di trazione Ibrido seriale

presenta rendimenti elevati, anche del 35 %, o grazie a reazioni chimiche nelle fuel-cells. Vista la presenza di accumulatori, questo tipo di configurazione può garantire percorrenze in solo elettrico, comportandosi da ZEV (Zero Emission Vehicle).

Un'applicazione commerciale di tale principio si vede da molti anni sul filobus bimodali. Questi sono i filobus che hanno un motogeneratore diesel a bordo per produrre l'energia elettrica, che permette di guidare i filobus anche dove non ci sono linee elettriche filoviarie (ad esempio nei tratti capolinea-deposito).

## 1.8.2 Ibrido parallelo

In un ibrido parallelo, ciascuna delle sorgenti di alimentazione di bordo è in grado di fornire energia direttamente alle ruote, come riportato in figura 1.29.

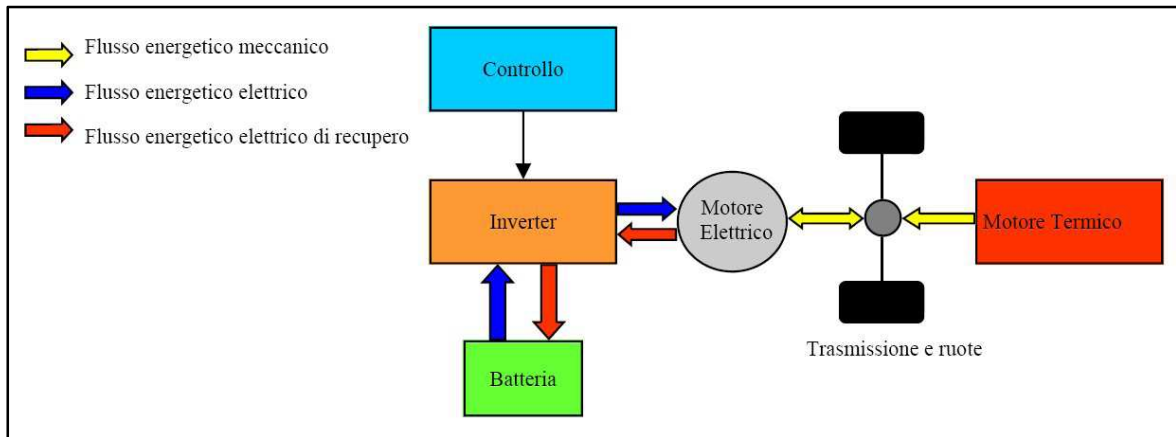


Figura 1.29: Schema funzionale sistema di trazione ibrido parallelo

Ciascuna sorgente di alimentazione segue un percorso indipendente per fornire energia alle ruote. Il motore elettrico non deve necessariamente fornire tutta la potenza alle ruote (a parte quando è necessaria la modalità ZEV, ad esempio nei centri storici), ma può solo supportare il motore termico durante la marcia. Perciò il motore termico non lavora a punto fisso e quindi non raggiunge gli ottimali rendimenti della configurazione seriale; tuttavia, i rendimenti sono comunque elevati grazie all'ausilio del motore elettrico. In questa particolare configurazione, le batterie devono essere ricaricate in rete, oppure ricaricate tramite il recupero dell'energia durante la frenatura.

## 1.8.3 Ibrido misto

Un ibrido misto serie/parallelo o ibrido power-split può assumere entrambe le caratteristiche del seriale e del parallelo. Questo sistema ha i vantaggi sia del parallelo sia della configurazione in serie, ma ha una maggiore complessità. Per esempio, è necessario accoppiare sofisticati sistemi epicicloidali alla macchina elettrica per formare una "trasmissione continuamente variabile elettrica", o "e-CVT". Le macchine elettriche svolgono il ruolo sia di motori sia di generatori, a seconda della necessità di guida del momento (se il mezzo deve accelerare allora si comporteranno da organi motori, mentre se il mezzo è in frenata allora si comporteranno da

generatori elettrici che ricaricano le batterie). Valgono quindi le considerazioni fatte per l'uno e per l'altro sistema, ovvero, che il motore non lavora sempre a punto fisso, ma comunque con rendimenti elevati grazie all'ausilio del motore elettrico, può funzionare come ZEV, le batterie sono ricaricate dal motore termico (a parte il recupero dell'energia in frenata) ed il motore elettrico non deve necessariamente fornire l'intera potenza alle ruote.

La figura 1.30 mostra la configurazione dei componenti dei due comuni sistemi di power-split.

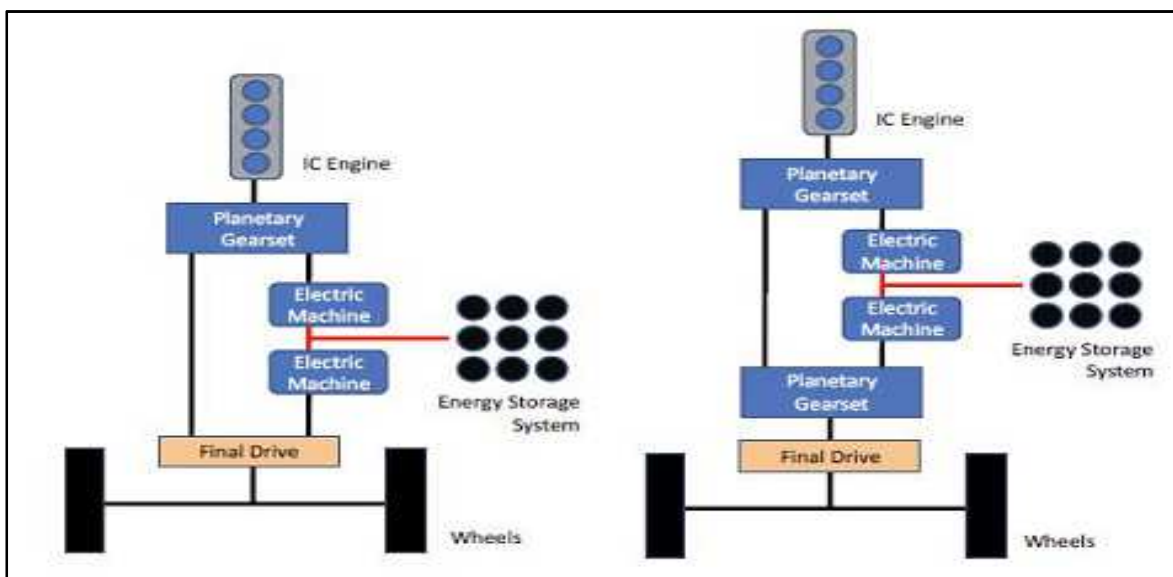


Figura 1.30: Schema funzionale dei sistemi Power-split

Il sistema con un solo gruppo planetario è conosciuto come “input split system” mentre il sistema con due gruppi di ingranaggi planetari è un sistema che viene chiamato anche “bimodale”.

## 1.9 Autobus Fuel Cell

Un veicolo a idrogeno è un veicolo che utilizza l'idrogeno come carburante. Con tale espressione ci si può riferire sia a un'automobile, sia a un qualsiasi altro mezzo di trasporto a idrogeno, come un aeromobile. Questi veicoli convertono l'energia chimica dell'idrogeno in energia meccanica, bruciandolo in un motore a combustione interna o facendolo reagire con l'ossigeno in una pila a combustibile, producendo elettricità. I primi veicoli sono indicati come HICEV (Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicle), mentre i secondi sono conosciuti come FCEV (Fuel Cell Electric



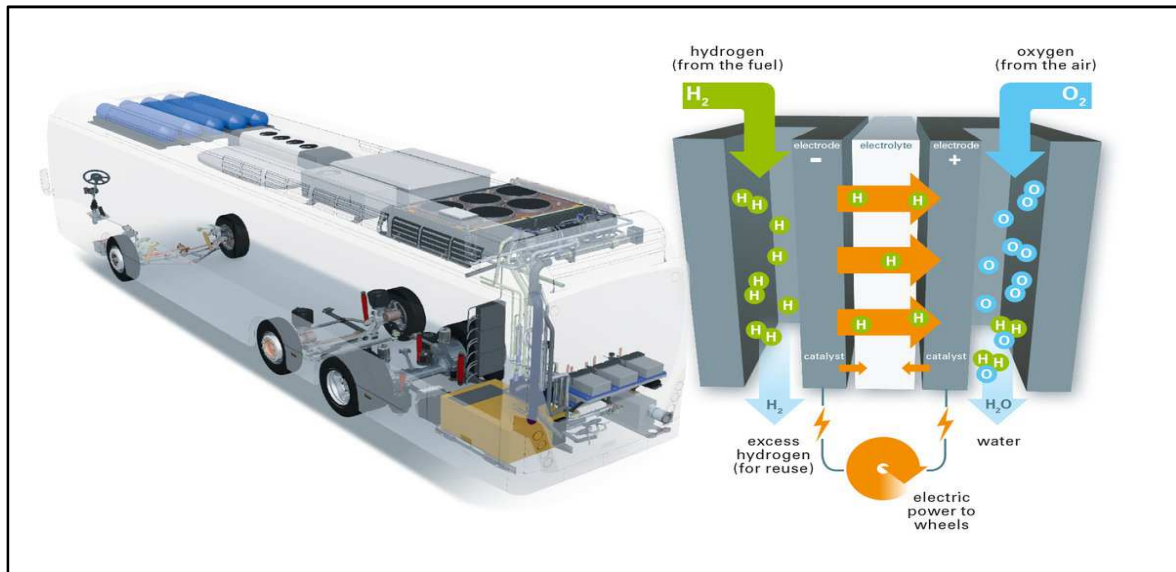


Figura 1.31: Layout tipo di un autobus alimentato ad Idrogeno

Vehicle). In figura 1.31 è riportato un layout di un autobus alimentato ad idrogeno. La pila a combustibile (o *fuel cell FC*) è un dispositivo in grado di utilizzare idrogeno producendo energia elettrica con una buona efficienza, ma con prototipi ancora costosi ed ingombranti. La realizzazione di una fuel cell richiede infatti metalli della serie chimica del platino (estremamente costoso) mentre gli altri materiali provati fino ad ora hanno dimostrato una vita utile troppo breve. Dal momento che la diffusione dell'utilizzo dell'idrogeno come una fonte portatile di energia ha senso soltanto se impiegato in pile a combustibile (la semplice combustione con l'ossigeno atmosferico in motori a combustione interna produce inquinanti come i  $\text{NO}_x$ , rumore, ed ha una minor resa energetica in termini di efficienza), le persone che auspicano una economia all'idrogeno sperano che i progressi nelle nanotecnologie e nella produzione in serie ridurrà questi problemi in modo da rendere queste pile efficaci in rapporto al loro costo. Infatti fino ad adesso le difficoltà tecnologiche sono enormi. In considerazione della complessità della tecnologia si riporta a titolo esemplificativo il flusso dell'energia a bordo di un autobus ad idrogeno reso ancora più articolato dai sistemi di recupero dell'energia in frenata (seguinte figura 1.33). Anche per questo gli autobus fuel cell sono stati inseriti in flotta solo attraverso progetti pilota con una diffusione mondiale che illustreremo qui di seguito.

Il progetto CUTE con l'entrata in esercizio di trenta autobus modello Citaro con

trasmissione tradizionale alimentati ad idrogeno per mezzo delle fuel cell ebbe un buon impatto di immagine ed affidabilità tecnica ma per anni non si sono avute evoluzioni specifiche. Negli ultimi anni al contrario si è avuto un nuovo interesse per gli autobus alimentati ad idrogeno FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) pur con numeri ancora limitati specie sul mercato europeo.

In figura 1.32 si riporta la diffusione dei progetti pilota in Europa (< 200 autobus).

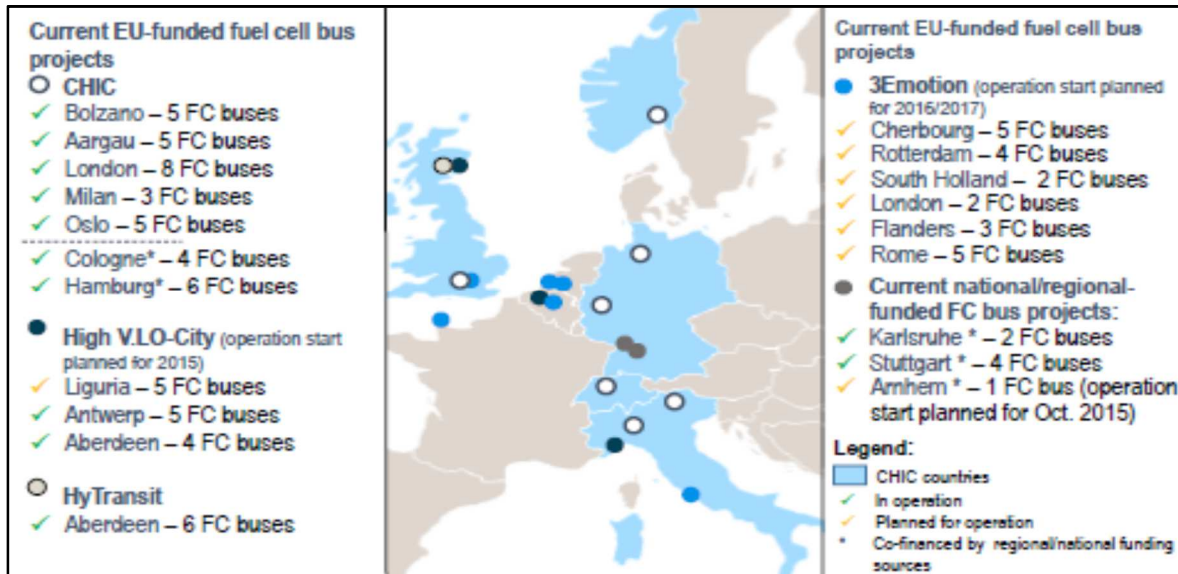


Figura 1.32: Current FC buses in Europe and numbers of buses deployed, source CHIC project – Elementy Energy

Un altro importante ostacolo alla diffusione di questa tecnologia consta nella complessità tecnico/economica della realizzazione e manutenzione degli impianti di rifornimento per l'idrogeno di dimensioni ancora maggiori a quella per gli autobus a metano a parità di flotta gestita.

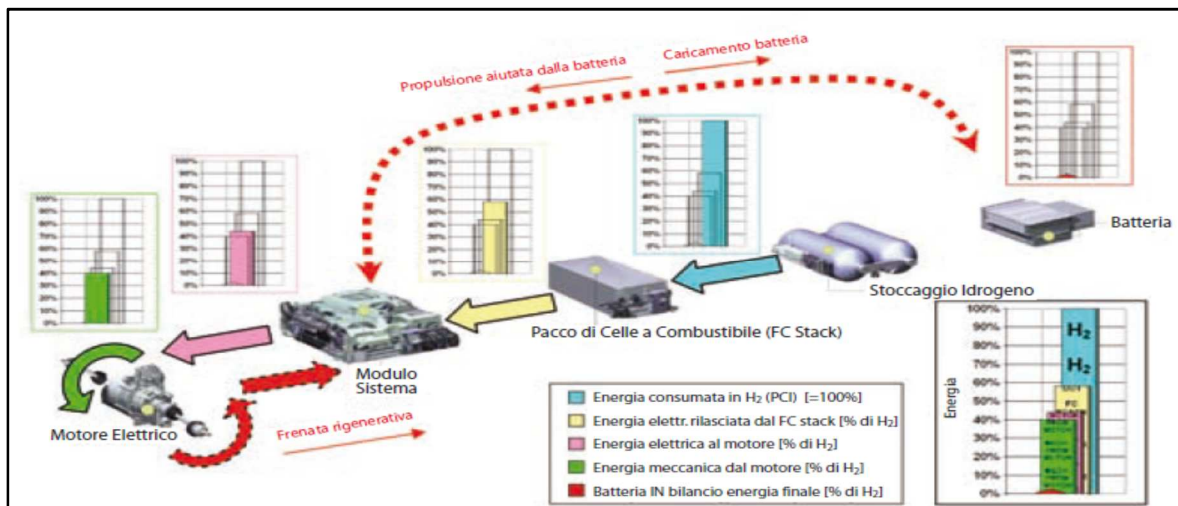


Figura 1.33: Il flusso dell'energia negli autobus ad idrogeno

L'idrogeno rappresenta una fonte di energia sicura, priva di anidride carbonica (molecola H<sub>2</sub>), che può essere ottenuta da molteplici risorse, anche rinnovabili. I veicoli ad idrogeno possono quindi essere considerati "veicoli ad emissioni zero".

L'idrogeno viene utilizzato nell'industria nazionale chimica e della raffinazione dall'inizio del secolo scorso: è l'elemento più leggero conosciuto dall'uomo, più leggero dell'aria di 14 volte. Di conseguenza, in caso di perdita, il gas si disperderà naturalmente e rapidamente nell'atmosfera.

Quando l'idrogeno si incendia, si manifesta con una fiamma localizzata anziché provocare esplosioni improvvise. L'idrogeno dunque è sicuro come qualsiasi altro carburante che alimenta i veicoli. Oggi inoltre esiste un elevato potenziale di produzione di idrogeno "green", ossia da fonti rinnovabili, eolico e fotovoltaico in primis ma anche da biomasse residuali (rifiuti e scarti di lavorazione, potature, ecc.), con il doppio vantaggio di usare l'idrogeno stesso anche come stoccaggio dell'energia elettrica prodotta in eccesso. In figura 1.34 si riporta la rappresentazione semplificata della catena di produzione/distribuzione dell'idrogeno.

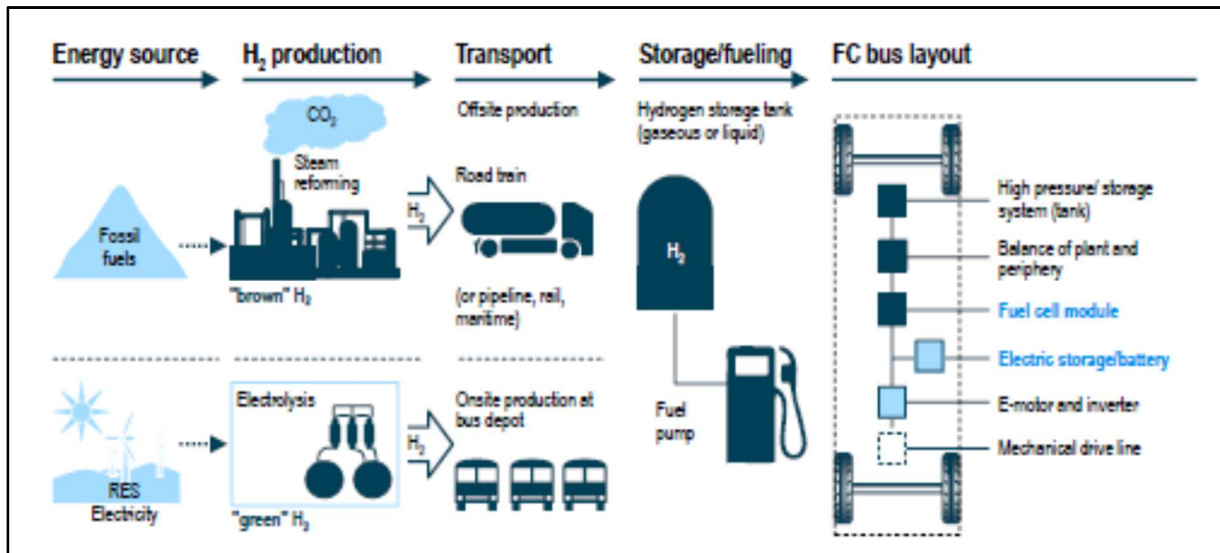


Figura 1.34: Hydrogen value chain and FC bus layout (simplified representation)

I veicoli a celle a combustibile alimentati a idrogeno uniscono ai vantaggi di silenziosità ed assenza di inquinamento tipici dei veicoli elettrici a batteria, caratteristiche d'uso simili a quelle dei veicoli convenzionali, in termini di autonomia e tempi di rifornimento. Possono infatti essere assimilati ai veicoli a batteria tanto che

si parla già di una seconda generazione di veicoli a celle a combustibile che potrebbe abbinare l'alimentazione a idrogeno con quella plug-in da rete elettrica per massimizzare le opportunità di rifornimento da parte dell'utente (auto della Daimler sul mercato nel 2017).

Ma naturalmente non si vuole e non si deve limitare la mobilità ad idrogeno solo alle autovetture ed ai veicoli privati. Può essere estesa ai servizi di trasporto pubblico, veicoli industriali (muletti, spazzatrici, veicoli aeroportuali bagagli), trasporto ferroviario (tram, treni), trasporto navale (fiumi, laghi, lagune). Si riportano di seguito alcuni esempi:

\* Realtà idrogeno a Bolzano: 5 autobus H<sub>2</sub> nel servizio pubblico a Bolzano da 4 anni, 12 nuovi bus in fase di acquisto, servizio anche in periferia. Dieci autovetture H<sub>2</sub> a noleggio. Stazioni di rifornimento H<sub>2</sub> già esistenti, ulteriore capillarizzazione prevista entro 2020, con stazioni ogni 100 km sull'autostrada e ogni 40 km in percorso urbano.

\* Milano, 3 bus ad idrogeno da tempo in servizio attivo (linea 84) ed una stazione di rifornimento.

Altri progetti sono in fase di definizione:

\* Rovereto: una decina di bus ad idrogeno e relativo distributore idrogeno.

\* Firenze: Dieci minibus per servizio scolastico e relativo distributore;

\* Azienda Trasporto Napoli e regione Campania da 5 a 20 bus idrogeno (dipende dai finanziamenti EU) e relativo distributore;

\* ATAC Roma: repowering minibus a batteria con idrogeno e celle in regime di range extender e possibilità di repowering di filobus.

Inoltre molti Stati Membri hanno già avviato da tempo importanti iniziative atte a sostenere l'introduzione dell'idrogeno come combustibile per il trasporto, attraverso lo sviluppo e l'attuazione di una strategia nazionale. Questi sono:

\* Regno Unito: "UK H<sub>2</sub> Mobility" ([www.ukh2mobility.co.uk](http://www.ukh2mobility.co.uk));

\* Francia: "Mobilite hydrogene France" ([www.afhypac.org](http://www.afhypac.org));

\* Scandinavia: "Scandinavian Hydrogen Highway Partnership"

([www.scandinavianhydrogen.org](http://www.scandinavianhydrogen.org));

\* Germania: "H2 Mobility" ([h2-mobility.de](http://h2-mobility.de)).

Iniziative simili sono in fase di lancio anche in altri paesi europei come Austria, Belgio, Finlandia, Paesi Bassi, Svizzera.

I progetti di cui sopra dimostrano che lo sviluppo dell'idrogeno come combustibile alternativo è possibile quando si stabilisce una strategia per diffondere le stazioni di rifornimento di H<sub>2</sub> e si favorisce lo sviluppo della tecnologia, supportando la presenza importante della ricerca e di attori industriali nel campo dell'idrogeno e con la garanzia di un forte sostegno legislativo e finanziario del governo nazionale. Quindi si ritiene che la politica di promozione debba essere indirizzata a tutti i combustibili alternativi elencati nella direttiva UE, includendo a pieno titolo anche l'idrogeno nel novero delle misure atte a promuoverlo quale combustibile alternativo. L'idrogeno è un combustibile che utilizza le celle a combustibile per convertire l'energia chimica dell'idrogeno in energia elettrica per alimentare il veicolo. Le emissioni complessive del combustibile idrogeno dipendono come per l'elettricità dal relativo processo di produzione. Oggi il combustibile idrogeno non è ancora diffuso, ma è considerato come uno dei più promettenti per il futuro.

Attualmente sul mercato sono tre le tecnologie disponibili sui bus che utilizzano idrogeno: motore alimentato da celle a combustibile senza batteria, motore ad idrogeno a combustione interna e combinazione di fuel cell con batteria elettrica. La prima opzione per gli autobus si è già utilizzata, ma non si è rivelata efficiente poiché richiede grandi celle a combustibile, che portano a consumi significativi di energia.

La tecnologia che si sta utilizzando sui bus è quella con la configurazione ibrida seriale del sistema a celle a combustibile e batterie. La batteria è ricaricata durante la guida sfruttando il recupero dell'energia in frenata come mostrato nello schema di figura 1.33 (capacità tipicamente ~ 20kWh). La pressione del serbatoio dell'idrogeno varia tipicamente da 350 o 700 bar. Gli autobus ad idrogeno presentano un'elevata flessibilità d'impiego sulle linee poiché non sono vincolati ad infrastrutture di ricarica lungo la linea ed hanno un'autonomia e tempi di rifornimento simili a quelli degli

autobus diesel. In figura 1.35, si riporta uno studio nel quale viene mostrato l'andamento del prezzo d'acquisto (CAPEX) degli autobus diesel, Hybrid, ad idrogeno negli scenari di sviluppo di nicchia o di produzione su larga scala.

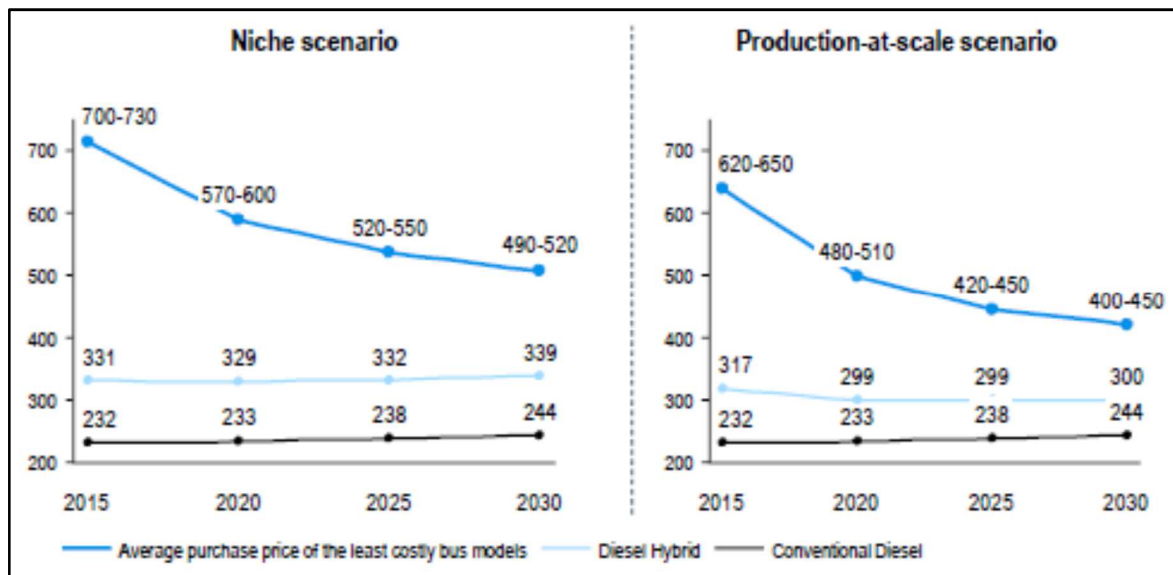


Figura 1.35: Purchase price development of standard FC buses-source Roland Berger

Questa fonte energetica richiede forti e specifici investimenti sull'infrastruttura di rifornimento ed infrastrutture di approvvigionamento. Le stazioni di rifornimento di idrogeno sono relativamente scarse in Europa e per questo si stanno costruendo nuove stazioni, soprattutto in Germania, Italia e Paesi scandinavi. Il grande potenziale di questa tecnologia è rappresentato dalla disponibilità delle risorse.

Come per i bus elettrici globalmente le emissioni di CO<sub>2</sub> degli autobus a idrogeno dipendono dal metodo di produzione dell'idrogeno che può essere ricavato da fonte di energia rinnovabile con buon potenziale di produzione. Lo svantaggio principale è rappresentato dai problemi di sicurezza in quanto l'idrogeno è altamente infiammabile. Appare difficile quindi classificare la scelta rappresentata dall'adozione di sistemi di trazione a idrogeno basati sulle fuel cell. Tale difficoltà si lega ai costi che oggi accompagnano questi veicoli il cui utilizzo, ancora legato a realtà molto particolari (aeroporto di Monaco) è ben lontano da figurare in maniera significativa (sono esclusi quindi i pochi esemplari prototipo) in una flotta per i servizi di TPL. Al momento (ma stando alle stesse previsioni della UE questa affermazione va estesa a comprendere anche i prossimi 10 anni), dunque, altrettanto



poco significativa dovrà ritenersi il contributo in termini di km vettura che potrà essere chiesto ai veicoli ad idrogeno. D'altro canto gli autobus fuel cell possono essere impiegati come gli autobus diesel convenzionali. Gli autobus fuel cell offrono le migliori prestazioni operative rispetto ad altre opzioni a emissioni zero. In termini di accelerazione, velocità e graduabilità, gli autobus fuel cell funzionano come gli autobus convenzionali. Grazie a livelli di rumorosità e vibrazioni molto bassi, offrono un'esperienza di guida fluida e un elevato livello di comfort per i passeggeri. Pertanto, gli autobus fuel cell hanno tutti i vantaggi di un veicolo elettrico, ma li combinano con la flessibilità operativa dei bus diesel convenzionali (in figura 1.36 si riporta il confronto delle caratteristiche operative dei diversi veicoli ZEV).

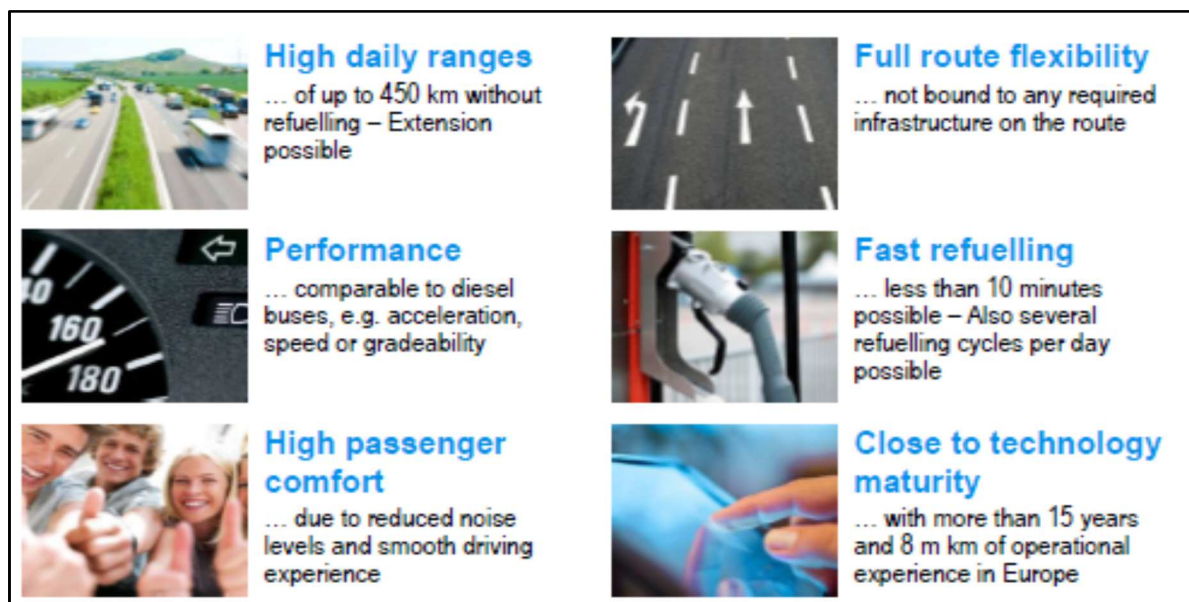


Figura 1.36: High-level comparison of operational performance of different zero emission bus concepts

Nella figura 1.37 sono schematizzati i principali vantaggi degli autobus fuel cell.

Zero emission option	Daily range	Route flexibility	Refuelling/ recharging time	Productivity
Opportunity E-Bus	+	-	-	-
Overnight E-Bus	-	+	-	-
Trolley	+	-	+	+
Fuel Cell	+	+	+	+

Figura 1.37: Summary of operational advantages of fuel cell buses

Il costo totale di proprietà (TCO) dovrebbe scendere a 3,3 euro per chilometro nel 2030 dai 3,8 euro del 2015 per un autobus standard.

Il calcolo del Total Cost Ownership (fonte Roland Berger) che riportiamo in figura 1.38 include tutti i costi complessivi di acquisto e funzionamento e tiene conto dei costi degli autobus sostitutivi diesel durante i tempi di inattività degli autobus FC nei primi anni di utilizzo. Mentre la maggior parte degli studi tende a ignorare i costi di inattività delle nuove tecnologie di autobus introdotte, questo studio include esplicitamente questo tipo di costi nei suoi calcoli per fornire una valutazione più realistica. Sebbene i costi dovrebbero scendere del 5-7% entro il 2030 dai livelli del 2015, in questo studio si prevede nel 2030 un risparmio del '11-18% sul TCO rispetto agli autobus diesel. Il TCO degli autobus diesel si prevede aumenti anche del 30% nello stesso periodo di tempo a causa del presunto aumento del prezzo del gasolio. La figura 1.38 riporta una possibile evoluzione del TCO di un autobus Fuel cell standard e snodato 18 m. Tale aspetto sarà meglio approfondito nel successivo capitolo 2 di questo lavoro di ricerca.



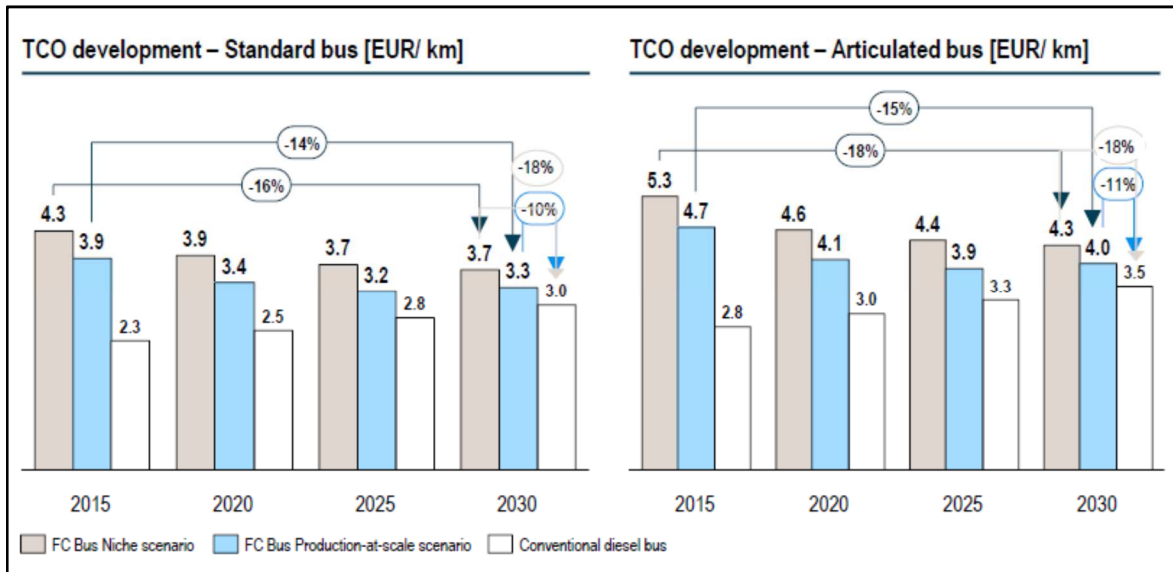


Figura 1.38: TCO development of FC buses compared to conventional diesel buses

## CAPITOLO 2 Analisi del Total Cost Ownership dei BUS per il Trasporto pubblico locale

### 2.1 Costi ambientali per il TPL: inquadramento normativo

L'analisi del Total Cost Ownership si è resa necessaria all'interno di questo lavoro di ricerca al fine di completare l'analisi dei dati manutentivi di LCC dei diversi sistemi di trazione per il TPL, includendo di fatto anche i costi ambientali che rivestono sempre più carattere d'importanza rilevante nella valutazione per l'inserimento in flotta di nuovi sistemi di trazione sostenibili dal punto di vista ambientale.

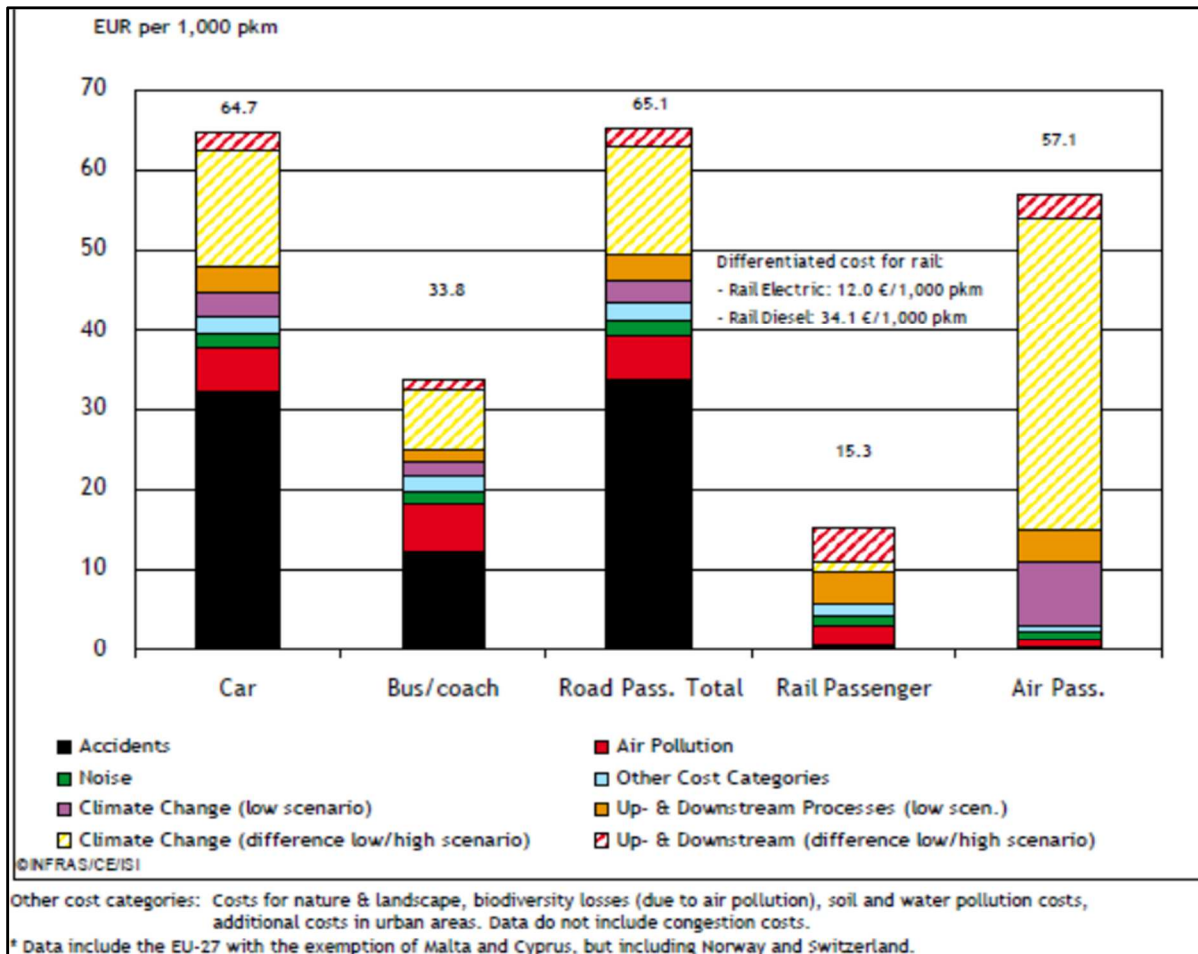


Figura 2.39: Costi esterni dei trasporti in Europa – Source CE Delft

In figura 2.39 sono riportati i costi esterni dei trasporti in Europa. Tenere conto dei costi ambientali delle varie tecnologie in un contratto di fornitura di Tpl modifica in modo sostanziale le premesse dei contratti di affidamento del servizio. Se i valori dei costi includono la sostenibilità all'interno si impongono livelli di sostenibilità predefiniti che per essere raggiunti richiedono investimenti importanti. Nei successivi capitoli si è approfondito l'analisi dei dati manutentivi con il metodo LCC, che ci permetterà di testare la maturità tecnica dei nuovi sistemi di trazione sostenibili. Tuttavia si è voluto integrare il lavoro con il TCO per avere dei costi degli asset e ambientali completi.

Partiamo dalla proposta di direttiva che modifica la direttiva 2009/33/CE relativa alla promozione di veicoli puliti e a basso consumo energetico nel trasporto su strada, stabilendo obiettivi minimi per l'appalto pubblico di veicoli puliti e che mira alla promozione di un trasporto pulito, sostenendo nuove tecnologie pulite e, a lungo

termine, la riduzione delle emissioni di inquinanti atmosferici e CO<sub>2</sub>.

La direttiva associa la definizione di veicolo pulito per i veicoli leggeri e pesanti alla direttiva 2014/94/UE sulla realizzazione di un'infrastruttura per i combustibili alternativi. La direttiva modificata dovrebbe contribuire inoltre allo sviluppo di un'infrastruttura per i combustibili alternativi, nonché alla conformità dei veicoli ai requisiti delle norme più recenti per le emissioni di inquinanti atmosferici e gas a effetto serra.

L'imposizione di obiettivi minimi di appalto per i veicoli leggeri e pesanti da parte della presente direttiva richiederà risorse finanziarie supplementari per le amministrazioni aggiudicatrici e gli enti aggiudicatori. La direttiva proposta utilizza gli appalti pubblici per stimolare la domanda di veicoli adibiti al trasporto su strada puliti.

Al fine di fare più chiarezza sull'argomento ed evitare che i valori di TCO e WTW siano decisamente di puro marketing la direttiva impone che il calcolo delle emissioni di CO<sub>2</sub> dovrebbe essere basato su un approccio "dal pozzo alle ruote" al fine di rendere giustizia all'intera catena di approvvigionamento del combustibile, dalla fase di estrazione allo scarico. Ciò fornirà un calcolo più accurato delle emissioni complessive di un particolare veicolo. Pertanto, la Commissione dovrebbe stabilire la metodologia per la registrazione delle emissioni "dal pozzo alla ruota" al più tardi entro il 31 dicembre 2022.

E' importante a questo punto del lavoro definire il "veicolo pulito": un veicolo, indipendentemente dalla categoria, alimentato da combustibili alternativi quali definiti all'articolo 2, punto 1, della direttiva 2014/94/UE, esclusi i biocarburanti che non sono prodotti a partire da materie prime di cui all'allegato IX, parte A, della direttiva 2018/... (RED II) o che sono ottenuti dall'olio di palma\*; sono compresi i veicoli ibridi in cui l'energia elettrica è usata solo per una parte dell'uso operativo del veicolo, i veicoli a basse emissioni e quelli a zero emissioni. Per i veicoli dotati di motore a combustione interna, le emissioni in condizioni reali di guida (RDE)\*\* in percentuale dei limiti di emissione\*\*\* non possono superare l'80 %.

Ai fini della direttiva(2014/94/UE) si intende per:

«combustibili alternativi»: combustibili o fonti di energia che fungono, almeno in parte, da sostituti delle fonti di petrolio fossile nella fornitura di energia per il trasporto e che possono contribuire alla sua decarbonizzazione e migliorare le prestazioni ambientali del settore dei trasporti. Essi comprendono, tra l'altro:

- elettricità,
- idrogeno,
- biocarburanti, quali definiti all'articolo 2, punto i), della direttiva 2009/28/CE,
- combustibili sintetici e paraffinici,
- gas naturale, compreso il biometano, in forma gassosa (gas naturale compresso — GNC) e liquefatta (gas naturale liquefatto— GNL) e
- gas di petrolio liquefatto (GPL);

\* Ciò è dimostrato tramite un contratto di approvvigionamento di biocarburante o altre forme di accesso al biocarburante

\*\* Emissioni di particolato ultrafine (RDE) in condizioni reali di guida in  $\mu\text{g}/\text{km}$  (PN), ossidi di azoto in  $\text{mg}/\text{km}$  ( $\text{NO}_x$ ) misurati conformemente alla versione applicabile dell'allegato IIIA del regolamento (UE) 2017/1151.

\*\*\* I limiti di emissione applicabili sono reperibili nell'allegato I del regolamento (CE) n. 715/2007.

I veicoli con zero emissioni allo scarico (ZEV) possono lasciare anch'essi un'impronta ambientale significativa, a causa del processo di fabbricazione dei componenti e del livello di riciclabilità o di efficienza della produzione di combustibile. Pertanto, le tecnologie che affrontano tale sfida, come le batterie sostenibili e riciclabili, dovrebbero godere di un livello più elevato di sostegno in termini di conseguimento degli obiettivi minimi di appalto.

I costi del ciclo di vita costituiscono per le amministrazioni aggiudicatrici e gli enti aggiudicatori un importante strumento per tenere conto dei costi energetici e ambientali durante il ciclo di vita di un veicolo, compreso il costo delle emissioni di gas a effetto serra e di altri inquinanti sulla base di un'adeguata metodologia di

determinazione del loro valore monetario. Dato lo scarso utilizzo di questa metodologia per il calcolo dei costi di esercizio nell'intero arco di vita nell'ambito della direttiva 2009/33/CE e date le informazioni pervenute dalle amministrazioni aggiudicatrici e dagli enti aggiudicatori in merito all'uso di metodi propri, adeguate alle rispettive circostanze ed esigenze specifiche, non dovrebbe essere obbligatorio l'utilizzo di una metodologia specifica, ma le amministrazioni aggiudicatrici, gli enti aggiudicatori o gli operatori dovrebbero essere nella posizione di scegliere qualsiasi metodologia di calcolo dei costi di esercizio a sostegno delle loro procedure di appalto. Tuttavia, a causa della mancanza di una chiara comprensione delle emissioni complessive del ciclo di vita dei vari tipi di combustibile, la Commissione dovrebbe fornire un'analisi che sfoci in una metodologia comune dell'Unione rivolta ai fabbricanti per la comunicazione coerente dei dati sulle emissioni di CO<sub>2</sub> di tutti i tipi di combustibile.

La proposta di modifica alla direttiva 33/2009 per l'acquisto di veicoli M3, N2, N3 tra cui quindi, anche gli autobus, contiene le seguenti specifiche da qui al 2030 relative a:

- Energia elettrica comprendendo una serie di veicoli di varia natura purché (vedi nota tabella n°1) l'energia elettrica sia usata per una parte sostanziale dell'uso operativo del veicolo (autobus ibridi).

- L'idrogeno;

- Il gas naturale compreso il biometano in forma gassosa CNG e liquefatta LNG.

*Tabella 1: Prescrizioni relative ai combustibili alternativi per i veicoli pesanti – proposta UE N°A8-321/2018*

<b>Categorie di veicoli</b>	<b>Combustibili alternativi</b>
Veicoli delle categorie M3, N2 e N3	Energia elettrica*, idrogeno, gas naturale compreso il biometano, in forma gassosa (gas naturale compresso - GNC) e liquefatta (gas naturale liquefatto - GNL)

*\*Per uso nei veicoli, quali definiti all'articolo 2, punto 2, della direttiva 2014/94/UE, a condizione che l'energia elettrica sia usata per una parte sostanziale dell'uso operativo del veicolo.*

Per l'acquisto di nuovi autobus sostenibili viene di nuovo definito l'obbligo del 25%

già in vigore dal 30.06.2018 e viene elevato nel nostro paese al 50% nel 2025 e al 75% nel 2030 come indicato in tabella 2. In altre parole mentre attualmente e sino al 2025 si possono acquistare nell'ambito del 100% di nuovi bus a gara il 75% di autobus a gasolio, dal 2025 questi diventeranno il 50% fino a ridursi al 25% dal 2030.

*Tabella 2: Obiettivi minimi per la quota di veicoli pesanti di categoria M3, N2, N3 rispetto alle acquisizioni totali di veicoli pesanti tramite appalti pubblici a livello di Stato membro\**

Stato Membro	Autocarri		Autobus	
	2025	2030	2025	2030
.....				
Belgio	10%	15%	50%	75%
Italia	10%	15%	50%	75%
.....				

*\*I veicoli con zero emissioni allo scarico o i veicoli a gas naturale, a condizione che funzionino interamente a biometano e che ciò possa essere dimostrato tramite un contratto di approvvigionamento di biometano o altre forme di accesso al biometano, devono essere contati come 1 veicolo che contribuisce al raggiungimento della quota richiesta. Tale conteggio sarà abbandonato nel caso degli Stati membri in cui la quota minima di appalti richiesta supera il 50 % del volume totale degli appalti pubblici e sarà applicato un limite massimo del 50 %. Tutti gli altri veicoli leggeri categoria M1, M2, N1 devono essere contati come 0,5 veicoli che contribuiscono al raggiungimento della quota richiesta.*

**Per gli autobus Entro il 2030, almeno il 50 % di tale obiettivo in materia di appalti deve corrispondere ad autobus a zero emissioni.**

Il sistema di trasporto con gli autobus elettrici deve verificare a priori l'impatto sulla grid elettrica locale di alimentazione. Nei piani della UE lo sviluppo delle fonti rinnovabili per la produzione di energia elettrica è progettato al 57% di target nel 2030. Anche nel caso di rispetto del progetto il 43% del totale ed in particolare la potenza base di generazione dovranno essere fornite dal nucleare e dal gas. In considerazione del fatto che la Carbon Intensity of EU grid è di 275.9 gCO<sub>2</sub>/kWh contribuendo notevolmente al valore del TCO di questi sistemi di trazione, non si può definire la trazione elettrica l'unica via d'uscita nel transitorio. Un aumento al 100% della trazione elettrica in questo momento, qualora possibile, peggiorerebbe la situazione dei GHG. Soltanto dopo il definitivo superamento della generazione di

energia elettrica con il carbone nel 2025 si potrà avere un'effettiva riduzione dei GHG utilizzando autobus elettrici (sintesi in figura 2.40).

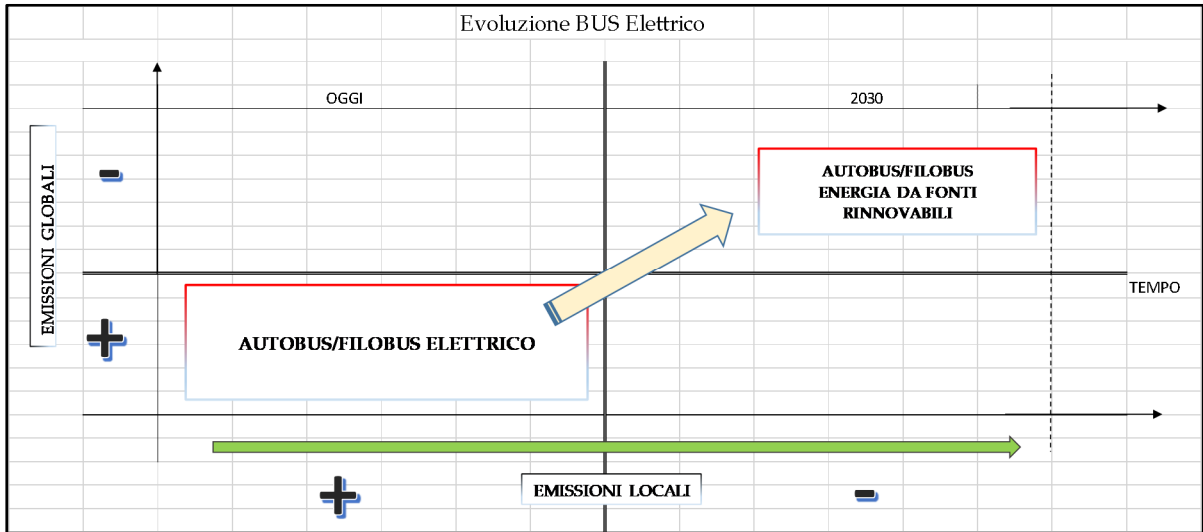


Figura 2.40: Possibile evoluzione della grid e dell'autobus elettrico

La quota di energie rinnovabili nel consumo finale lordo di energia è uno degli indicatori principali della strategia Europa 2020. L'obiettivo dell'UE è ottenere il 20% di energia nel consumo finale lordo di energia da fonti rinnovabili entro il 2020 e almeno il 57% entro il 2030 (figura 2.41).

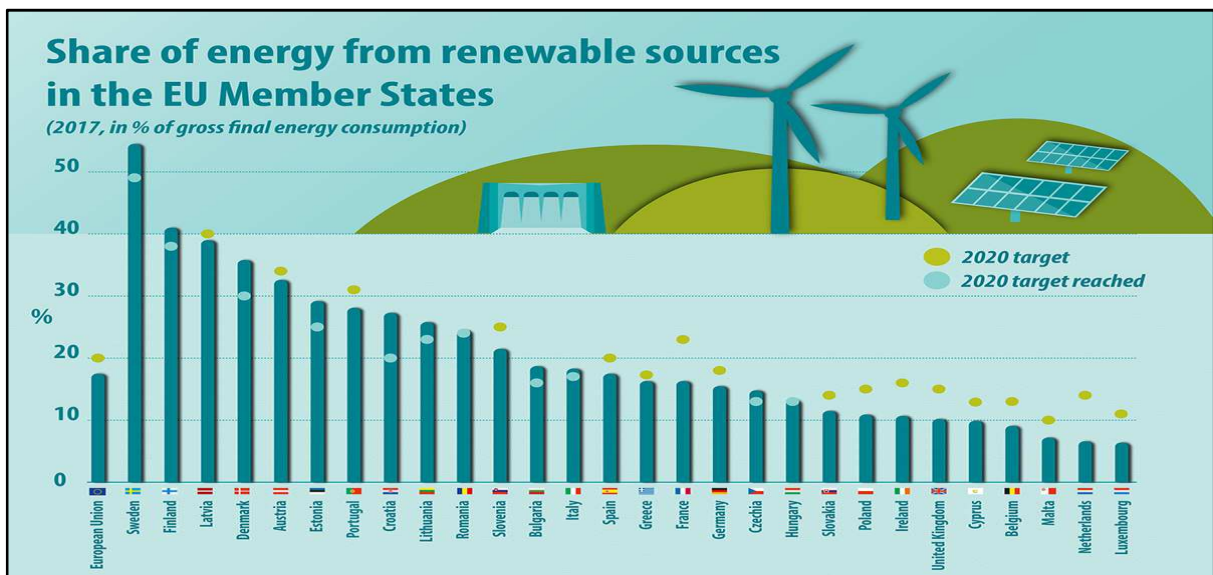


Figura 2.41: Quota di energia rinnovabile del consumo di energia in Europa-Source Eurostat

L'innovazione nel settore delle nuove tecnologie aiuta a ridurre le emissioni dei veicoli e a ridurre l'inquinamento acustico sostenendo nel contempo la decarbonizzazione del settore dei trasporti. Una maggiore diffusione di veicoli adibiti

al trasporto su strada a basse emissioni o a zero emissioni riduce le emissioni di CO<sub>2</sub> e di determinati inquinanti (particolato, ossidi di azoto e idrocarburi non metanici) e quindi migliora la qualità dell'aria nelle città e in altre aree inquinate, contribuendo nel contempo alla competitività e alla crescita dell'industria europea sul mercato sempre più globale dei veicoli a basse emissioni e a zero emissioni e garantendo lo sviluppo di infrastrutture per i combustibili alternativi. Inoltre, la neutralità tecnologica deve essere il principio fondamentale di ogni sforzo, al fine di garantire e stimolare un ambiente competitivo e incoraggiare l'ulteriore ricerca e innovazione in questo settore.

Sebbene l'Unione sia una delle regioni più importanti per la ricerca e l'ecoinnovazione ad elevato valore, la regione Asia-Pacifico ospita i maggiori produttori di autobus e batterie. Analogamente, gli sviluppi del mercato globale dei veicoli elettrici a batteria sono guidati dai mercati della Cina e degli Stati Uniti, che insieme rappresentano circa il 60 % del mercato globale rispetto al 28 % detenuto dall'UE. È pertanto necessario un ambizioso quadro politico dell'UE per stimolare l'innovazione e promuovere ulteriormente la competitività e la crescita dell'industria europea nei mercati sempre più globali dei veicoli puliti e delle relative infrastrutture tecnologiche.

Il mercato europeo delle batterie avrà un valore annuo di 250 miliardi di EUR a partire dal 2025, poiché si prevede che la domanda di celle di batterie in Europa ammonterà a 200 GWh e potrebbe creare 4-5 milioni di nuovi posti di lavoro in Europa. Tuttavia, la mancanza di una base di produzione interna delle celle di batterie mette a repentaglio la posizione dei clienti industriali dell'UE. Al fine di superare questo svantaggio concorrenziale e di creare una catena di valore della produzione delle celle di batterie competitiva in Europa, incentrata sull'approvvigionamento sostenibile e responsabile di materie prime, processi di produzione basati su energie rinnovabili, riciclabilità e riutilizzo, le istituzioni dell'Unione, gli Stati membri e le autorità locali devono agire in modo rapido e collettivo.



## 2.2 Environmental challenges in public transport

Dal 2011 la commissione Europea ha previsto l'adozione di iniziative specifiche per costruire un sistema di trasporto competitivo che mira ad aumentare la mobilità, rimuovere i principali ostacoli e stimolare la crescita e l'occupazione con l'obiettivo di garantire una mobilità integrata a livello Europeo e attenta alle esigenze della popolazione, alla politica ambientale e alla competitività. L'obiettivo generale della strategia entro il 2050 è quello di ridurre la dipendenza dalle importazioni di petrolio e ridurre le emissioni di carbonio da trasporto del 60% rispetto ai livelli del 1990.

Per fare questo, tra gli obiettivi si registra quello di dimezzare l'uso di mezzi alimentati convenzionalmente nel trasporto urbano entro il 2030, o quello di incentivare l'utilizzo della ferrovia per i viaggi di media distanza.

Altri obiettivi si riferiscono all'impatto in termini sociali della mobilità, ad esempio la possibilità di avvicinarsi a zero decessi negli incidenti di trasporto su strada entro il 2050, o di triplicare la lunghezza della rete ferroviaria ad alta velocità entro il 2050.

Per raggiungere tali obiettivi è necessario promuovere lo sviluppo di una generazione di trasporto sostenibili, in particolare per i sistemi integrati di gestione del traffico, il trasporto a basse emissioni, una maggiore efficienza energetica dei veicoli e la gestione razionale e organizzata della domanda di trasporto. Rispetto a questi obiettivi tutti gli operatori di TPL, dovrebbero strutturare la propria azione con l'obiettivo di fornire un significativo contributo per il miglioramento della mobilità urbana ed extraurbana, contribuendo alla riduzione dei consumi da fonti fossili e la conseguente riduzione di emissioni di CO<sub>2</sub> e altre sostanze dannose per la salute e l'ambiente, la riduzione della congestione stradale e la possibilità di incidenti, il miglioramento del confort di chi viaggia ed infine la garanzia di un servizio sostenibile per tutti, anche per chi non potrebbe permettersi mezzi di spostamento alternativi.

Nell'immagine collettiva consolidata spesso si associa il trasporto pubblico a una scelta di necessità, addirittura a una soluzione di ripiego per chi non può permettersi un'automobile o non ha la possibilità di guidare. Si tratta di un approccio fortemente

basato su un'educazione all'automobile che è utile sfatare a partire dalla definizione di servizi di qualità ed effettivamente "sostituibili", in grado di portare innanzitutto un beneficio per gli utilizzatori, ma poi anche numerosi benefici al territorio e all'ambiente. Se da un lato non si deve perdere il valore "sociale" del trasporto pubblico in termini di diritti alla mobilità (per ragioni di carattere economico o fisico), dall'altro è importante avvicinare il servizio alle persone e migliorarne la qualità allo scopo di rendere questa scelta una effettiva opportunità in termini di sicurezza, tempi, comodità, efficacia, comfort.

I fenomeni di mobilità, sia merci che passeggeri, incidono su tutti gli aspetti delle attività umane, dalla residenza, al lavoro e al tempo libero. Dal punto di vista dell'impatto ambientale, dopo le industrie di produzione e trasformazione dell'energia, i trasporti sono il settore maggiormente responsabile per le emissioni di gas serra in atmosfera (vedi figura 2.42).

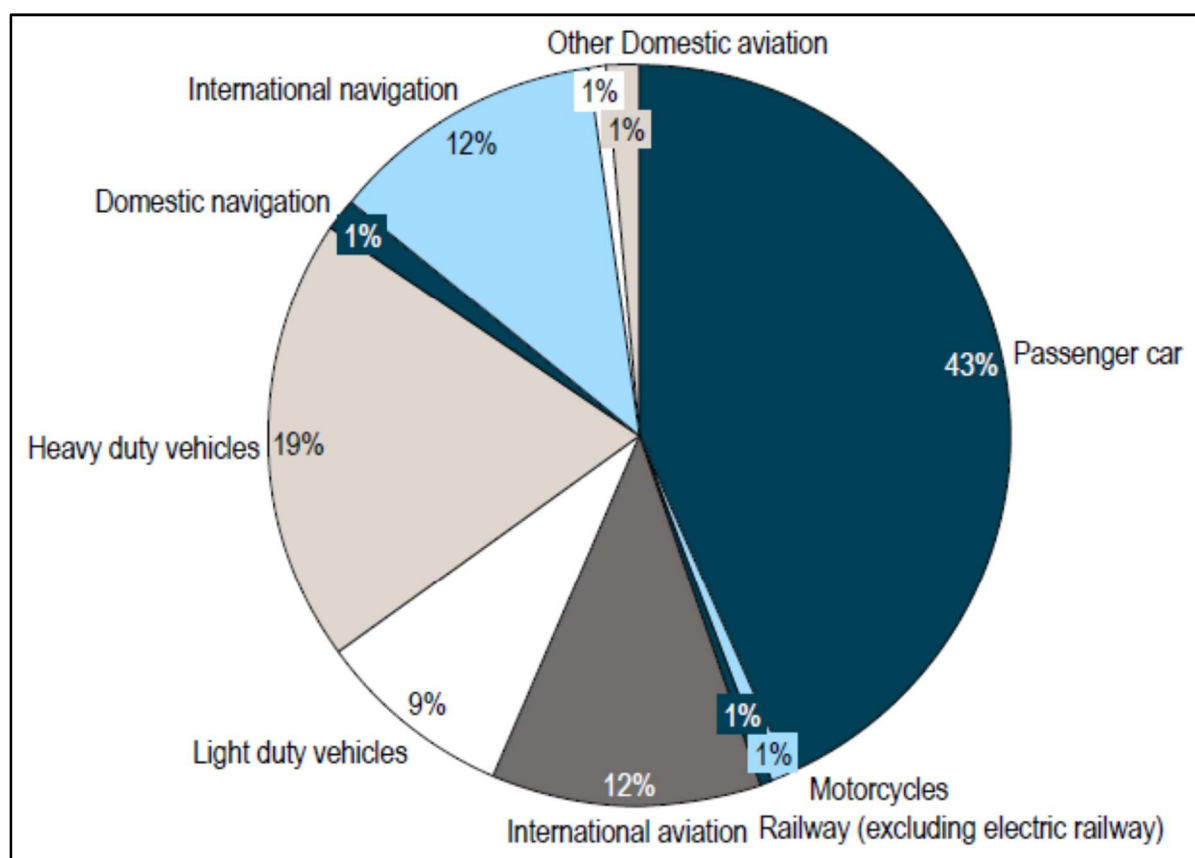


Figura 2.42 GHG emissions by transportation mode in EU28 –Source: Integrated fuels and vehicles, roadmap to 2030.

Il trasporto è infatti responsabile di circa il 20% delle emissioni di gas per effetto serra

(cosiddetti GHG) dell'UE. Tra il 1990 e il 2007 le emissioni di gas serra del settore sono aumentate del 26,4%, mentre le emissioni di altri settori economici (ad esempio nel settore dell'agricoltura e dell'energia) sono calate. Dal 2007 la crescita delle emissioni di gas serra da parte dei trasporti ha cominciato a rallentare principalmente per ragioni connesse alla minore mobilità in ragione della crisi economica degli anni dal 2008 in poi.

La principale fonte di emissioni di gas serra nei trasporti è il trasporto su strada con una quota di circa il 94%. Rispetto ad altri settori dell'economia, la riduzione delle emissioni di gas serra nel settore dei trasporti è stata più bassa. Le emissioni complessive dell'UE sono diminuite del 10,9% dal 2007 rispetto al 8,7% nel settore dei trasporti. Le cifre di emissioni di gas serra con evidenza delle quote WTT e TT sono riportati nella figura 2.43.

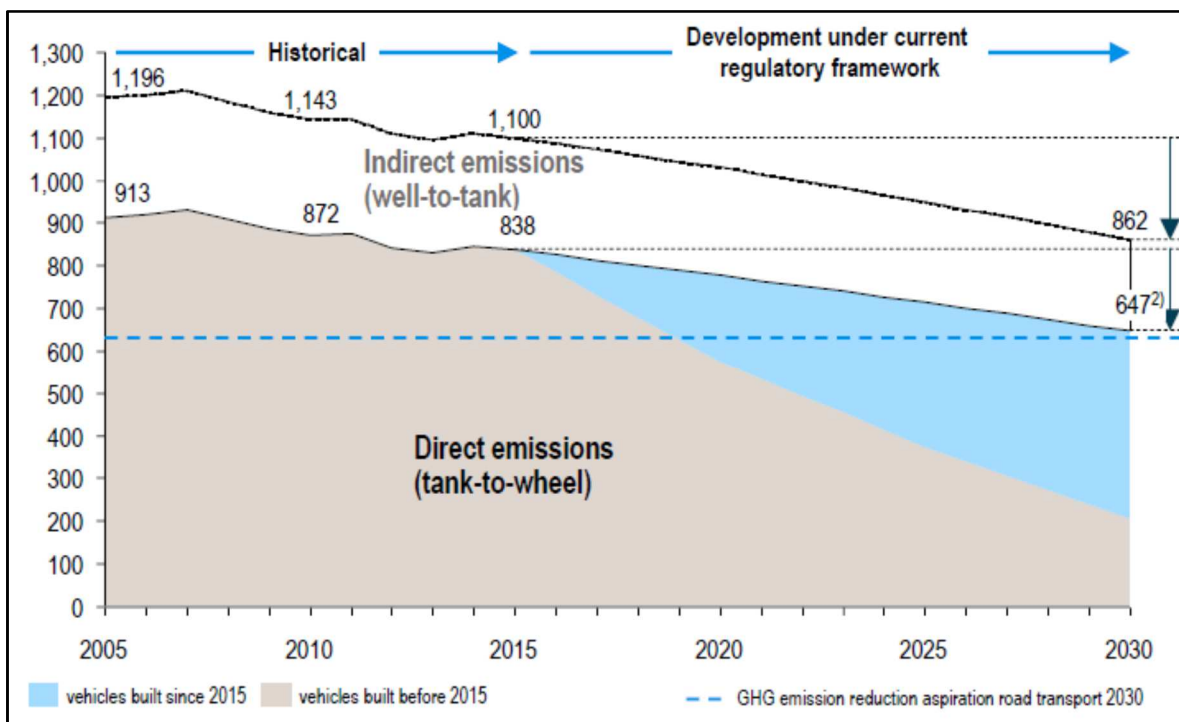


Figura 2.43: GHG Emission to 2030

Coerentemente con gli obiettivi di questo lavoro di ricerca viene riportata in figura 2.44 l'analisi delle efficienze dal pozzo alla ruota di varie tecnologie di sistemi di trazione. Il grafico dimostra i limiti del convenzionale Internal Combustion Engine nel contribuire ad un'economia a basso tenore di carbonio. Solo le combinazioni di tecnologia e combustibile a base di rinnovabili faciliteranno lo sviluppo della mobilità con veicoli a "ultra-basse e zero emissioni di carbonio". All'impatto ambientale si aggiunge il tema dell'inquinamento acustico, che si configura come un elemento di forte impatto sulla vita delle persone e sull'ambiente al punto che anche l'UE ha stabilito di affrontare la questione del rumore in modo prioritario nell'immediato futuro, dal momento che livelli eccessivi di rumore sono spesso causa di effetti negativi sulla qualità della vita e della salute. Gli studi sulla popolazione esposta mostrano che, in ambito urbano, la sorgente di rumore prevalente è il traffico veicolare, confermando che il rumore, in particolare quello prodotto dal traffico stradale,

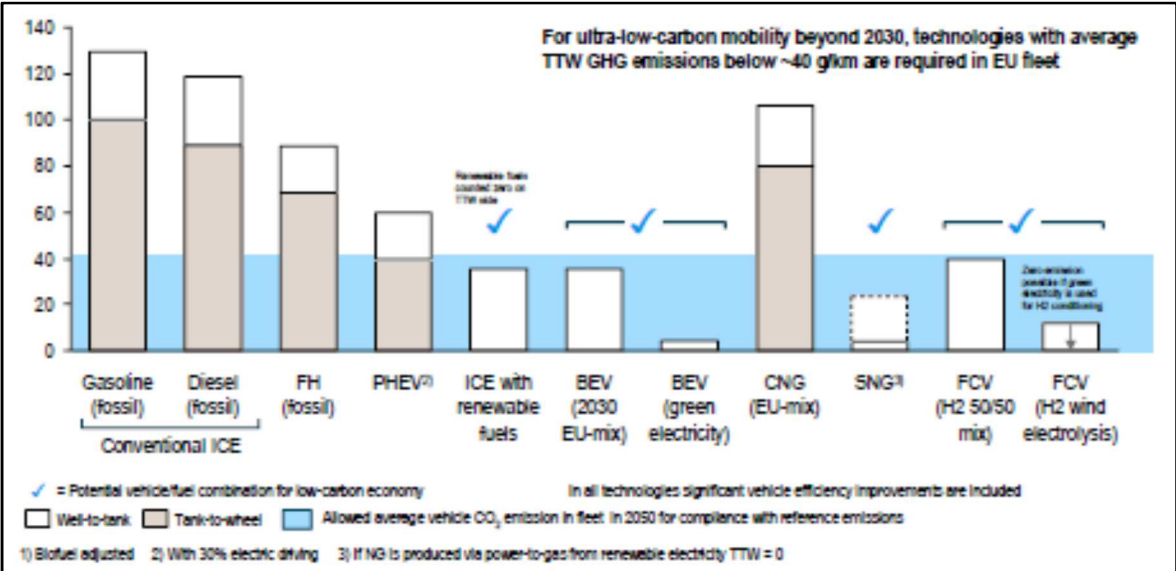


Figura 2.44: WTW GHG efficiencies by technology powertrain, Source IEC, Roland Berger

rappresenti una rilevante criticità in un'ottica di sostenibilità.

Come indicato nella figura 2.45 situazione varia molto da paese a paese. Alcuni paesi e città sono più avanzati rispetto a tutti gli altri nell'introduzione di flotte di autobus a basso/zero emissioni. Per i bus sono disponibili attualmente quattro principali fonti di alimentazione: fossil fuels, biofuels, elettricità e idrogeno. Per ognuna di queste differenti opzioni esiste una tecnologia di sistemi di trazione sui BUS in grado di utilizzare un fluido o una combinazione di essi (Hybrid).

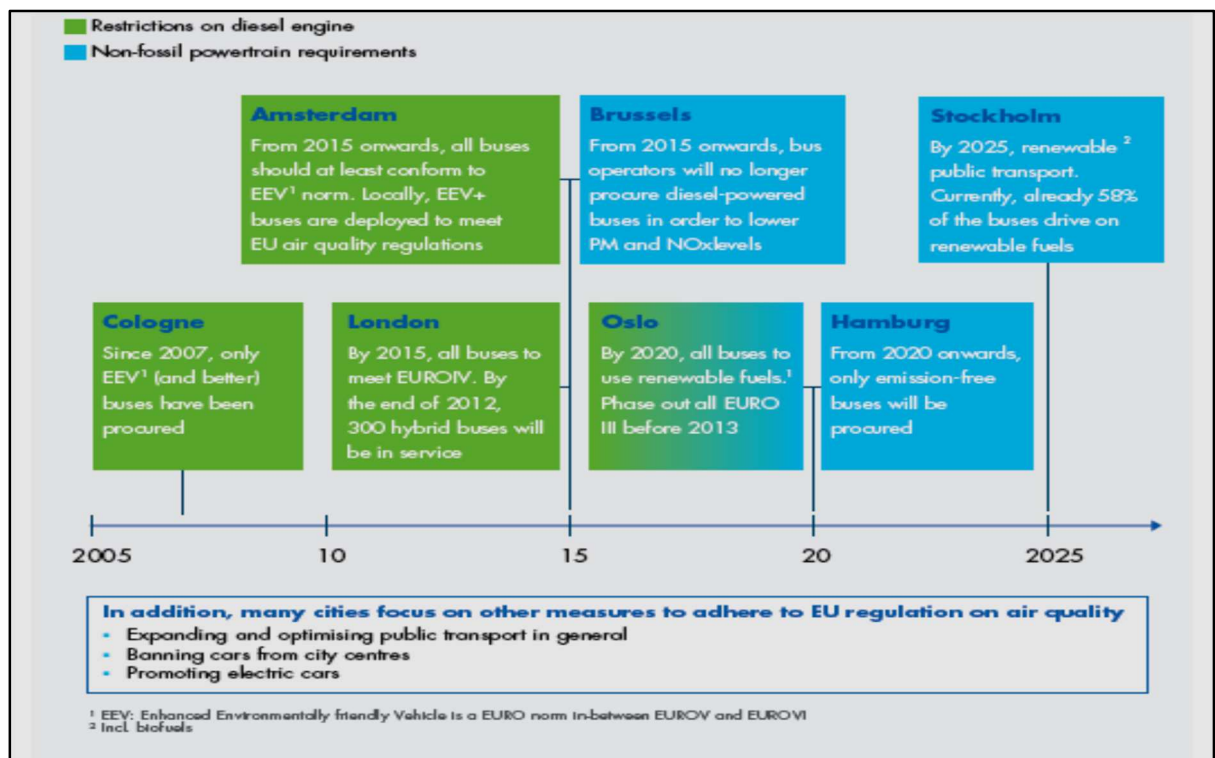


Figura 2.45: European cities focusing on clean powertrain for public transport, Source CIVITAS, Clean buses for your city

Altri sistemi di trazione sono considerati molto promettenti dal punto di vista tecnologico/ambientale e sono alimentati con CNG (compressed natural gas), con la 2° generazione di Biofuels, elettricità e configurazioni ibride che combinano elettricità e idrogeno o diesel. Allo stesso tempo con l'introduzione dell'Euro VI (standard di emissione per gli autobus diesel) queste tecnologie sono pulite quanto alternative.

### 2.3 L'inquinamento atmosferico da traffico stradale

L'inquinamento atmosferico costituisce uno degli effetti a maggiore impatto sull'ambiente di un sistema di trasporto. Il trasporto su strada, in particolar modo, influisce sui fenomeni di inquinamento, sia per la sua netta predominanza rispetto all'utilizzo di altre modalità di trasporto, sia perché l'emissione di sostanze inquinanti è diffusa sul territorio prevalentemente nelle aree urbane (figura 2.46).

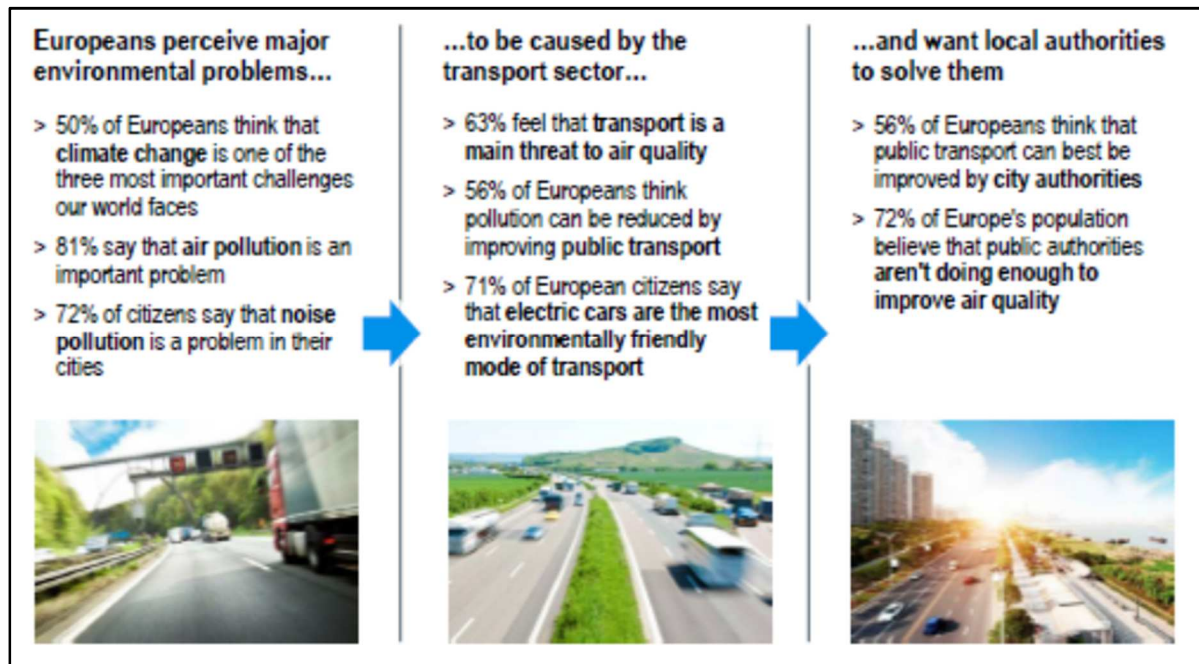


Figura 2.46: Summary of public perception of environmental challenges in public transport

La rilevanza del problema è ampiamente riconosciuta dalla normativa di settore che esercita attività di controllo a priori, sulle emissioni dei veicoli, e a posteriori, imponendo dei valori di soglia per la concentrazione di alcuni inquinanti nell'atmosfera. La normativa introduce, inoltre, strumenti di pianificazione per il controllo a lungo termine della qualità dell'aria e provvedimenti di breve termine per fronteggiare le situazioni di allarme. Il trasporto pubblico quindi che gioca un ruolo importante attraverso l'impiego di tecnologie di cui alla figura 2.47 può essere decisivo al fine di migliorare la qualità dell'aria nelle aree urbane.



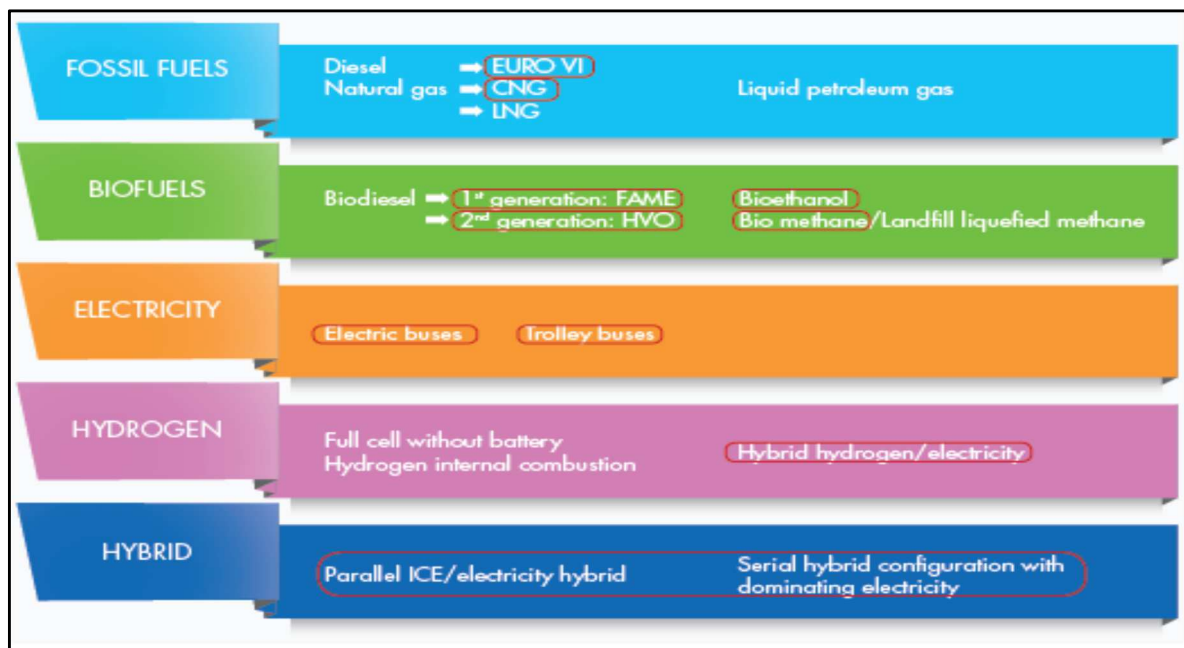


Figura 2.47: Bus technologies for different energy carriers

- \* Il D.Lgs 152/2006 (Norme in Materia Ambientale) definisce inquinamento atmosferico "ogni modificazione dell'aria atmosferica, dovuta all'introduzione nella stessa di una o più sostanze in qualità e con caratteristiche tali da ledere o da costituire un pericolo per la salute umana o per la qualità dell'ambiente oppure tali da ledere i beni materiali o compromettere gli usi legittimi dell'ambiente".
- \* Il D.Lgs 155/2010, che recepisce la direttiva comunitaria 2008/50/CE relativa alla "qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa", fornisce un quadro normativo unitario in materia di valutazione e di gestione della qualità dell'aria.

Lo stato di inquinamento atmosferico è il risultato di un processo che comprende tutti i fenomeni a cui prendono parte le sostanze inquinanti a partire dalla loro genesi fino all'espletamento della loro azione sull'ecosistema.

Il processo di inquinamento può essere scomposto in sub-processi, quali la formazione, l'emissione, la dispersione e l'azione delle sostanze inquinanti (figura 2.48). Nell'ambito di questi sub-processi sono coinvolti diversi subsistemi dell'ecosistema globale: le sorgenti, responsabili dell'immissione delle sostanze inquinanti nell'aria e a volte anche della loro formazione, l'atmosfera, che rappresenta il mezzo attraverso il quale essi evolvono, e i recettori, ovvero tutti gli

elementi dell'ecosistema (compresa l'aria stessa) che risentono dell'azione dannosa delle sostanze inquinanti. In particolare, i quattro sub-processi dell'inquinamento atmosferico sono:

- \* **la formazione delle sostanze inquinanti:** il processo dell'inquinamento da traffico veicolare è originato dal fatto che i veicoli stradali utilizzano come propellenti sostanze idrocarburiche combustibili derivate dal petrolio o da gas naturali dotate di elevate potenzialità inquinanti. La fase sostanziale del processo di formazione delle sostanze inquinanti immesse nell'atmosfera avviene all'interno degli apparati di propulsione dei veicoli;
- \* **l'emissione:** le sorgenti di inquinamento che immettono sostanze nocive nell'atmosfera possono essere naturali (vulcani, vegetazione, batteri) o antropiche (processi industriali, processi di trasformazione dell'energia, produzione dei rifiuti solidi, attività di trasporto).

Il D.L. del 21 maggio 2004 n°71 ("Attuazione della direttiva 2001/81/CE relativa ai limiti nazionali di emissione di alcuni inquinanti atmosferici") definisce l'emissione come "il rilascio nell'atmosfera di sostanze provenienti da fonti puntuali o diffuse". I veicoli di trasporto possono essere considerati come sorgenti puntuali in movimento; le strade, invece, possono essere schematizzate come sorgenti lineari costituite da un insieme di sorgenti puntuali distribuite nello spazio lungo una linea e quindi caratterizzate dall'emissione di tutti i veicoli che le percorrono.

Le sorgenti di emissione sono caratterizzate dal tipo di sostanza inquinante emessa e dall'intensità dell'emissione. L'intensità dell'emissione è generalmente espressa in termini di quantità di sostanza emessa da una sorgente elementare per unità di tempo e per unità di spazio dalla sorgente stessa. Nel caso in cui l'estensione spaziale della sorgente sia trascurabile, la sua intensità è esprimibile in termini di flusso temporale, ovvero come quantità di sostanza per unità di tempo;

- \* **la dispersione:** è il fenomeno di evoluzione degli inquinanti dal momento dell'emissione a quello in cui avviene la loro rimozione. Le sostanze inquinanti,



una volta immesse nell'atmosfera, sono soggette a processi fisico-chimici che determinano la loro distribuzione nello spazio e nel tempo; tali fenomeni sono influenzati dal comportamento dell'atmosfera (processi di inversione termica) e dalle condizioni meteorologiche (vento e precipitazioni). Il risultato dell'azione contemporanea dei processi di trasporto, reazione chimica e rimozione degli inquinanti dà luogo alla presenza, in un certo punto dello spazio e in un certo istante di tempo, di una determinata quantità della generica sostanza inquinante che altera la naturale composizione dell'aria atmosferica. La misura di tale quantità è definita "concentrazione" e rappresenta la quantità di inquinante presente in un volume unitario di aria.

- \* **l'azione:** l'azione delle sostanze inquinanti dipende dalla loro entità, dalla tipologia e dal tempo di permanenza nell'atmosfera. In particolare, la presenza contemporanea di più sorgenti inquinanti, condiziona ulteriormente la qualità dell'aria con effetti sul clima, sulla flora, sulla fauna e sull'uomo. Gli impatti negativi degli inquinanti sono dovuti principalmente alla loro concentrazione nell'aria, la quale è solitamente misurata in microgrammi ( $1\mu\text{g} = 10^{-6} \text{ g}$ ) di inquinante per metro cubo di aria ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

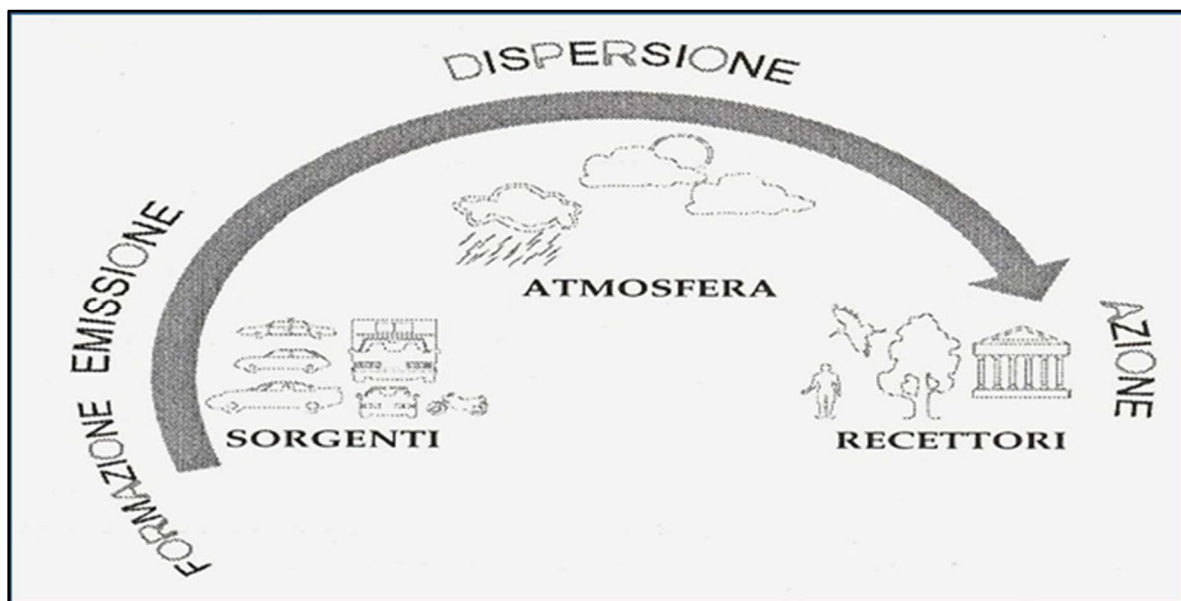


Figura 2.48: Schema del processo di inquinamento atmosferico

I processi di inquinamento dell'aria possono essere classificati a seconda del loro

dominio spaziale in: processi localizzati (o di microscala) e diffusi (o di mesoscala). I primi sono quelli che causano conseguenze maggiormente percepibili e si manifestano in tempi minori; fra questi possono essere classificati i fenomeni di inquinamento delle aree urbane. I processi diffusi, invece, interessano grandi masse d'aria e intervengono nei fenomeni meteorologici e climatici dell'intero pianeta; tali processi causano conseguenze più difficilmente misurabili che si evolvono nel lungo periodo. I casi di inquinamento acuto sono causati, nelle aree urbane, dalla combinazione di diverse fonti inquinanti, in quanto, al traffico automobilistico si aggiungono altre fonti di inquinamento atmosferico, come, ad esempio, le attività industriali ed il riscaldamento domestico.

## 2.4 I principali inquinanti da traffico

La normativa vigente definisce inquinante una "qualsiasi sostanza presente nell'aria ambiente che può avere effetti dannosi sulla salute umana o sull'ambiente nel suo complesso". Gli inquinanti atmosferici possono essere classificati in diversi modi. Un primo metodo di classificazione riguarda il loro stato fisico e consiste nel suddividere gli inquinanti in:

- \* sostanze gassose (come gas e vapori);
- \* sostanze in sospensione o particolato allo stato solido o liquido.

Con riferimento alla sorgente di emissione delle sostanze inquinanti, queste possono essere di:

- \* origine naturale, emesse da sorgenti non correlate da attività umane (vulcani, oceani, processi naturali);
- \* origine antropica, emesse da sorgenti correlate ad attività umane (trasporti, industria, conversione di energia, etc).

Le sostanze possono anche essere classificate in base alla loro genesi [Vismara 1989]; si distinguono pertanto gli:

- \* inquinanti primari, emessi direttamente dalle sorgenti;

- \* inquinanti secondari, che si formano in atmosfera in seguito a reazioni chimiche tra inquinanti primari e altre sostanze normalmente presenti nell'aria.

Gli inquinanti possono essere classificati anche in relazione al proprio comportamento chimico, cioè possono essere:

- \* inquinanti inerti, ovvero non soggetti, in condizioni tipiche di esistenza in atmosfera, alla partecipazione a reazioni chimiche;
- \* inquinanti secondari, soggetti in condizioni tipiche di esistenza in atmosfera alla partecipazione a reazioni chimiche.

I principali inquinanti prodotti dai sistemi di trasporto sono:

- \* il Monossido di Carbonio (CO),
- \* i composti organici nella forma di particolato (PTS),
- \* gli Ossidi di Zolfo (SO<sub>x</sub>),
- \* gli Ossidi Azoto (NO<sub>x</sub>),
- \* l'Anidride Carbonica (CO<sub>2</sub>),
- \* l'Ozono (O<sub>3</sub>),
- \* gli Idrocarburi (HC), in particolare quelli non metanici (NMHC) e quelli policiclici aromatici (IPA),
- \* il Piombo (Pb) e i suoi composti.

La presenza di Monossido di Carbonio è fortemente legata ai flussi di traffico. In

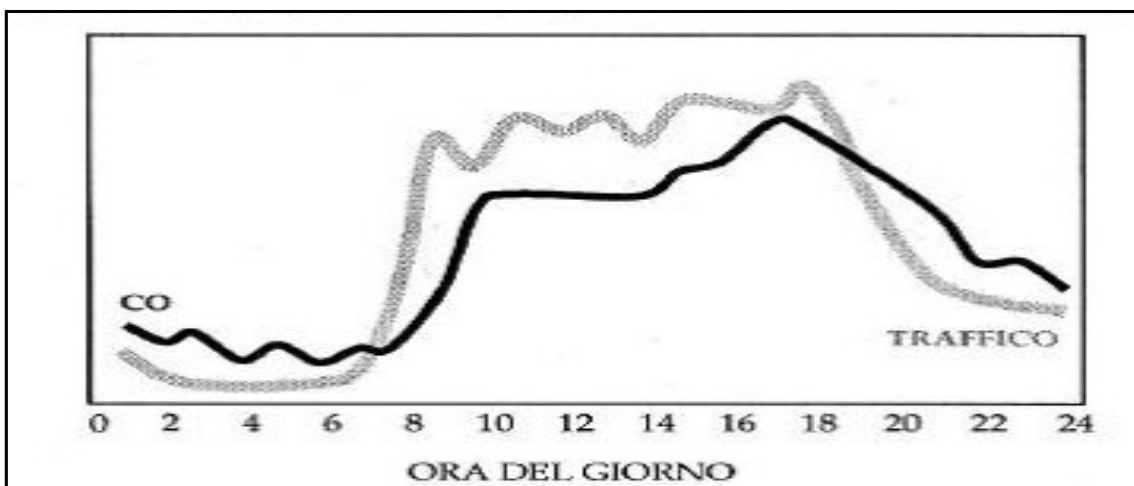


Figura 2.49: Andamento qualitativo della concentrazione di CO e del flusso di traffico in [veicoli/ora] nell'arco di una giornata in una strada urbana

figura 2.49 si nota come la concentrazione di CO, misurata in una sezione stradale durante l'arco di una giornata, ha un andamento simile a quello dei flussi veicolari che percorrono la stessa strada.

Il Monossido di Carbonio presenta anche una forte variabilità spaziale (figura 2.50): in una strada isolata la sua concentrazione mostra di solito valori massimi nell'intorno dell'asse stradale e decresce molto rapidamente allontanandosi da esso,

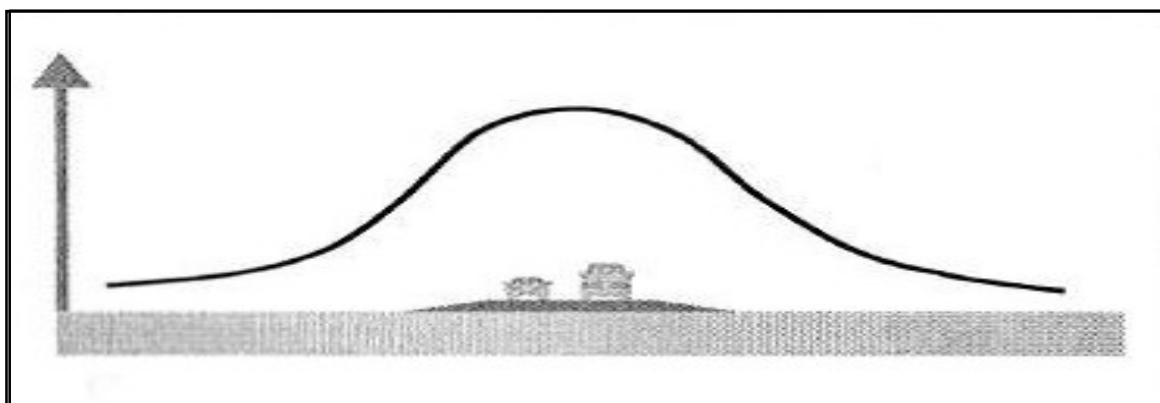


Figura 2.50: Andamento qualitativo della concentrazione di CO in una sezione stradale – Fonte [Horowitz]

fino a diventare trascurabile a una distanza di alcune decine di metri [Horowitz, 1982].

Il D.Lgs 155/2010 individua il particolato atmosferico come l'inquinante più preoccupante per la salute pubblica, in ragione della sua azione di invasività a danno dell'apparato respiratorio. Il particolato atmosferico (o aerosol atmosferico)

comprende una miscela di particelle molto differenziate per origine e composizione e con una distribuzione dimensionale che può variare da 0,005 a 100  $\mu\text{m}$  di diametro aerodinamico equivalente, che corrisponde al diametro di una particella sferica, di densità unitaria, che ha lo stesso comportamento aerodinamico della particella in esame.

La normativa ha posto l'attenzione sulle particelle con diametro inferiore a 10  $\mu\text{m}$ , aggregazione nota come  $\text{PM}_{10}$  o particolato fine. In particolare, esistono tre diverse tipologie di polveri sottili di diverso diametro aerodinamico: inalabili, toraciche e respirabili; le ultime due categorie producono effetti nocivi per la salute dell'uomo. All'interno del  $\text{PM}_{10}$  si distinguono il  $\text{PM}_{2.5}$  (particelle con diametro inferiore ai 2.5  $\mu\text{m}$ ) e il  $\text{PM}_1$  (inferiori a 1  $\mu\text{m}$ ). Tra il  $\text{PM}_{10}$  e  $\text{PM}_{2.5}$  esiste una forte sovrapposizione dimensionale: il 60% del  $\text{PM}_{10}$  è costituito dalla frazione inferiore a 2.5  $\mu\text{m}$ . Le particelle con diametro inferiore a 2.5  $\mu\text{m}$  sono di origine primaria, in quanto generate prevalentemente dai processi di combustione dovuti al traffico, all'industria e al riscaldamento domestico; sono invece di origine secondaria se formate da processi di trasformazione chimica dovuti ad interazioni con altre tipologie di inquinanti quali ossidi di zolfo, ossidi di azoto e composti organici volatili.

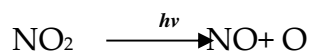
Il Biossido di Zolfo ( $\text{SO}_2$ ) e i suoi prodotti di ossidazione (triossido di zolfo, acido solforico e solfati) sono comunemente indicati con il termine generico di ossidi di zolfo  $\text{SO}_x$ . L' $\text{SO}_2$  è un gas incolore, solubile in acqua e dall'odore pungente. Le principali sorgenti antropiche sono i processi di combustione delle sostanze che contengono zolfo (principalmente i combustibili fossili come il carbone e gli oli combustibili utilizzati nei processi industriali); inoltre, i vulcani attivi e l'aereosol marino costituiscono le principali sorgenti naturali. Gli Ossidi Zolfo possono essere trasportati dalle masse d'aria in movimento anche a lunghe distanze dai punti di emissione.

Gli Ossidi di Azoto si formano durante qualsiasi processo di combustione dove l'aria sia il comburente, in ragione della presenza di azoto e di ossigeno. Una delle

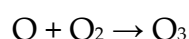
principali fonti di NO<sub>x</sub> è il traffico stradale: nei gas di scarico degli autoveicoli sono contenute quantità più elevate di monossido di azoto (NO) rispetto al biossido di azoto (NO<sub>2</sub>), il loro rapporto è circa 95 a 5. L'NO si forma per ossidazione dell'azoto contenuto nell'aria del fluido evolvente, la sua produzione è favorita dalle alte temperature e dall'abbondante presenza ossigeno. Il Monossido di Azoto immesso nell'atmosfera subisce una ulteriore ossidazione convertendosi in NO<sub>2</sub> (che sarà quindi un inquinante secondario). Tale processo è dovuto a trasformazioni di tipo fotochimico, indotte dalla luce ultravioletta presente nei raggi del sole, per questo motivo si avrà una maggiore concentrazione di NO<sub>2</sub> in rapporto all'NO nei mesi estivi. Queste reazioni chimiche portano alla formazione di Ozono e di altri inquinanti secondari, che prendono il nome di smog fotochimico presente in molte città con condizioni meteorologiche sfavorevoli. La concentrazione degli NO<sub>x</sub> nell'atmosfera dipende dall'intensità delle emissioni (come per il CO), dal loro trasporto e dalla diffusione per effetto del vento e delle turbolenze atmosferiche.

L'Ozono (O<sub>3</sub>) è presente nelle zone più alte dell'atmosfera dove si forma naturalmente a causa di reazioni chimiche attivate dalla radiazione solare, è perciò un inquinante secondario. Le cause di inquinamento da Ozono sono le stesse che provocano lo smog fotochimico, ovvero l'emissione di idrocarburi e Ossidi di Azoto dovuta ai mezzi di trasporto.

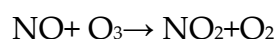
L'NO<sub>2</sub> assorbe energia dai raggi ultravioletti della luce solare e, per effetto di ciò, si scinde in molecole di NO e di ossigeno:



L'ossigeno atomico è molto reattivo, si combina con l'Ossigeno molecolare (O<sub>2</sub>) presente nell'atmosfera formando l'ozono (O<sub>3</sub>):



L'Ozono reagisce con NO formando di nuovo Biossido di Azoto e O<sub>2</sub>:



Tale reazione ostacola la presenza contemporanea di concentrazioni di NO e O<sub>3</sub>, per questo motivo le concentrazioni di Ozono tendono ad essere basse in presenza delle sorgenti di NO.

Il fenomeno appena descritto può essere schematizzato rappresentando l'andamento delle concentrazioni di NO, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> in una sezione stradale (Figura 2.51).

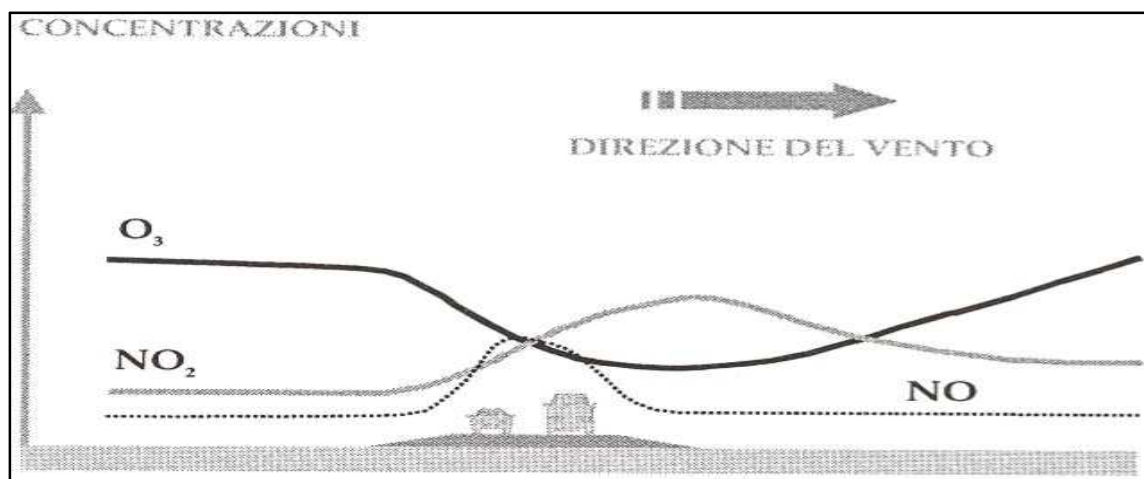


Figura 2.51: Andamento qualitativo delle concentrazioni di NO, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> in una sezione stradale – Fonte [Horowitz]

Nelle prime ore del mattino si ha generalmente la concentrazione massima di NO prodotta dalla punta di traffico mattutina; questo viene poi convertito in NO<sub>2</sub> nel giro di qualche ora. La successiva formazione di O<sub>3</sub> inizia soltanto quando il processo di produzione di NO<sub>2</sub> si avvicina al completamento, a questo punto la concentrazione di O<sub>3</sub> cresce rapidamente raggiungendo un massimo tra le 12 e le 15; nelle ore serali la concentrazione di Ozono va diminuendo.

Le reazioni fotochimiche sono molto complesse, per tale motivo è difficile stimare l'evoluzione e la distribuzione spazio-temporale dei prodotti di tali reazioni. Il monitoraggio corretto di questo inquinante va fatto nelle località più periferiche della città e nei parchi, perché il vento trasporta l'O<sub>3</sub> dalle aree urbane a quelle suburbane e rurali.

## 2.5 Andamento del Total Cost of Ownership (TCO) delle tecnologie sostenibili per l'autobus

In considerazione del rapido assottigliarsi dei giacimenti a fronte di una domanda crescente come mostrato in figura 2.52, delle eccessive emissioni di gas serra e di agenti inquinanti e del fatto che i trasporti contribuiscono per il 17,2 % dei gas serra prodotti dall'uomo e per il 74 % del particolato è necessario confrontare le alternative al motore diesel nel trasporto pubblico su strada in termini di consumo, ambientali ed economici, in vista di un necessario ed auspicabile allontanamento dal petrolio.

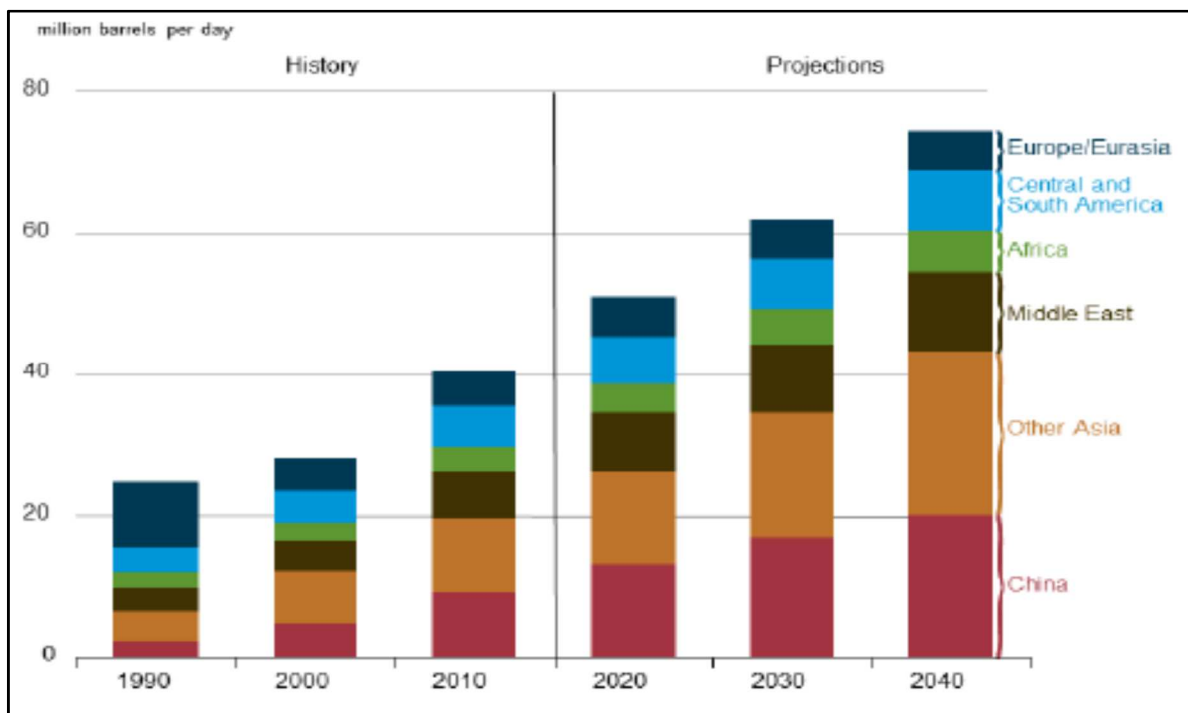


Figura 2.52: Richiesta mondiale barili di petrolio

Il Costo totale di proprietà (TCO) è un utile indicatore per l'analisi e la comparazione dei costi delle nuove tecnologie attraverso la stima dei costi di possesso diretti e indiretti di una flotta di autobus.



Il TCO include il costo dell'autobus, il valore di ammortamento, i costi di manutenzione, i costi energetici di consumo di carburante/energia, i suoi costi operativi a vita, inclusa l'infrastruttura di ricarica / rifornimento necessaria (vedi figura 2.53).

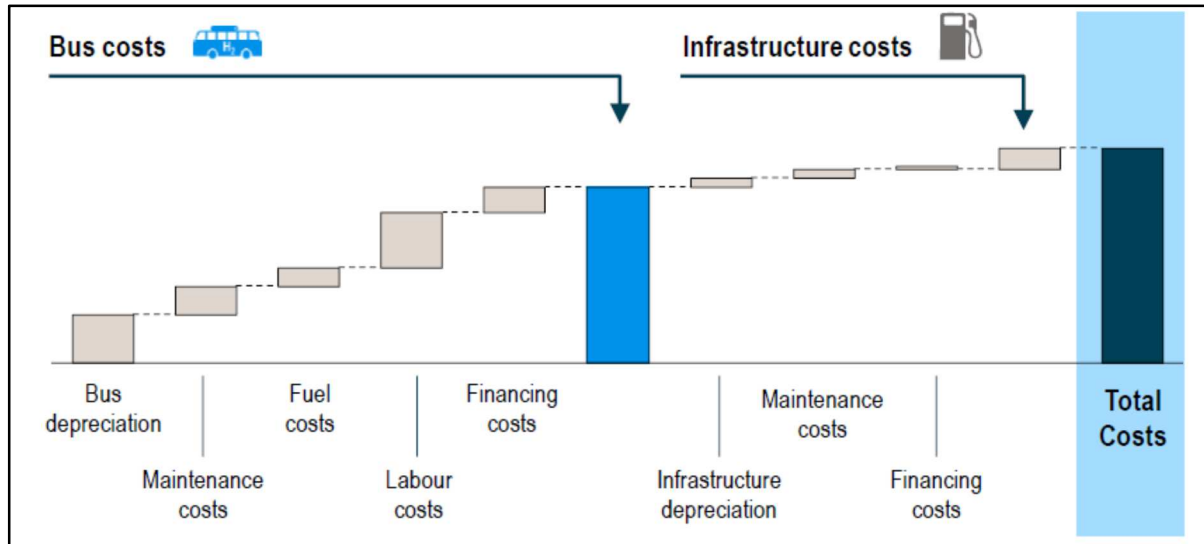


Figura 2.53 Composizione del Total Cost Ownership

La relazione può essere così sintetizzata:


$$TCO = \frac{\sum(IC+EC+MC+CC+CT)}{(LD*OY)} \quad [€/km] \quad (1)$$

Dove: IC= Investment cost, EC= Energy cost; MC= Maintenance Cost & Helping Cost; CC= Chargers cost (infrastruttura); CT= Carbon tax or emission cost; LD= Line distance (mileage); OY= Operational Years during entire life cycle.

E' importante per le stazioni appaltanti del TPL decidere se intendono avere costi completi degli asset TCO e dell'inquinamento o solo i costi di gestione.

Tuttavia, un singolo valore di TCO non sarà adeguato per valutare i costi degli autobus. Il TCO è influenzato da diversi parametri come per esempio il chilometraggio annuale e la congestione del traffico urbano.

In figura 2.54 sono riportati i principali fattori che influenzano il valore del TCO di una flotta di autobus. Nelle figure seguenti tratte da un recente lavoro della McKinsey - what's sparking electricvehicle adoption in the truck industry?-, che ha considerato il rapido sviluppo delle batterie di trazione, si può osservare che la

Rank.	Influential factors in Electric bus A	Influential factors in Electric bus B	The factors
1	Line distance / year (km)	Line distance / year (km)	 <p>The most influential</p>
2	Operational year	Operational year	
3	Investment cost including battery	Investment cost including battery	
4	Maintenance cost & helping maintenance per year	Maintenance cost & helping maintenance per year	
5	Energy cost per year	Fast chargers cost	
6	Extra battery cost	Energy cost	
7	Normal chargers cost	Extra battery cost	
8	Carbon tax / year	Carbon tax/ year	

*Figura 2.54 Summary of the most influential factors that cause the change of TCO*

previsione di parità di TCO per gli autobus elettrici a batteria con quelli diesel è prevista poco prima del 2025, confermando quindi che lo sviluppo effettivo dei sistemi di autobus elettrici per i later adopter, avverrà verso il 2030 con l'utilizzo di tecnologie (sistema = autobus + batterie + ricarica) già mature. Vedi in appendice 12.1 - Andamento Total Cost of Ownership, TCO, delle tecnologie sostenibili per l'autobus dal 2016 al 2030, come si può osservare la parità di TCO è prevista nell'intorno del 2023. I progetti che partono o sono partiti prima portano a costi maggiori che devono essere coperti in qualche modo per il maggiore TCO se si escludono gli inquinanti – Source McKinsey, Center of Future Mobility.

In questo momento c'è un gap di costo tra i sistemi e-bus e i sistemi tradizionali e questo non può essere coperto se non da maggiori fondi, come è avvenuto per tutta una serie di progetti di e-bus ed h-bus in Europa. Transport of London (TFL) in questo contesto ha infatti deciso di retrofittare gli autobus a gasolio, circa 3000, euro IV ed euro V con installazione di filtri SCRT per portare le emissioni a livelli euro VI con costi certi e con nessun rischio tecnologico legato all'inserimento di e-bus in misura cospicua. Gli e-bus sono stati introdotti con piccoli lotti pilota.

Sostenere che i 2.000 autobus elettrici già venduti in Europa (2017 che sono l'1,7 % del mercato europeo) sono i primi dell'evoluzione futura ove cambieranno solo alcuni aspetti tecnici è un'affermazione a-tecnica. In realtà si stanno costruendo una serie di prototipi che hanno valore soltanto perché permettono agli operatori di acquisire competenze sui sistemi di autobus elettrici. Per gli operatori che acquistano questi sistemi per una linea chiavi in mano dal fornitore non si avrà neppure questo importante risultato. Gli autobus elettrici attuali hanno un TCO, total cost of ownership, elevatissimo rispetto ai sistemi tradizionali a gasolio e metano. Si osservi che i costi di questi sistemi sono sotto i 2,5 euro TCO. I progetti sugli e-bus sono stati avviati grazie ad investimenti delle istituzioni locali e nazionali. In Italia, negli anni '90 sono fioriti molti esempi di piccole flotte di bus elettrici per progetti pilota.

	Diesel	Hydrogen (current)	Hydrogen (Next gen)	Electric
Vehicle Ownership	100	800	510	196
Vehicle other	100	144	144	100
'Fuel' costs	100	95	95	55
Staff	100	100	100	100
Infrastructure	100	209	209	180
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>193</b>	<b>158</b>	<b>119</b>

Figura 2.55 Il TCO comparativo tra alcuni sistemi di alimentazione in uno studio della TFL

Si riporta in figura 2.55 un primo studio di TCO effettuato da TFL.

Alcuni TCO sono decisamente di puro marketing ed è per questo motivo che si è deciso di verificare come indicato in figura 2.56 i valori che diversi studi hanno prodotto analizzando le variabili che più influenzano il valore finale del TCO.

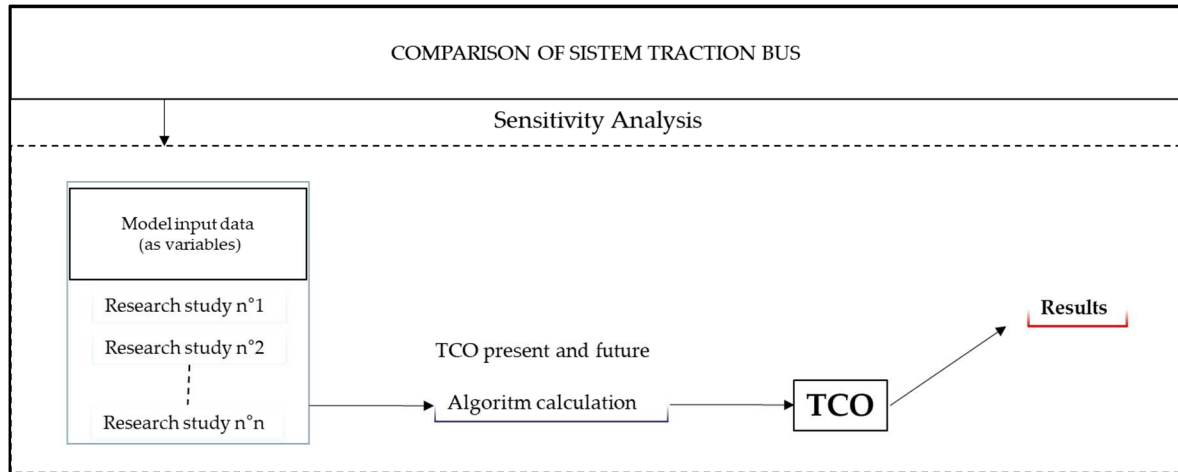


Figura 2.56: Sketching the sequence of how methods on the research are used

Peraltro tenere conto dei costi ambientali delle varie tecnologie in un contratto di fornitura di Tpl modifica in modo sostanziale le premesse dei contratti di affidamento del servizio. Se i valori dei costi sono con sostenibilità all'interno si impongono livelli di sostenibilità predefiniti che per essere raggiunti richiedono investimenti importanti. Cominciamo a riportare dei valori di TCO calcolati da un laureando del Politecnico di Torino che assumendo come dati in ingresso quelli riportati nella seguente tabella 3 produce i valori del grafico n°2.57. Seguiranno altri calcoli di TCO in altri scenari di cui verranno mostrati i risultati al fine di procedere ad un loro confronto ed analisi dettagliata.

Tabella 3: Dati in ingresso studio n°1- Fonte: Politecnico di Torino

<b>Ipotesi assunte studio n°1</b>	<b>Costo dei carburanti</b>
Km annui: 60.000	Diesel: 1.66 €/l
Vita utile bus: 12 anni	CNG: 0.063 €/Kwh
Assenza di sovvenzioni	Elettricità: 0.168 €/Kwh
Ricambio batterie Li-Ion ogni 6.5 anni al costo di 1000 €/kwh installato	H2 : 0.91 €/Kwh

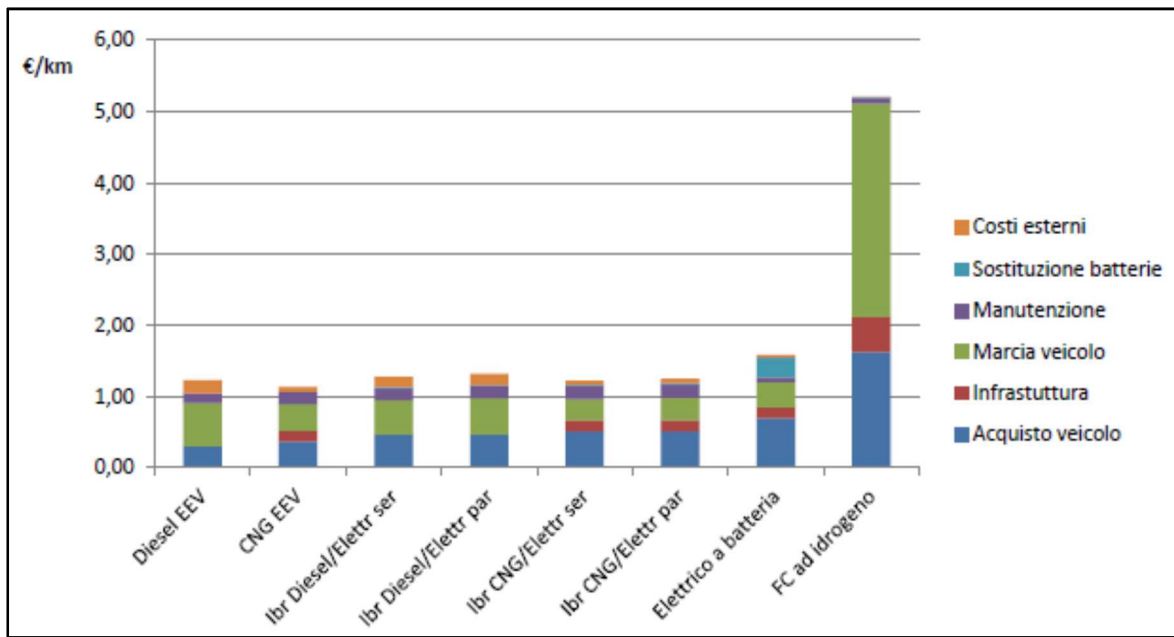


Figura 2.57 TCO con dati in ingresso studio n°1 del Politecnico di Torino

Nella tabella n°4 riportiamo i dati del secondo studio per uno scenario al 2030 che vede un elevato sviluppo e diffusione dei veicoli elettrici ed a fuel cell.

Tabella 4: Dati in ingresso studio n°2 al 2030 con sviluppo bus elettrici e fuel cell- Fonte: Politecnico di Torino

Ipotesi assunte studio n°2	Costo dei carburanti
Km annui: 60.000	Diesel: 2.83 €/l
Vita utile bus: 12 anni	CNG: 0.125 €/Kwh
Ricambio batterie Li-Ion ogni 10 anni al costo di 250 €/kwh installato	Elettricità: 0.112 €/Kwh
Riduzione costi d'acquisto (no sovvenzioni): 27% Idridi, 50% BEVs, 53% FCVs	H <sub>2</sub> : 0.46 €/Kwh

I risultati di tale studio con lo scenario prospettato è mostrato in figura 2.58.

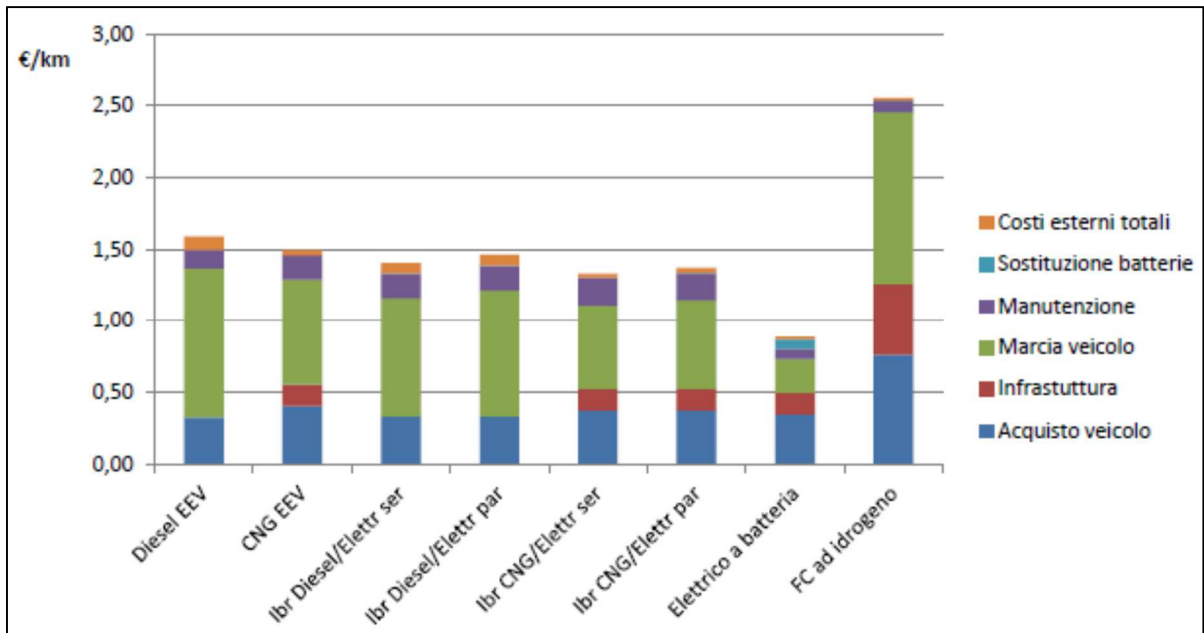


Figura 2.58 TCO con dati in ingresso tabella n°4, al 2030 con sviluppo bus elettrici e fuel cell-  
Fonte: Politecnico di Torino

Nella tabella n°5 riportiamo i dati dello studio n°3 per uno scenario al 2030 che vede un ridotto sviluppo e diffusione dei veicoli elettrici ed a fuel cell.

Tabella 5: Dati in ingresso studio n°3 al 2030 con basso sviluppo bus elettrici e fuel cell-  
Fonte: Politecnico di Torino

Ipotesi assunte studio n°3	Costo dei carburanti
Km annui: 60.000	Diesel: 2.83 €/l
Vita utile bus: 12 anni	CNG: 0.125 €/Kwh
Ricambio batterie Li-Ion ogni 6.5 anni al costo di 1000 €/kwh installato	Elettricità: 0.168 €/Kwh
Nessuna riduzione prevista per i costi d'acquisto e nessuna sovvenzione	H <sub>2</sub> : 0.91 €/Kwh

I risultati dello studio con i parametri di cui sopra sono visualizzati in figura 2.59.

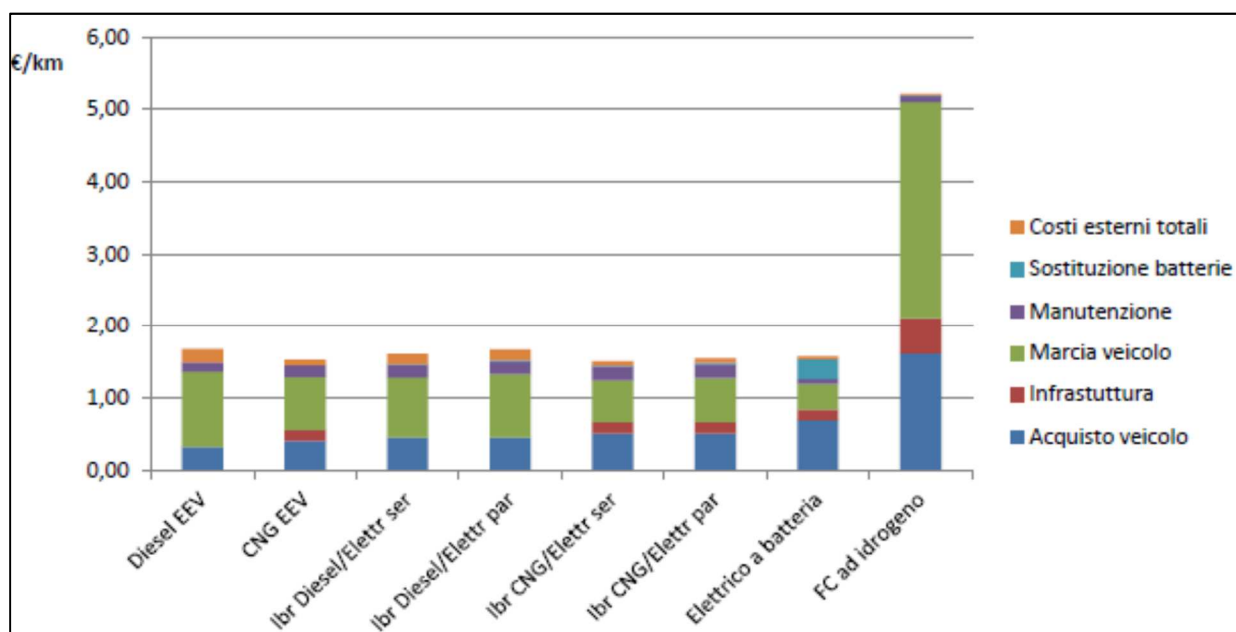


Figura 2.59 TCO con dati in ingresso tabella n°5, al 2030 con basso sviluppo bus elettrici e fuel cell- Fonte: Politecnico di Torino

Nella tabella n°6 riportiamo i dati dello studio n°4 per uno scenario attuale ma con un'introduzione di una nuova tassazione sulle emissioni prodotte.

Tabella 6 Dati in ingresso studio n°4, scenario attuale con introduzione di una nuova tassa sulle emissioni prodotte- Fonte: Politecnico di Torino

Ipotesi assunte studio n°4	Costo dei carburanti
Km annui: 60.000	Diesel: 1.66 €/l
Vita utile bus: 12 anni	CNG: 0.063 €/Kwh
Ricambio batterie Li-Ion ogni 6.5 anni al costo di 1000 €/kwh installato	Elettricità: 0.168 €/Kwh
Aumento del 30% delle quantità in €/g espresse nell' <i>Handbook on estimation of the external costs in the transport sector</i>	H2 : 0.91 €/Kwh

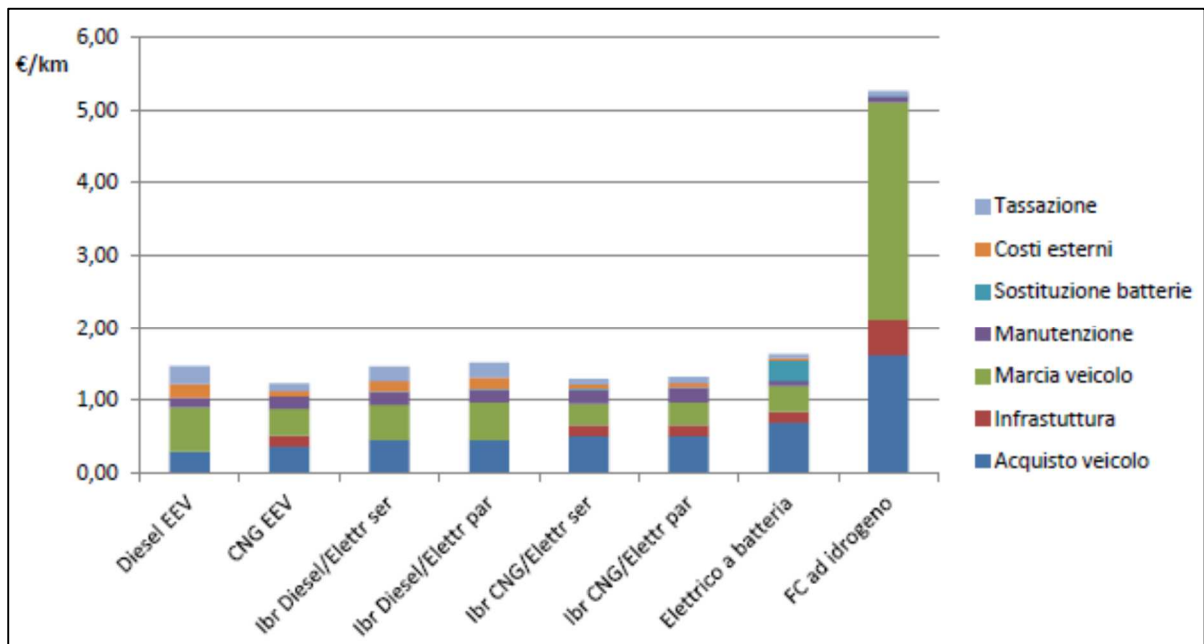


Figura 2.60 TCO con dati in ingresso tabella n°6, scenario attuale con introduzione di una nuova tassa sulle emissioni prodotte

Il risultato ottenuto in questa ricerca e presentato in questo capitolo deriva sia dal colloquio con i più importanti produttori di autobus e infrastrutture, sia da ricerche delle informazioni disponibili nella comunità scientifica. Questo rapporto inizia con una panoramica dei principali parametri per lo studio TCO, per essere successivamente seguito da un'analisi di sensibilità. L'entità delle spese in conto capitale per il rinnovo della flotta di autobus è importante, ma non necessariamente cruciale se per esempio il costo iniziale elevato è livellato nel corso degli anni dai minori costi di manutenzione. Pertanto, un TCO dimostra il suo valore offrendo un ambito pluriennale sull'investimento totale per la gestione di una flotta.

Nella successiva tabella n°7 riportiamo i dati in ingresso per il calcolo del TCO di uno studio della Copper Institute che ipotizza un profilo di missione annuo di 60.000 km  
 Tabella 7: Fuel cost per Technology- Fonte: European Copper institute

/	Diesel	CNG	PHEV	BEV
Kilometres/year	60000	60000	60000	60000
Fuel consumption	4,5 l/100 km	48,85 kg/100 km	34 l/100 km 1 kwh/km	1 kwh/km
Fuel price	1,01 €/l	0,6 €/kg	1,01 €/l 0,10 €/kwh	0,10 €/kwh
Fuel Cost	26.101,64 €	17.587,39 €	19952,28	6.000 €



e dati di consumo e prezzo energia carburanti come da tabella n°8.

Tabella 8: Dati in ingresso studio n°5, - Fonte: European Copper institute

	Diesel	CNG	PHEV	BEV (opport.)		BEV (depot)	
				With batt.	Lease	With batt.	Lease
Fuel cost (€/km)	€0,43	€0,29	€0,33	€0,10	€0,10	€0,10	€0,10
Maintenance cost (€/km)	€0,42	€0,53	€0,28	€0,23	€0,23	€0,23	€0,23
Battery lease (€/km)	-	-	-	-	0,14	-	€0,14
Battery replacement (€/km)	-	-	€0,002	€0,013	-	€0,025	-
Insurance cost (€/km)	€0,09	€0,09	€0,09	€0,09	€0,09	€0,09	€0,09
Tax cost (€/km)	-	-	-	-	-	-	-
Subsidies	-	-	-	-	-	-	-
OPEX 10 years (€/km)	€0,93	€0,91	€0,70	€0,42	€0,55	€0,44	€0,55
CAPEX bus	€184.719	€216.844	€357.391	€403.571	€381.485	€403.571	€381.485
Infrastructure + maintenance	€2.509,37	€5.120,48	€8.618,18	€83.773,96	€83.773,96	€24.435,24	€24.435,24
TCO 10 years (€/km)	€1,24	€1,27	€1,32	€1,24	€1,33	€1,18	€1,23

I risultati ottenuti con le ipotesi di studio della Copper Institute sono visualizzati nella seguente figura 2.61:

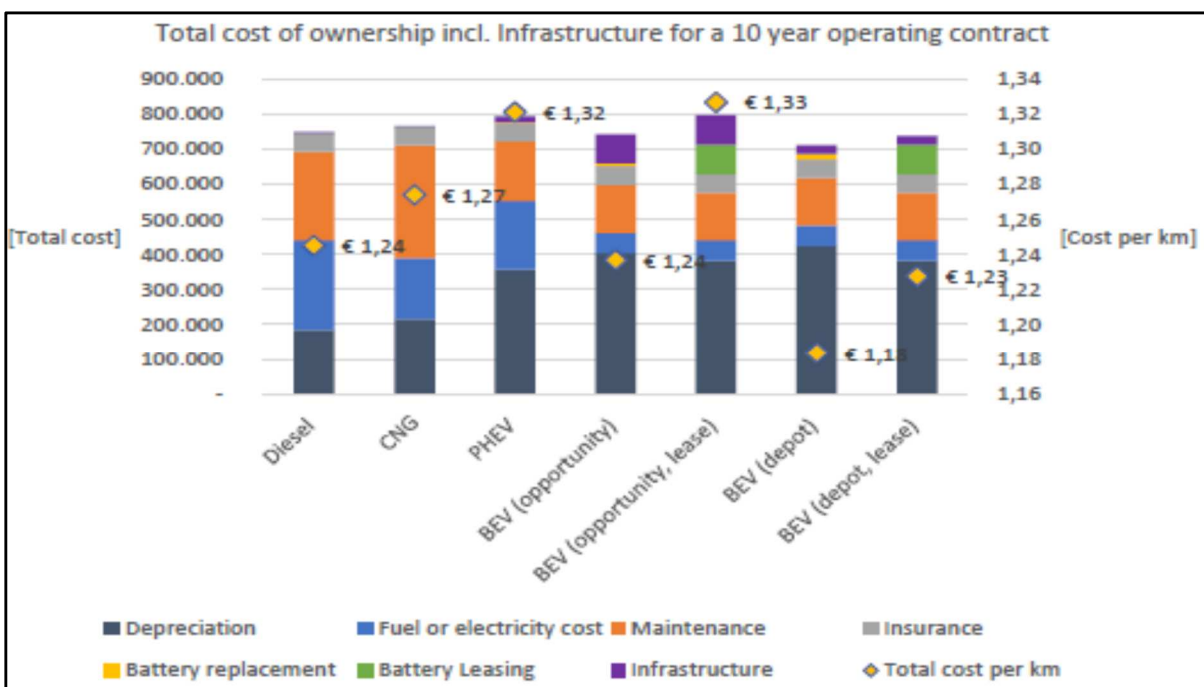


Figura 2.61 TCO attuale, inclusi i costi per le infrastrutture per un LCC di 10 anni – Fonte, European Copper institute

Sempre lo stesso istituto ipotizzando una diminuzione del costo d'acquisto per gli autobus elettrici di circa il 50% e l'aumento del 10% per quelli alimentati con diesel e CNG arriva al risultato riportato in figura 2.62.

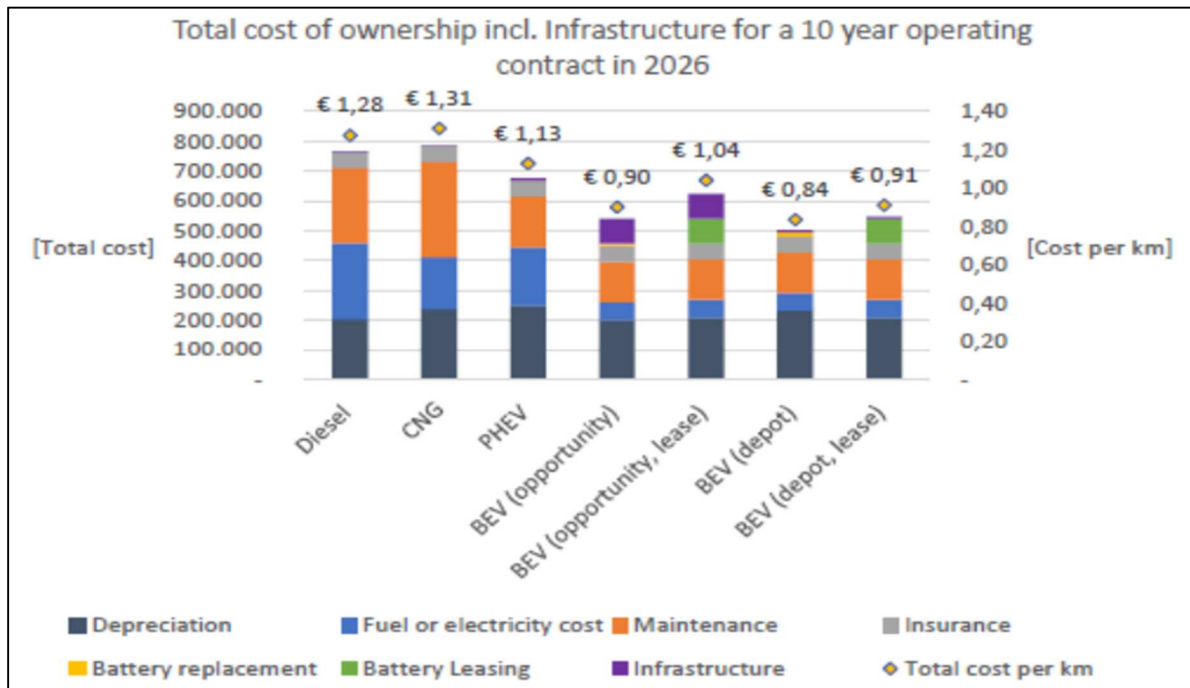


Figura 2.62 TCO al 2026 considerando una diminuzione dei costi dei sistemi di trazione elettrici, inclusi i costi per le infrastrutture per un LCC di 10 anni

Rispetto al convenzionale gruppo propulsore diesel, i sistemi di trazione alternativi attualmente hanno un costo più elevato (Autobus diesel circa 230.000 €, Autobus elettrico con batteria circa 500.000 euro). Ciononostante, la stessa tecnologia diesel è diventata più costosa a causa dei sempre più restrittivi vincoli sulle emissioni, richiedendo un migliore post trattamento. La differenza di costo iniziale tra un autobus elettrico con ricarica in deposito e un bus elettrico opportunity charge può essere correlata alla capacità delle batterie installate a bordo.

A titolo esaustivo si riporta (figura 2.63) il grafico di comparazione economica dei diversi sistemi di trazione e le linee di tendenza che mostrano l'andamento dei costi partendo dai sistemi di trazione tradizionali, passando per quelli alimentati con combustibili di origine bio, per arrivare infine a quelli con alimentazione elettrica ed idrogeno. Alla riduzione dell'impatto ambientale locale corrisponde un aumento dei costi che l'operatore di TPL deve sostenere.

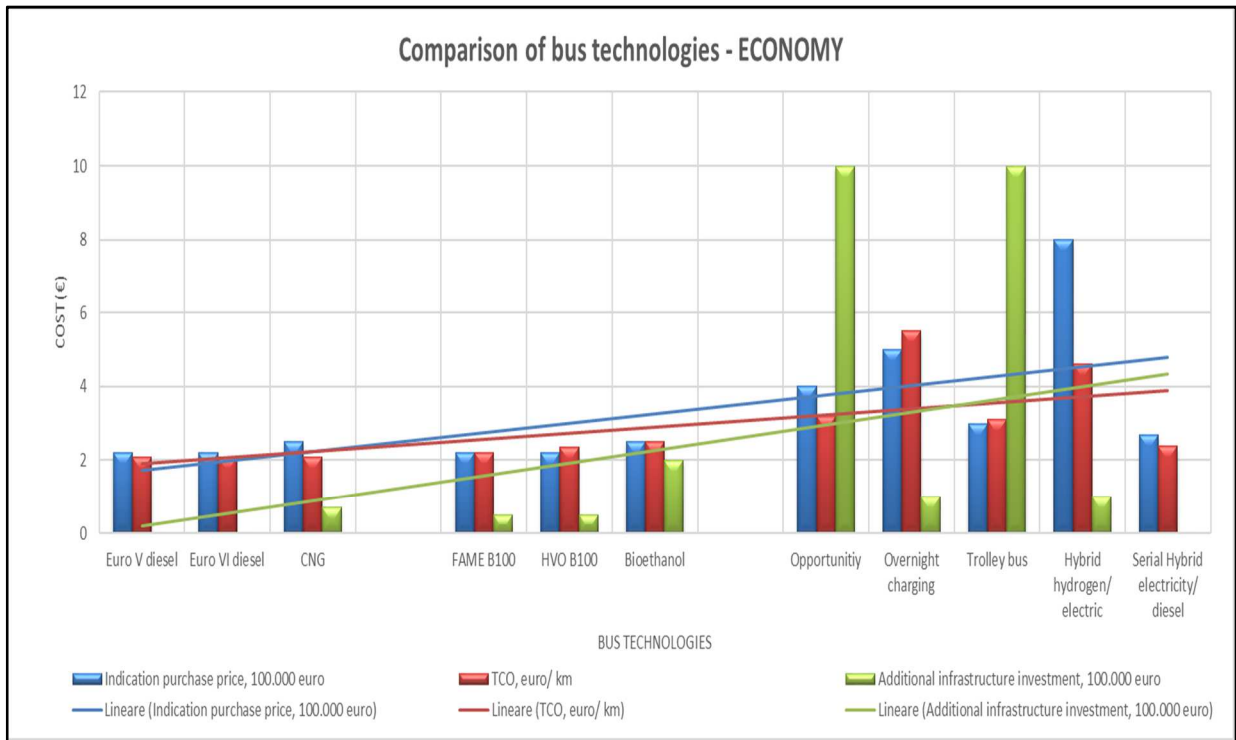


Figura 2.63 Comparazione economica dei diversi sistemi di trazione: tradizionali, alimentati da biocarburanti, elettrico, idrogeno

Al fine di rendere immediato anche il confronto dei consumi dei diversi sistemi di trazione si riporta la figura 2.64 (fonte CIVITAS).

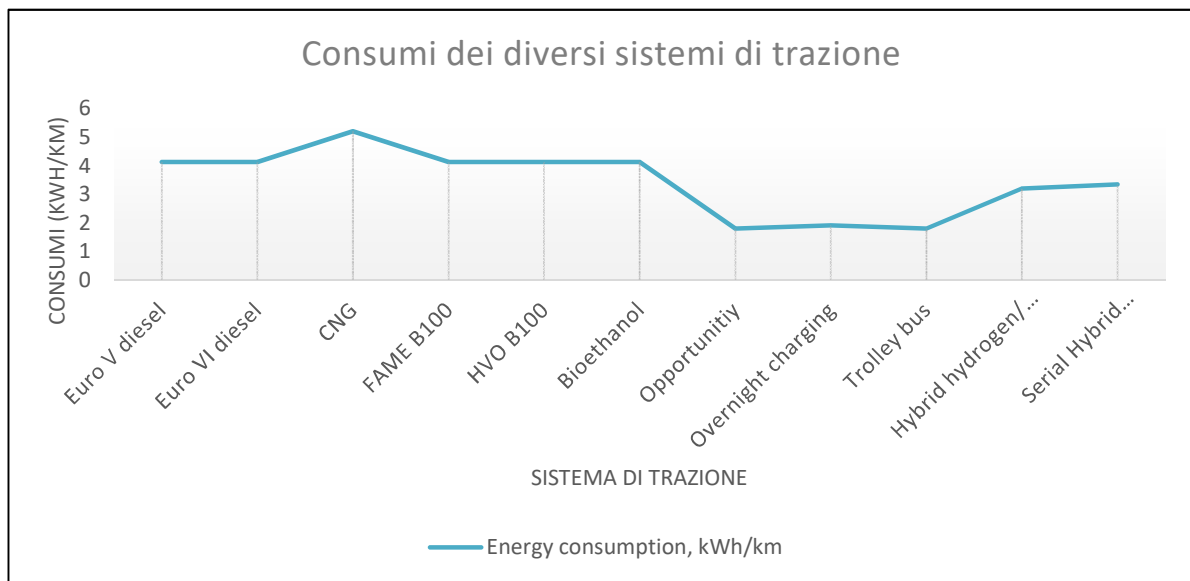


Figura 2.64 Andamento dei consumi kwh/km dei diversi sistemi di trazione

I valori dei TCO sono sintetizzati nel grafico seguente (figura 2.65) che ci consente di sintetizzare i valori ricercati e di arrivare ai seguenti risultati:

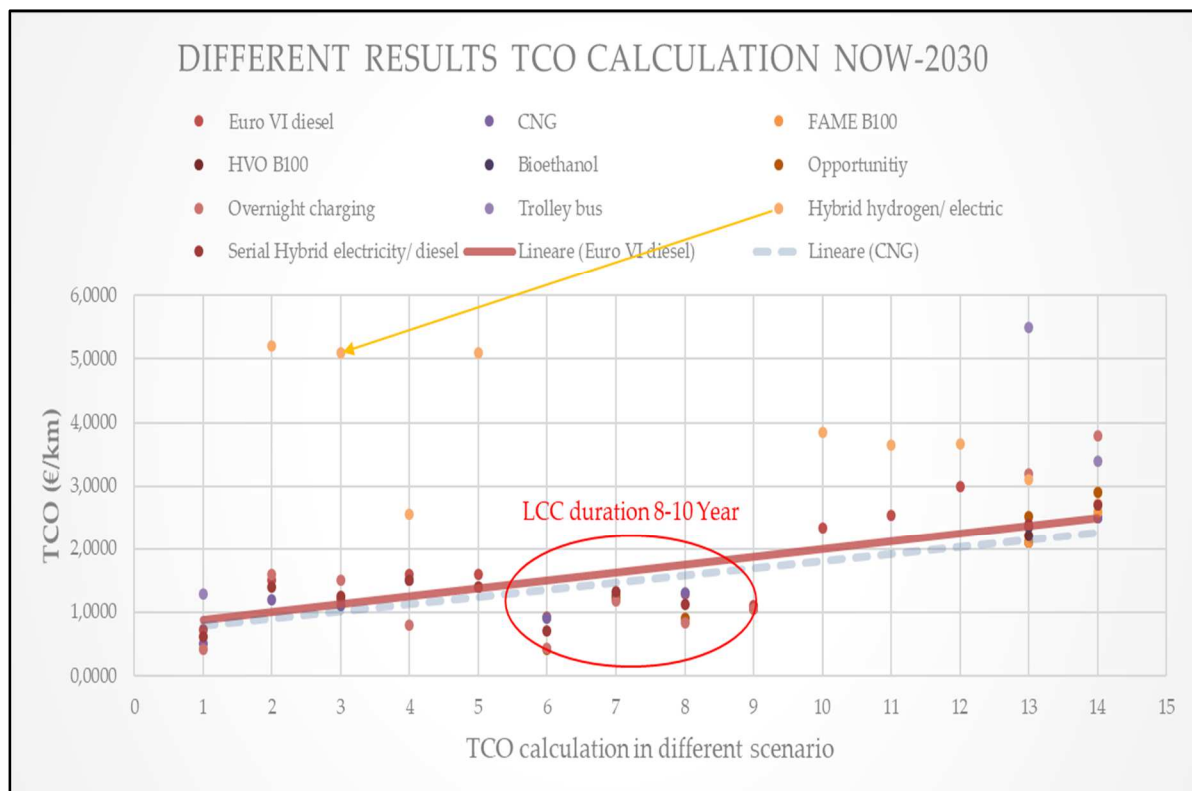


Figura 2.65: TCO calculation

- 1) I TCO degli autobus elettrici si posizionano sotto le linee di tendenza degli autobus diesel e CNG solo se si considerano tempi di durata di contratto di 8-10 anni.
- 2) Il TCO è influenzato dal profilo di missione richiesto,
- 3) Il TCO è influenzato dalla velocità commerciale e dal grado di congestione della linea.
- 4) La durata del contratto di Life cycle cost ha un impatto maggiore sugli e-bus con ricarica in opportunità, in considerazione dell'elevato costo delle necessarie infrastrutture.
- 5) I costi di TCO per l'idrogeno rimangono elevati rispetto ai sistemi di trazione tradizionali.
- 6) L'estensione della concessione amplia ulteriormente il divario dei TCO tra gli autobus elettrici e le opzioni di trazione convenzionali diesel e metano a favore di questi ultimi.
- 7) Il TCO dei bus elettrici diverrebbe interessante qualora si riuscisse a risolvere il problema dell'interoperabilità sistema di ricarica/bus e vi fossero sul mercato operatori in grado di ricaricare i bus elettrici escludendo di fatto i costi iniziali

d'investimento infrastrutturale (CAPEX).

I sistemi di trazione sono stati confrontati anche in base alla loro operatività e cioè rispetto a parametri importanti quali:

- La flessibilità d'impiego su qualsiasi linea da esercire;
- L'autonomia;
- La necessità di effettuare rifornimento/ricariche;
- La capacità di essere ZEV;

In figura 2.66 viene riportato il grafico riepilogativo che consente di paragonare i diversi sistemi di trazione costituendo un valido supporto nella scelta del prodotto autobus da utilizzare.

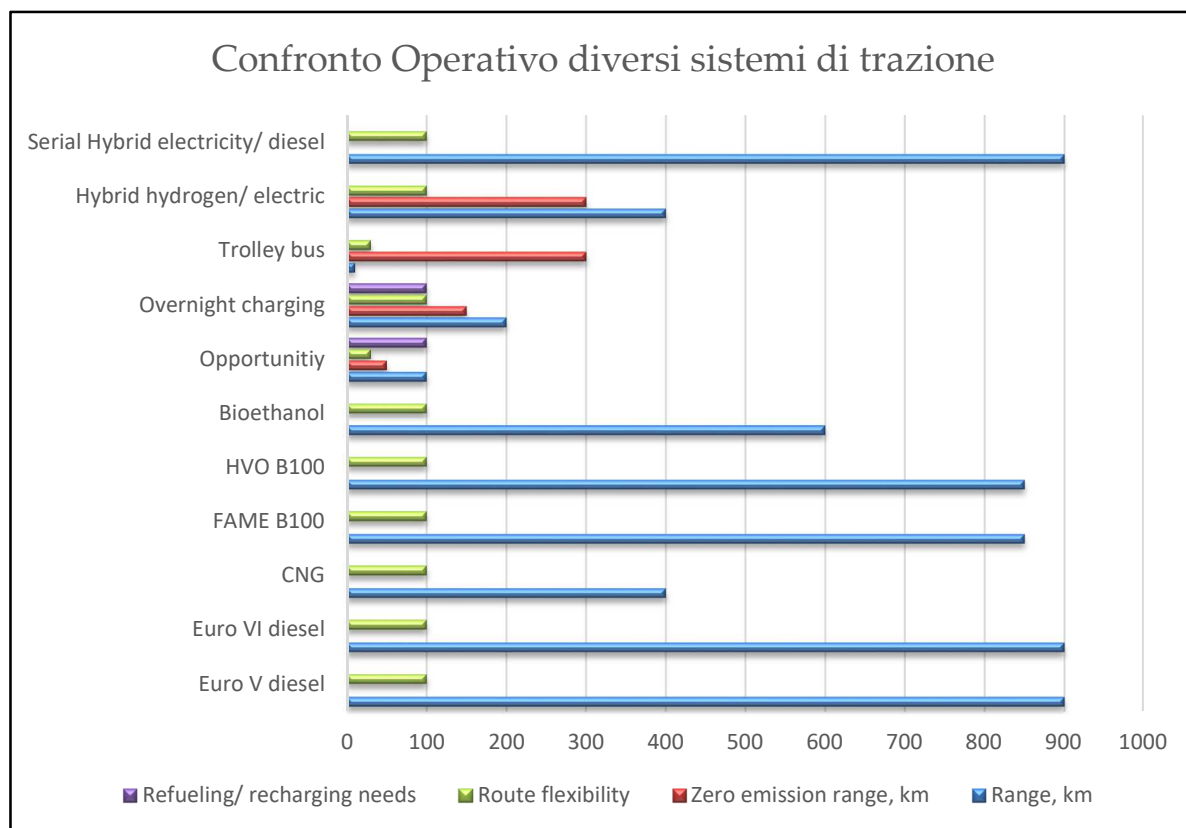


Figura 2.66: Confronto operativo dei diversi sistemi di trazione sostenibili

### **CAPITOLO 3 - Sviluppo di un modello per l'individuazione di parametri nell'introduzione di sistemi di trazione sostenibili nelle flotte per il trasporto pubblico locale**

---

La questione che si è fatta sempre più centrale nell'ambito dell'evoluzione del trasporto pubblico locale è la sostenibilità ambientale del parco da conseguire sia in termini di emissioni sia in termini di energie utilizzate e nello specifico la correlazione tra sistema di trazione e sviluppo della flotta. Proprio su questa materia, infatti non esistono al momento soluzioni standardizzate poiché ogni rete di offerta di TPL ha le sue caratteristiche peculiari locali che, impedendo di fatto la possibilità di ricorrere a scelte che siano general pur pose, impongono progetto ad hoc. Per analizzare più a fondo questa materia è possibile fissare gli input determinanti per l'attività di gestione delle flotte di seguito riportati:

- \* Le politiche dell'Unione Europea in termini di scelta dei combustibili per il trasporto (Direttive 338/2009,94/2014 e s.m.i. recepito in Italia con il Dlgs 257/2016);
- \* Le indicazioni di fondo a livello nazionale;
- \* Le politiche regionali di sviluppo della sostenibilità;
- \* Le indicazioni degli enti locali che si trasformano in specifiche dei capitolati di gara per l'affidamento dei servizi TPL a seguito dei contenuti del PUMS.

Questi input, i primi due dei quali hanno un carattere prettamente economico lasciando ai due rimanenti la connotazione di linee di indirizzo operativo, sono rappresentativi degli elementi che vanno assolutamente resi coerenti con le analisi macroeconomiche di gestione d'impresa nonché con l'analisi dell'offerta di mercato relativa ai veicoli per l'erogazione del TPL. Venendo a considerare gli aspetti macroeconomici che pesano nella definizione di una strategia aziendale di sostenibilità dell'erogazione del TPL, deve essere tenuto presente quanto è stato fissato in modo puntuale dalle politiche della UE in tema di energia per i trasporti da qui al 2030. La direttiva 94/2014 ha posto le basi per il corposo gruppo di progetti della UE, ponendo come linee guida tre principali filoni di ricerca:

- \* La riprogettazione dei veicoli heavy duty per renderli più ecosostenibili;

\*L'utilizzo di sistemi di propulsione alternativi;

\*La filiera della trazione elettrica con tutti i dispositivi atti a fornire autonomia ai veicoli elettrici nelle aree urbane.

Nel presente lavoro di dottorato di ricerca industriale si tratteranno quindi i diversi sistemi di trazione e il loro impatto sulle attività di manutenzione, cercando d'individuare la soluzione migliore per ogni tipologia di linea.

Negli ultimi anni si sono realizzate tanti e tante soluzioni che hanno permesso di comprendere meglio quali tecnologie sono più importanti per il breve, medio e lungo periodo. Per monitorare le evoluzioni tecniche che hanno precisi vincoli per l'acquisto di autobus nuovi da parte dell'UE, ormai si deve lavorare sull'orizzonte temporale del 2025-2030.

Come stato dell'arte si riporta che ormai sono chiari i sistemi di trazione riconosciuti dalla UE per l'utilizzo sugli autobus e cioè l'elettricità, l'idrogeno ed il metano (liquido o gassoso) in particolare tutti di origine BIO.

Numerose sono le strategie d'intervento per il miglioramento dell'efficienza del sistema dei trasporti da adottare in modo complementare e integrato. Gli interventi per il miglioramento della congestione delle aree urbane hanno diversa natura e possono essere classificati come segue:

\*Tecnologici;

\*Tattico – gestionali;

\*Strategico – infrastrutturali.

Gli interventi di tipo tecnologico riguardano prevalentemente il miglioramento delle prestazioni tecniche dei veicoli, attraverso l'utilizzo di mezzi a basso impatto ambientale (Bus GNC, Ibridi, elettrici, ecc.). Tutte aziende di TPL sono alle prese con la necessità di sviluppare in maniera sostenibile del punto di vista ambientale la propria flotta.

È necessario determinare gli obiettivi della propria azione piuttosto che scommettere su un'unica soluzione tecnologica e realizzare progetti pilota scollegati dal contesto e difficilmente realizzabili. L'operatore di TPL deve effettuare e ripetere i seguenti step



meglio rappresentati in figura 3.67 e cioè STEP A. Determinare gli obiettivi; STEP B. Valutare la fattibilità; STEP C. Ottimizzare la soluzione preferita.



Figura 3.67: Value Chain Integrator

Nella fase A) l'operatore di TPL deve determinare gli obiettivi e stabilire se si vuole una riduzione dei livelli di emissione locale o una riduzione dei GHG nel complesso. Per fare questo si deve scegliere il tipo di carburante/energia da utilizzare valutando la possibilità di ottenerlo di origine BIO. Si pensi ai contratti di forniture di energia elettrica dove a volte all'operatore di TPL basta fare richiesta al distributore senza

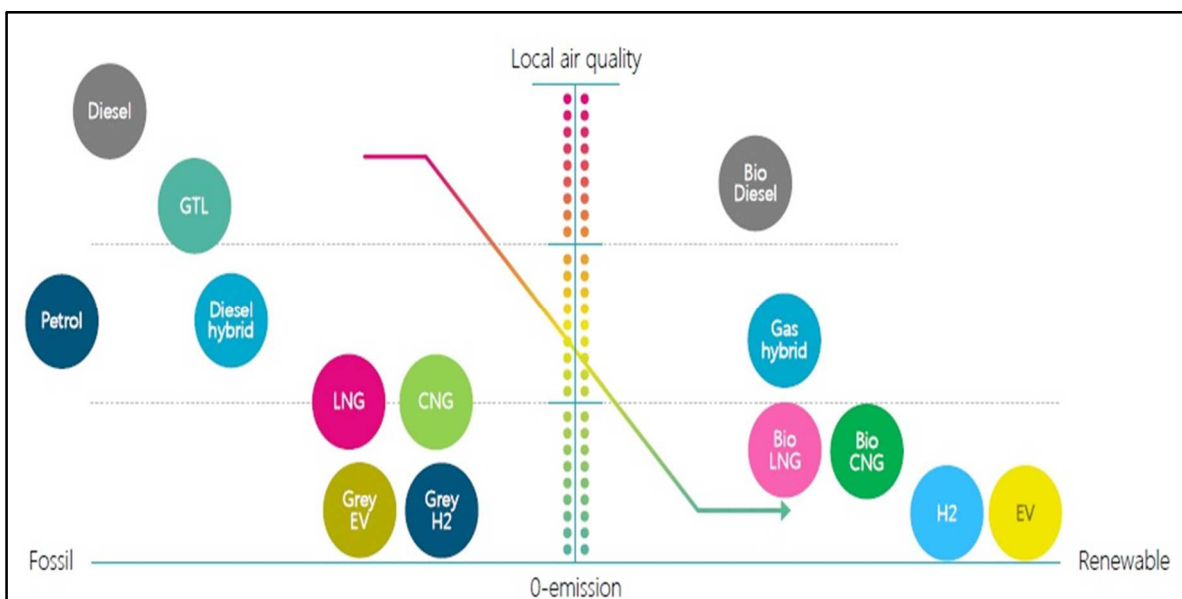


Figura 3.68 Make high-level section of possible fuel solution



nessun onere aggiuntivo (vedi figura 3.68).

Nella fase B) l'operatore di TPL deve valutare la fattibilità del progetto che si vuole realizzare. La prima verifica consta nella sostenibilità finanziaria o nell'esistenza di contribuzioni governative. Successivamente si verifica anche la fattibilità legale relativa a permessi da ottenere dai vari enti concedenti. Risulta inoltre fondamentale verificare la possibilità di ottenere fonti energetiche di origine BIO ed il rischio per il passaggio da una stazione di ricarica CNG/BNG a una ad idrogeno, considerando anche le limitazioni tecniche (per esempio durata limitata delle batterie e loro dimensioni a bordo bus).

Infine, nell'ultima fase C) l'operatore di TPL deve ottimizzare la soluzione preferita (figura 3.67) attraverso continui feed-back che arrivano dall'esercizio di concerto con i costruttori di autobus e stazioni di rifornimento.

Risulta fondamentale quindi governare il modello di transizione tra lo stato S0 della flotta a quello S1 futuro (vedi figura 3.69).

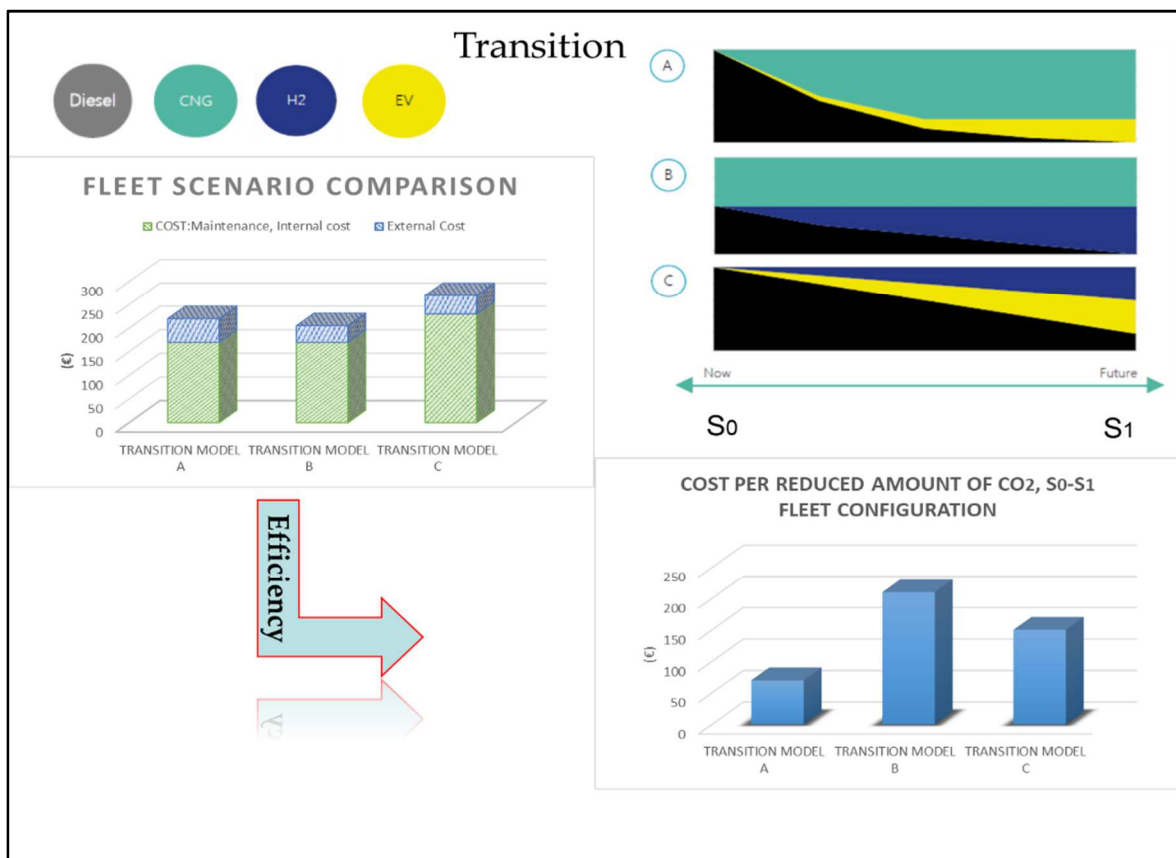


Figura 3.69: Fleet scenario transition

In sintesi si riportano nella tabella 9 e 10 i parametri da valutare per la comparazione e sviluppo sostenibile dal punto di vista ambientale delle flotte (stato S1) e le variabili in ingresso per l'impostazione dello stato S0.

Tabella 9: Model parameters for fleet comparison

<b>Model Parameters</b>		
<b>Cost Factor</b>	<b>Environment</b>	<b>Busses</b>
<i>Depreciation</i>	<i>Particulate Matter</i>	<i>Capacity</i>
<i>Fuel</i>	<i>Fuel</i>	<i>Malfunction</i>
<i>Maintenance</i>	<i>Tank to wheel</i>	
<i>Personnel</i>	<i>Well to Whell</i>	

Tabella 10: Variabili in ingresso per valutazione della flotta

<b>Variabili in ingresso</b>	
<b>Linee in concessione</b>	<b>Composizione della Flotta</b>
<i>N° di Autobus</i>	<i>Diesel</i>
<i>Profilo di missione (lunghezza linea)</i>	<i>CNG</i>
<i>Tipologia di linea (Urbana, Mista, Extraurbana, con pendenze rilevanti...)</i>	<i>Electric</i>

Come verificato sperimentalmente da molte aziende e costruttori è necessario un apprendimento continuo attraverso l'“Uso” delle lezioni apprese nella fase operativa dei nuovi sistemi di trazione. Una flotta sostenibile si ottiene integrando sistemi e soprattutto progettando, finanziando e costruendo infrastrutture di rifornimento carburante “pulito”.

Nelle attività della manutenzione irrompe la sostenibilità con necessità di competenze relativamente alle tecnologie (elettrico, gas, ecc..) e alle relative stazioni di rifornimento. È del tutto evidente che siamo di fronte ad un cambio di paradigma poiché la scelta sul sistema di alimentazione provoca effetti su tutte le altre dimensioni aziendali.

L'azione di sviluppo delle flotte con autobus elettrici non è l'unica modalità con la quale abbattere le emissioni. L'Agenzia Transport For London ha infatti deciso di retrofittare gli autobus a gasolio, circa 3000, Euro IV ed Euro V con installazione di filtri SCRT per portare le emissioni a livello Euro VI con costi certi e con nessun rischio tecnologico legato all'inserimento di e-bus in misura cospicua. Gli e-bus sono stati introdotti via via con progetti specifici e non a macchia d'olio. È importante per le stazioni appaltanti TPL decidere se intendono avere costi completi degli ASSET (TCO) e dell'inquinamento o solo costi di gestione.

Nel proseguo di questo lavoro eseguiremo un confronto tra le diverse bus option e sarà valutato l'impatto e il supporto del metodo LCC nell'inserimento di sistemi di trazione in flotta e l'influenza della velocità commerciale e dell'orografia delle linee sui costi di manutenzione.

### 3.1 Confronto tra le diverse "bus option"

Le opzioni appropriate per una città dipenderanno da una gamma di fattori: dimensione della città, esistenza di un certo tipo di infrastruttura (ad esempio, trolley network), risorse disponibili, politica generale della città sulla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>, inquinanti locali e rumore. Il confronto di diversi vettori energetici per gli autobus in base al set di parametri sopramenzionati sarà utile nella selezione di una delle soluzioni più adatte per la città di riferimento.

Tutte le tecnologie descritte nel capitolo 1 sono in fasi di maturità differenti. La figura 3.70 fornisce un'indicazione sul confronto dei bus secondo vari parametri operativi. Un confronto più dettagliato delle tecnologie di bus sulla varietà di indicatori è fornito nell'appendice 12.3 del presente lavoro di ricerca.

Uno dei principali vantaggi dell'autobus diesel è lungo impiego in molteplici settori, le sue ben note prestazioni operative e la significativa disponibilità in Europa delle necessarie infrastrutture di rifornimento. Gli autobus ibridi diesel/elettrici sono entrati in produzione da un certo numero di anni e stanno iniziando a trovare una nicchia in alcuni paesi europei.

I filobus sono in funzione da decenni e sono considerati in una fase di tecnologica

molto matura. Si stanno conducendo test su celle a combustibile ad idrogeno e celle a combustibile autobus ibridi dalla fine degli anni 1990 con le ultime tecnologie ancora in fase sperimentale. Gli autobus elettrici vengono distribuiti in tutto il mondo e sono stati in servizio commerciale per circa due anni. Questa è la tecnologia in continua evoluzione e le nuove applicazioni sono attualmente in fase di sperimentazione in tutta Europa.

Una varietà di opzioni tecnologiche di bus con alimentazioni alternative al gasolio sono attualmente disponibili sul mercato e riportate in figura 2.47. Nella successiva figura 3.70 si riporta invece il confronto operativo tra le diverse tecnologie dei sistemi di trazione di autobus con i criteri meglio specificati in nota.

Bus technology/energy source	Fossil fuel			Biofuel				Electricity			Hydrogen	Hybrid
	Euro V	Euro VI	CNG	FAME B100	HVO B100	Biomethane	Bioethanol	Opportunity	Overnight	Trolley	Hybrid hydrogen/electric	Serial hybrid electricity/diesel
<b>Fuel characteristics</b>												
Renewable/not	Red	Red	Red	Orange	Orange	Orange	Orange	Green	Green	Green	Orange	Orange
Energy security	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Green	Green	Green	Orange	Orange
<b>Operational performance</b>												
Range, km	Green	Green	Orange	Green	Green	Orange	Green	Red	Red	Orange	Orange	Green
Zero emission range, km	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Orange
Route flexibility	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Red	Green	Green
<b>Infrastructure</b>												
Current market penetration	Green	Green	Orange	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Red	Red	Green

Figura 3.70: Comparison of bus technologies on some operational characteristic, where green represent the most environmentally friendly option, red the less option and orange an option in between – source CIVITAS, Clean buses for your city

Tutti i tipi di carburante, rispetto ai combustibili fossili sono a-priori combustibili rinnovabili e in caso di carenza di energia rappresentano una valida alternativa agli autobus diesel e CNG. L'attuale disponibilità di questi combustibili differisce significativamente dall'elettricità in quanto rappresentano le opzioni più sicure di fonti energetiche rinnovabili.

Quasi tutti gli autobus hanno prestazioni operative comparabili. Tutti si aspettano

dagli e-bus un'offerta di un'autonomia superiore ai 300 km, che di solito è ciò che è necessario per le città europee di medie dimensioni. Il tempo di rifornimento/ricarica varia in generale dai 5 - 10 minuti per l'opportunità, a parecchie ore per la ricarica (3-5 ore a seconda del tipo di batteria) per gli autobus over-night. I filobus sono costantemente connessi alla rete aerea e non hanno bisogno di tempo di ricarica durante il normale funzionamento. L'autonomia in modalità puramente elettrica (che è molto importante da un punto di riduzione delle emissioni) dipende in modo significativo dalla tecnologia e i filobus, i bus ad idrogeno ed ibridi paralleli offrono le prestazioni più elevate.

Gli autobus diesel beneficiano di una maggiore disponibilità in Europa di infrastrutture di rifornimento. Questo risulta vantaggioso anche per gli autobus alimentati con biocarburanti o BNG in quanto solo piccole modifiche sono necessarie per adattare l'infrastruttura di rifornimento alle esigenze di carburanti di origine BIO. La Commissione Europea ha recentemente pubblicato una proposta di direttiva (come riportato nel capitolo 2 di questo lavoro di ricerca) sullo sviluppo di infrastrutture per lo sviluppo di vettori energetici alternativi obbligando gli Stati membri a elaborare un piano d'azione. Questo passo può sicuramente indirizzare le municipalità a decisioni a favore di alcune tecnologie di bus più sostenibili dal punto di vista ambientale.

Una chiara comprensione delle differenti emissioni di CO<sub>2</sub> che stanno contribuendo al riscaldamento globale e le locali emissioni inquinanti (NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>) che incidono sulla qualità dell'aria è necessaria. Per esempio, gli autobus che utilizzano il FAME (Fatty-acid methyl ester meglio noto come biodiesel) riducono nel complesso le emissioni di CO<sub>2</sub>, ma possono aumentare livello di emissione locali rispetto ad altri sistemi di trazione.

D'altra parte, gli autobus CNG non hanno grandi vantaggi sulla riduzione della CO<sub>2</sub>, ma diminuiscono considerevolmente gli inquinanti localmente. In generale, gli autobus diesel Euro VI offrono un miglioramento significativo sull'emissione di CO<sub>2</sub> e sulle emissioni locali, diminuendo la differenza di emissioni rispetto alle altre

opzioni di combustibili alternativi. Le flotte di autobus più rispettose dell'ambiente sono quelle alimentate ad energia elettrica, fornendo zero emissioni locali e riducendo CO2 emissioni al 50-100% rispetto ai valori diesel.

Bus technology/energy source	Fossil fuel			Biofuel				Electricity			Hydrogen	Hybrid
	Euro V diesel	Euro VI diesel	CNG	FAME B100	HVO B100	Bio-methane	Bioethanol	Opportunity	Overnight charging	Trolley bus	Hybrid hydrogen/electric	Serial Hybrid electricity/diesel
CO2eq, g/km	Orange	Orange	Red	Orange	Orange	Orange	Orange	Green	Green	Green	Red	Green
NOx, g/km	Red	Orange	Orange	Red	Orange	Orange	Orange	Green	Green	Green	Green	Orange
PM10, g/km	Red	Green	Green	Orange	Orange	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Orange
Noise standing, dB	Red	Red	Orange	Red	Red	Orange	Orange	Green	Green	Green	Green	Green
Noise passing by, dB	Red	Red	Orange	Red	Red	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange

Figura 3.71: Comparison of bus technologies on their environmental performance, where green represent the most environmentally friendly option, red the less option and orange an option in between – source CIVITAS, Clean buses for your city

Nel caso dei biocarburanti, dell'elettricità e dell'idrogeno è anche importante considerare che le emissioni totali prodotte dipendono dalla produzione e dalla distribuzione del loro vettore energetico. Gli esperti distinguono il WTW (well to whell) in WTT (well to tank) e TTW (tank to whell) meglio approfonditi nel successivo capitolo 4 di questo lavoro di ricerca.

Gli autobus elettrici ed a idrogeno emettono zero emissioni TTW, ma considerando le emissioni necessarie per la produzione e distribuzione dell'elettricità (WTT), in generale le emissioni di CO2 (WTW) variano da 0 a 500 g/km. Le municipalità per massimizzare la riduzione delle emissioni sono alla ricerca di certificazione da parte dei fornitori di carburante/elettricità della loro origine bio al fine di decarbonizzare la loro rete elettrica.

La figura 3.71 fornisce un'indicazione sul raffronto tra le performance ambientali delle diverse tecnologie di trazione dei bus. Un confronto più dettagliato è riportato nell'appendice 12.3.

Le stime di costo riportate in figura 3.72 sono puramente indicative e possono variare da paese a paese (soprattutto per quanto riguarda ai costi operativi che dipendono dalle tasse sui carburanti, dai costi del lavoro, ecc.). Il loro scopo principale è quello di dare una base di confronto tra la consolidata tecnologia Euro VI dei bus diesel e gli autobus che operano con carburanti alternativi.

Le tecnologie dei sistemi di trazione di autobus che sono alimentati con combustibili fossili e biocarburanti sono quelle al momento meno costose. Il costo di un autobus elettrico può essere il doppio di quello di un autobus diesel ed è fortemente dipendente dal prezzo della batteria di trazione. Gli autobus ibridi ad idrogeno rappresentano attualmente la tecnologia più costosa tra quelle proposte sul mercato.

Bus technology/energy source	Fossil fuel			Biofuel				Electricity			Hydrogen	Hybrid
	Euro V	Euro VI	CNG	FAME B100	HVO B100	Bio-methane	Bioethanol	Opportunity	Overnight	Trolley	Hybrid hydrogen/ electric	Serial hybrid electricity/ diesel
Indication purchase price, 1000 euros	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Orange	Red	Orange	Red	Green
TCO 2012, euro/km	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Orange	Red	Red	Red	Green
TCO 2030, euro/km	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Orange	Red	Red	Orange	Green
Additional infrastructure investment, 1000 euros	Green	Green	Red	Orange	Orange	Red	Red	Orange	Red	Red	Red	Green

Figura 3.72: Comparison of bus technologies by economics performance, where green represent the most environmentally friendly option, red the less option and orange an option in between – source CIVITAS, Clean buses for your city

Gli autobus diesel ed i filobus sono già stati in funzione da lungo tempo. Le loro caratteristiche operative e i costi associati come ad esempio i costi di manutenzione ed il valore di mercato di seconda mano sono ben noti. Questo non è il caso degli autobus elettrici, per esempio, dove il valore residuo del veicolo non è disponibile e dove non ci sono prove chiare sul costo di manutenzione richiesto.

Nella scelta del sistema di trazione da utilizzare per l'introduzione di autobus in

flotta, le municipalità e gli operatori di TPL dovrebbero prendere in considerazione quanto segue:

- Pur dimostrando significativi miglioramenti sulle emissioni, gli autobus diesel Euro VI e CNG non sono conformi alla politica di lungo termine di riduzione del numero di veicoli che utilizzano combustibili fossili e potrebbero affrontare costi operativi più elevati dovuti all'aumento dei prezzi del carburante;
- I bus CNG, i bus ibridi diesel/elettrico, nonché bus alimentati a bioetanolo e ad idrogeno hanno maggiori problemi di sicurezza;
- HVO (Hydrogenated Vegetable Oil), bioetanolo e idrogeno rappresentano vettori energetici alternativi per gli autobus, ma che attualmente hanno una limitata produzione in Europa;
- Gli e-bus sono oggi considerati la tecnologia più pulita, ma rimangono molto costosi e richiedono investimenti elevati sull'infrastruttura di ricarica.

### 3.2 L'analisi dei dati L.C.C. (Life Cycle Cost) come orientamento nell'introduzione di sistemi di trazione sostenibili nelle flotte per il trasporto pubblico locale

L'analisi dei dati manutentivi e di Life Cycle Cost di autobus a trazione Diesel, CNG, Ibridi, Filobus come verifica dell'evoluzione temporale dei costi. La metodologia L.C.C. è l'unica che consente di tenere sotto controllo i costi manutentivi e di migliorare il prodotto autobus attraverso il coinvolgimento del costruttore nella fase di esercizio. Attraverso la convalida sperimentale dei dati aziendali di sistemi di trazione tecnologicamente più maturi, si è evidenziata la necessità per l'operatore di TPL che deve introdurre sistemi di trasporto sempre più sostenibili, di caratterizzarli sulla base della metodologia LCC.

In considerazione del fatto che la sostenibilità nel TPL si realizza sempre più con sistemi di trasporto è opportuno applicare tale metodo anche alle stazioni di ricarica/rifornimento degli autobus con minor impatto ambientale.

In questo articolo di ricerca dimostreremo come il metodo LCC evidenzi la non maturità dei nuovi sistemi di trazione sostenibili e risulti allo stesso tempo affidabile



al fine di spingere alla maturazione il prodotto “artigianale” autobus.

I limiti riscontrati sono la correttezza delle dichiarazioni del costruttore e la mancanza di dati reali per i nuovi sistemi di trazione.

Da un punto di vista operativo, viene predisposto un piano di manutenzione che specifica, a vari livelli e secondo precise tempistiche, tutti gli interventi richiesti dal mezzo in termini di manutenzione periodica, preventiva e correttiva. Possono anche essere previste soluzioni tecniche alternative che contemplano, ad esempio, d’infittire le operazioni di manutenzione preventiva poco costose per evitare futuri interventi di manutenzione correttiva molto onerosi, o, al contrario, suggeriscono di adottare scelte economicamente e tecnicamente pesanti ma che si dimostrano più affidabili e durature, richiedendo un numero di interventi minori.

Se quindi un intervallo temporale (o chilometrico) è troppo ampio e tale per cui le parti in oggetto non riescono a raggiungere la percorrenza dichiarata in offerta, con il modello LCC sarà il costruttore a pagare l’effettuazione più ravvicinata di sostituzione. Con il metodo tradizionale ne era assolutamente disinteressato.

Il Life Cycle Cost è da intendersi come un processo di fasi integrate a partire dalle specifiche tecniche di flotta fino all’esercizio vero e proprio. Durante la stesura della propria offerta, il costruttore si impegna contrattualmente a definire il ciclo di manutenzione che è da prevedersi per la maggior parte della vita del mezzo, che può essere 10, 12, 14 anni (facendosi carico di tutte le possibili inefficienze non previste con un metodo di penali o deprezzamento del prodotto).

È importante sottolineare come per l'inserimento in flotta di autobus

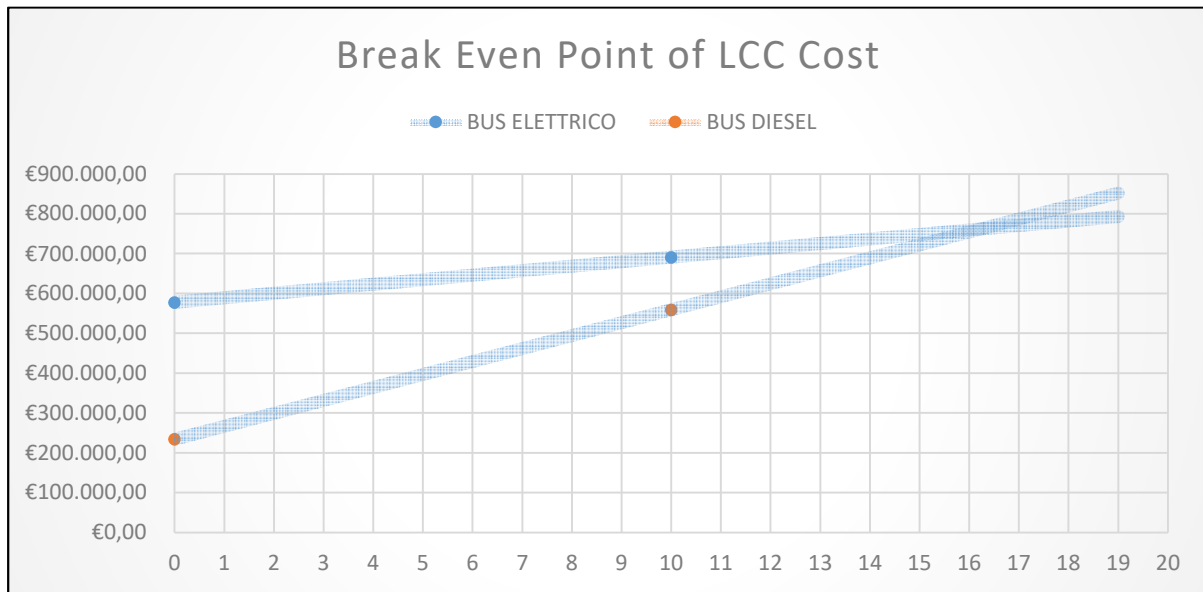


Figura 3.73 Break Even Point BUS Elettrico/Diesel convenzionale

tecnologicamente in fase di sviluppo questo periodo debba essere aumentato almeno a 18 anni come per esempio per gli autobus elettrici e loro sistema di ricarica. Ciò al fine di rendere economicamente sostenibile la sostituzione delle batterie e sfruttarle al meglio per tutta la loro vita che i costruttori stanno sempre più tentando di allungare (1°,2° e 3° vita). La figura n° 3.73 mostra come il BEP tra l'LCC cost per gli e-bus ed il tradizionale autobus diesel si verifica attorno al 18° anno.

Si può osservare inoltre, come mostrato in tabella n°11, che l'inserimento di autobus sostenibili implica modifiche dovute alla costruzione delle stazioni di rifornimento e/o dell'officina di riparazione dei mezzi.

Tabella 11: Modifiche necessarie all'infrastruttura in base al sistema di trazione scelto

	STAZIONE DI RICARICA	MODIFICHE OFFICINA/DEPOSITO	INFRASTRUTTURA IN LINEA
AUTOBUS ELETTRICI	OVER NIGHT	SI	/
	OPPORTUNITY	SI	SI
	IN MOTION	SI	SI
FILOBUS		/	SI
METANO	CNG	SI	/
	LNG	SI	/
FUEL CELL	RICARICA	SI	/

Alla luce di quanto sopra riportato si deve considerare, nell'introduzione dei sistemi di autobus alternativi ed in particolare degli autobus elettrici, la stessa complessità che vale per le scelte relative ai veicoli anche per le scelte relative alle stazioni di

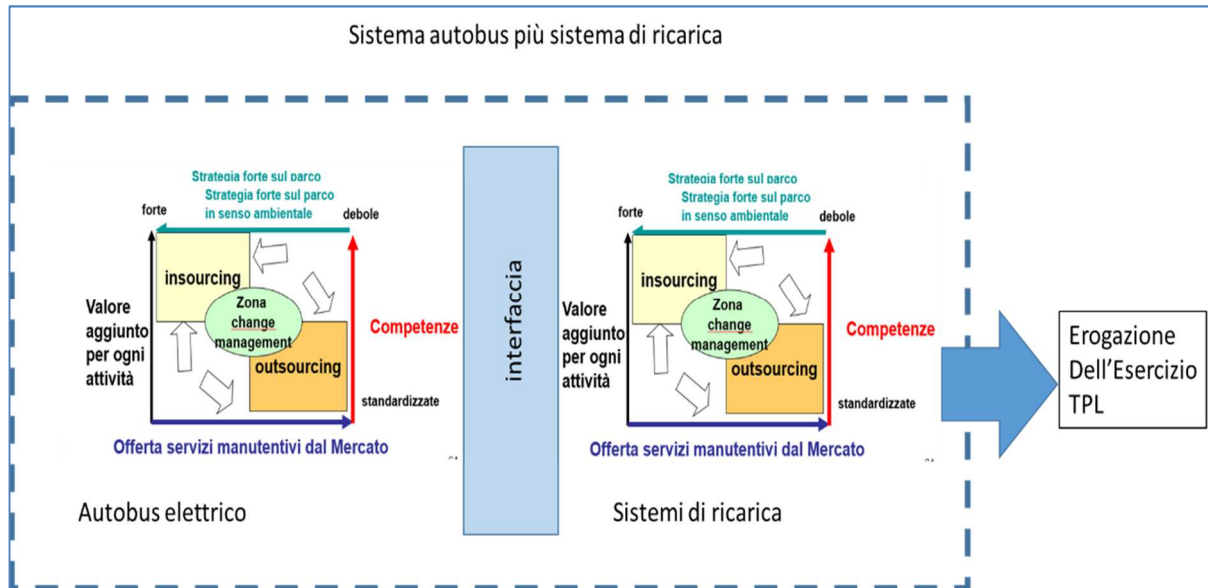


Figura 3.74: Interfaccia Autobus / sistema di ricarica

ricarica. In pratica l'operatore TPL si trova a dover scegliere sia per quanto riguarda l'autobus elettrico sia per quanto riguarda la stazione di rifornimento alle scelte del make or buy, con la complicazione che si tratterà, in generale, di due fornitori diversi come riportato in figura n°3.74 (Autobus elettrico/Sistema di ricarica).

La gestione di una flotta di autobus elettrici da parte di un operatore del TPL per esempio, comporta una serie di attività connesse come il servizio continuo di assistenza 24/7; sviluppo delle soluzioni software per la gestione miglioramento tecnologico di parti o di sistema; servizi di supporto remoto 24/7 ecc.

Come si può osservare dalla complessità di questi servizi, che iniziano con il progetto della loro adozione per verificare il sistema di ricarica lungo la rete più idoneo, sono un'attività completamente diversa dalla gestione di un autobus a gasolio.

La quantità di attività necessarie per esercire sistemi ad alta sostenibilità è elevata e soprattutto potrebbero esserlo anche i relativi costi se non opportunamente valutati. L'operatore TPL diviene sempre più un utilizzatore e sempre meno un comaker, come nel passato. Il problema al momento per la parte elettrica è che non esistono ancora dominant design per le ricariche di uno dei qualunque tipi: ON, OPP e flash

in linea. L'adozione del modello LCC prevede che al momento dell'offerta il costruttore del veicolo si impegni a specificare un piano di manutenzione per il proprio mezzo sia dal punto di vista tecnico sia per l'impatto economico, specificando e quantificando il costo euro/km da sostenere.

Con la metodologia LCC se un costruttore per non rischiare dichiara costi di manutenzione molto elevati dovrà riconoscere uno sconto maggiore sul prezzo d'acquisto per vendere il lotto di veicoli. Oppure se l'intervallo temporale di

Specifiche per la fornitura di n. 6 autobus lunghezza massima 6,5 metri alimentazione a batteria (commessa 01/08)												
SCHEDA n° 7.2./B		PARTE TECNICA - MANUTENZIONE										pag 1/1
TIPO AUTOBUS												
PARAGR. DI RIF.	OGGETTO	ANNI										COSTO TOTALE
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
7.3.2.	** MANUTENZIONE programmata (MDO)	534	569	653	569	473	860	569	473	750	473	5923
	** MANUTENZIONE programmata (MAT)	418	628	418	628	418	1046	628	418	628	418	5648
7.3.3.	*Sostituzione parti principali (MDO)	44	184	306	306	44	490	306	306	184	44	2214
	*Sostituzione parti principali (MAT)	206	1006	1686	3296	206	2692	3296	1686	1006	206	15286
7.3.4.	Manutenzione correttiva (MDO + MAT)			2500	2500	2500	3000	3000	3000	3500	3500	23500
<b>TOTALE PARTE TECNICA</b>		<b>1202</b>	<b>2387</b>	<b>5563</b>	<b>7299</b>	<b>3641</b>	<b>8088</b>	<b>7799</b>	<b>5883</b>	<b>6068</b>	<b>4641</b>	<b>52571</b>
MO = Mano d'opera (costo orario pari a 35 Euro/Ora)						MAT = Materiali						
** Costo riferito all'esecuzione del piano di manutenzione periodica del fornitore, allegato all'offerta (schede 7.3.2/a e 7.3.2./b)												
* Costo riferito alla percorrenza dichiarata dal fornitore per i complessivi riportati nella lista parti principali (scheda 7.3.3.)												

Figura 3.75 Scheda di riepilogo Costi manutentivi LCC

manutenzione è troppo ampio, e quindi le parti non riescono a raggiungere la percorrenza dichiarata in offerta, con il modello LCC sarà il costruttore a pagare l'effettuazione più ravvicinata della manutenzione.

Considerando quindi l'approccio LCC nelle schede tecniche vengono specificate le voci di costo annuali previste per le diverse operazioni di manutenzione (programmata, sostituzioni parti principali e ricambi minori), suddivise per manodopera e ricambi, come mostra la figura n°3.75. Al fine di arrivare a dimostrare i risultati ottenuti è stato necessario creare un database di dati (schede tecniche fornite in fase di gare ed estrazione dati reali dal sistema informativo della manutenzione aziendale di operatori TPL) relativi ai contratti dei lotti di veicoli con alimentazione Diesel, CNG, ibridi diesel/elettrico, Filobus, elettrico batterie plug-in, elettrico con pantografo. Successivamente sono stati utilizzati per le analisi relative ai costi di

manutenzione e interpretazione delle rette di regressione lineare costruite entrando con determinati parametri nel grafico di dispersione al fine d'intercettare risultati significativi dal punto di vista scientifico.

Sono stati creati fogli di lavoro excel per poter analizzare i dati più rilevanti. Per ogni lotto si è specificato la data di immatricolazione, il costruttore, la lunghezza, la tipologia di servizio (urbano, interurbano, suburbano), la modalità di alimentazione. In questa prima parte del lavoro si è analizzata l'incidenza della manodopera nei costi di gestione della manutenzione, in contrapposizione all'apporto dovuto ai prezzi dei ricambi. Pertanto sono stati raccolti i dati di manodopera complessivi (dovuti sia alla manutenzione programmata, che a quella correttiva) per ciascun lotto. Analogamente si sono raccolte le medesime informazioni per i relativi costi dei ricambi.

Si sono confrontati il costo totale della manodopera con il costo da sostenere per i ricambi e si è valutato il rapporto complessivo, attraverso un'interpolazione lineare tra i punti ottenuti per i casi considerati. Si riporta il grafico (figura n°3.76), che esplica i risultati ottenuti.

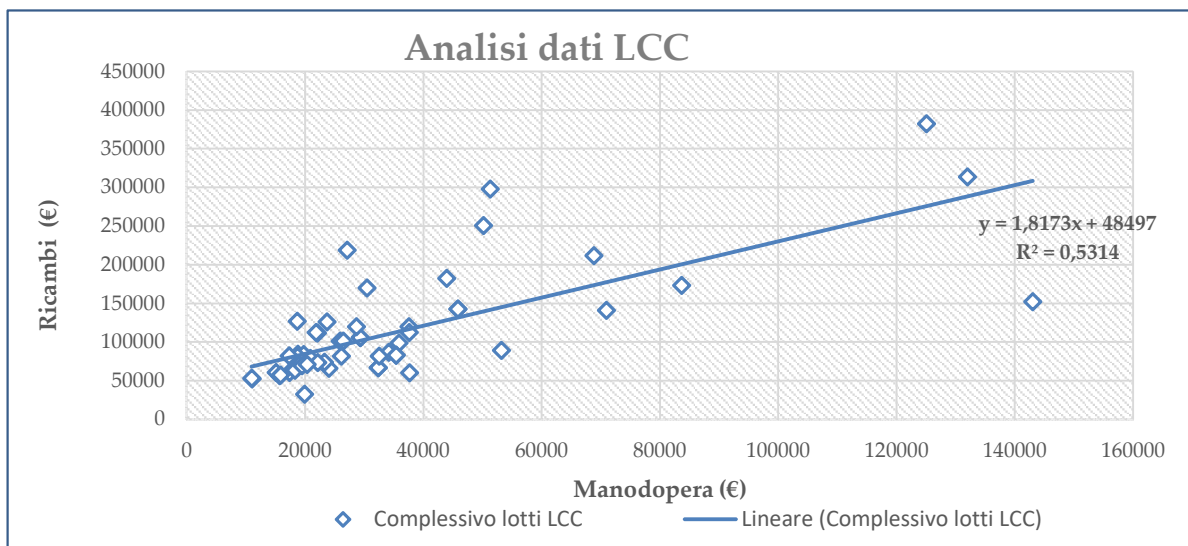


Figura 3.76: Regressione lineare dei dati LCC indipendentemente dal sistema di trazione. Dai risultati emerge chiaramente come i costi dei ricambi siano superiori a quelli della manodopera a sottolineare un'impostazione sempre più *spare part intensive* da parte del costruttore indipendentemente dal sistema di trazione utilizzato.

I valori delle grandezze di cui sopra sono dichiarati e garantiti dal costruttore, perciò, definiti formalmente a livello di contratto che stabilisce i rapporti tra le parti anche attraverso meccanismi di penalità.

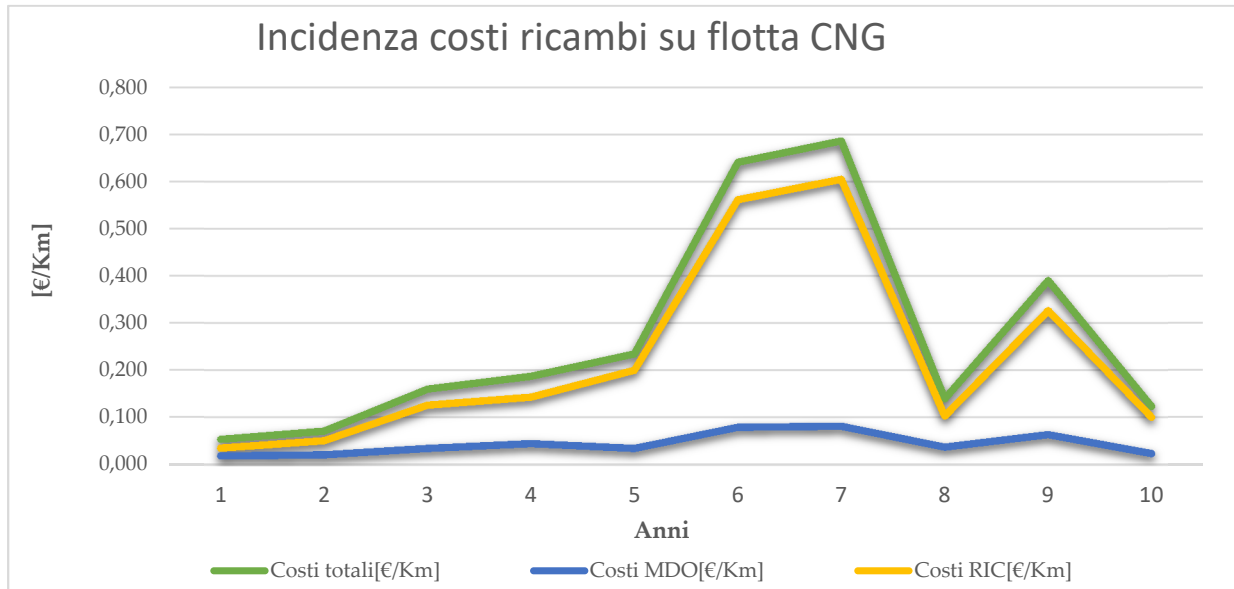


Figura 3.77: Incidenza dei costi dei ricambi su flotta CNG

Nella figura n°3.77 si riporta l'incidenza dei ricambi nei dieci anni di contratto LCC per una flotta di autobus CNG. Si osserva come l'andamento nel tempo dei costi di manodopera (MDO) sia significativamente inferiore rispetto a quello dei costi dei ricambi (RIC) e conseguentemente per i costi totali. Tale rappresentazione è coerente con quanto sperimentato con l'analisi d'incidenza dei costi dei ricambi sui costi totali che pesano per il 69.7%.

Si sottolinea inoltre che il picco di spesa per i ricambi non si verifica per un anno solamente, ma bensì per due anni consecutivi, ossia il VI e il VII e si rileva una coincidenza delle due curve nell'anno VII, causata dal fatto che il costruttore ipotizza guasti per la Sostituzione Parti Principali (RIC) di bassa entità in corrispondenza del VII anno di vita utile della flotta.

Al fine di verificare l'affidabilità del metodo LCC sui sistemi di trazione maturi di cui sopra e poterlo estendere anche alle nuove tecnologie a basso impatto ambientale supportando tecnicamente l'operatore TPL, si è eseguita un'ulteriore analisi sulle percorrenze delle parti principali dei veicoli della flotta sottoposti ad analisi LCC. Nello specifico si sono confrontate, e quindi valutate le differenze, tra le percorrenze

dichiarate in fase di gara e quelle realmente verificatesi nel corso degli anni.

I dati sono stati assunti a partire da tabelle presenti nel database, dove venivano specificate per ciascuna parte principale (definite da contratto), le percorrenze effettive di ciascun autobus e i valori corrispettivi che si sarebbero dovuti raggiungere.

Per ogni singola parte principale si sono ricavati i valori medi per ciascun lotto (batteria plug in, diesel, CNG, filobus, diesel ibrid) e se ne è valutato il

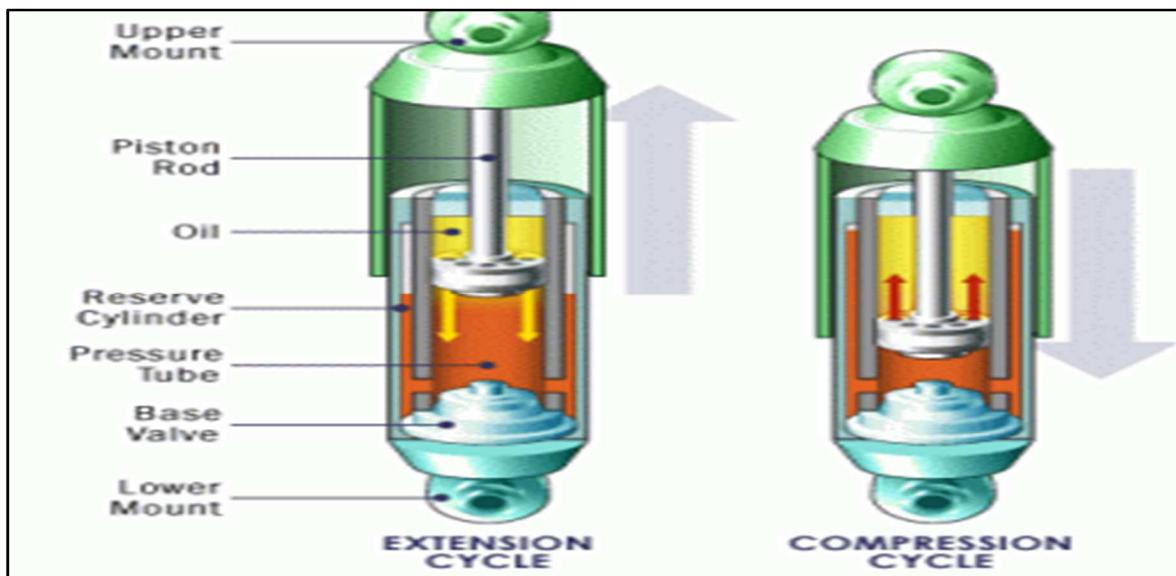


Figura 3.78 How Front suspensions work

comportamento. Il primo componente esaminato è l'ammortizzatore anteriore di cui si riporta in figura n° 3.78 il principio di funzionamento.

Riportiamo per brevità i grafici ottenuti per gli ammortizzatori del I° asse, dell'intercooler e del compressore impianto pneumatico. Si è generalmente verificata un'alta discrepanza tra le percorrenze dichiarate dal costruttore e quelle realmente soddisfatte. Indipendentemente dal sistema di trazione sopra riportato si evidenzia che nel caso degli ammortizzatori del 1° asse PME=PMC solo in un punto coincidente

con un lotto di fornitura autobus (figura n°3.79).

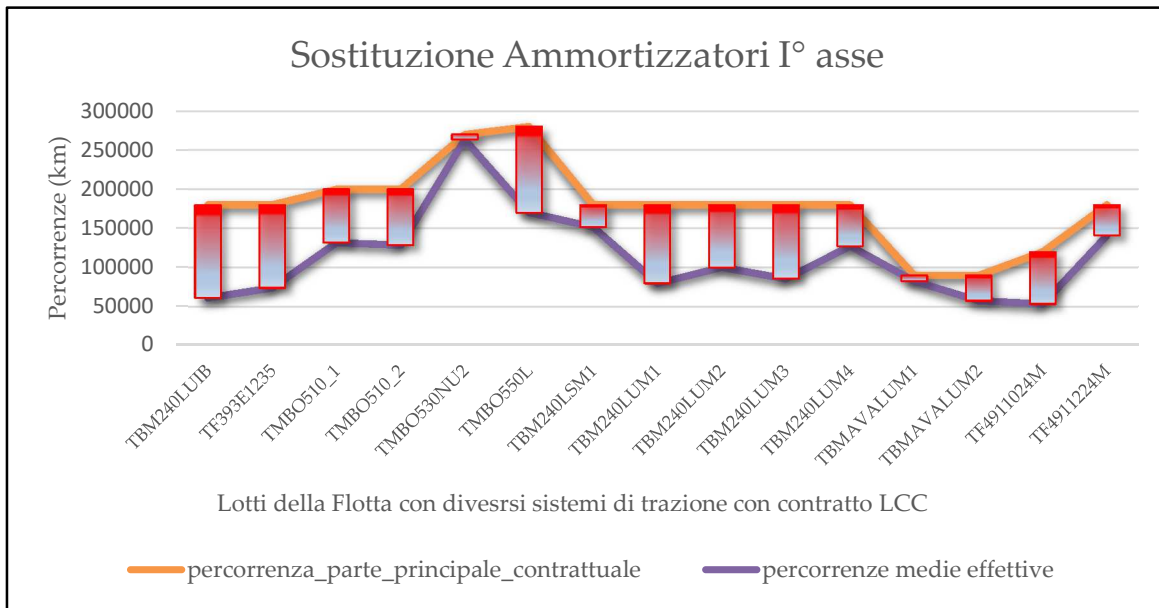


Figura 3.79: Verifica percorrenza ammortizzatori 1° asse per i diversi sistemi di trazione

Riportando il rapporto tra chilometri previsti e reali per tutti i veicoli e valutando la regressione lineare per individuarne l'andamento emerge la conferma del forte distacco tra ciò che viene previsto dai costruttori in fase di gara e i guasti che poi si realizzano durante la circolazione dei mezzi (vedasi figura n°3.80).

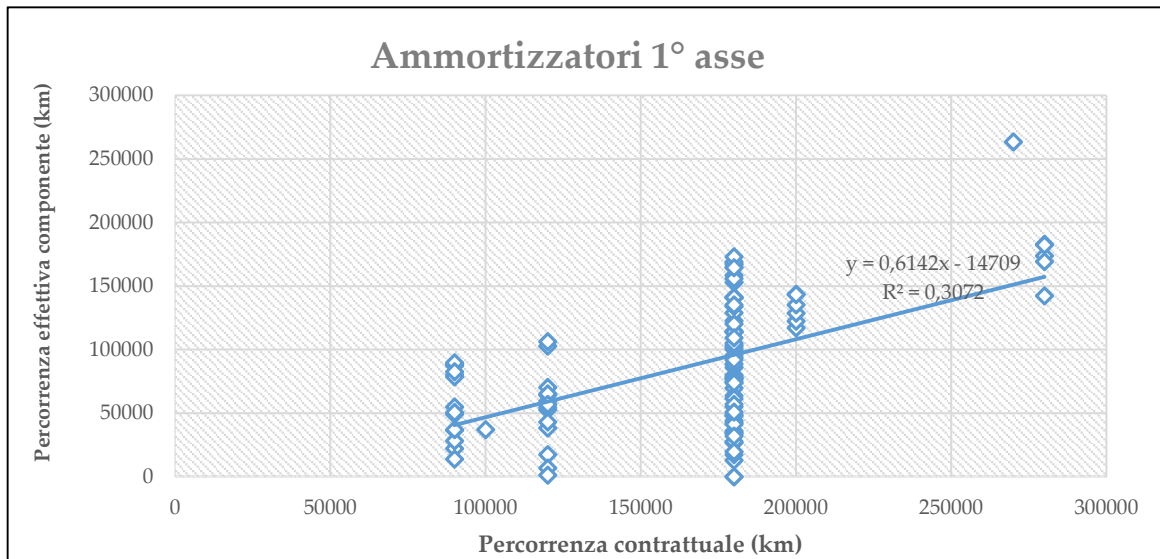


Figura 3.80: Regressione lineare della percorrenza effettiva Ammortizzatori I° Asse

Inoltre all'aumentare della percorrenza dichiarata corrisponde un aumento della media della percorrenza effettiva del componente. Come vedremo in seguito questo accade per i componenti di autobus maturi tecnologicamente e già sottoposti a valutazione LCC da anni. Procediamo con l'analisi di un altro componente di cui



viene schematizzato il funzionamento in figura n°3.81. I dati manutentivi confermano appieno la tendenza appena detta.

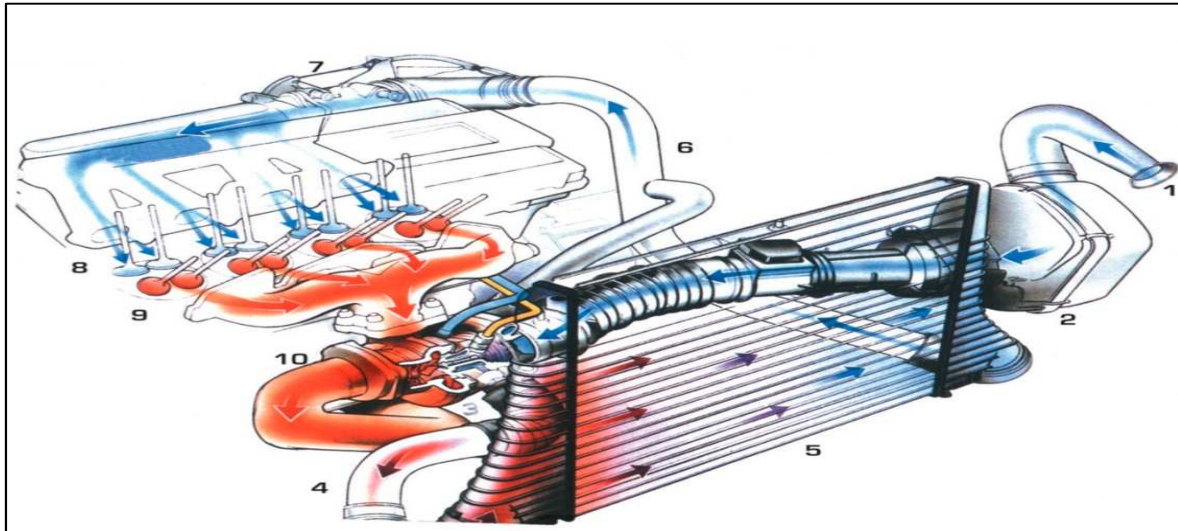


Figura 3.81: How the intercooler works

Sulla figura n°3.83 riportiamo l'andamento della regressione lineare che conferma l'andamento finora osservato in cui all'aumento della percorrenza dichiarata corrisponde l'aumento della media delle percorrenze effettive del componente Intercooler.

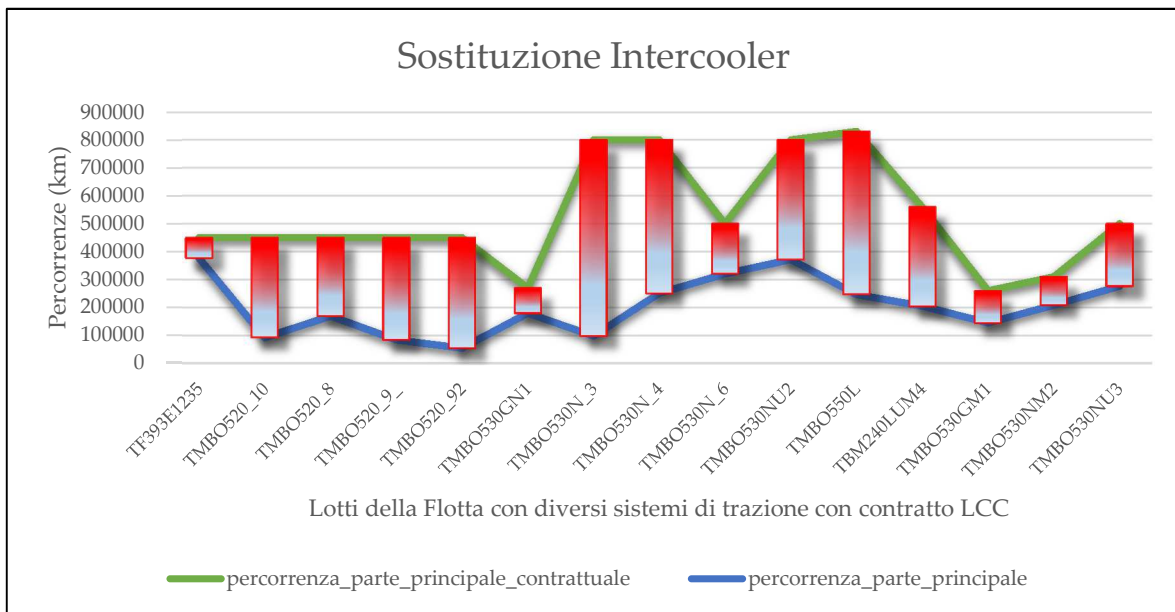


Figura 3.82 Verifica percorrenza intercooler per i diversi sistemi di trazione

Passiamo ora all'analisi dell'ultimo componente – Compressore aria impianto pneumatico – riportato nella figura n°3.84.

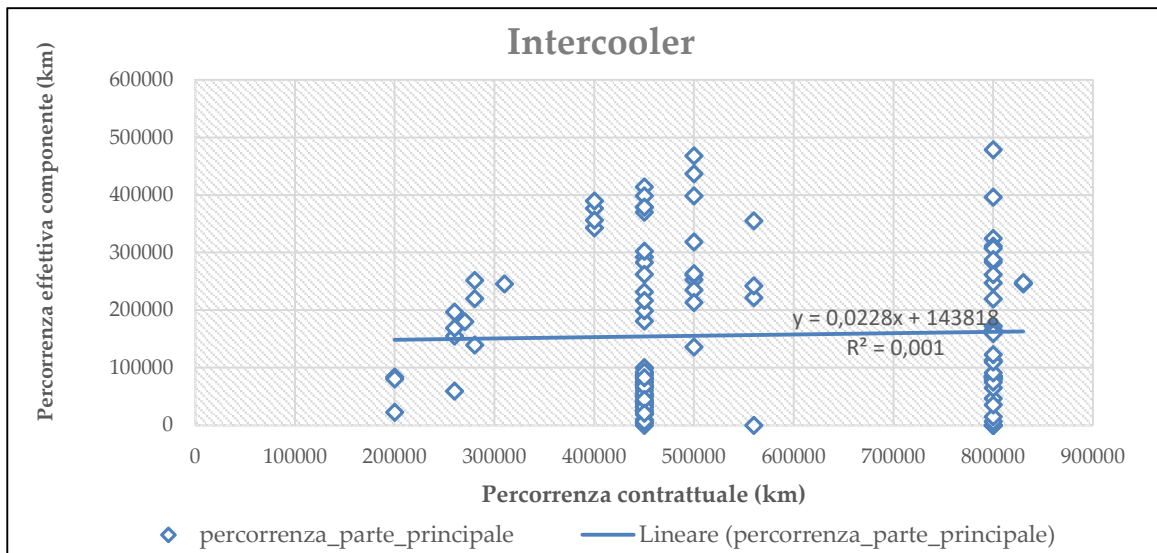


Figura 3.83 Regressione lineare della percorrenza effettiva intercooler

L'analisi delle sostituzioni di questo componente evidenzia come le tecnologie non mature possono causare costi elevati di manutenzione o addirittura la non fruibilità del prodotto.

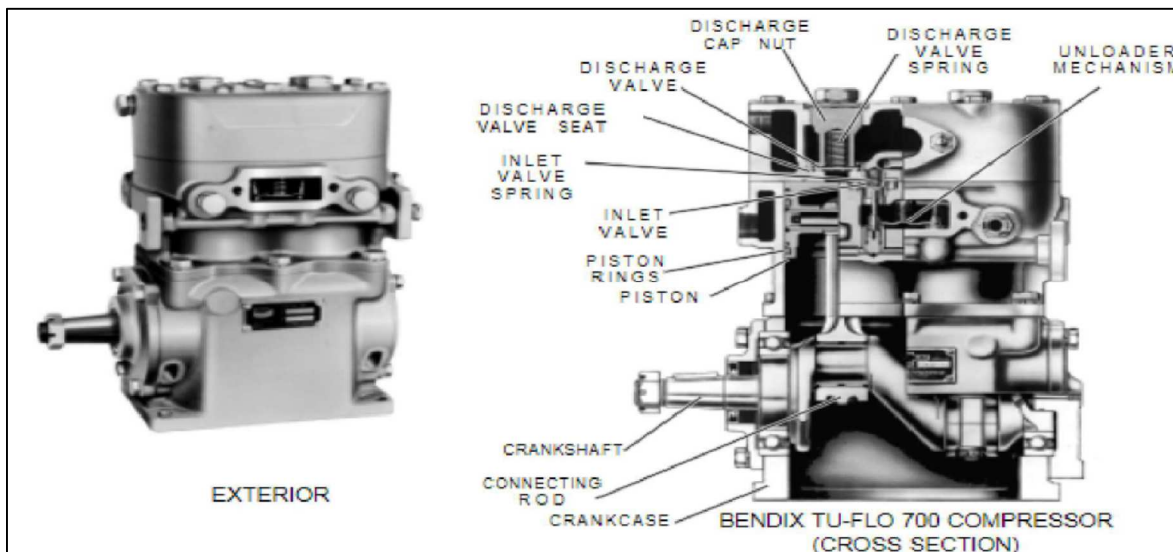


Figura 3.84 How the air compressor works

Sugli autobus/filobus meno impattanti dal punto di vista ambientale vi sono dei componenti che non raggiungono la percorrenza contrattuale prevista e addirittura invertono la tendenza della retta di regressione lineare ottenendo che all'aumentare della percorrenza dichiarata contrattualmente si verifica una riduzione delle

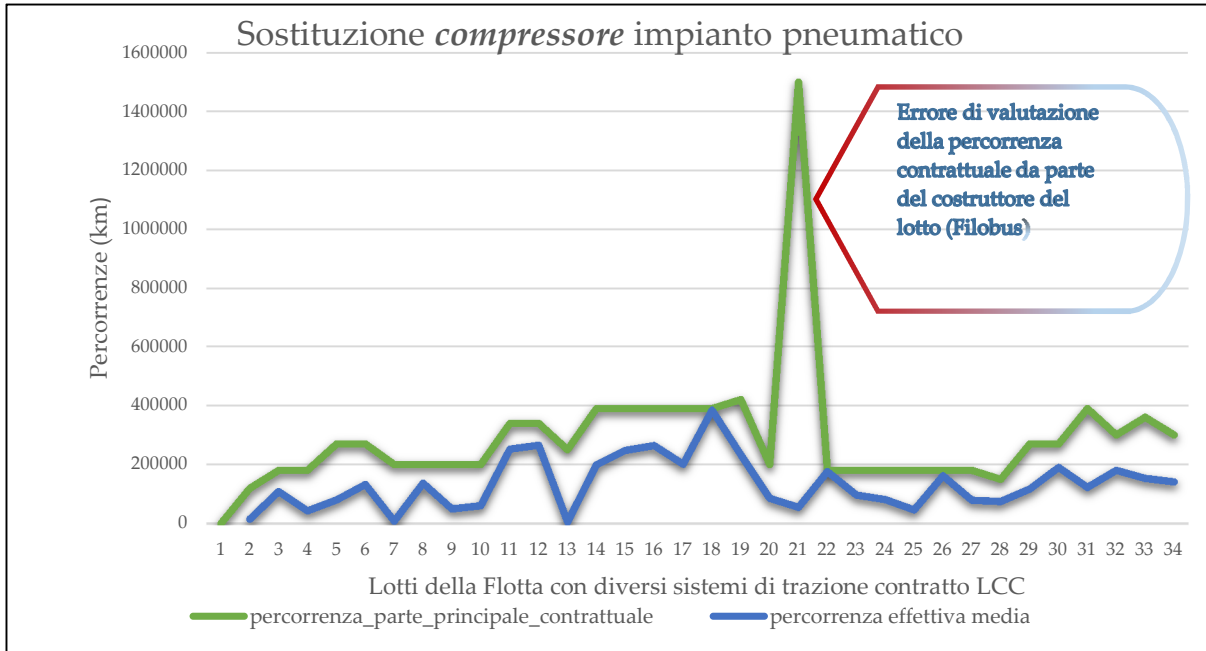


Figura 3.85: Dato di percorrenza contrattuale errato in fase di progetto

percorrenze reali. In figura n°3.85 e n°3.86 sono mostrati i risultati ottenuti per il compressore impianto pneumatico del filobus e per il generatore di trazione elettrico.

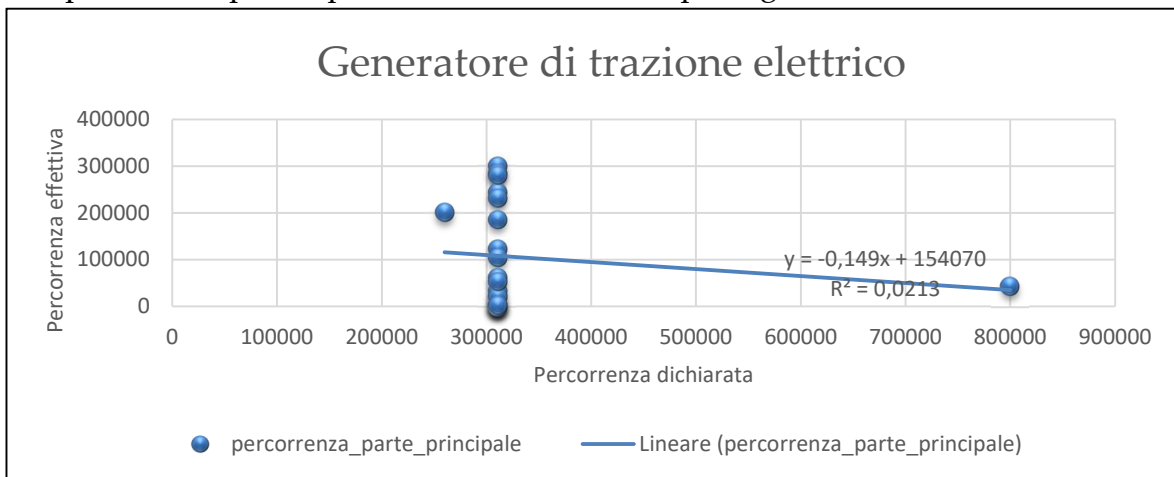


Figura 3.86: Regressione lineare delle sostituzioni del generatore di trazione

In questo studio è stato possibile osservare come il Metodo LCC consente la standardizzazione dei costi manutentivi per tutti gli autobus che si trovano nel punto più alto della curva di maturità del prodotto che si riporta di seguito. Tale approccio è l'unico che consente agli stakeholder del settore che si trovano nella zona "A" di portare a maturazione una tecnologia che consenta di ridurre sempre più l'impatto ambientale dei mezzi costituenti le flotte per il TPL (figura 3.87).

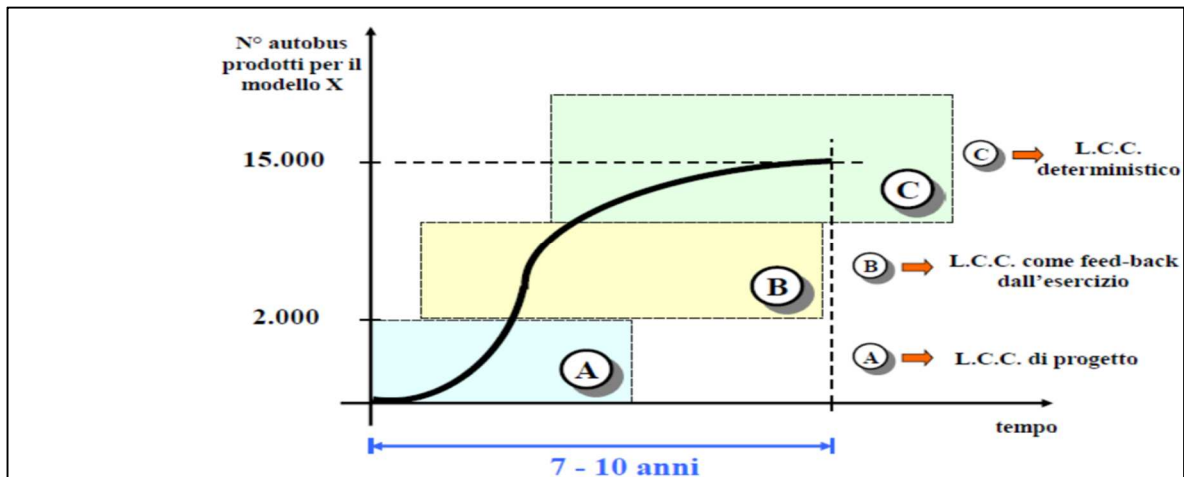


Figura 3.87 Fasi di sviluppo del metodo LCC nel tempo

In considerazione che la sostenibilità ambientale si realizza con sistemi e quindi con infrastrutture come schematizzato in figura n°3.74 è opportuno valutare ed integrare i costi manutentivi come segue:

$$LCC = (SMC_{bus} + UMC_{bus}) + (SMC_i + UMC_i) \quad (2)$$

Where:

SMC<sub>bus</sub> – Scheduled Maintenance Cost autobus;

UMC<sub>bus</sub> – Unscheduled Maintenance Cost autobus;

SMC<sub>i</sub> – Scheduled Maintenance Cost infrastructure

UMC<sub>i</sub> – Unscheduled Maintenance Cost infrastructure;

Per gli altri sistemi di trazione a basso impatto ambientale tra cui le fuel Cell, l'elettrico, l'LNG per i quali non si è ancora raggiunto una maturità tecnologica avanzata e che è stata finora utilizzata solo attraverso l'introduzione di progetti pilota spesso spiaggiati, l'LCC rappresenta un supporto per un corretto inserimento in

servizio di questi autobus.

Questo approccio è utile anche al costruttore che altrimenti si trova ad affrontare degli errori di valutazione che impattano negativamente sulla buona riuscita del progetto. La totale adesione dell'operatore al piano di manutenzione del costruttore PMC del veicolo, adesione che costituisce il cardine dell'L.C.C., è qui un punto di arrivo e di partenza per l'organizzazione della manutenzione.

Punto di arrivo nel senso che una organizzazione che adotta la metodologia L.C.C. deve far coincidere i propri piani di manutenzione in modo integrale con quelli del costruttore realizzando, in questo modo, l'equazione  $PME=PMC$ . Punto di partenza poiché un'organizzazione che opera ancora secondo questa metodologia dovrà tendere a questo risultato. L'organizzazione che adotta ancora il suo PME, diverso da quello PMC, non potrà mettere in tensione eventuali errori nel PMC e pagherà le conseguenze senza poter retroagire. L'organizzazione che adotta il PMC, se trova errori e riesce a formalizzarli, grazie alle competenze al suo interno, in cicli di lavorazione, svilupperà il piano PMC a costi sostenuti dal costruttore.

La regressione lineare dei dati LCC e i relativi grafici che riportano i rapporti tra le due percorrenze: avendo in ordinata i km dichiarati e in ascissa i km medi effettivi ci ha consentito di capire l'andamento delle sostituzioni delle parti principali in funzione dei chilometri percorsi. All'aumentare del chilometraggio dichiarato corrisponde un aumento anche del chilometraggio effettivo prima di arrivare a sostituzione o viceversa.

Dalle analisi dei dati sopra possiamo concludere che la linea di tendenza ha un andamento crescente per i componenti di bus tecnologicamente maturi mentre per i componenti di autobus con tecnologie innovative si nota una linea di tendenza decrescente che sta a significare che la percorrenza dichiarata dal costruttore non è ancora raggiunta in fase di esercizio. Pertanto la metodologia LCC rimane l'unica garanzia per l'esercente il TPL al fine di una maturazione del prodotto autobus e sostenere costi certi qualora si è costretti all'inserimento in flotta di sistemi di trasporto sostenibili.

I costi manutentivi hanno un andamento prevedibile solo sulla base del metodo del L.C.C.. Nella successiva figura n°3.88 si confronta il risultato delle analisi dei dati dei costi manutentivi dei sistemi di trazione ibrido, metano Euro VI, Diesel Euro VI, Elettrico con pantografo, filobus, elettrico plug-in. La diminuzione dell'impatto ambientale dei sistemi di trazione per il TPL comporta un aumento dell'innovazione tecnologica e dei relativi costi per la manutenzione.

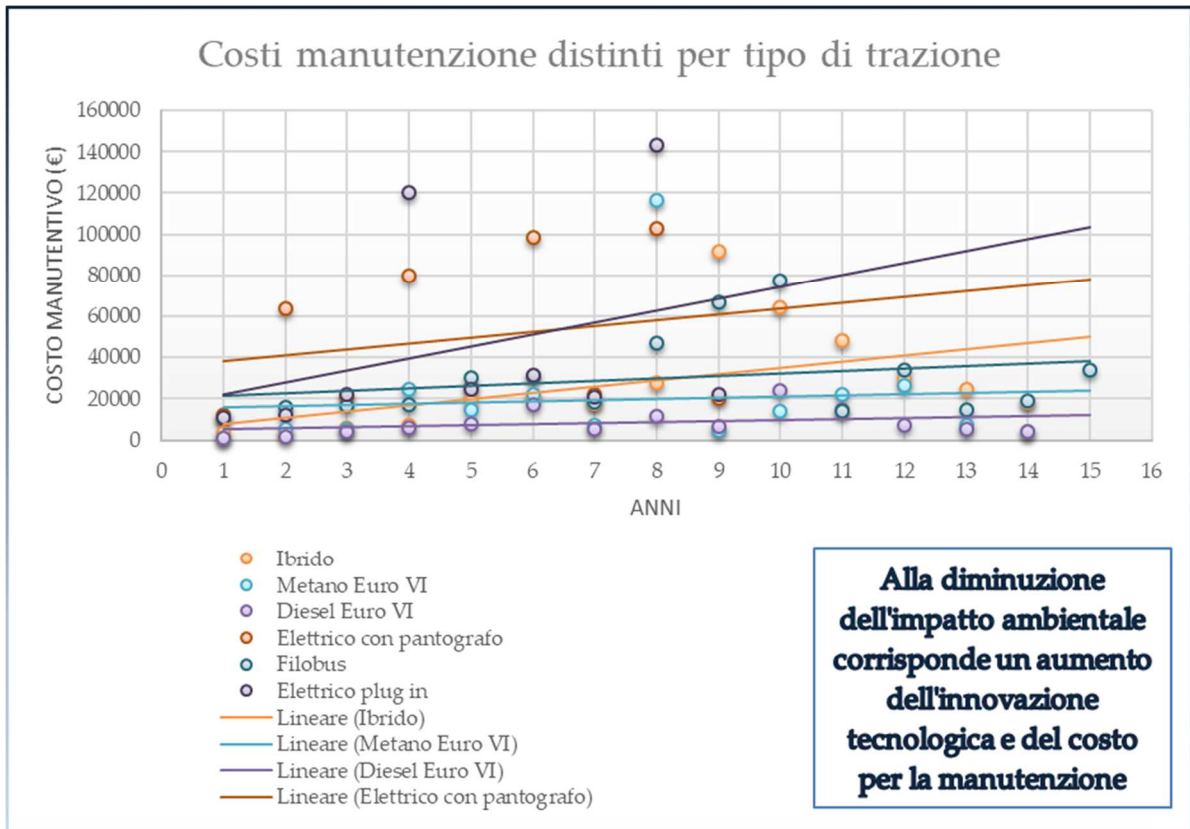


Figura 3.88 I costi di manutenzione dei diversi sistemi di trazione

I risultati dell'analisi numerica dei dati LCC di flotte di autobus sottoposti a vincolo LCC dimostrano di essere sempre più Spare Parts Intensive. Come mostrato nei grafici sopra la sostituzione dei componenti per i sistemi di trazione più maturi avviene tendenzialmente vicina a quella dichiarata dal costruttore. I componenti degli autobus più innovativi tecnologicamente per consentire di pari passo una riduzione del loro impatto ambientale dimostrano invece di essere lontani dalla percorrenza "pensata" in fase di progetto e che risulterà essere determinante in fase di esercizio con i conseguenti costi per l'operatore di TPL.

Il rischio tecnologico legato all'inserimento di sistemi di trazione a basso impatto

ambientale deve essere contenuto dall'applicazione della metodologia LCC al fine di standardizzare i costi e permettere al costruttore di far maturare tecnologicamente il prodotto.

### 3.3 Targets a breve e lungo termine

Con una durata media di circa 12 anni, gli autobus che sono acquistati oggi rimarranno in esercizio almeno fino al 2030. Pertanto, se gli obiettivi dell'UE 2020 e 2050 devono essere raggiunti, le modifiche alla propria flotta devono essere fatte adesso. Questo è un compito molto arduo in quanto i limiti finanziari di oggi devono essere combinati con una visione a lungo termine delle città europee a zero emissioni. Le valutazioni costo/efficienza devono considerare lo sviluppo futuro dell'approvvigionamento di petrolio le nuove tendenze in ambito normativo e i grandi cambiamenti di tecnologia dei bus.

Nelle attuali condizioni economiche, due principali criteri vengono seguiti per decidere quale sistema di trazione sviluppare e cioè i costi e le emissioni di GHG.

Gli autobus diesel hanno un costo di acquisto e un TCO relativamente basso. Offrono un'alta flessibilità percorso e beneficiano della disponibilità a livello europeo di una buona diffusione delle infrastrutture di rifornimento. Efficienza, costi di manutenzione e di esercizio sono prevedibili, così come il valore residuo sul mercato dell'usato. Gli autobus a gas naturale sono prontamente disponibili sul mercato, ma il prezzo d'acquisto è di circa 30.000 € superiore a quello del bus diesel. Inoltre, richiedono stazioni di rifornimento relativamente costose di circa 1 milione di euro (per una flotta di 100 autobus ammontano a circa 10.000 euro per bus). Le tecnologie ZEV rivelano che gli autobus elettrici completi sono attualmente due volte più costosi degli autobus diesel standard (400.000 e 500.000 euro). In più ci sono limitazioni di autonomia e poca esperienza con i costi di manutenzione durante il loro ciclo di vita. Gli autobus Hydrogen fuel cell sono in vendita ma non sono ancora tecnologicamente maturi e sviluppati. Sono stati realizzati solo piccoli progetti pilota con costi di acquisto al momento alti (800.000 € euro o più).

In questo momento i TCO degli autobus elettrici e ad idrogeno sono almeno due volte più costosi di quello degli autobus diesel standard. Le emissioni inquinanti non sono più una dei principali criteri di selezione dei nuovi autobus, poiché anche gli autobus diesel Euro VI hanno emissioni inquinanti molto basse di NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> e particolato. Nel lungo termine, i principali criteri di selezione dovrebbero essere le emissioni di CO<sub>2</sub> e il consumo energetico così come la possibilità di utilizzare combustibili rinnovabili (biocarburanti o rinnovabili elettricità) e di origine BIO.

Gli autobus alimentati con biocarburanti rappresentano un buon mercato in alternativa agli autobus diesel, riducendo i livelli di emissioni di CO<sub>2</sub> quasi della metà rispetto al diesel Euro V e Euro VI di origine fossile. Il livello di emissioni locali possono essere ridotte a seconda del tipo e della miscela di biocarburanti utilizzati.

In generale, i biocarburanti di seconda generazione (HVO) mostrano livelli di emissioni basse, ma il loro prezzo d'acquisto è sostanzialmente superiore al gasolio normale. Il biodiesel è spesso usato in miscele con il diesel di origine fossile, come B30 (30% biodiesel in diesel) o HVO30 (30% HVO in diesel). La possibilità di utilizzare miscele di B7 (7% biodiesel o FAME) o di HVO30 dovrebbe essere nello specifico verificata con il costruttore dell'autobus in quanto vi potrebbero essere alcune restrizioni di carattere tecnico/giuridico. Talvolta alcune piccole modifiche tecniche o modifiche ai piani di manutenzione potrebbero essere necessari. L'infrastruttura di rifornimento del diesel può essere facilmente adattata ed a basso costo per il rifornimento di autobus con biocarburanti.

Gli autobus elettrici, a seconda dell'origine dell'energia elettrica, producono almeno il 50% in meno di CO<sub>2</sub> rispetto agli autobus diesel e non hanno emissioni inquinanti locali. Come la qualità del mix della grid elettrica migliorerà in Europa, l'alimentazione dei motori elettrici dei bus diventerà automaticamente più pulita. Nel contempo, questi bus sono limitati nell'autonomia di esercizio: i filobus sono limitati dalla loro rete e gli autobus elettrici dall'infrastruttura di ricarica al fine di eseguire ricariche di opportunità. Attualmente questi autobus rappresentano l'opzione più costosa con un costo elevato degli investimenti relativi all'infrastruttura di ricarica e/o



della rete aerea. Nelle città in cui l'infrastruttura di alimentazione dei filobus è già esistente, l'utilizzo e l'ulteriore sviluppo di queste reti è considerato l'opzione più sostenibile ed efficiente dal punto di vista energetico.

Gli autobus ibridi diesel mostrano un costo di acquisto leggermente superiore normali autobus diesel, ma possono ridurre le emissioni di GHG solo fino al 20%. Possono inoltre offrire una interessante tecnologia di bridging per il medio termine. Infine, gli autobus a celle a combustibile ad idrogeno rappresentano una vera promessa tecnologica, ma sono attualmente in fase sperimentale.

A seconda delle fonti di produzione di idrogeno si possono ridurre le emissioni di gas serra fino al 70%. Questi autobus non rappresentano ancora una tecnologia matura e sono attualmente più costosi e richiedono investimenti elevati in infrastrutture. Per soddisfare la direttiva UE 2050 sulle energie rinnovabili e gli obiettivi sulla qualità dei carburanti, è necessario convertire una parte della flotta di veicoli su biocarburanti come il biodiesel, il biogas, il bioetanolo o l'elettricità da fonti rinnovabili. Il biodiesel di prima generazione (FAME) è già miscelato con il gasolio fino al 7% (limite di miscelazione in volume). I volumi di miscelazione più elevati non sono possibili perché sono non compatibili con molti veicoli (in particolare le automobili).

La tecnologia degli autobus BNG e CNG è la stessa, purché il biogas sia della stessa qualità del gas naturale (necessario dal punto di vista della standardizzazione dei carburanti e della manutenzione). Anche gli autobus alimentati con il bioetanolo sono un'opzione, anche se attualmente soltanto un fornitore (Scania) fornisce questa tecnologia. Un altro modo di contribuire agli obiettivi UE è rappresentato dall'installazione di una driveline ibrida (elettrico). Questa può essere combinata con tutti motori a combustione come diesel, gas ed etanolo e può ridurre il consumo di carburante (e emissioni di CO<sub>2</sub>) fino a circa il 20%.

L'introduzione su larga scala di tecnologie con emissioni di CO<sub>2</sub> estremamente basse è necessaria dal 2030 in poi per costruire una flotta completa di questi Technologies al 2050. Queste non sono attualmente ampiamente disponibili, ma è molto importante

conoscerle per iniziare la costruzione di progetti pilota seguiti con il metodo del Life cycle cost. Se i produttori vedono un mercato emergente, allora i fondi per la ricerca e sviluppo saranno disponibili e si tradurranno in migliori e più efficienti progetti e con costi molto più bassi rispetto al periodo attuale. È importante sottolineare che questi sono processi lunghi e che possono facilmente abbracciare diversi decenni.

Per soddisfare gli obiettivi dell'UE nel 2050 di riduzione di GHG, è meglio optare per le tecnologie con più basso (well-to-wheel) consumo energetico e che offrono buone opportunità di utilizzo di combustibili rinnovabili. Volendo applicare questo concetto al mondo degli autobus, significherebbe avere tutti autobus elettrici, e nel tempo forse anche Hydrogen fuel cell. Ciò è dovuto al comportamento di guida dinamico di questi bus, dove il sistema di ricarica in frenata permette di ottenere il recupero di energia in frenata ed alte efficienze energetiche. L'elettricità e anche H<sub>2</sub> possono essere prodotti in modo rinnovabile con energia solare ed eolica. Potrebbero anche essere prodotte da biomassa, ma per il lungo termine, è molto meglio usare la biomassa per produrre biocarburanti liquidi. Questi ultimi possono essere utilizzati in applicazioni dove il combustibile liquido è l'unica opzione pratica (linee a lungo raggio extraurbane).

### 3.4 Influenza della pendenza del tracciato

Oltre al metodo d'analisi riportato in questo capitolo ci si è resi conto che per definire il sistema di trazione corretto da impiegare su una linea, attraverso il metodo LCC è necessario procedere con una progettazione ad hoc del servizio che ci consentisse di utilizzare al meglio le caratteristiche tecniche di ogni sistema di trazione.

Al fine di avere una casistica più esaustiva sui dati di manutenzione procediamo a fare alcune considerazioni sul tipo di percorso effettuato cercando di capire come la pendenza del tracciato influisce su di essi.

Per raggiungere il risultato sono stati individuati due macro tipologie possibili di viaggio:

- Urbani a pendenza quasi nulla: appartengono a questa tipologia di percorso le strade dell'ambito urbano che non presentano dislivelli da superare. Per cui vi

saranno velocità massimo nell'ordine dei 60 km/h e tratti a velocità nulla, dovuti, ad esempio, alla presenza di intersezioni semaforiche o di forte traffico. Lavorando, spesso, a basse velocità.

- A dente di sega: appartengono a questa tipologia i percorsi eseguiti mischiando tratti urbani a tratti extraurbani, con continui tratti di accelerazione seguiti da sequenze deceleranti. Si avranno, quindi, valori elevati di accelerazioni per lunghi periodi, che comporteranno una elevata varianza dei valori istantanei di velocità dovuti anche a cambi di pendenza del tracciato.

Ricordando che la pendenza "i" rappresenta il rapporto numerico tra le misure dell'innalzamento (verticale) e l'avanzamento (orizzontale), un veicolo che si muove lungo una traiettoria in pendenza è sottoposto ad una resistenza addizionale  $R_p$  che può essere negativa se si oppone al moto, il che accade in salita, o positiva se favorisce il moto, il che accade in discesa (figura 3.89). Quindi questa resistenza (ed è l'unico caso) non è sempre negativa, perché non è di origine dissipativa, bensì energetica del campo gravitazionale. Infatti essa dipende dalla forza peso ed il lavoro che essa fa compiere nel moto in salita è pari alla variazione di energia potenziale che si verifica nello stesso tempo.

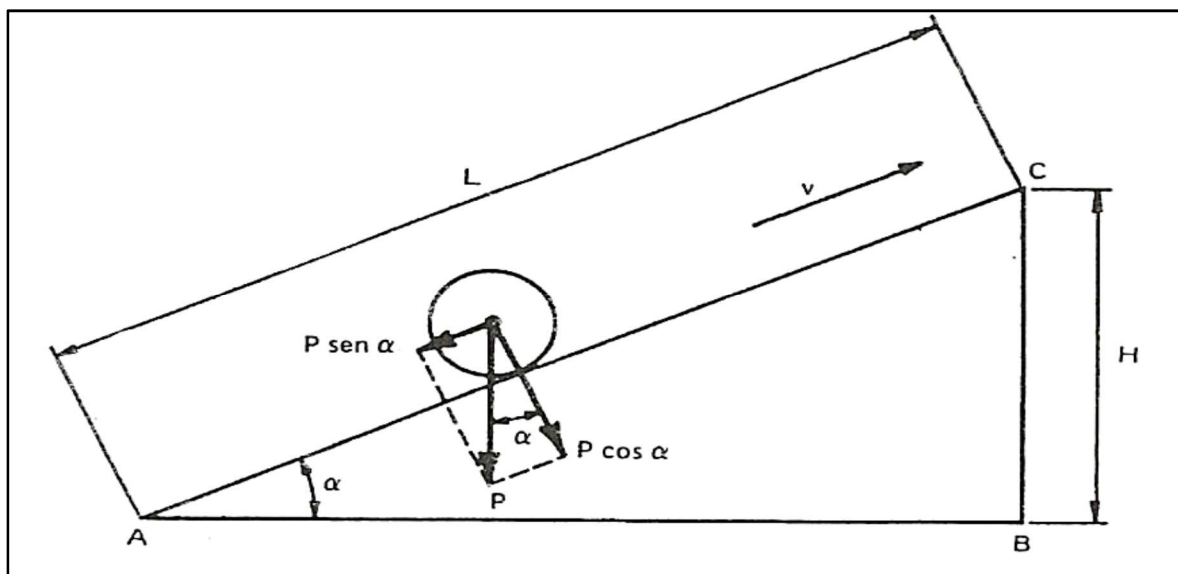


Figura 3.89: Resistenza alla pendenza

$$R_p = P \cdot \sin(\alpha)$$

$$\text{Lavoro} = P \cdot \sin(\alpha) \cdot L = P \cdot L \cdot \sin(\alpha) = P \cdot H$$

e poiché per angoli piccoli  $\text{sen}(\alpha) \approx \text{tg}(\alpha) = i$ , allora si ricava che:

$$R_p = P \cdot i \quad (3)$$

dove  $i$  rappresenta la pendenza espressa in % su strada (per cui è data in 10 N/KN).

Si può dedurre che la cosiddetta resistenza alla pendenza  $R_p$ , negativa in salita e positiva in discesa, può interessare solo come maggiore prestazione richiesta dal motore se si vuole mantenere inalterata la velocità dall'orizzontale alla salita. Vengono invece maggiormente sollecitati tutti gli organi della catena cinematica, dell'impianto frenante, dello sterzo e degli pneumatici (vedi figura 3.91).

Infatti, secondo il principio di conservazione dell'energia, l'energia potenziale dovrebbe essere dissipata durante la discesa, a causa di un insieme di resistenze (di rotolamento, meccanica, di attrito dell'aria, di freno- motore) tra cui quella di frenatura. Il sistema di frenatura trasforma una parte di questa energia in calore mediante l'aderenza tra due corpi metallici. Nel caso dei veicoli pesanti, contraddistinti da elevate masse, è dunque necessario che sia trasformata in calore una quantità più elevata di energia rispetto a quella delle comuni autovetture.

Nel caso di linee con pendenze <10% da superare, l'intervallo manutentivo programmato è più corto e si verifica  $PME > PMC$ .

Al fine di avere un riscontro immediato e oggettivo su quanto appena dichiarato si sono raccolti i dati di manutenzione di un campione di autobus impiegati sulle due



*Figura 3.90: Autobus non impiegato correttamente*

tipologie di linea sopra riportate. In figura 3.90 si mostrano le condizioni d'impiego

non corrette per un autobus suburbano che comporta l'aumento dei costi di manutenzione. L'ambito urbano, invece comporta livelli di consumo più alti del normale. Questo perché ci si trova ad avanzare a velocità mediamente basse e, spesso, addirittura nulle con motore in moto.



Figura 3.91: Organi dell'autobus sollevati su linee impegnative

L'ambito urbano sollecita parimenti tutti gli organi dell'autobus comportando un costo di manutenzione di circa 1,5 volte quello che si riscontra in un ambito extra urbano.

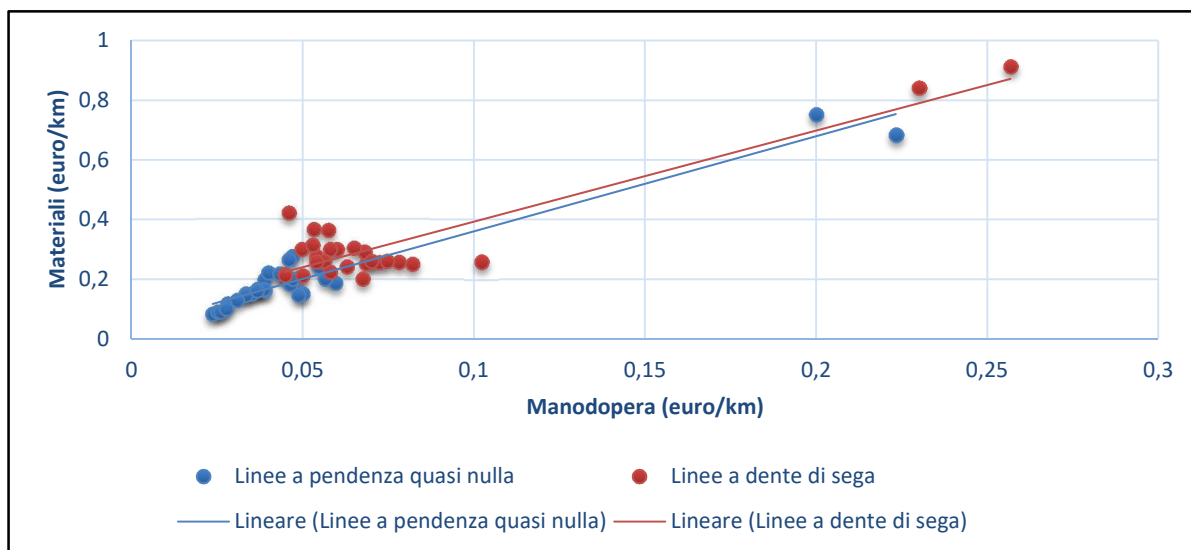


Figura 3.92: Andamento dei costi di manutenzione su linee a diversa conformazione

Al di là della valutazione iniziale dei costi di manutenzione e delle percorrenze delle

parti principali dichiarate in gara, nella programmazione delle attività manutentive se si impiegano i bus con qualsiasi sistema di trazione o tecnologia su linee con pendenze variabili è necessario ridurre l'intervallo manutentivo con conseguente aumento dei costi (figura 3.92)

## **CAPITOLO 4 II WELL-TO-WHEEL**

---

Il geologo M.K. Hubbard ha predetto nel 1956, che la produzione di petrolio negli Stati Uniti avrebbe raggiunto il picco entro i successivi 20 anni e si sarebbe poi evidenziato un declino della produzione. Le sue previsioni sono state confermate, e oggi più del 60 per cento del petrolio utilizzato negli Stati Uniti è importato. Successivamente, l'analisi di Hubbard è stata applicata alla produzione mondiale di petrolio. Sulla base delle migliori stime delle riserve totali di petrolio in tutto il mondo, si prevede che la produzione totale di petrolio raggiungerà il picco entro i prossimi 20 o 40 anni. Prima di raggiungere questo picco di domanda, è necessario trovare qualche altro carburante per il trasporto che supporti e sostituisca in modo crescente il petrolio. Sono stati studiati diversi combustibili alternativi per sostituire i carburanti primariamente usati nel trasporto merci e persone, ovvero benzina e gasolio. Le alternative principali sono riportate in figura 4.93, e sono: il gas propano (o GPL in realtà un misto di propano e butano), gas naturale compresso (CNG), idrogeno, Gasolio Fisher-Tropsch (F-T), metanolo, etanolo, ed elettricità. Questi combustibili sono derivati da altre materie prime come la biomassa, il carbone, il gas naturale, la fissione nucleare, lo stesso petrolio, e in maniera minore l'energia solare. Il gas naturale è quello che evidenzia i margini migliori di utilizzo e consumo soprattutto per il settore trattato in questa ricerca. A causa dei suoi vantaggi ambientali e la sua relativa abbondanza, il gas naturale è considerato il miglior suppletivo alla benzina e al gasolio.

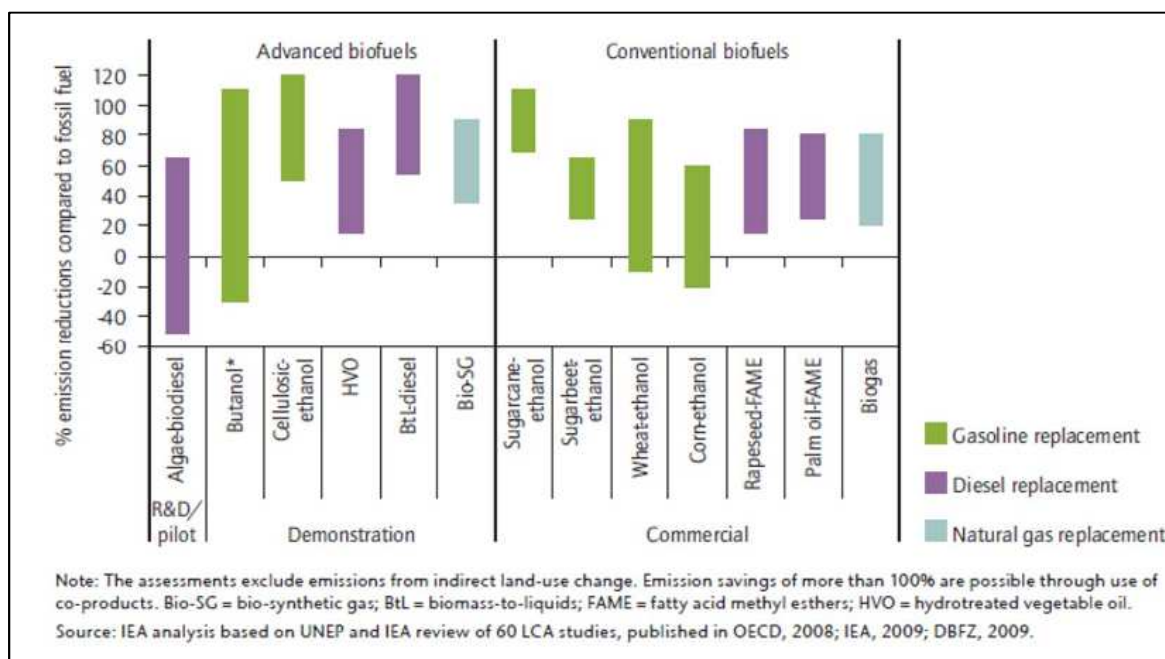


Figura 4.93 Combustibili alternativi, source IEA,2011

È già utilizzato sia in forma liquefatta sia compressa per alimentare i motori a combustione interna di veicoli in tutto il mondo ma può anche essere utilizzato come materia prima per la produzione di altri combustibili, compreso l'idrogeno, metanolo, e gasolio F-T, o per generare elettricità tramite elettrolisi.

Nel condurre l'analisi riguardo le tecnologie di trasporto alternative, è stato utilizzato il gas naturale come materia prima per ciascuna tecnologia, nonché la fonte di approvvigionamento per tutte le esigenze. In questo modo, tutte queste alternative vengono confrontate sulla base della loro efficienza rispetto alla stessa fonte di energia. Si è anche analizzata una varietà di configurazioni di motore e trasmissione. Il motore a combustione interna è, ovviamente, l'attuale standard. L'elettricità e le celle a combustibile, un'altra tecnologia, sono essenzialmente le batterie in cui l'idrogeno e l'ossigeno si combinano per generare elettricità, e questa elettricità spinge un motore elettrico che alimenta il veicolo. Poiché l'energia elettrica è generata da una reazione chimica e non termicamente, l'efficienza della cella a combustibile non è limitata dal principio di Carnot. In questi sistemi di celle a combustibile (fuel-cells) viene impiegato metanolo o idrogeno come combustibile: nel primo caso è necessario un componente che possa effettuare delle reazioni chimiche a bordo per generare idrogeno, mentre nel secondo caso si utilizza idrogeno (di solito allo stato

liquido, in un serbatoio apposito con un elevato grado di isolamento) generato direttamente ad un impianto centralizzato e liquefatto da un impianto criogenico.

Un veicolo ibrido-elettrico (o HEV, Hybrid Electric Vehicle), utilizza un piccolo motore a combustione interna in combinazione con una motore/generatore elettrico e uno o più pacchi di batterie (Il motore termico e quello elettrico possono essere disposti in serie o in parallelo; l'analisi svolta e di cui si riportano i risultati, si basa su una configurazione parallela perché questo è il modello scelto maggiormente dalle case automobilistiche). In parallelo, quindi, il motore a combustione interna e il sistema di propulsione elettrica sono direttamente collegati alla trasmissione della vettura. In entrambi i casi l'unità termica o il motore elettrico può alimentare il veicolo a parte, ma possono anche essere combinati nel caso in cui sia un'alimentazione aggiuntiva (ad esempio nelle partenze da fermo).

Poiché il motore termico del veicolo ibrido elettrico non deve fornire potenza di picco, può essere significativamente più piccolo del motore di un veicolo convenzionale della stessa potenza, e può operare sempre in prossimità o alla massima efficienza. L'energia prodotta in eccesso dal motore viene convertita in elettricità ed immagazzinata nella batteria durante periodi di bassa richiesta di potenza; durante l'accelerazione od in salita l'energia viene richiesta dal motore elettrico per supportare la propulsione termica. Queste ed altre caratteristiche servono a fare degli HEV più efficienti e meno inquinanti di un veicolo tradizionale. Se in futuro dovranno essere commercializzate le celle a combustibile per autoveicoli, anche loro potrebbero essere inseriti negli HEV. Tuttavia questa tecnologia la si potrà sfruttare solo in futuro, e non sarà utilizzabile per le flotte industriali e per i trasporti pubblici. Se si prendono in considerazione sei tipi di gruppi motopropulsori e sei combustibili combinati in 12 diverse combinazioni di carburante del motore, ecco che si può notare come il gas naturale possa essere utilizzato tal quale direttamente in un motore a scoppio convenzionale, oppure in combinazione con un motore elettrico in una configurazione a gas-elettrico ibrido.



Il gas naturale può anche essere la materia prima per generare gasolio da un processo Fisher-Tropsch, in cui il monossido di carbonio e l'idrogeno reagiscono per produrre il combustibile liquido per motori diesel convenzionali, nonché in configurazioni ibride diesel-elettrico. L'idrogeno generato da "steam-reforming" di gas naturale può essere impiegato direttamente in una cella a combustibile o come carburante in un motore ad accensione comandata. L'elettricità generata da degli impianti a ciclo combinato a gas naturale può caricare un veicolo alimentato a batteria completamente elettrico o elettrolizzare l'acqua per fare idrogeno che verrà impiegato in una cella a combustibile.

#### 4.1 Il Well To Wheel (WTW): Well To Tank (WTT) e Tank to Wheel (TTW)

La valutazione dell'intera catena energetica dei sistemi di trazione che va dalla produzione del combustibile sino alle ruote fa già parte da tempo delle analisi relative alla sostenibilità. Con il WTW si è arricchita l'analisi dei sistemi di trasporto (e anche di tutti gli altri sistemi), che per poter essere completa deve basarsi sui seguenti aspetti:

- Life Cycle Assessment (L.C.A.), in quanto è importante che sin dalla progettazione siano definite le modalità di smaltimento del dispositivo progettato;
- Life Cycle Cost (L.C.C.), che è un elemento fondamentale per la progettazione, lo sviluppo e successiva gestione del veicolo, proponendo un insieme di dati condivisi fra costruttore ed esercente, capace di migliorare il mezzo in termini di performance economiche. Quest'aspetto ha un'incidenza determinante sui budget aziendali degli operatori che utilizzano flotte;
- L'efficienza del Well To Tank (WTT) e Tank To Wheels (TTW). Il primo (WTT) è costituito dalla spesa energetica "esterna" totale  $[MJ_t]$  per estrarre e trasportare il combustibile sino al serbatoio del veicolo, per unità di energia contenuta del carburante (potere calorifico inferiore),  $[MJ_f]$  ( $f = \text{fuel}$ ); il secondo

(TTW) costituito dal rapporto fra i consumi energetici [MJ<sub>f</sub>] utilizzati nello specifico per percorrere una distanza [km].

In termini dimensionali, considerando che il WTT è espresso come  $\left[\frac{MJ_{et}}{MJ_f}\right]$  e il TTW è espresso come  $\left[\frac{MJ_f}{km}\right]$ , allora il WTW sarà composto da un'energia specifica per unità di distanza percorsa:

$$WTT \left[\frac{MJ_t}{MJ_f}\right] * TTW \left[\frac{MJ_f}{km}\right] = WTW \left[\frac{MJ_t}{km}\right] \quad (4)$$

Le ricerche sul WTW di cui si discuterà in seguito, prendono i singoli rendimenti dei vari passaggi necessari per portare il combustibile – gasolio, gas naturale, biogas, idrogeno... – dal pozzo al serbatoio e vengono moltiplicati insieme per ottenere in generale il Well-To-Tank. Successivamente, determinati i singoli rendimenti dei passaggi necessari per trasformare l'energia del carburante contenuto nel serbatoio del veicolo, in energia da fornire alle ruote, vengono moltiplicati per dare l'efficienza complessiva del Tank-To-Wheel. Infine, le efficienze Well-To-Tank e Tank-To-Wheel si moltiplicano insieme per ottenere l'efficienza complessiva Well-To-Wheel di ciascuna tecnologia. La Figura 4.94 rappresenta lo schema logico seguito.

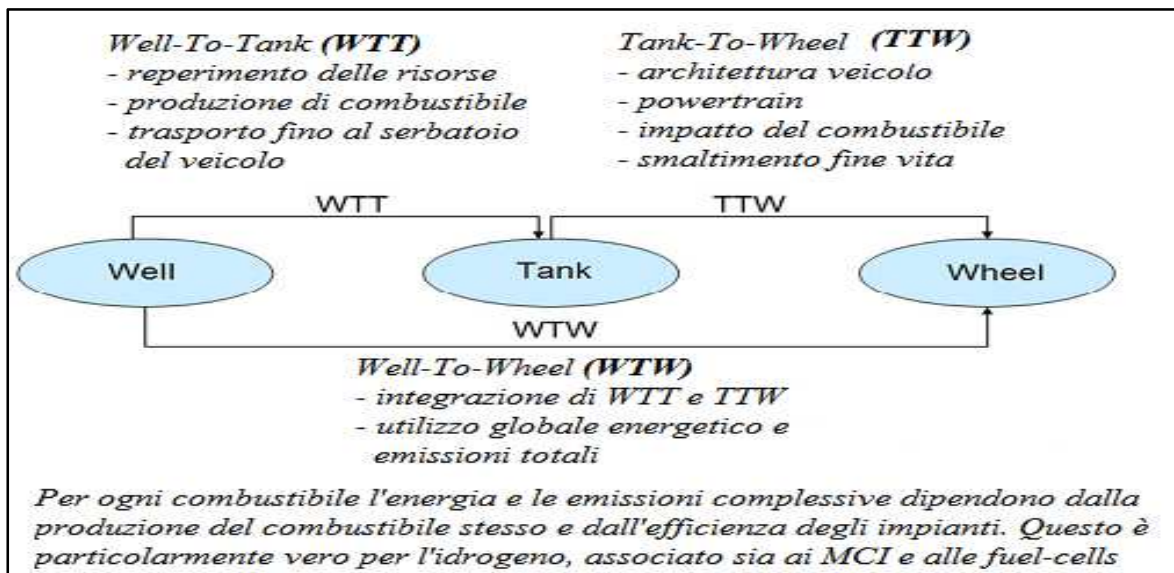


Figura 4.94 Schema del WTW

Perciò, il solo “segmento” WTT per un dato combustibile non dipende in linea di principio dall'utilizzo finale dello stesso, per cui può venire usato per un mezzo pesante, un bus, o per un'utilitaria. Piccole variazioni possono verificarsi a seconda

che il carburante venga utilizzato per il servizio privato o in flotte di veicoli (ad esempio flotte di bus). Allo stesso modo il solo “segmento” TTW non sarà dipendente dal modo di produrre il combustibile erogato e consumato. L’integrazione dei due però fornirà tutte le combinazioni possibili di produzione, trasporto, uso di ogni combustibile con l’impatto che ha ogni tecnologia usata per produrlo e ogni tecnologia impiegata per consumarlo.

I costi correlati e le decisioni “extra-ambientali” (politiche interne ed esterne, finanziamenti...) devono svolgere un ruolo preponderante nelle scelte del carburante e dei veicoli di una flotta di autobus, ma le flotte di autobus sono ritenute molto adatte per l’introduzione di nuovi combustibili. Ad esempio, il gas naturale o il biogas è ormai comunemente usato in autobus urbani. Inoltre, come si spiegherà in seguito, quasi tutti i tipi di veicoli beneficiano dell’ibridazione. Il miglioramento dell’efficienza della tecnologia ibrida (HEV) combinata ai motori a combustione interna MCI (o ICE) è dovuta a due importanti vantaggi: innanzitutto, la tecnologia ibrida rende possibile il funzionamento del ICE nel suo/suoi punti di massimo rendimento; in secondo luogo, il recupero di energia durante le frenature, altrimenti dissipata in attrito e calore, contribuisce alla maggiore efficienza del sistema di trazione globale. Il risparmio di carburante in sistemi HEV dipende dai cicli di lavoro, e il servizio di autobus urbani con il loro regolare stop-and-go, sono ideali queste applicazioni. Può essere raggiunto un risparmio di carburante di oltre il 30 %.

#### 4.1.1 Il Well-To-Tank (WTT)

Il grafico 4.95, mostra una dozzina di diverse combinazioni di sei tipi di propulsori - convenzionali e ibridi ad accensione comandata, per compressione ed ibridi, a celle a combustibile, e a batteria - e sei combustibili - metano, gasolio da processo FT, un misto di gas e gasolio da processi FT, metanolo, ed idrogeno da processo di “*steam-reforming*” o da elettrolisi.



Figura 4.95 Combinazione di sistemi di trazione

L'efficienza di produzione di energia elettrica o di idrogeno (riferite al WTT) sono molto inferiori all'efficienza di qualsiasi altro combustibile indagato. Con l'estrazione di metano dal sottosuolo, la distribuzione via "pipe-line" e la sua compressione finale, si mantiene quasi il 90 % del contenuto energetico originale del gas. Se si aggiunge però il processo di combustione in una centrale elettrica (a ciclo combinato per esempio), inviando poi l'elettricità generata attraverso le linee di trasmissione, e utilizzando l'energia elettrica per l'elettrolisi dell'acqua per produrre idrogeno né si riduce l'efficienza di quasi tre volte.

#### 4.1.2 Il Tank-To-Wheel (TTW)

In termini di efficienza Tank-To-Wheel invece (Grafico 4.96), saltano all'occhio tre delle summenzionate tecnologie: il veicolo completamente a batteria elettrica, le fuel-cells ad idrogeno e l'ibrido diesel-elettrico. Infatti, un motore a scoppio convenzionale è efficiente solo la metà rispetto ad un veicolo elettrico a batteria.

A causa di questa presunta alta efficienza, molte aziende sostengono lo sviluppo di queste tre opzioni. Ecco che le alte efficienze Tank-To-Wheel delle opzioni elettriche a celle a combustibile a idrogeno e a batteria sono compensate dalle basse efficienze di produzione del combustibile in queste forme (inteso come idrogeno o elettricità).

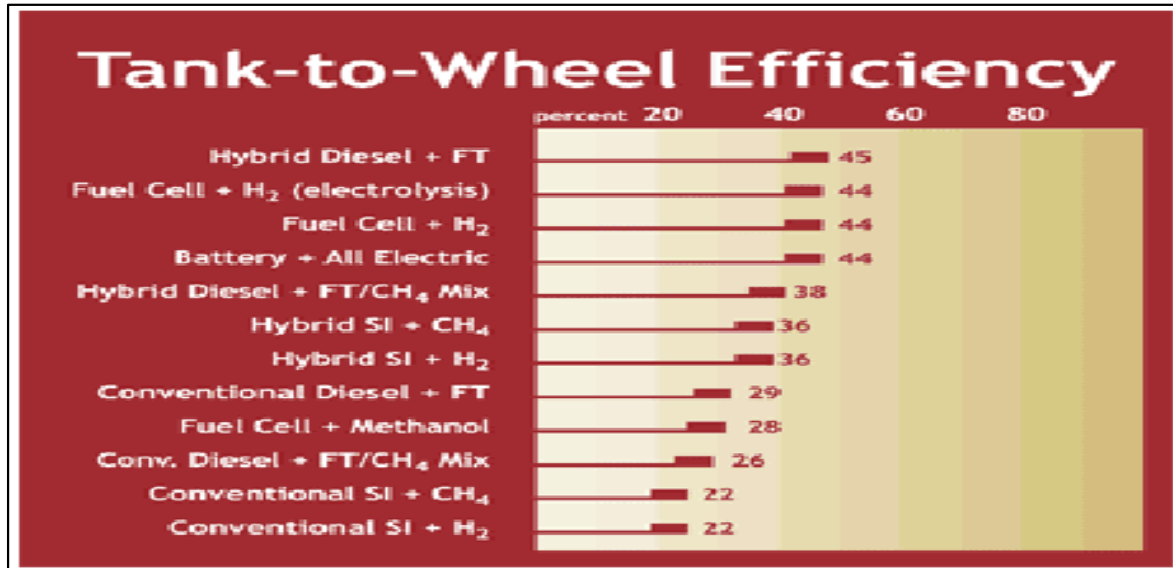


Figura 4.96 Combinazione di sistemi di trazione

### 4.1.3 Il Well-To-Wheel (WTW)

Come risultato, l'efficienza complessiva dell'alimentazione ad idrogeno del veicolo sembra molto meno promettente di quanto spesso ritratta nella letteratura commerciale (vedi grafico 4.97). Al 13 %, l'efficienza Well-To-Wheel della cella a combustibile con idrogeno prodotto per elettrolisi è la più bassa delle opzioni che si sono studiate. Poiché i gas che causano il riscaldamento globale vengono generati con proporzionalità inversa rispetto alla efficienza Well-To-Wheel, i veicoli a fuel-cells ad idrogeno sono molto distanti dal poter essere considerati ad "impatto zero" finché la fonte di energia primaria da cui si ricava è un combustibile fossile.

In ultima analisi, le migliori performance che si sono trovate sono state le tecnologie con veicolo ibrido a gas naturale, ibrido alimentato a gasolio F-T, o una miscela di gas naturale e gasolio F-T. Infatti essi hanno efficienze Well-To-Wheel del 30–32 %. I veicoli a fuel-cells alimentati da idrogeno generato da "steam-reforming" di gas naturale in un impianto presentano un WTW vicino al 27 %. Non si deve però dimenticare che tutti i ragionamenti fatti si sono basati sul presupposto che l'energia

elettrica o l'idrogeno necessario per la propulsione del veicolo siano stati generati dal gas naturale. Se però, essi fossero stati prodotti da fonti non fossili, come l'energia eolica, l'energia solare, la fusione o fissione nucleare, allora la loro fattibilità sarebbe data dai costi e dagli impatti ambientali che avrebbero determinato, e non è l'efficienza di per sé.

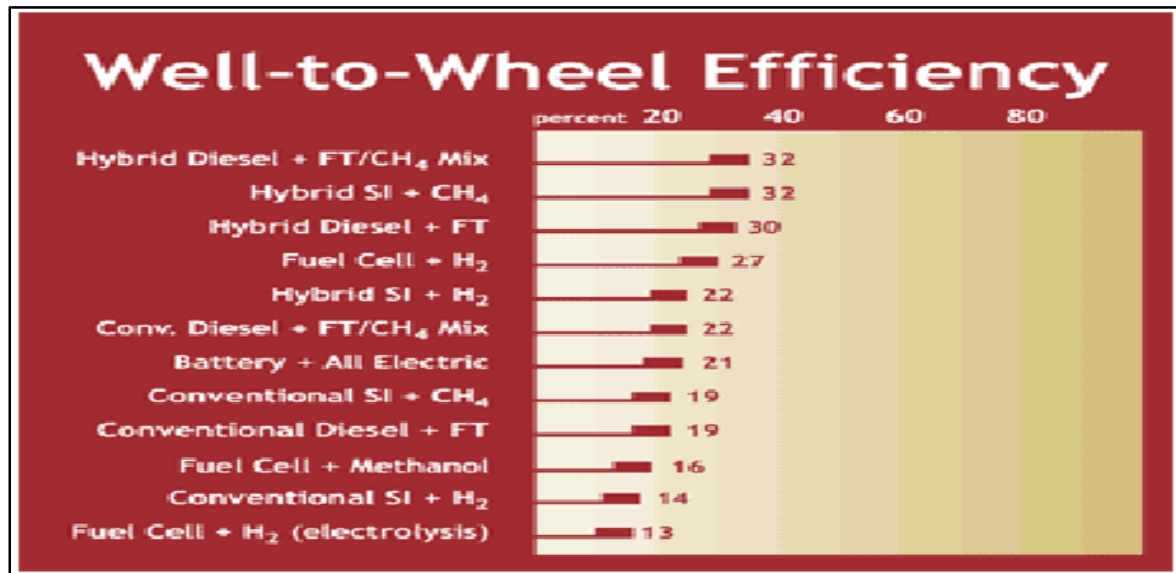


Figura 4.97:WTW

Le fonti rinnovabili sono ecologicamente più sostenibili. L'energia eolica è vicina ad avere un prezzo competitivo per la produzione di energia elettrica in luoghi favorevoli, ma la disponibilità di generazione elettrica è solo una piccola frazione di quello che sarebbe necessario per un sistema di trasporto alimentato elettricamente. Al momento attuale, l'energia da fotovoltaico e l'energia termica solare sono invece più costose di quelle date da un ciclo combinato con centrali alimentate a gas naturale. L'energia da fusione nucleare è ancora piuttosto lontana da applicazioni diffuse, e la fissione non è più costosa rispetto ad altre fonti di energia elettrica, ma per essere politicamente accettabile, dovrà essere dimostrato un modo sicuro di smaltimento delle scorie nucleari. Alla luce di queste carenze di fonti di energia, non fossili e alternative, è improbabile che qualcuna di esse sarà usata in maniera diffusa per soddisfare il fabbisogno del settore trasporti entro i prossimi 25 anni.

4.2 La relazione fra il consumo di energia del Well-To-Wheel e i gas serra  
L'EUCAR, CONCAWE e JRC (Centro di Ricerca della Commissione Europea) hanno valutato il consumo energetico ed il Well-To-Wheel di una vasta gamma di carburanti associati diversi "powertrain", mettendolo in relazione alle emissioni di gas serra (GHG). Gli obiettivi specifici dello studio sono:

- \* Stabilire in modo trasparente e oggettivo il Well-To-Wheel e valutare le emissioni di gas serra di una vasta gamma di carburanti per autotrazione e di propulsori, attuali e futuri;
- \* Considerare la fattibilità di impiego (dalla produzione all'utilizzo finale) di ogni carburante e stimare i costi macroeconomici associati;
- \* Avere un risultato da considerare come riferimento.

L'analisi Well-To-Wheel come spiegato poco prima, è la base essenziale per valutare l'impatto di vari combustibili usati per l'autotrazione e diversi tipi di "powertrain". La filiera di produzione del combustibile e l'efficienza di propulsione sono entrambi elementi chiave da considerare riguardo le emissioni di gas serra e il consumo di energia. Quello che si evidenzia è che il passaggio verso fonti rinnovabili e a basso contenuto di carbonio può offrire una significativa riduzione dei gas serra, ma richiede complessivamente più energia. Separando i punti che riguardano i bilanci energetici e di gas serra (1) dai punti che coinvolgono la fattibilità, la disponibilità ed i costi (2 e 3), si può evidenziare che:

1. La produzione su larga scala di combustibili sintetici o di idrogeno da carbone o gas offre il potenziale di riduzione delle emissioni di gas serra attraverso la cattura e lo stoccaggio della CO<sub>2</sub> (anche se questo merita un ulteriore studio).
2. I biocarburanti cosiddetti "evoluti" e l'idrogeno, possono sostituire in modo migliore i combustibili fossili rispetto i biocarburanti convenzionali;
3. Lo sviluppo su larga scala di questi processi è condizionato fortemente da diversi ostacoli, come l'elevata complessità e dimensioni degli impianti, l'efficienza ed i costi di investimento.

Si devono analizzare singolarmente i diversi combustibili ma si riporteranno solamente quelli più interessanti e fattibili dal punto di vista pratico nel settore dei trasporti.

#### 4.2.1 Considerazioni valide per i combustibili e le tecnologie convenzionali e per quelle ibride.

Gli sviluppi dei propulsori e dei veicoli continueranno a contribuire alla riduzione del consumo energetico e delle emissioni di gas serra. Separando i punti che riguardano i bilanci energetici e di gas serra (1,2) dai punti che coinvolgono la fattibilità, la disponibilità ed i costi (3), si può evidenziare che:

1. I più alti miglioramenti di efficienza energetica sono previsti più per i propulsori a benzina e per la tecnologia dei motori alimentati a gas naturale compresso CNG (PFI\_SI "*Port Fuel Injection\_Spark Ignition*") che per i motori a gasolio (DI\_CI "*Direct Injection\_Compresed Ignition*")
2. L'ibridazione dei motori convenzionali è in grado di fornire ulteriori benefici energetici diminuendo le emissioni di gas serra.
3. Le tecnologie ibride aumenterebbero tuttavia la complessità ed il costo dei veicoli.

In riferimento ai propulsori convenzionali, con un powertrain puramente termico, il miglioramento dell'efficienza (del WTW) non è molto soddisfacente. Infatti, come riporta la ricerca svolta dal JRC, per i motori diesel l'adozione del turbocompressore è un "must" ormai da tempo, e i benefici aggiuntivi sono previsti attraverso le strategie di "downsizing". Viene tenuto in conto solo il miglioramento rappresentato ad esempio dalle miglie in termini di attriti, frizioni interne, regolazione variabile delle pompe di circolazione dei liquidi, etc. etc...). All'opzione DPF viene assegnata invece una penalità di circa 2,5%, perché viene utilizzato il combustibile per la rigenerazione del filtro. Per i motori ad accensione comandata (PISI), il principale contributo al miglioramento dell'efficienza dell'impiego di carburante viene dal "downsizing" (la cilindrata del motore a benzina è stata ridotta da 1,6 litri fino a 1,3 litri e la coppia viene ripristinata da un turbocompressore).



Per gli ibridi, l'ottimizzazione del consumo del combustibile (che sia gasolio o benzina) è una funzione della “strategia di controllo ibrido” e del rapporto potenza/massa del motore elettrico. Il motore elettrico fornisce una coppia elevata, disponibile immediatamente dopo l'avvio e su un'ampia gamma di velocità di rotazione. Come risultato, le configurazioni ibride offrono buone prestazioni di accelerazione, anche se tendono ad essere più pesanti rispetto ai sistemi convenzionali.

In termini energetici e di gas serra, l'impatto della produzione di gasolio che di per sé necessita un dispendio energetico comunque consistente, è più che compensato dal rendimento superiore del motore Diesel DICI rispetto al benzina PISI.

Dai grafici seguenti si evidenziano i contributi WTT e TTW, le cui definizioni sono state espresse all'inizio del paragrafo, per i sistemi convenzionali a gasolio a benzina e ibridi. Si nota che il contributo essenziale di dispendio energetico e di immissione in atmosfera di gas serra è dato dal Tank-To-Wheel in un rapporto circa 5:1 rispetto al Well-To-Tank.

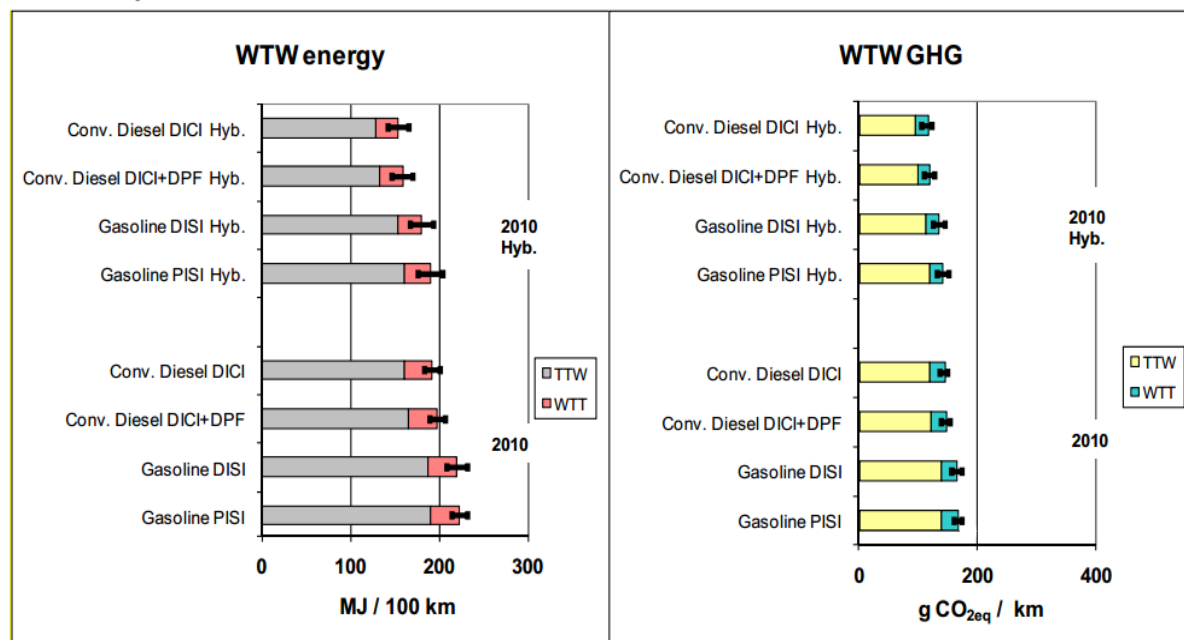


Figura 4.98: WTW energy & WTW GHG

Si evidenzia anche in questi grafici 4.98, ciò che era già stato esplicitato nel grafico 4.95, ovvero che il miglior sistema in grado di abbattere i consumi energetici (in

termini di WTW) e abbattere contestualmente l'emissione di gas serra è il sistema ibrido diesel.

#### 4.2.2 Il WTW per il Gas Naturale Compresso (CNG)

Come per tutti i combustibili gassosi, il metano richiede un'infrastruttura dedicata per la distribuzione e il rifornimento di carburante. La rete del gas naturale, sviluppata in molte aree d'Europa per servire le utenze domestiche, commerciali e industriali può essere utilizzata per fornire gas naturale nelle stazioni di rifornimento. Tuttavia alcune aree d'Europa non sono servite dalla rete ed è improbabile che la domanda per l'uso nei trasporti, da sola, giustifichi ampie aggiunte alle reti esistenti. Per tali aree, il GNL (Gas Naturale Liquido), distribuito su strada e vaporizzato alla stazione di rifornimento, può essere un'opzione da seguire. I problemi di infrastruttura ed i costi sono essenzialmente legati alle stazioni di rifornimento. Però, supponendo che vengano utilizzati gli attuali siti in cui si erogano i combustibili convenzionali, i costi di investimento e di esercizio sarebbero per lo più associati allo stoccaggio, alla compressione (anche oltre i 200 bar) e alle colonnine di ricarica. I problemi di sicurezza connessi con l'uso diffuso di un gas infiammabile ad alta pressione sono reali, ma non considerato come una barriera significativa.

Le emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte dall'uso del metano si posizionano fra quelle generate dalla combustione della benzina e quelle del gasolio, ma si avvicinano comunque al diesel nella maggior parte dei casi. Dopo il 2010 i maggiori guadagni di efficienza del motore sono stati previsti per i veicoli a metano, in particolare con l'ibridazione per cui le emissioni di GHG sono diventate inferiori a quelle del gasolio. Il consumo nel computo del WTW è rimasto superiore a quello della benzina, escludendo però gli ibridi per i quali si è ridotto rispetto al gasolio. Separando i punti che riguardano i bilanci energetici e di gas serra (1,2) dai punti che coinvolgono la fattibilità, la disponibilità ed i costi (3,4,5), si può evidenziare che:

1. L'origine del gas naturale e il percorso che esso segue fino all'alimentazione del veicolo sono fondamentali per l'energia complessiva WTW e il bilancio dei gas serra.
2. Il GPL fornisce un modesto risparmio nelle emissioni di gas serra e per il WTW rispetto alla benzina e gasolio.
3. Il risparmio limitato di CO<sub>2</sub>, accoppiato alle infrastrutture di rifornimento e ai costi del veicolo portano a un costo abbastanza elevato per tonnellata di CO<sub>2</sub> evitata per metano e GPL.
4. Le infrastrutture e le barriere di mercato rischiano di essere i principali fattori che limitano lo sviluppo del metano, mentre l'offerta di gas naturale è improbabile che sia un problema, almeno nel medio termine;
5. Il biogas, se prodotto dai rifiuti, fornisce un basso impatto nella produzione di gas serra e costi relativamente bassi.

I veicoli a metano si sono sfruttati per molti anni in Europa e nel resto del mondo, generalmente sostenuti da un favorevole regime fiscale per il carburante, sebbene la carenza di infrastrutture di rifornimento ed i maggiori costi aggiuntivi delle attrezzature necessarie per il funzionamento dei veicoli abbiano limitato il loro sviluppo per le flotte.

Al fine di rappresentare le opzioni commerciali reali esistenti, si sono presi in considerazione veicoli bi-fuel (benzina-CNG) e veicoli appositamente studiati per alimentazioni a gas naturale (ottimizzati).

Sui primi è montato un sistema di alimentazione di metano addizionale al sistema a benzina originale. Viene aggiunto anche un serbatoio supplementare di CNG (bombole in una quantità più o meno modesta a seconda degli spazi e dell'impiego dei mezzi), mentre la capacità del serbatoio della benzina può essere ridotta o meno. Non è possibile alcuna ottimizzazione specifica per l'alimentazione a gas dato che dovrebbe essere conservata intatta l'operatività del funzionamento a benzina. Di conseguenza, la curva di coppia viene diminuita di circa il 12% durante il funzionamento a metano. La velocità massima non è significativamente influenzata,

ma la capacità di accelerazione è leggermente al di sotto della prestazione con benzina. Siccome le prestazioni sono soddisfatte in modalità benzina si può considerare accettabile questo decremento.

Per i secondi, il motore è sviluppato con lo stesso livello di tecnologia del motore a benzina. In questo motore avente quindi un singolo carburante, il CNG, può venire ottimizzato il rapporto di compressione, poiché, avendo il gas naturale un più alto numero di ottano rispetto alla benzina, è di conseguenza più alta la resistenza alla detonazione. Il rapporto di compressione del motore CNG può passare da 9,5:1 e 12,5:1 con un conseguente aumento di efficienza del ciclo termodinamico del 10 % rispetto al riferimento benzina. Al fine di soddisfare tutti i criteri di prestazione e in particolare l'accelerazione, viene richiesta una coppia maggiore e ciò lo si può ottenere o aumentando la cilindrata del motore, oppure attraverso "downsizing" e l'utilizzo del turbocompressore. Ovviamente sarà anche necessaria una mappatura corretta ed ottimizzata per l'utilizzo del veicolo. Contando le cilindrature maggiori, tutti i componenti ausiliari per il sistema di alimentazione a gas, uniti soprattutto al peso delle bombole di CNG (anche più di 100 kg l'una se in acciaio), viene penalizzato il consumo di carburante ed il vantaggio – in termini di efficienza – ottenuto dall'ottimizzazione propria di un veicolo dedicato, viene di fatto ridotto, anche se rimane comunque superiore al veicolo bi-fuel descritto precedentemente.

L'operazione necessaria aggiuntiva per aumentare l'efficienza complessiva, è quella di inserire anche un'unità di compressione della carica (un turbocompressore), opportunamente progettato nei materiali usati, affinché resista a temperature più alte generate dalla combustione de gas. Grazie a questo, il rendimento aumenta fino al 15%. Si può attribuire un ulteriore miglioramento dell'1 %, grazie alla migliore miscelazione del combustibile gassoso con l'aria, consentendo fluidodinamiche ottimizzate.

Lo studio del JRC prosegue con l'analisi del WTW di sistemi ibridi a metano, affiancando l'unità elettrica al solo motore dedicato. La disponibilità del motore elettrico permette accelerazioni soddisfatte con la cilindrata del motore originale PISI.

Con l'ibridazione a metano il risultato in termini di WTW ed emissioni di gas serra è particolarmente vantaggioso e riporta un grado di miglioramento del 24 % rispetto al convenzionale PISI. Le configurazioni PISI sono quelle che hanno il WTW e generazioni di GHG più elevati indipendentemente dall'alimentazione (figura 4.99). Il veicolo con motore "dedicato" ha un leggero vantaggio rispetto alla versione bi-fuel anche se va tenuto presente che la configurazione bi-fuel è un compromesso e non soddisfa tutti i criteri di prestazione. Il miglioramento dell'efficienza del motore a metano porta emissioni di gas serra inferiori a quelle del gasolio, anche se il

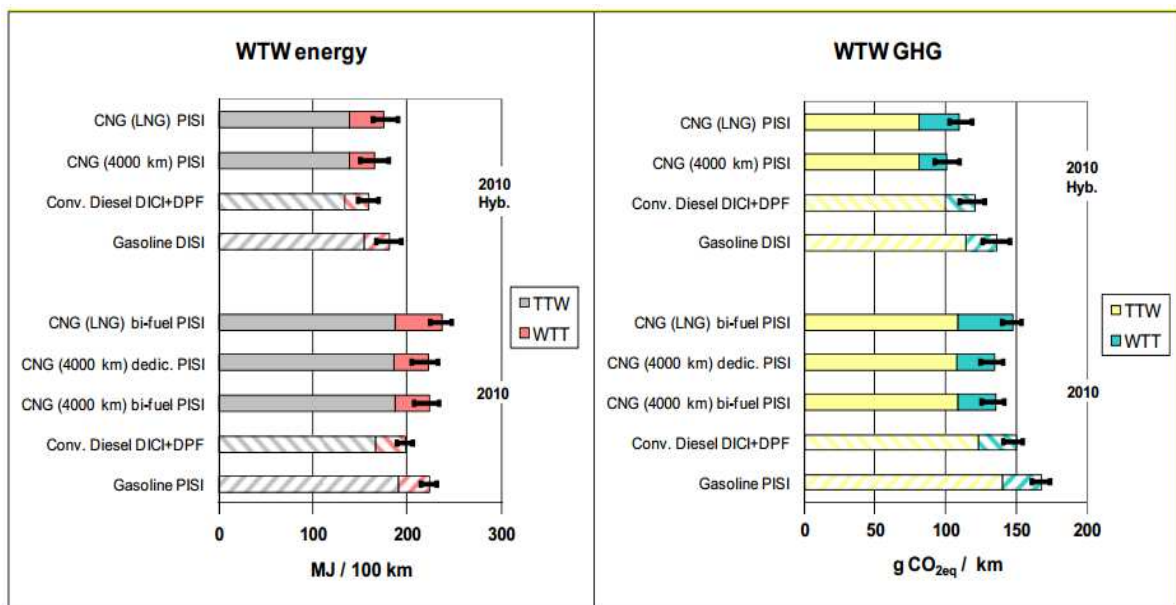


Figura 4.99: WTW energy & WTW GHG for PISI configuration

consumo di energia è ancora superiore. L'effetto è ancora più evidente per gli ibridi come già spiegato sopra. La distanza del trasporto del gas e il percorso dell'oleodotto sono fondamentali per l'analisi. La lunghezza della pipe-line di 4000 km è considerata ragionevole per la fornitura in Europa. A lungo termine, si possono prevedere anche oleodotti più lunghi nonché una quota maggiore di GNL. La tecnologia degli oleodotti ("pipeline") è in continua evoluzione e le pressioni di esercizio oggi sono le più elevate possibili.

#### 4.2.3 Il WTW per il Biogas Compresso (CBG)

La fermentazione anaerobica di materiale organico produce una miscela gassosa, nota come "biogas", costituita principalmente da metano (CH<sub>4</sub>) e anidride carbonica (CO<sub>2</sub>).

La biomassa costituisce l'alimentazione per eccellenza, contenendo componenti quali carboidrati (cioè saccaridi come il glucosio), acidi grassi e proteine. Quando il letame, o i residui colturali o i rifiuti urbani vengono stoccati o posti in discarica, si verifica l'inizio di un processo di decomposizione, i cui prodotti preponderanti sono appunto metano (il biogas) e anidride carbonica.

Sebbene la maggior parte degli impianti di produzione di biogas siano stati finora di piccola scala e orientati alla produzione di calore ed energia, si è sviluppato nel tempo un concetto di impianto più grande al fine di produrre un gas che può essere utilizzato in combinazione o in alternativa al gas naturale come carburante per autotrazione (Compressed Bio-gas o CBG). Tali procedure richiedono necessariamente la pulizia del gas per rimuovere le varie impurità e soprattutto la CO<sub>2</sub> prodotta. Alcuni di questi impianti esistono già in Scandinavia.

Nella ricerca effettuata dal JRC, sono stati analizzati tre casi in cui si utilizzano materiali di scarto e cioè da rifiuti urbani organici, letame secco ed umido e due casi in cui si utilizza grano (pianta intera) o una combinazione mais ed orzo, prodotti nello stesso spazio di terra. In tutti i casi si è ipotizzato che il gas prodotto, filtrato e pulito si unisca nella rete del gas esistente per raggiungere la stazione di rifornimento.

Il materiale di scarto utilizzato come materia prima è considerato a effetto serra nullo ("GHG free"). Le colture dedicate avranno una "Carbon Footprint" modesta risultante dall'attività agricola (contando la CO<sub>2</sub> generata dalle attività agricole stesse e le emissioni di N<sub>2</sub>O). Per la produzione viene però usata una parte di biogas. Come risultato, il biogas ha un impatto generalmente favorevole sul WTW e sulle emissioni di gas serra (Grafici 4.100): anche se l'energia totale richiesta è relativamente elevata, non è rilevante ai fini del processo, partendo da un materiale di scarto che non avrebbe comunque altri usi. L'impronta complessiva di gas serra è un po' più alta quando si utilizzano colture dedicate. Tra l'altro, la produzione di biogas avviene naturalmente con il letame e in particolare quando diluito in acqua (letame "liquido"): quindi le emissioni di metano (che è comunque un gas serra) possono essere evitate utilizzando il letame per la produzione di biogas.

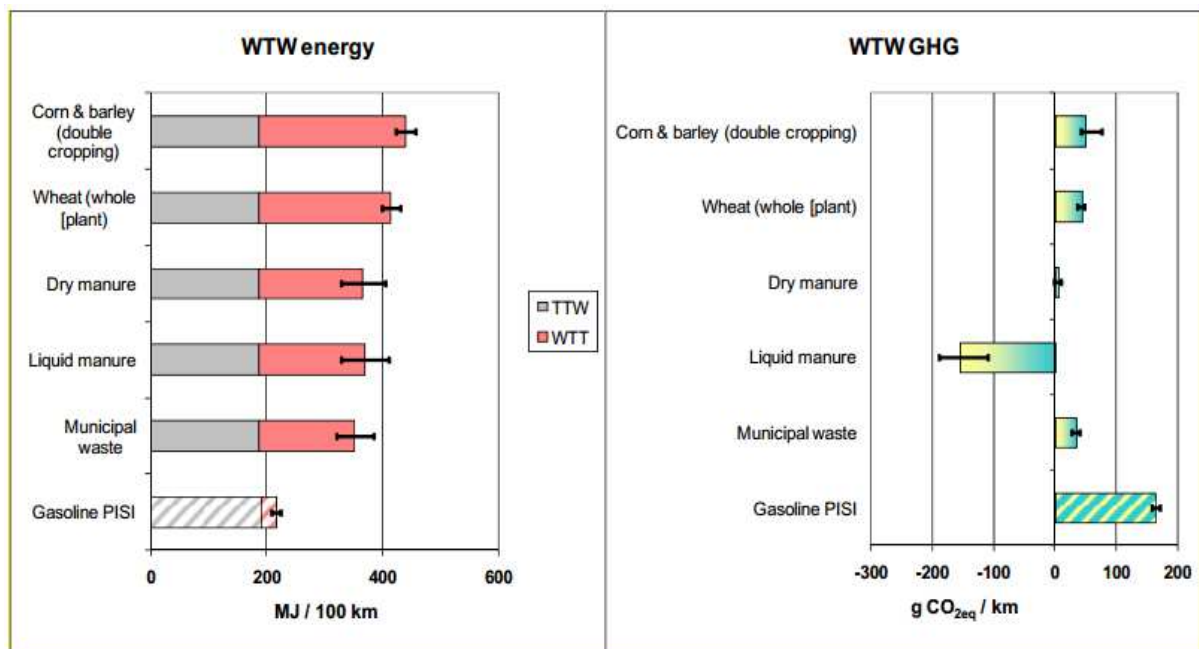


Figura 4.100: WTW energy & WTW GHG for Biogas CBG

La quota di energia da combustibile fossile per la produzione di biogas da rifiuti comunali e da letame (“manure”) è nel range 0,15-0,17 MJ/MJf. I dati riportati dalla sono frutto della decisione di utilizzare limitatamente l’energia prodotta in loco da biogas per la generazione del solo calore utile per il processo, il che significa che la richiesta di energia elettrica proviene dalla rete. Per il mais e orzo, l’apporto di energia fossile è più alto, 0,23-0,29 MJ/MJf, e tiene in conto dell’energia utilizzata per la produzione agricola ed il trasporto allo stabilimento di trasformazione

Per le emissioni di gas serra il bilancio è molto favorevole, soprattutto nel caso del letame perché le elevate emissioni di metano dal letame grezzo vengono evitate già nel processo di raccolta. Prelevando letame liquido e usandolo per la produzione di biogas, si impediscono alcune emissioni di gas serra in atmosfera, mentre per il mais le emissioni di gas serra sono leggermente superiori, ma paragonabili a quelli per la produzione di metano.

#### 4.2.4 Il WTW per le tecnologie dell’idrogeno

Esistono diverse modalità di produzione dell’idrogeno ed i risultati in termini di WTW e di costi sono dipendenti dal percorso che viene seguito.

- Se prodotto da elettrolisi usando un mix di elettricità proveniente da diverse fonti (per lo più fossili), risultano emissioni di gas serra superiori rispetto alla produzione di idrogeno direttamente da gas naturale.
- In quest'ultimo caso (produzione da metano), separando i punti che riguardano i bilanci energetici WTW e di gas serra (1,2) dai punti che coinvolgono la fattibilità, la disponibilità ed i costi (3,4), si può evidenziare che:
  1. La riduzione del WTW e delle emissioni di gas serra possono essere raggiunte solo se l'idrogeno viene utilizzato in celle a combustibile (fuel-cells);
  2. Le emissioni di gas serra ed il WTW sono più elevati per i veicoli dotati di motori endotermici a idrogeno "ICE" rispetto ai propulsori convenzionali o alimentati a metano;
  3. Nel breve termine, il gas naturale è l'unica valida fonte di idrogeno su larga scala. Il bilancio del WTW e la riduzione dei gas serra possono essere raggiunti solo se l'idrogeno è utilizzato sui veicoli a celle a combustibile anche se i costi sono più alti;
  4. I veicoli con propulsori termici ad idrogeno saranno disponibili nel breve termine a un costo inferiore rispetto alle celle a combustibile, ma il loro uso potrebbe aumentare le emissioni di gas serra fintanto che sarà prodotto idrogeno da gas naturale.

Se prodotto da fonti non fossili (biomasse, eolico, solare o nucleare), offre basse emissioni complessive di gas serra. Separando i bilanci energetici WTW e di gas serra (1) dalla fattibilità, disponibilità e costi (2), si può evidenziare che:

1. Le fonti rinnovabili impiegate per la produzione di idrogeno hanno un potenziale limitato.
2. Può essere raggiunto un utilizzo più razionale delle fonti rinnovabili utilizzando direttamente l'idrogeno per la produzione di elettricità, anziché come combustibile stradale.

Se viene prodotto indirettamente attraverso "reformers" a bordo veicolo offre scarsi benefici di gas serra rispetto ai propulsori convenzionali avanzati o ibridi. In questo caso però, si potrebbe sfruttare l'infrastruttura di distribuzione dei carburanti già



esistente, ed offrire l'opportunità di inserire e rendere più stabile la tecnologia delle celle a combustibile.

Concludendo, per l'idrogeno, utilizzato come carburante per il trasporto, le emissioni di gas serra si verificano tutte nella parte WTT, il che lo rende particolarmente attraente per la cattura e lo stoccaggio della CO<sub>2</sub>.

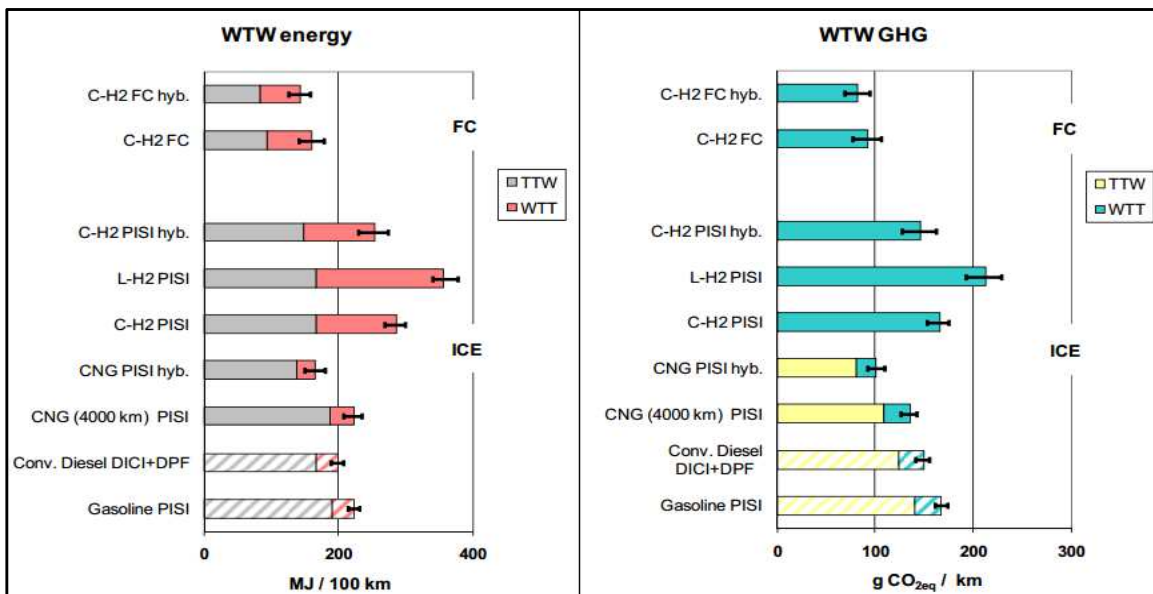


Figura 4.101: WTW energy & WTW GHG for Hydrogen ICE, source pipeline 4000 km

Anche se i motori termici (ICE) ad idrogeno hanno un buon rendimento di conversione, il loro WTW è sfavorevole rispetto all'uso diretto di CNG. L'aumento dei costi del veicolo è tra l'altro moderato, e questi veicoli potrebbero potenzialmente essere bi-fuel (benzina-idrogeno). Se, infine, l'idrogeno fosse usato come una tecnologia di transizione per sostenere lo sviluppo della relativa infrastruttura, questo si avrebbe al costo di notevoli emissioni di gas serra aggiuntivi. L'alternativa delle celle a idrogeno diventa chiaramente migliore.

Le macchine termiche hanno maggiori dispersioni irreversibili alle basse temperature, a causa del loro specifico principio di funzionamento (figura 4.102).

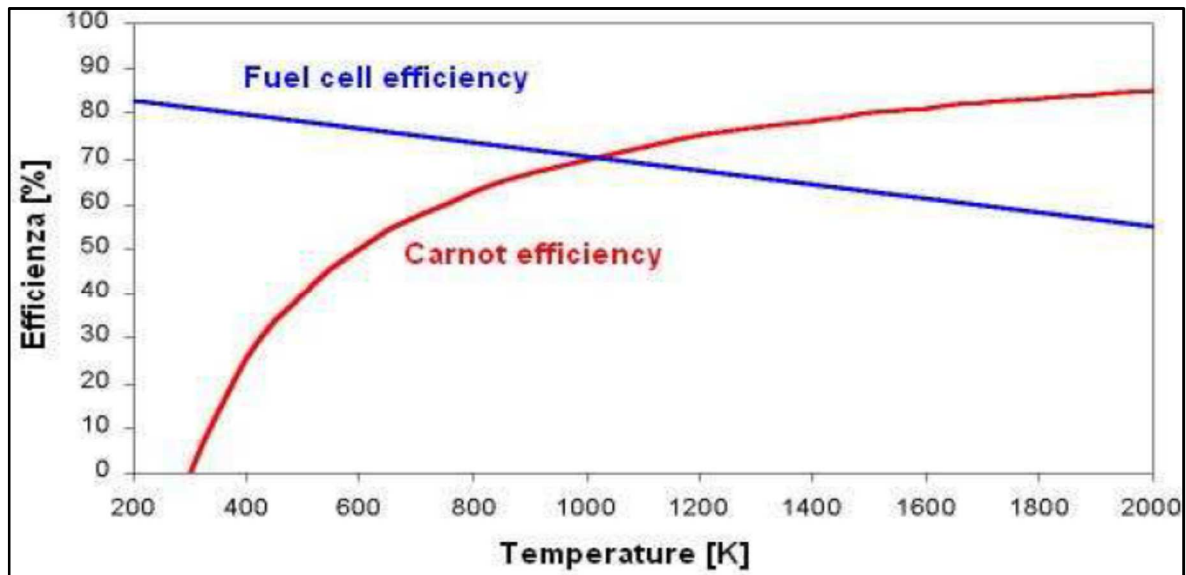


Figura 4.102: Efficienza di una fuel cell a confronto con l'efficienza di una macchina termica in funzione della temperatura.

I motori a combustione interna devono trasformare l'energia chimica del combustibile prima in calore e poi in lavoro. Per limitare le dispersioni irreversibili dovrebbero lavorare a temperature molto più elevate, che però non si possono raggiungere a causa di limiti strutturali dei materiali. Al contrario, le fuel cells trasformano l'energia chimica direttamente in lavoro, cioè in elettricità, che può essere immediatamente sfruttabile per la trazione. Nel loro caso non esiste la combustione, la relazione è esclusivamente elettrochimica e le perdite irreversibili sono molto limitate; quindi, la produzione di energia avviene nelle condizioni più favorevoli dal punto di vista dell'efficienza. Tuttavia bisognerà tener conto anche dei rendimenti e delle perdite di tutti i sistemi associati all'utilizzo delle fuel cells per la trazione automobilistica (sistemi ausiliari, reformer, motori elettrici, ecc.).

#### 4.2.5 Relazione finale fra WTW e emissioni GHG per i combustibili analizzati

Sintetizzando i ragionamenti svolti finora, si può estendere l'analisi, utilizzando i dati WTW e GHG si possono considerare i diversi usi delle risorse energetiche primarie rispetto alle emissioni di gas a effetto serra che esse procurano, per sapere, infine come possono essere utilizzati in modo più sia le risorse fossili sia quelle rinnovabili.

Il grafico 4.103 mostra la relazione tra il consumo totale di energia WTW e le emissioni di gas serra per tutti i combustibili analizzati, ad esclusione dell'idrogeno. Le stesse informazioni per l'idrogeno sono state già presentate in precedenza nel grafico 4.101. I risultati sono mostrati per tutti i tipi di veicoli. Le cifre energetiche comprendono tutta l'energia, sia da combustibili fossili che rinnovabili. In generale, le opzioni che nel WTW ambientale riportano basse emissioni di gas serra sono proprio quelle che hanno un elevato WTW energetico (ad esempio il CBG). Anche se le emissioni di gas serra sono di primaria importanza oggi, sono anche obiettivi desiderabili il risparmio energetico e l'uso efficiente delle risorse energetiche.

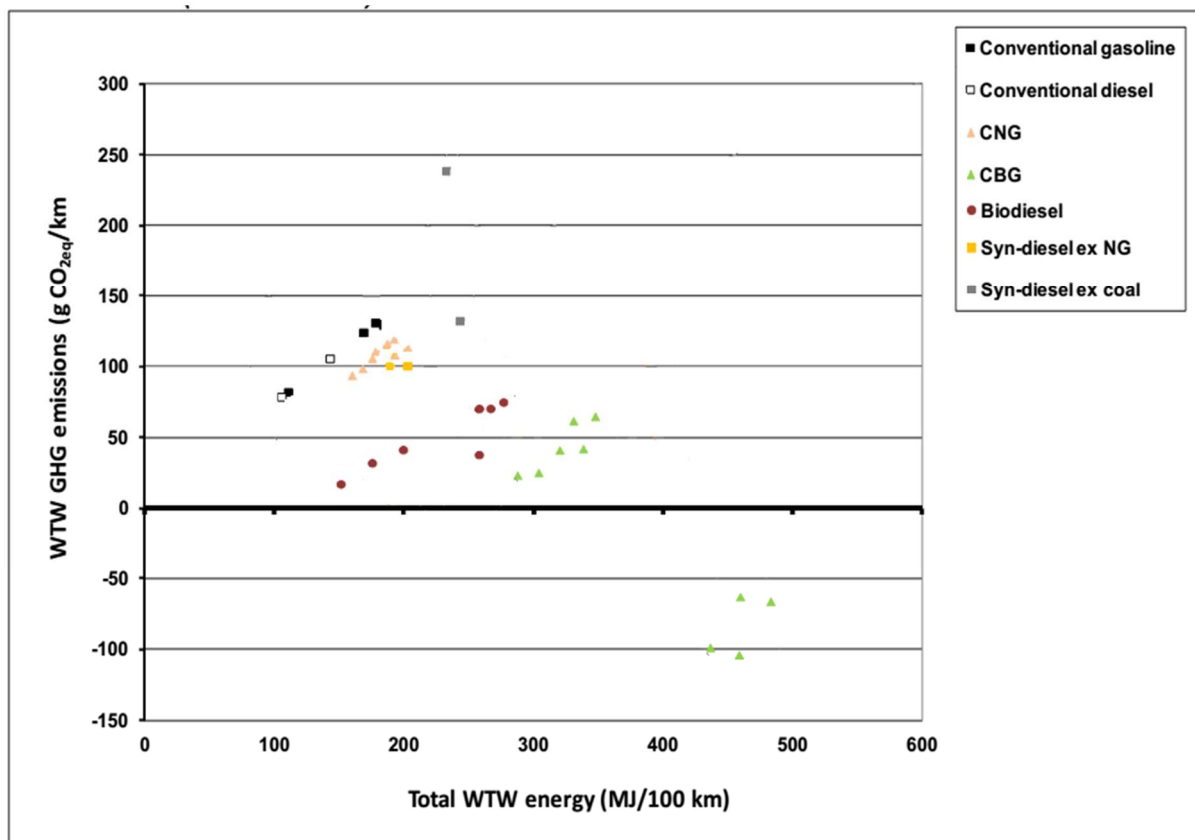


Figura 4.103: Relazione WTW e GHG

In pratica tutte le risorse energetiche primarie sono disponibili in quantità limitate. Per i combustibili fossili il limite è fisico, espresso in barili o (m<sup>3</sup>) effettivamente presenti nel terreno e sfruttabili mentre per la biomassa il limite è insito nell'uso della terra disponibile. È improbabile che il pianeta sia a corto di sole o di vento in un prossimo futuro, ma l'abilità di sfruttare queste energie è molto limitata dalla capacità di costruire impianti di conversione ad un costo accettabile e trovare siti per

installarli. In altre parole, il consumo di energia primaria deve essere limitato ed è quindi importante considerare la riduzione di gas serra, cercando allo stesso tempo di minimizzare il dispendio energetico. Un'analisi esaustiva richiederebbe considerazioni non solo del trasporto stradale, ma di tutto il settore energetico.

## **CAPITOLO 5 - Costi standard quale soluzione efficace per la sostenibilità economica ed ambientale**

---

In considerazione del fatto che nel presente lavoro di ricerca vengono esaminati i costi di manutenzione di flotte di autobus è necessario definire meglio i fabbisogni standard di un'azienda che esercisce il Trasporto Pubblico Locale. Essi possono essere definiti come il prodotto tra la quantità-obiettivo di prestazioni e il costo unitario standard e, in genere, calcolati come valore atteso di una funzione di spesa oppure di una funzione di costo. I due approcci si differenziano per la domanda di ricerca. La funzione di spesa risponde alla domanda: qual è la spesa giustificata per un certo servizio date le caratteristiche della popolazione e del territorio del Comune considerato? La funzione di costo risponde alla domanda: qual è il costo giustificato, date le caratteristiche della popolazione e del territorio locale, per fornire un'unità del servizio (o per garantire il servizio a un utente) da parte dell'ente considerato? La stima dei fabbisogni standard è stata effettuata dalla SOSE (Società degli studi di settore), a valle di un'ampia e approfondita rilevazione dei dati dei certificati di conto consuntivo del 2010 e di variabili di contesto, del livello dei fattori di carico e dei livelli di output del servizio.

Nella determinazione del costo standard si fa riferimento all'Art. 1, comma 4 della legge n.147, del 27 dicembre 2013. L'unità di servizio che si prende per il calcolo è espressa in chilometri di servizio, e si tiene conto di:

- aree metropolitane e aree a domanda debole;
- velocità commerciale;
- economie di scala;
- tecnologie di produzione;

- ammodernamento del materiale rotabile;
- ragionevole margine di utile.

Per garantire una graduale, equa ed efficiente distribuzione delle risorse, è ripartita tra le regioni una quota crescente delle risorse statali per il trasporto pubblico locale, sulla base del costo standard di produzione dei servizi.

Infatti, al “fine di armonizzare la normativa di settore del trasporto pubblico regionale e locale con i principi e i criteri stabiliti in materia di federalismo fiscale, ed in attuazione dell'articolo 119 della Costituzione, [...], le regioni, le province e i comuni, allo scopo di assicurare la mobilità degli utenti, definiscono [...] obblighi di servizio pubblico, prevedendo nei contratti di servizio di cui all'articolo 19, le corrispondenti compensazioni economiche alle aziende esercenti i servizi stessi, determinate secondo il criterio dei costi standard che dovrà essere osservato dagli enti affidanti nella quantificazione dei corrispettivi da porre a base d'asta previsti nel bando di gara o nella lettera di invito delle procedure concorsuali, tenendo conto dei proventi derivanti dalle tariffe e di quelli derivanti anche dalla eventuale gestione di servizi complementari alla mobilità” (decreto legislativo del 19 novembre 1997, n. 422, Art.17, comma 1 e successive modifiche).

In questo quadro la definizione di una metodologia di calcolo standard si rende necessaria, sia in un'ottica macro che micro.

A livello macroeconomico, la determinazione dei fabbisogni e dei costi standard costituisce a regime l'unico criterio di riferimento per la equiparazione e la revisione della spesa degli enti territoriali, affinché ciascun ente riceva risorse commisurate a indicatori di bisogno e ai costi delle proprie funzioni, valutato in base a parametri oggettivi piuttosto che alle spese storiche, inique ed eccessivamente costose. La ripartizione delle risorse del Fondo deve essere effettuata tenendo conto di principi di premialità che incentivino l'efficienza.

A livello microeconomico il costo standard, riflette il costo del servizio, opportunamente specificato e erogato a prestabiliti livelli di qualità, assumendo condizioni operative mediamente efficienti (definiti quindi sulla base delle attività e

dei costi di una pluralità di operatori e/o di conoscenze sui processi di produzione industriali). Gli affidatari sono incentivati a promuovere la propria efficienza (“yardstick competition”). In più, consente di definire il costo del servizio a prescindere dal particolare operatore che lo erogherà: l’amministrazione concedente potrà così riconoscere all’operatore affidatario un ammontare che remunera i costi di un (ipotetico ma realistico) operatore ragionevolmente efficiente e non i costi specifici dell’affidatario.

## 5.1 I modelli di costi standard

Al fine di fornire agli Enti competenti uno strumento utile a definire il costo standard (o costo-obiettivo) del proprio servizio di trasporto, si sono ricercate delle metodologie di calcolo che, seguendo una logica di ripartizione dei costi dei processi aziendali, consente di arrivare a definire il costo standard della singola azienda.

Esistono tre tipologie di modelli da adottare e sono:

- Modello BOTTOM – UP (ingegneristico);
- Modello TOP – DOWN (statistico);
- Modello IBRIDO (misto).

Il primo modello, bottom-up, definisce il costo in maniera analitica a partire da standard produttivi e tecnologici, determinati (in linea di principio) attraverso l’analisi delle trasformazioni input-output, ma richiede analisi molto onerose per la definizione degli standard produttivi di alcuni fattori e vi è il rischio di costruire condizioni produttive ideali piuttosto che realistiche. La logica bottom-up può determinare una stima del costo molto diversa da quella storicamente determinata dalle specificità dell’operatore; da una parte, ciò riduce i rischi di incorporare inefficienze ingiustificate, ma, dall’altra, può non essere in grado di contemplare alcuni vincoli tecnologici e contrattuali che possono limitare le prestazioni (operatore “ideale” contro “realistico”).

Il secondo, attribuisce il costo standard effettuando ipotesi più o meno restrittive sulla forma funzionale che può descrivere il legame tra le caratteristiche (quantitative e

qualitative) dell'output ed il costo analizzato; tale relazione ipotizzata viene poi specificata e validata attraverso l'osservazione dei dati contabili e operativi delle imprese, certificando, inoltre, quali caratteristiche siano effettivamente in grado di giustificare differenze più o meno rilevanti nei costi di produzione. Il costo a cui erogare un determinato output viene, quindi, integralmente desunto dagli operatori osservati. Per tali motivi, il modello top-down tiene conto maggiormente delle specificità degli operatori e individua una struttura di comportamento efficiente, che, in funzione dei modelli utilizzati, può riflettere l'efficienza media di tutti gli operatori osservati o di quelli più performanti. Tuttavia può incorporare le caratteristiche di inefficienza (anche le inefficienze "non fisiologiche" accettabili per un operatore reale).

Infine, partendo dal modello top-down che lega le caratteristiche dell'output del servizio con il suo costo economico, integrandolo con i vincoli normativi tipici del modello bottom-up ingegneristico, si arriva a definire il terzo modello, ibrido (o misto). In tal modo si tiene conto delle specificità degli operatori, evitando di dover ricorrere a scelte discrezionali, determinando una stima del costo standard che cerchi di non incorporare le inefficienze (non giustificabili) storicamente determinate.

La configurazione di costo rigorosa, deriva da una logica economica di produzione industriale, dove tutti i fattori produttivi devono essere individuati e remunerati. Pertanto, al fine di ricostruire i costi necessari e sufficienti a produrre il servizio sono stati considerati:

1. Costi dell'area "esercizio", che comprendono:

- Costo per il personale viaggiante ( $C_{PV}$ );
- Costo per il personale di scorta ( $C_{PS}$ );
- Costo energia di trazione ( $C_{TR}$ );

$$C_{TR} = \sum_i \frac{vetture\_km * P_{Ci}}{C_{Ci}}$$

dove:  $vetture\_km$  = chilometri di percorrenza contrattuali

$i$  = alimentazione veicolo  $i$ -esima (diesel, metano);

$P_{Ci}$  = prezzo del combustibile  $i$ -esimo (diesel, metano);

$C_C$  = consumo medio combustibile *i*-esimo.

- Costo ammortamento ( $C_{AM}$ ), per cui si ha

$$C_{AM} = \sum_i \frac{(N_i * P_i)}{V_t}$$

dove:  $N_i$  = numero di veicoli per tipologia;

$P_i$  = prezzo veicolo;

$V_t$  = vita tecnica (15 anni).

- Costo assicurazioni ed eventuali pedaggi ( $C_{AP}$ );
- Costo pulizia e guardiania del materiale rotabile, dei depositi ed officine ( $C_{PUGU}$ );
- Costo controlleria supplementare a terra e/o a bordo ( $C_{CS}$ ).

Mettendo insieme tutte le voci si ottiene:

$$C_{AE} = C_{PV} + C_{PS} + C_{TR} + C_{AM} + C_{AP} + C_{PUGU} + C_{CS}$$

## 2. Costi dell'area "manutenzione", che comprendono:

- Numero personale di manutenzione (funzione dei piani di manutenzione per tipologia di materiale rotabile) ( $N_{PM}$ );
- Costo medio unitario personale di manutenzione ( $C_{PM}$ );
- Costo materiali di manutenzione (funzione dei piani di manutenzione per tipologia di materiale rotabile) ( $C_{MATMAN}$ ).

Mettendo insieme tutte le voci si ottiene:

$$C_{MAN} = (C_{PM} * N_{PM}) + C_{MATMAN}$$

## 3. Costi dell'area "amministrativa", che comprendono:

- Costo amministrativi diretti (% del numero operativi\* costo unitario a parametro medio di un amministrativo) ( $C_{AMM.DIR}$ );
- Costo area esercizio ( $C_{AE}$ );
- Costo area manutenzione ( $C_{MAN}$ );



- Percentuale spese generali (Staff comuni ribaltati, assicurazioni, smaltimento rifiuti, struttura amministrativa, etc) (w).

Mettendo insieme tutte le voci si ottiene:

$$C_{AMM} = (C_{AMM.DIR} + C_{AE} + C_{MAN}) * w$$

4. Costo del capitale pre-tasse (tenendo conto dell'IRAP), tramite la misura fisica del capitale (numero di veicoli di proprietà in servizio) e la misura del capitale investito netto (valore netto dei veicoli di proprietà in servizio).

Il costo totale così determinato, rapportato al numero di veicoli-km di servizio, determina il costo medio chilometrico osservato per ciascun servizio erogato (nel seguito,  $CS_{km}$ ), e rappresenta la variabile dipendente della funzione scelta come base del modello di regressione:

$$C_{ST_{km}} = \left( \frac{C_{AE} + C_{MAN} + C_{AMM} + IRAP}{vettture\_km} \right) * (1 + U)$$

dove:  $U =$  margine utile,

$vettture\_km =$  percorrenze contrattuali.

Il modello così composto, è di semplice comprensione, estremamente operativo, flessibile perché permette la sua applicazione a tutti gli ambiti industriali ed anche chiaro perché permette di seguire l'influenza di ogni driver di costo sulla generazione del costo standard, di comprendere su quali variabili si può far leva per diminuirlo, per generare un guadagno maggiore, ed anche per stimolare proficui percorsi di efficienza di cui si è parlato. Si può scegliere una forma funzionale semplificata del modello precedentemente presentato, concentrando l'analisi su un numero limitato di variabili ritenute essenziali per il settore dei trasporti pubblici locali. Le variabili di interesse del modello semplificato presentato sono le seguenti:

1. Velocità commerciale (VC);
2. L'effetto della dimensione dei bacini di servizio (km);
3. L'ammodernamento del parco rotabile (€/km).

Analizziamo le variabili una ad una.

## 5.2 La velocità commerciale nel calcolo del costo standard

Anzitutto si deve darne una definizione: essa è una delle caratteristiche principali dei servizi di trasporto pubblici, e rappresenta la velocità media con cui il servizio viene erogato agli utenti. L'unità di misura è quindi quella di una velocità ovvero [km/h], e viene calcolata rapidamente acquisendo due dati separati: il numero di chilometri di servizio eserciti nell'anno e il numero di ore di guida, nette, impiegate per percorrerli (da capolinea di partenza a quello d'arrivo).

Tramite questa variabile, si evidenzia il primo effetto sulla qualità di erogazione del sistema di trasporto pubblico, poiché gli utenti ne percepiscono una pluralità di aspetti, quali per esempio il livello di congestione del traffico, la distanza media fra le fermate, il livello di manutenzione delle strade, ecc..

Allo stesso tempo si intuisce che la velocità commerciale ha notevole influenza sul costo d'esercizio perché, siccome i servizi su autobus sono prettamente "labour", il costo del lavoro determina mediamente più della metà dei costi della produzione, e la voce di costo legata alla remunerazione del personale viaggiante, di deposito e di movimento, ne rappresenta la parte più significativa. D'altra parte il numero di chilometri di servizio annui che ogni autista può percorrere dipende intrinsecamente dalla velocità commerciale a cui viene erogato il servizio, nonché dalla tipologia, urbana o extraurbana. Da questo punto di vista, si ricorda che è possibile programmare turni su percorsi urbani in maniera più produttiva rispetto agli extraurbani, poiché nel primo caso agli autisti sono fornite pause più brevi (fra le corse da un capolinea all'altro) rispetto a quelle date agli autisti sull'extraurbano. Per questi motivi, si può concludere che se si riuscisse ad aumentare la velocità commerciale in un contesto urbano, si consentirebbe un recupero di produttività molto maggiore rispetto a quanto si recupererebbe in un contesto extraurbano.

Sebbene, poi, non sia necessariamente vero che un servizio urbano sia lento e uno extraurbano veloce, si può comunque osservare che esiste una qualche correlazione tra alta velocità e servizi di natura extraurbana e tra bassa velocità e servizi urbani. Ciò implica che per velocità commerciali basse (e quindi contesti con strutturazione

dei turni prevalentemente orientati alla tipologia urbana), l'effetto incrementale della velocità commerciale è atteso molto elevato, mentre per velocità commerciali alte (e quindi contesti con strutturazione dei turni prevalentemente orientati alla tipologia extraurbana) l'effetto incrementale della velocità commerciale dovrebbe risultare meno importante.

Per quanto riguarda la relazione fra chilometri percorsi da un autobus e la velocità commerciale, si potrebbe intuire una proporzionalità diretta fra le due variabili. In realtà non è così (figura 5.104). Infatti i veicoli, diversamente dal personale di guida, possono essere sfruttati da più autisti, su più turni, lo stesso giorno (e nella pratica ciò accade sempre). Pertanto, anche in situazioni di bassa velocità commerciale, ovvero in un contesto urbano, il numero di chilometri di servizio percorsi in un anno da un veicolo può essere opportunamente incrementato utilizzando lo stesso veicolo

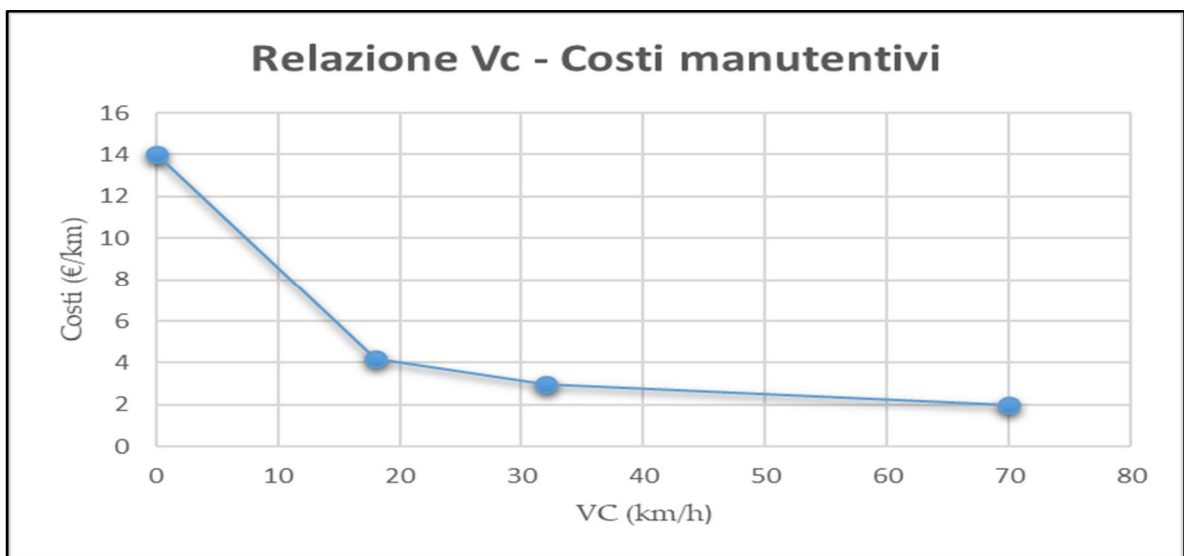


Figura 5.104: L'influenza della Vc sul costo standard di un esercente il TPL

per erogare più turni "urbani" anziché sfruttarlo con velocità commerciali più alte, diminuendo il numero di turni giornalieri, nel contesto extraurbano. Ecco quindi che si spiega il motivo per cui può esistere una grande differenza di chilometri di servizio svolti annualmente da ogni autista e una più modesta differenza di chilometri percorsi annualmente da ogni veicolo (urbano o extraurbano). Un'ultima considerazione da fare riguarda la relazione tra velocità commerciale ed il consumo di carburante (nel caso di veicoli a gasolio o metano) o energia (in caso di veicoli

elettrici/filobus). Il consumo calcolato generalmente per una flotta di autobus è più alto per servizi con velocità commerciali basse (tipicamente servizi urbani). Ciò è testimoniato anche dai calcoli effettuati grazie ai database dell'azienda TPER. Pertanto, l'incremento marginale della velocità commerciale può anche determinare una riduzione del costo di trazione maggiore per servizi lenti che per i servizi veloci.

### 5.3 Il numero di veicoli-chilometri nel calcolo del costo standard

Viene definito il numero di veicoli-chilometri di servizio come il chilometraggio di percorrenza previsto, contrattuale, (espresso in milioni di chilometri) che è necessario che venga coperto da tutta la flotta di veicoli di trasporto pubblico. In qualche maniera questa percorrenza "di progetto" è legata alla dimensione del territorio in cui si deve muovere l'azienda di TPL. Più è esteso il bacino di erogazione del servizio, più gli operatori di tale servizio possono essere avvantaggiati (ma anche svantaggiati) da economie di scala (o diseconomie). Ci si può infatti aspettare che tali economie/diseconomie di scala, per lo meno di natura pecuniaria, siano dipendenti fortemente dal servizio erogato.

Il vantaggio di questo tipo di economie, lo si può vedere quando, con gare indette per l'acquisto di un numero sufficientemente elevato di veicoli, gli operatori sopra una certa dimensione (o consorzi di operatori) possono ottenere forniture di veicoli a prezzi unitari molto vantaggiosi.

Un altro vantaggio lo si può apprezzare (anche se non sempre ciò avviene) dall'acquisto di carburanti per l'autotrazione (tipicamente gasolio e metano), per cui i "grandi operatori" o consorzi di operatori, possono ottenere uno sconto quantità giustificato dall'acquisto di notevoli volumi di combustibile. Lo svantaggio può essere legato alle condizioni contrattuali dei lavoratori: essi infatti possono ottenere migliori condizioni contrattuali attraverso un maggior potere negoziale nell'ambito della contrattazione di secondo livello (figura 5.105).

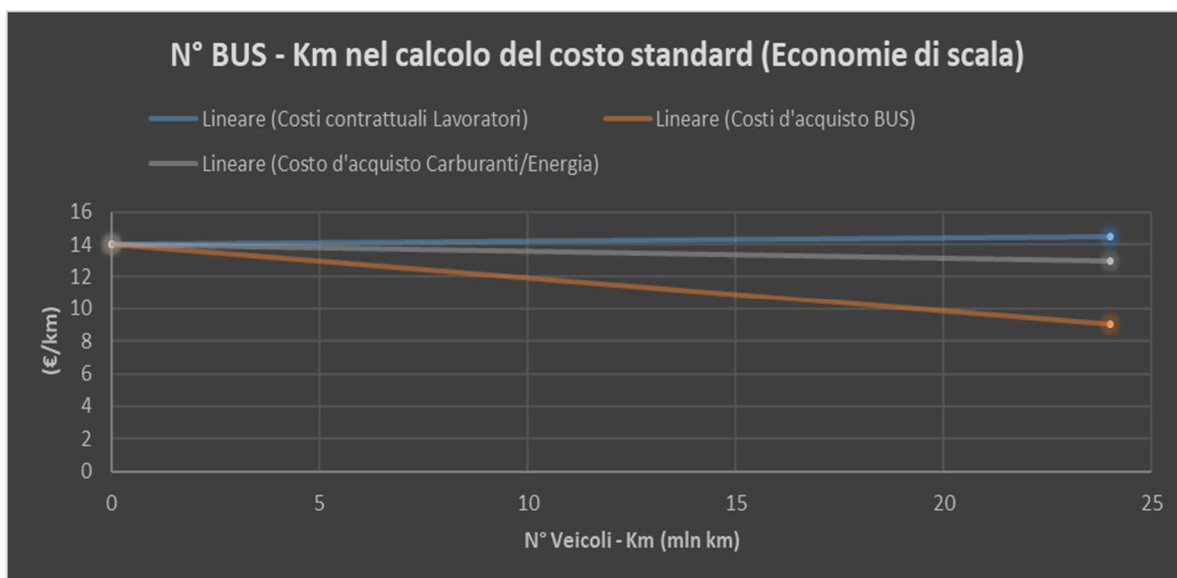


Figura 5.105 Economie di scala per operatore di TPL

#### 5.4 L'ammmodernamento della flotta nel calcolo del costo standard

Viene espresso in [€/km] ed è definito come il valore monetario per veicoli-km di servizio della somma di tutti gli ammortamenti dei veicoli di proprietà (al lordo di eventuali contributi pubblici a fondo perduto e ricalcolati assumendo per tutti una vita utile di 15 anni) e dei canoni di affitto per i veicoli utilizzati. La stima monetaria riferita a questa definizione è definita come grado di ammodernamento del parco rotabile. I veicoli attualmente utilizzati per l'erogazione dei servizi di trasporto pubblico sono purtroppo caratterizzati da un'elevata anzianità media (nell'extraurbano ancora di più che nell'urbano) e sono nella grande maggioranza dei casi autobus con trazione a gasolio. Pertanto, dotarsi di un parco veicoli molto più giovane della media nazionale o addirittura a basso impatto ambientale (autobus a trazione a metano o elettrica) richiede livelli di investimento (e quindi quote annuali di ammortamento) molto più elevati di quelli sostenuti dagli operatori il cui parco rotabile ha un'anzianità media in linea o più alta di quella nazionale.

Indicativamente, un veicolo a gasolio nuovo, con strumentazione moderna, può costare anche più del doppio di uno simile per dimensione e posti offerti acquistato dieci anni fa e un veicolo a metano nuovo può costare anche il 30 % in più di uno a

gasolio nuovo, a parità di dimensioni, posti offerti e strumentazione di bordo, mentre uno elettrico nuovo anche il 100% in più di uno equivalente a gasolio nuovo.

Per questi motivi, il grado di ammodernamento rappresenta un driver del costo del servizio, indicativo di una caratteristica qualitativa (l'ammodernamento del parco rotabile) controllabile dall'operatore che lo eroga.

## 5.5 L'influenza dei parametri inquinanti sui costi standard

La recente direttiva europea 2009/33/CE, contribuisce al conseguimento degli obiettivi europei volti a migliorare l'efficienza energetica e a ridurre le emissioni inquinanti nel settore dei trasporti. Essa promuove lo sviluppo di un mercato di veicoli puliti, ed impone agli enti pubblici ed altri operatori di tener conto, al momento di aggiudicare appalti pubblici per veicoli adibiti al trasporto, dell'impatto di tali veicoli, nell'arco della loro vita utile, in termini di consumo energetico, emissioni di CO<sub>2</sub> e di altre sostanze inquinanti. L'impatto energetico e l'impatto ambientale riguardano:

- il consumo energetico;
- le emissioni di CO<sub>2</sub>;
- le emissioni di NO<sub>x</sub>;
- idrocarburi non metanici (NMHC);
- particolato (PM).

Per soddisfare tale requisito, ovvero prendere in considerazione l'impatto ambientale dei veicoli, le amministrazioni aggiudicatrici, gli enti aggiudicatori e gli operatori di servizi pubblici di trasporto possono scegliere di fissare specifiche tecniche in materia di prestazioni energetiche ed ambientali nella documentazione per l'acquisto di veicoli oppure di integrare nella decisione di acquisto l'impatto energetico e l'impatto ambientale.

## 5.6 Metodologia di calcolo dei costi di esercizio durante l'intero arco di vita

La direttiva prevede una metodologia di calcolo che consente di trasformare in valore monetario i costi del consumo energetico e i costi relativi alle emissioni di CO<sub>2</sub> e alle emissioni di sostanze inquinanti nell'intero arco di vita di un veicolo. Il chilometraggio percorso da un veicolo nell'intero arco di vita è desunto, salvo altrimenti specificato, dalla tabella 12.

Tabella 12: Chilometraggio percorso da un veicolo nell'intero arco di vita

Categoria veicolo (categorie M e N di cui alla direttiva 2007/46/CE)	Chilometraggio nell'intero arco di vita
Autovetture (M <sub>1</sub> )	200 000 km
Veicoli commerciali leggeri (N <sub>1</sub> )	250 000 km
Veicoli commerciali pesanti (N <sub>2</sub> , N <sub>3</sub> )	1 000 000 km
Autobus (M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> )	800 000 km

I costi di esercizio nell'intero arco di vita connessi al consumo energetico, nonché i costi relativi alle emissioni di CO<sub>2</sub> e alle emissioni di sostanze inquinanti stabiliti nella tabella 13 che sono imputabili all'esercizio dei veicoli da acquistare, sono trasformati in valore monetario e calcolati usando la metodologia seguente:

1. per quanto riguarda i costi di esercizio imputabili al consumo energetico nell'arco di vita dell'autobus, si calcola anzitutto il consumo energetico per chilometro, a prescindere dal fatto che sia fornito direttamente o meno. Qualora sia fornito in unità diverse, il consumo di carburante è convertito in consumo di energia per chilometro utilizzando i fattori di conversione di cui alla tabella 13, per i contenuti energetici dei vari carburanti. Si moltiplica il numero per il valore monetario del combustibile per unità di energia. Tale valore unico equivale al costo per unità di energia di metano, diesel... ante imposte, quando sono utilizzati come carburante per trasporto. I costi di esercizio imputabili al consumo energetico di un veicolo nell'intero arco di vita sono calcolati moltiplicando il chilometraggio relativo

all'intero arco di vita [km], per il consumo energetico per chilometro [MJ/km] e per il costo per unità di energia [€/MJ].

Tabella 13: *Contenuti energetici dei carburanti*

Carburante	Contenuto energetico
Diesel	36 MJ/litro
Benzina	32 MJ/litro
Gas naturale/biogas	33-38 MJ/Nm <sup>3</sup>
Gas di petrolio liquefatto (GPL )	24 MJ/litro
Etanolo	21 MJ/litro
Biodiesel	33 MJ/litro
Emulsioni	32 MJ/litro
Idrogeno	11 MJ/Nm <sup>3</sup>

2. I costi relativi alle emissioni di CO<sub>2</sub> sono calcolati moltiplicando il chilometraggio relativo all'intero arco di vita per le emissioni di CO<sub>2</sub> in chilogrammi per chilometro e per il costo per chilogrammo.
3. I costi relativi alle emissioni inquinanti sono calcolati sommando i costi di esercizio relativi alle emissioni di NO<sub>x</sub>, NMHC e particolato.

La tabella 14 riporta il costo specifico di ogni fattore emissivo.

Tabella 14: *Costo specifico di ogni fattore emissivo*

CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NMHC	Particolato
0,03-0,04 EUR/kg	0,0044 EUR/g	0,001 EUR/g	0,087 EUR/g

I requisiti appena esposti sono predisposti per:

1. fissare specifiche tecniche in materia di prestazioni energetiche ed ambientali nella documentazione per l'acquisto di nuovi veicoli adibiti al trasporto su strada, per ciascun tipo di impatto considerato, nonché per ogni altro tipo di impatto ambientale;
2. integrare nella decisione d'acquisto l'impatto energetico e ambientale secondo le seguenti modalità:
  - inserendo tali impatti fra i criteri di aggiudicazione, nei casi in cui è aperta una procedura d'appalto;



- integrando gli impatti trasformati in valore monetario, nella decisione d'acquisto, avvalendosi della metodologia di calcolo dei costi di esercizio durante l'intero arco di vita.

Nelle procedure di gara d'acquisto veicoli, per adempiere agli obblighi emanati dalle direttive europee e in particolare dalla direttiva 2009/33/CE discussa, nei capitolati di gara, vengono richieste ai costruttori delle specifiche elaborazioni sui costi energetici ed ambientali.

Tabella 15: Foglio di calcolo per i fattori emissivi

CAPITOLATO SPECIALE PER ACQUISTO DI AUTOVEICOLI CON ALLESTIMENTO PER TRASPORTO PASSEGGERI		SCHEMA N°	
CALCOLO COSTO TECNICO EMISSIONI			
<b>FOGLIO DI CALCOLO PER IL COSTO TECNICO EMISSIONI</b>			
<b>TIPO MOTORIZZAZIONE: EURO VI - TIPO COMBUSTIBILE: GASOLIO</b>			
1	CC = Consumo dichiarato carburante		l/100 km
2	eNOx = emissioni ossido d'azoto		g/kWh
3	ePART = emissioni di particolato		g/kWh
4	eNMHC = emissione idrocarburi non metanici (*)		g/kWh
5	CM = chilometraggio veicolo nell'intero ciclo di vita	800.000	km
6	Consumo energetico	36	MJ/litro
7	Potere Calorifico Gasolio	10	kWh/litro
8	eCO2 = emissioni di CO2	2,5636	kg/litro
9	cuC = costo unitario gasolio pre-Accisa	1,00	€/litro
10	cuCO2 = costo unitario emissioni CO2	0,04	€/kg
11	cuNOx = costo unitario emissioni NOx	0,0088	€/g
12	cuPART = costo unitario emissioni Particolato	0,174	€/g
13	cuNMHC = costo unit. emissioni idrocarburi non metanici	0,002	€/g
14	Consumo Carburante [(1 x 5)/100]	0	litri
15	Consumo Energetico Carburante [14 x 7]	0	kWh
16	Emissioni CO2 [14 x 8]	0	Kg
17	Emissioni NOx [15 x 2]	0	g
18	Emissioni PART [15 x 3]	0	g
19	Emissioni NMHC [15 x 4]	0	g
20	<b>COSTO CICLO DI VITA CARBURANTE [9 X 14]</b>	0	€
21	<b>COSTO CICLO DI VITA CO2 [10 x 16]</b>	0	€
22	<b>COSTO CICLO DI VITA NOx [11 x 17]</b>	0	€
23	<b>COSTO CICLO DI VITA PART [12 x 18]</b>	0	€
24	<b>COSTO CICLO DI VITA NMHC [13 x 19]</b>	0	€
25	<b>Ces = COSTI DI ESERCIZIO ENERGETICI ED AMBIENTALI DEL CICLO DI VITA [20+21+22+23+24]</b>	0	€

Rilevato secondo ciclo  
**CUNA 503-01** DA OFFERTA

Con fattore di deterioramento DF - ciclo **WHTC** DA OFFERTA

Con fattore di deterioramento DF - ciclo **WHTC** DA OFFERTA

Con fattore di deterioramento DF - ciclo **WHTC** DA OFFERTA

decreto 8 maggio 2012

D.lgs 03/03/2011 n.24

VALORE STANDARD

Standard DEFRA

VALORE STANDARD

STD.

D.lgs 03/03/2011 n.24

D.lgs 03/03/2011 n.24

D.lgs 03/03/2011 n.24

D.lgs 03/03/2011 n.24

Consumo carburante [14 / 5] **0,00000** litri/km

Emissioni CO2 [16 / 5] **0,00000** kg/km

Emissioni NOx [17 / 5] **0,00000** g/km

Emissioni PART [18 / 5] **0,00000** g/km

Emissioni NMHC [19 / 5] **0,00000** g/km

(\*) emissioni NMHC (g/kWh) calcolate teoricamente in base al metodo analitico (valido per alimentazioni gasolio ma non a gas naturale):  
eNMHC (teoric) = 0,98 x eTHC (eHC total)

Le case costruttrici dei veicoli sono interessate alla compilazione di particolari fogli di calcolo (tabella 15), in cui attestano tutte le quantità di energia e di emissioni rilevate e che caratterizzeranno il veicolo durante il ciclo di vita predefinito da normativa (800.000 km).

Vengono perciò calcolati sui cicli di prova sia i consumi (litri di gasolio o kg di gas per 100 km), sia i grammi (o i kg) al chilometro o al kWh delle emissioni prestabilite

di CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM e HC. In seguito vengono eseguite le opportune moltiplicazioni fra i valori rilevati ed il costo unitario (“cu”) dei fattori inquinanti considerati e il chilometraggio di missione (o kWh totali di missione) per dare il valore complessivo delle emissioni e dei consumi totali, durante il ciclo di vita. Sommando i costi totali ambientali dati dalle emissioni, al costo totale energetico (calcolato con il prezzo del combustibile esplicitato nella scheda stessa), si ottiene il valore complessivo del costo energetico ed ambientale del ciclo di vita (che in tabella 15 è rappresentato dall’ultima casella rossa in fondo alla scheda).

A questa scheda viene poi dato risalto tramite un punteggio, stabilito da ogni capitolato di gara d’acquisto: al migliore (minore) costo sarà attribuito un maggior punteggio, grazie cui il corrispondente costruttore avrà maggior probabilità di vincere la gara del lotto per cui concorre.

## 5.7 I consumi dei veicoli adibiti al trasporto pubblico locale

Arrivati a questo punto è necessario stabilire i valori di consumo di combustibile e le emissioni inquinanti di ogni autobus. In realtà, si può fare un ragionamento semplificato: al fine di quantificare il costo standard dei veicoli, si può dividere l’analisi in specifici settori, contenenti al proprio interno diverse tipologie e famiglie di autobus. La decisione è stata quella di suddividere in base alla alimentazione e ai sistemi di propulsione, e cioè:

1. Veicoli alimentati a gasolio;
  - Con propulsore termico tradizionale;
  - Con sistemi di trazione ibridi;
2. Veicoli alimentati a gas naturale compresso (CNG), con propulsore termico tradizionale;
3. Filobus.

## 5.8 Le emissioni dei veicoli adibiti al trasporto pubblico locale

Per quanto riguarda i calcoli delle emissioni, sono purtroppo di difficile valutazione. Infatti a livello teorico, i motivi di tali difficoltà sono legati a due parametri motoristici, ovvero la velocità del motore, espressa in “rpm” (giri al minuto), e il “carico motore”, ovvero le richieste da parte del guidatore, in termini di coppia e potenza. In generale si può affermare che aumentando i giri motore, aumenta il numero di combustioni a in un determinato lasso di tempo, e di conseguenza i tempi fisici di combustione variano (sono più brevi a parità di angolo di manovella). Vale il contrario se si diminuiscono i giri motore. La variazione dei tempi di combustione determinerà una certa variazione di emissioni inquinanti. Per quanto riguarda il carico, in generale si può affermare che aumentandolo, aumenta la richiesta di potenza al motore, aumenta perciò la quantità di combustibile iniettato in camera, e di conseguenza la quantità anche i prodotti di combustione. Anche in questo caso quindi, una variazione di potenza si trasforma in una variazione di emissioni inquinanti. A livello pratico la difficoltà nel valutare le emissioni rimane. In particolare, oltre alle succitate cause di variazioni di emissioni, vanno considerati ulteriori fattori, come la velocità del mezzo, la pendenza, le accelerazioni/partenze, i pesi, l'aerodinamica, ecc..

La generazione delle emissioni è quindi legata ad una moltitudine di fattori che difficilmente si riescono a simulare. Allora si sono introdotti dei modelli di “ciclo di guida” standard, validi per tutti i veicoli (o in realtà parti di essi, come i mezzi pesanti, gli autobus, le automobili...), in cui vengono fatti variare velocità motore e carico, secondo standard prefissati. In particolare, per gli autobus, ci sono due serie di prove, una stazionaria (ESC, European Stationary Cycle) e una transitoria (ETC, European Transient Cycle). Si riporta comunque un grafico delle emissioni diviso per i diversi sistemi di trazione (figura 5.106).

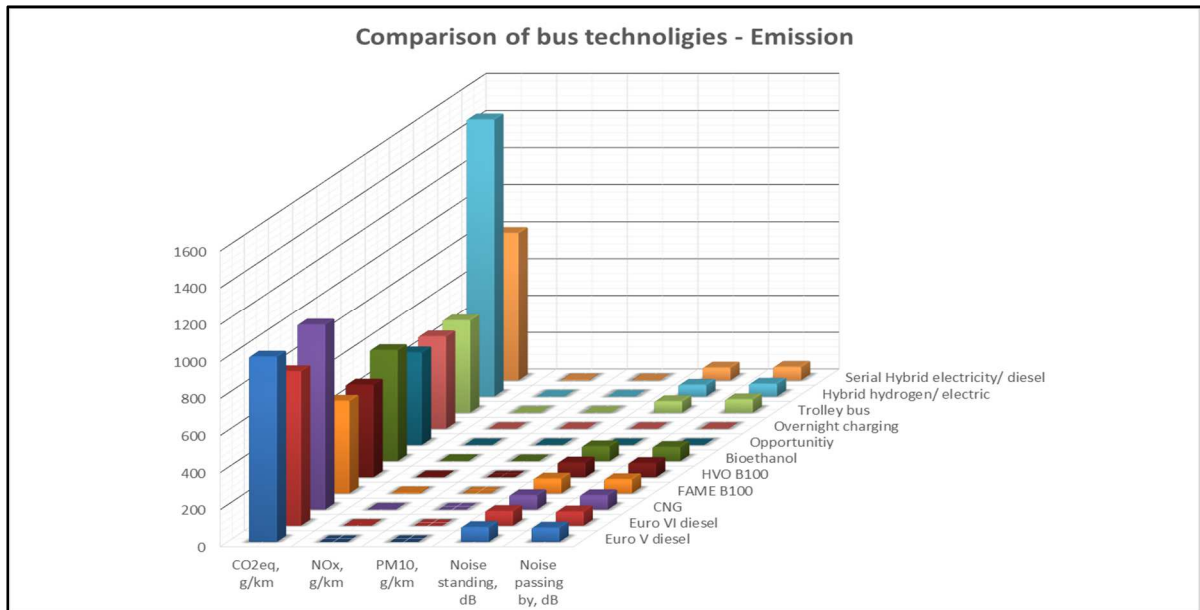


Figura 5.106: Comparison emission of different bus technologies

### 5.8.1 European Steady Cycle

Questo tipo di prova ha come obiettivo il calcolo delle emissioni dei veicoli pesanti alimentati esclusivamente a gasolio. Il motore è testato su di un banco dinamometrico in una sequenza di punti stazionari di seguito specificata (vedi figura 5.107).

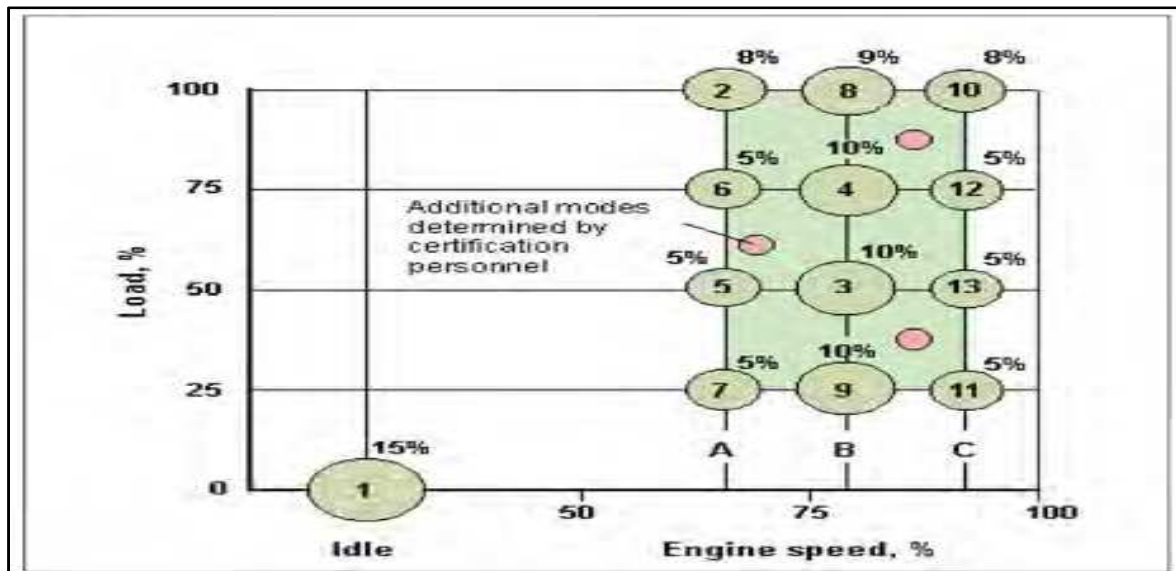


Figura 5.107 Criteri di prova al banco di motori diesel

Il motore deve essere mantenuto in ciascun punto per un tempo opportuno, e i cambi di velocità di rotazione e carico devono essere effettuati in meno di 20 secondi. La velocità di rotazione deve essere tenuta entro un range di  $\pm 50$  rpm rispetto a quella

nominale del punto, mentre la coppia deve essere tenuta entro  $\pm 2\%$  della coppia massima relativa allo stesso regime di prova. Le emissioni sono misurate in ogni punto, di cui, poi, viene fatta una media ponderata su tutto il ciclo usando i fattori di peso specificati dalla norma. Il risultato finale delle emissioni verrà espresso ancora in g/kWh dividendo la suddetta media per la media ponderata delle potenze impegnate. Il test consiste nel far lavorare il motore a tre velocità differenti (IDLE, A,B,C) ognuna per un certo periodo di tempo, durante il quale viene richiesto al motore un carico (0; 25%; 50 %; 75 %; 100 %), e quindi una potenza costante.

Per determinare le velocità A, B e C, si definisce un alto regime (o velocità) del motore  $RPM_{alto}$ , rilevando al banco i regimi del motore, in corrispondenza dei quali si ha il 70% della potenza massima dichiarata e scegliendo fra questi il maggiore; si definisce un basso regime (o velocità) del motore  $RPM_{basso}$ , rilevando al banco il più basso regime del motore, in corrispondenza del quale si ha il 50% della potenza massima dichiarata; le velocità saranno così calcolate:

- $A = RPM_{basso} + 0.25 (RPM_{alto} - RPM_{basso})$ ;
- $B = RPM_{basso} + 0.50 (RPM_{alto} - RPM_{basso})$ ;
- $C = RPM_{basso} + 0.75 (RPM_{alto} - RPM_{basso})$ .

Nella seguente tabella 16 vengono riportate tutte le combinazioni:

*Tabella 16: Combinazioni di prova del motore diesel*

Modalità numero	Regime motore	Carico percentuale	Fattore di ponderazione	Durata della modalità
1	Minimo	-	0,15	4 minuti
2	A	100	0,08	2 minuti
3	B	50	0,10	2 minuti
4	B	75	0,10	2 minuti
5	A	50	0,05	2 minuti
6	A	75	0,05	2 minuti
7	A	25	0,05	2 minuti
8	B	100	0,09	2 minuti
9	B	25	0,10	2 minuti
10	C	100	0,08	2 minuti
11	C	25	0,05	2 minuti
12	C	75	0,05	2 minuti
13	C	50	0,05	2 minuti

## 5.8.2 European Transient Cycle

Questo ciclo di prova è valido sia per veicoli a gasolio provvisti di sistemi avanzati di post trattamento (come catalizzatori SCR e/o trappole anti particolato), sia per veicoli a metano, per i quali tale test è invece l'unico utile per la misurazione delle loro emissioni. Tale test è differente rispetto a quello spiegato prima, in quanto, come riporta il termine "transient", vengono variate in maniera continuativa sia la velocità motore che la potenza richiesta (figura 5.108). Questo approccio permette di rappresentare tre differenti condizioni di guida, ognuna della durata di 600 secondi:

1. rappresenta un stile di guida urbano, con velocità massime di 50 km/h, frequenti fermate, accelerazioni e periodi a regime di rotazione del motore minimo;
2. rappresenta uno stile di guida extraurbano, con bruschi momenti di accelerazione. La velocità media è di 72 km/h;
3. rappresenta uno stile di guida tipico di autostrade o strade assimilabili a queste. La velocità media è di 88 km/h.

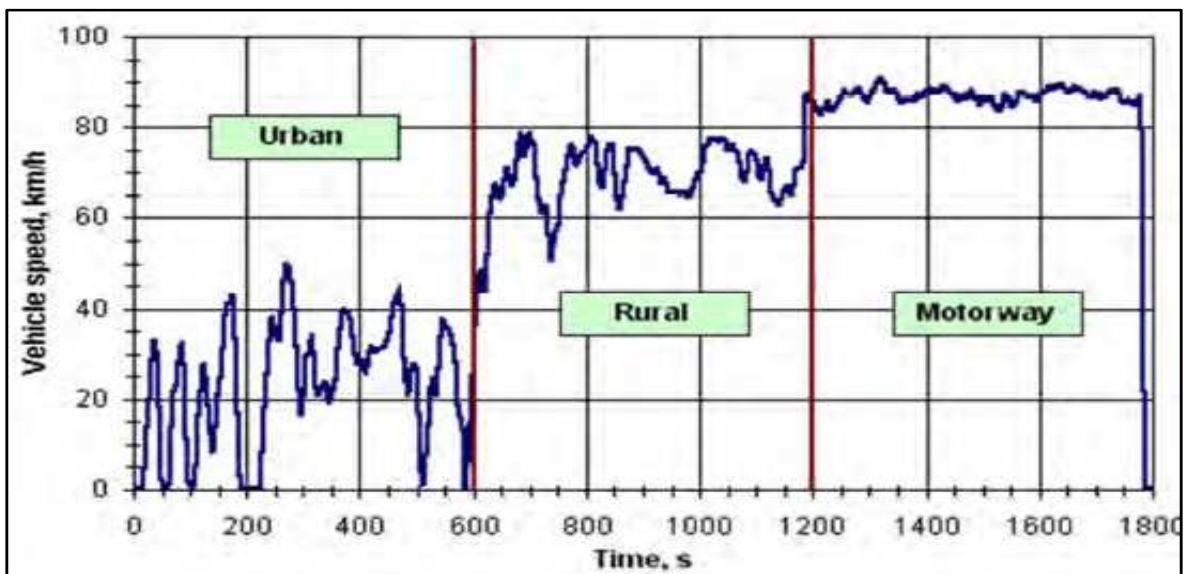


Figura 5.108: Variazione di velocità e carico

## 5.9 La metodologia SORT (Standardized On-Road Test)

Molti produttori di autobus, nella realtà attuale, dichiarano il consumo sulla base di test eseguiti su banchi prova motori con cicli ESC e/o ETC. Tuttavia, né il ciclo ESC con la prescrizione di 13 punti fissi di misurazione, né il ciclo ETC, con caratteristiche



più dinamiche, prendono in considerazione l'intero veicolo. Inoltre questi cicli di prova non riflettono in nessun modo adeguatamente il funzionamento Stop-&-Go di un autobus di linea. Per questi motivi, le prove definite dalle normative non sono sufficienti per simulare il funzionamento di un veicolo di trasporto pubblico. Perciò è sembrato indispensabile la progettazione di cicli di prova su strada per l'intero veicolo, nel quadro del progetto SORT, sulla base di dati statisticamente generati da diverse società europee di trasporto (velocità commerciale, tempo medio trascorso alle fermate, distanza media tra di loro, carico ...).

L'obiettivo della metodologia è di generare un ciclo di prova standardizzato per autobus, che misuri il consumo di carburante affinché sia applicato a tutti i costruttori e operatori del sistema di trasporto pubblico.

Per definire i fattori che influenzano maggiormente i test, è necessario tener conto di un certo numero di parametri tipici, come la densità di traffico, il numero di fermate (sia per la salita e la discesa dei passeggeri, ma anche dovuti alla presenza di semafori, ostacoli, etc...), il percorso, i carichi del veicolo e la velocità commerciale. Sebbene integrando così tante variabili risulta un processo di difficile esecuzione, questi parametri possono essere visti come influenza diretta sulla velocità commerciale, che diventa quindi una sorta di denominatore comune per le diverse variabili. In figura 5.109 si riporta lo schema logico dei ragionamenti svolti.

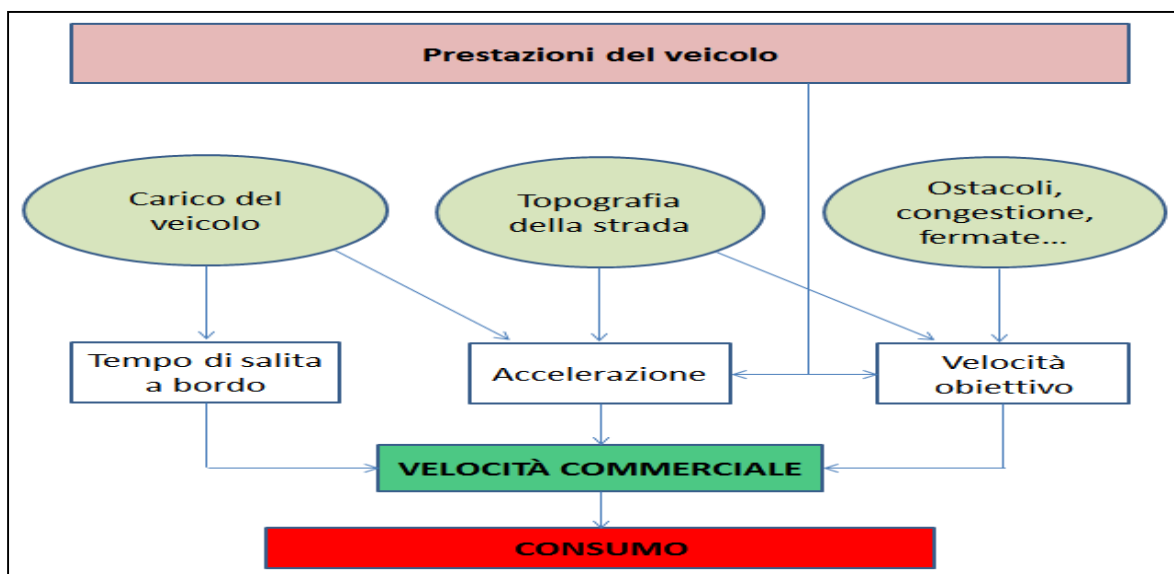


Figura 5.109 Schema prove

La velocità commerciale può essere vista quindi come il parametro chiave di differenziazione dei distinti modelli operativi. Infatti, la figura 5.110 seguente mostra che ogni cambiamento dei parametri impatta sulla velocità commerciale e quindi sul consumo (che è inversamente proporzionale).

Parametri	Variazione	Velocità commerciale	Consumi
Accelerazione	↗	↗	↗
Tempo perso alle fermate	↘	↗	↘
Carico	↘	↗	↘
Numero di fermate	↘	↗	↘
Velocità commerciale	↘	↗	↘

Figura 5.110 Influenza dei parametri sulla velocità commerciale

Quindi, è evidente che, accelerazione a parte, ogni fattore che aumenta la velocità commerciale ha un'influenza positiva sul consumo. L'accelerazione, però è meno influente di altri fattori, in quanto è fortemente limitata per ragioni di comfort dei passeggeri e a causa delle restrizioni ambientali (eco guida). La riduzione dei consumi in seguito all'aumento della velocità commerciale è un paradosso ben noto agli operatori: la velocità commerciale può essere influenzata tramite misure strutturali, come corsie dedicate, e di conseguenza una riduzione di fermate legate al grado di congestione, avrà un impatto favorevole sui consumi (figura 5.111).



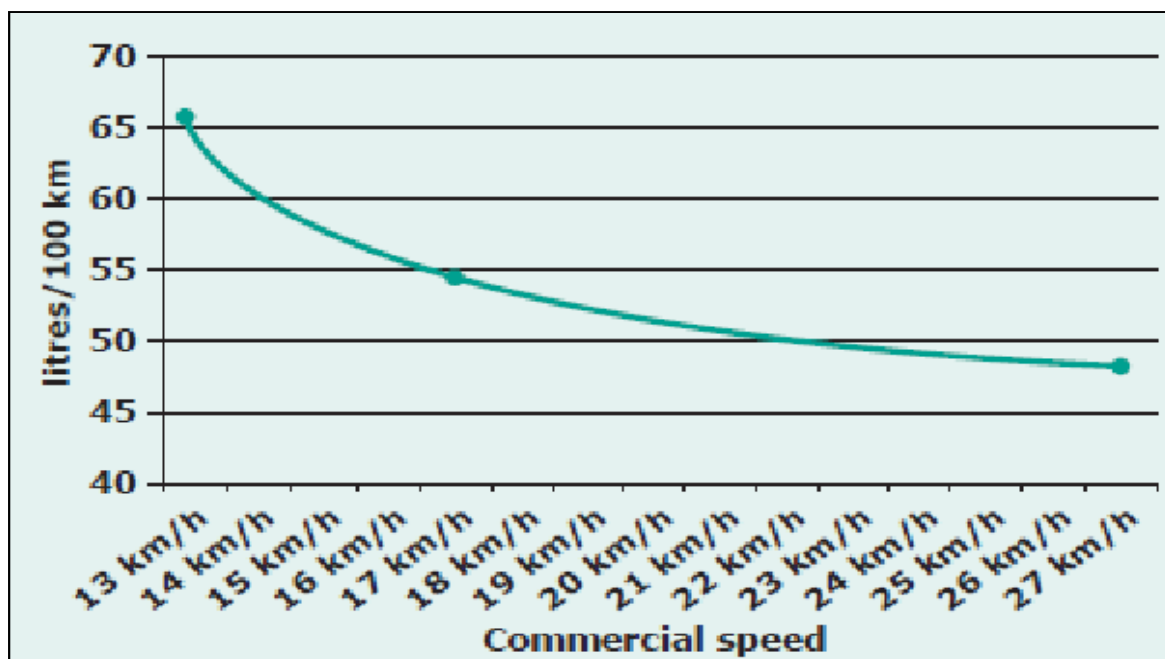


Figura 5.111 Relazione consumi/velocità commerciale

La velocità media (commerciale), come verrà anche specificato in seguito, considera solo il tempo in cui l'autobus è su strada, mentre non considera il tempo in cui l'autobus è in attesa al capolinea o il tempo speso da questo per lasciare il deposito e recarsi al capolinea o per tornarvi da fine servizio. I valori tipici della velocità media nel traffico cittadino nei centri urbani sono di 10/14 km/h, quelli tipici dei percorsi suburbani e delle piccole città si aggirano tra i 16 e i 20 km/h, mentre nei percorsi extraurbani arrivano a 25/30 km/h. Un'ultima considerazione, valida esclusivamente per i veicoli ibridi, va fatta sull'influenza della topografia di un percorso sul consumo di carburante: esso viene modificato, traendo giovamento dal recupero di energia in frenata.

Ogni azienda vorrebbe avere un ciclo che rifletta la condizione del proprio servizio, ma ciò è chiaramente impossibile, visto che sarebbero necessari tanti cicli quanti sono i percorsi degli autobus. Inoltre, in molte città, gli stessi veicoli viaggiano su percorsi diversi, ognuno con le proprie caratteristiche. Da questa situazione, nasce la filosofia SORT: progettare un certo numero di cicli in modo tale che le aziende costruttrici di veicoli possano valutare il loro funzionamento come combinazione di diversi cicli di base. Sono stati definiti perciò 3 tipi diversi di cicli: il SORT 1 (ciclo urbano), il SORT 2 (combinato urbano-suburbano) e il SORT 3 (ciclo di periferia o extraurbano).

A causa della necessità di test semplici e riproducibili, si propongono cicli relativamente lunghi; questi sono composti da moduli identici (cicli base) in modo che il collaudatore possa adottare un modello di guida del tutto invariabile. In queste condizioni saranno prodotti risultati attendibili e più vicini alle “reali” condizioni di guida dei conducenti. La ripetizione di un certo numero di moduli (cicli base) ha anche il vantaggio di consentire un doppio controllo sulla qualità dei risultati e rende possibile eliminare dal campione i risultati che siano troppo distanti dai dati concordati (accelerazione eccessiva, fermate troppo brevi, mancato rispetto della velocità imposta...). Il ciclo proposto è pertanto costituito dalla ripetizione identica del ciclo di base, caratterizzato da una velocità media, una lunghezza, e condotto con un carico simulato (figura 5.112).

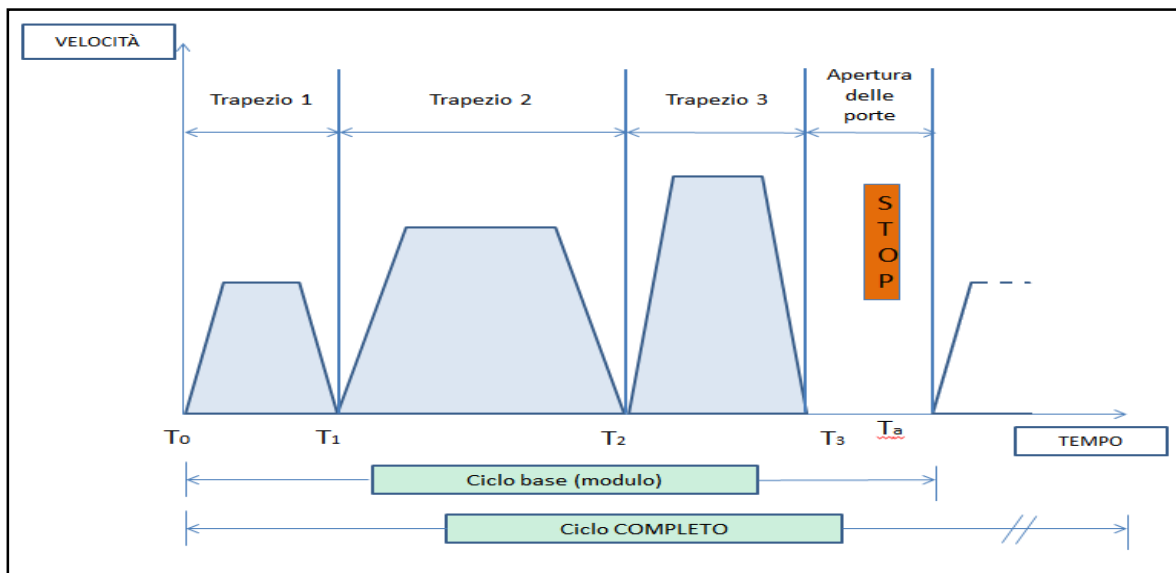


Figura 5.112: Ciclo di prova Standard

Un “ciclo base” (modulo) è costituito da diversi trapezi, suddivisi da fermate. La sequenza dei trapezi (anche denominati “sezioni”) all’interno di un modulo ha lo scopo di riflettere le condizioni di guida di un veicolo di trasporto pubblico: soste frequenti (sia con apertura delle porte per l’imbarco / sbarco, o fermate dovute alle condizioni ambientali, come semafori, congestione...). Viene definito anche il tempo di inattività totale all’interno di un ciclo base, così come la durata complessiva del modulo, al fine di raggiungere una velocità media prestabilita. L’inattività è data dalle fermate, che intervallano i trapezi, ciascuno dei quali è definito da

un'accelerazione, un tratto a velocità costante (sezione velocità imposta) e una fase di frenata. Alla fine di ogni trapezio (o sezione) è previsto un “tempo di fermata” che rappresenta le soste dovute al traffico (senza apertura porte); ogni modulo si conclude con un altro “tempo di fermata”, questa volta rappresentante la salita/discesa dei passeggeri (includendo l’apertura/chiusura porte).

Si riportano le caratteristiche di ogni ciclo SORT in tabella 17:

Tabella 17: Caratteristiche di ogni ciclo SORT

	<b>SORT 1</b>	<b>SORT 2</b>	<b>SORT 3</b>
<b>Velocità commerciale</b>	12	18	25.3
<b>Numero di fermate</b>	5.8	3.3	2.1
<b>Tempo di sosta (%)</b>	39.7	33.4	20.1
<b>Trapezio 1: V-cost (km/h) / Lunghezza (m)</b>	20/100	20/100	30/200
<b>Accelerazione minima (m/s<sup>2</sup>)</b>	1.03	1.03	0.77
<b>Trapezio 2: V-cost (km/h) / Lunghezza (m)</b>	30/200	40/220	50/600
<b>Accelerazione minima (m/s<sup>2</sup>)</b>	0.77	0.62	0.57
<b>Trapezio 3: V-cost (km/h) / Lunghezza (m)</b>	40/220	50/600	60/650
<b>Accelerazione minima (m/s<sup>2</sup>)</b>	0.62	0.57	0.46
<b>Durata delle fermate (s)</b>	20/20/2 0	20/20/2 0	20/10/1 0
<b>Lunghezza totale</b>	520	920	1450
<b>Frenata (m/s<sup>2</sup>)</b>	0.8	0.8	0.8

### 5.10 Cicli SORT-Hy per veicoli ibridi

La tecnologia ibrida ha subito molti sviluppi ed i produttori di veicoli ibridi sostengono notevoli risparmi di carburante che vanno dal 15 % al 30 %, sulla base di test del ciclo SORT.

Una sfida importante consiste nell'applicare la metodologia SORT convenzionalmente adatta ai veicoli a gasolio, anche ai veicoli ibridi. Tuttavia vi è da considerare un ostacolo importante: bisogna infatti tenere conto dell’elevata

dispersione dei risultati ottenuti, che compromette la ripetibilità delle misure, data principalmente della necessità di prendere in considerazione l'energia consumata dal motore termico e l'energia utilizzata dal RESS (Rechargeable Energy Storage System). Il metodo SORT può essere applicato per misurare il consumo di carburante di un autobus ibrido, a patto che venga adattato per compensare quest'inconveniente.

Gli ibridi a cui si riferisce la norma SORT sono veicoli che non possono essere ricaricati dall'esterno (praticamente la stragrande maggioranza degli ibridi in servizio ad oggi). L'energia propulsiva richiesta da questi veicoli deriva esclusivamente da sistemi che immagazzinano il combustibile a bordo (ad esempio motori diesel o CNG). Il RESS permette lo stoccaggio dell'energia recuperata dalla fase di frenata, e ha la capacità di immagazzinamento minore rispetto ad un veicolo puro elettrico (PEV). Per tal motivo, possono percorrere distanze limitate in puro elettrico e quindi vengono testati solo in modalità ibrida.

Si noti che la misura del consumo deve anche essere completata in termini di emissioni di CO<sub>2</sub> e con i costi energetici ambientali.

Queste ultime due caratteristiche dipendono però dalle condizioni locali per la produzione di elettricità e sul modo in cui il costo energetico viene gestito.

Il metodo di misurazione del consumo per la tipologia di mezzi di cui si sta discutendo in questo paragrafo, è diverso dai normali cicli per alimentazioni e trazione convenzionali. Più in particolare, rimangono invariate le distanze da percorrere, ovvero le lunghezze dei cicli base, ma i cicli sono ripetuti in quantità diverse. Inoltre, se il test è effettuato su una pista rettilinea, si dovranno ripetere le prove, una volta guidando in direzione nord ed un'altra volta guidando in direzione sud, mentre se viene eseguito su una pista circolare non ha più senso ripetere il test in ogni direzione. Si riassumono in tabella 18 queste peculiari differenze nel caso di pista rettilinea, ed in tabella 19 in caso di pista circolare.

Tabella 18: Ciclo SORT Hybrid pista rettilinea

Ciclo base SORT "i"	Lunghezza L <sub>i</sub> del ciclo "i" (m)	Numero di ripetizioni in ogni direzione	Numero totale di cicli	Lunghezza totale del test "i"
SORT 1	520	3	6	3120
SORT 2	920	2	4	3680
SORT 3	1450	1	2	2900

Tabella 19: Ciclo SORT Hybrid pista circolare

Ciclo base SORT "i"	Lunghezza L <sub>i</sub> del ciclo "i" (m)	Numero totale di cicli	Lunghezza totale del test "i"
SORT 1	520	6	3120
SORT 2	920	4	3680
SORT 3	1450	2	2900

Per ottenere un valore di consumo attendibile, si dovranno percorrere 3 volte le distanze di cui sopra, e stabilire una media dei 3 risultati ottenuti, per garantire le condizioni di una buona convergenza di questi risultati.

Si deve fare una considerazione ulteriore sullo State Of Charge delle batterie ("SOC"), misurato prima e dopo il test. Le variazioni del SOC influenzano significativamente la misurazione del consumo di carburante, positivamente o negativamente, e questo spiega la dispersione dei risultati accennata in origine. È necessario assicurarsi che lo stato di carica prima e dopo la misurazione rimanga all'interno di un intervallo ristretto al fine di minimizzare l'influenza della variazione sul consumo di carburante. Per fare ciò, si prende in considerazione la variazione dello stato di carica (Net Energy Change) e si controlla la variazione durante il test. La variazione deve essere prossima allo 0, come prescritto dalla normativa SAE J2711. Si definisce il NEC come:

$$NEC [Joule] = D SOC [Ah] * V_{system} [Volts] * 3600 \left[ \frac{sec}{h} \right]$$

Dove  $V_{\text{system}}$  è la tensione nominale delle batterie.

Per i supercapacitori invece vale la seguente formula:

$$NEC [Joule] = \frac{C}{2} [Farads] * D SOC [Ah]$$

La DSOC, variazione dello stato di carica tra inizio e fine test, si può misurare tramite un morsetto di corrente oppure tramite un resistore shunt o simili, in grado di rilevare la corrente in ingresso ed in uscita dalle batterie.

## **CAPITOLO 6 - La gestione della flotta attraverso la metodologia L.C.C. (life cycle cost). Analisi aziendali di costi energetici, ambientali e di manutenzione**

---

La metodologia di analisi L.C.C., che rappresenta l'acronimo dell'espressione Life Cycle Cost (ossia, costo del ciclo di vita), indica l'insieme di tutti i costi che accompagnano l'esistenza di un prodotto e che vengono dichiarati dal costruttore nel momento in cui procede ad avanzare la propria offerta di fornitura all'azienda acquirente. Si tratta di un approccio strutturato che si rivolge a tutti gli elementi di costo e che può essere utilizzato per produrre un profilo di spesa del prodotto durante la sua vita utile prevista. L.C.C. implica l'identificazione dei singoli costi connessi all'approvvigionamento del prodotto stesso. Tali costi possono essere sia "una tantum" sia "ricorrenti". È importante considerare la differenza tra questi due gruppi di costo, in quanto:

- \* "una tantum" → tali costi sono irrecuperabili una volta che l'acquisizione viene fatta;
- \* "ricorrenti" → tali costi continuano ad essere sostenuti per tutta la durata del prodotto, quindi possono aumentare con il tempo, ad esempio attraverso un aumento dei costi di manutenzione (in conseguenza all'aumentare dell'età delle attrezzature).

Le tipologie di spese sostenute varieranno in base alle tipologie di prodotti acquistati, alcuni esempi sono riportati di seguito:

- \* appalti pubblici (procurement);

- \* l'attuazione e l'accettazione;
- \* formazione iniziale;
- \* documentazione;
- \* strutture;
- \* modifiche ai processi di business;
- \* ritiro dal servizio e lo smaltimento.

L'applicazione delle tecniche di L.C.C. fornisce una gestione caratterizzata da una migliore consapevolezza dei fattori di costo; è importante che i driver di costo siano individuati in modo che la gestione dello sforzo venga applicata al costo effettivo della maggior parte delle aree per l'acquisto. Inoltre, la consapevolezza dei fattori di costo può anche evidenziare le aree esistenti che potrebbero beneficiare del coinvolgimento di gestione.

L'L.C.C. conduce a una decisione migliore a tutti i livelli, ad esempio, le decisioni di investimento più importanti, o la creazione di politiche di sostegno effettivo di costo. L'analisi L.C.C. permette anche di effettuare una previsione più accurata delle spese future da applicare alle valutazioni di calcolo dei costi a lungo termine.

L'L.C.C. rappresenta, inoltre, un componente fondamentale per giungere all'L.C.A. (Life Cycle Assessment), ossia valutazione del ciclo di vita: è una metodologia di analisi che valuta un insieme di interazioni che un prodotto o servizio ha con l'ambiente, considerando il suo intero ciclo di vita che include i punti di pre-produzione (quindi anche estrazione e produzione dei materiali), produzione, distribuzione, uso (quindi anche riuso e manutenzione), il riciclaggio e la dismissione finale del prodotto. Il concetto di L.C.A., che si muove verso l'identificazione dei carichi ambientali associati alla produzione di un bene o all'erogazione di un servizio, ha assunto oggi una notevole importanza dovuta dalla visione integrata di cui si fa portatore; l'L.C.A., infatti, si pone come strumento attraverso cui individuare i momenti di maggiore criticità ambientale, le responsabilità e le azioni degli attori coinvolti e, infine, le informazioni per apportare interventi di miglioramento.

Infatti, l'L.C.C. consente di ottimizzare la progettazione di strutture e di ottenere i

migliori risultati in termini di durata, performance e sostenibilità del bene, grazie ad un adeguato dimensionamento, ai minori sprechi, al risparmio energetico e al contenimento della produzione di rifiuti. L'L.C.C. è, dunque, in grado di valutare aspetti come quelli ambientali (conservazione dell'energia, sostenibilità) e questioni sociali che normalmente sono tenuti in scarsa considerazione, ma che, come conseguenza del mutato clima internazionale che influenza le politiche per ambiente, acquisteranno sempre più importanza nell'immediato futuro.

Lo scopo dell'L.C.C. è quello di minimizzare la somma dei costi, opportunamente attualizzati, associati ad ogni fase del ciclo di vita del prodotto, garantendo in tal modo benefici economici sia al proprietario/ gestore che agli utilizzatori finali. Le tecniche di L.C.C. consentono di valutare le proposte concorrenti sulla base dei costi attraverso lo studio della vita utile dei prodotti; l'analisi L.C.C. è rilevante per la maggior parte dei contratti di servizio e per le decisioni di acquisto delle attrezzature. Rispetto all'approccio tradizionale, secondo il quale vengono stimati solamente i costi monetari diretti per la costruzione e la manutenzione, l'approccio L.C.C. permette di estendere l'analisi del progetto a tutta la vita utile del prodotto, evidenziando in tal modo la reale economicità dell'investimento. Quindi riassumendo si ha che:

- \* Tecnica tradizionale → gli investimenti per la progettazione e il lancio dei nuovi prodotti vengono distribuiti fra i prodotti esistenti in quell'anno;
- \* L.C.C. (life cycle cost) → gli investimenti per la progettazione e il lancio dei nuovi prodotti sono imputati direttamente ad ogni nuovo prodotto e riassorbiti in tutto il ciclo di vita.

Quanto detto lo possiamo rappresentare attraverso il seguente grafico (figura 6.113):



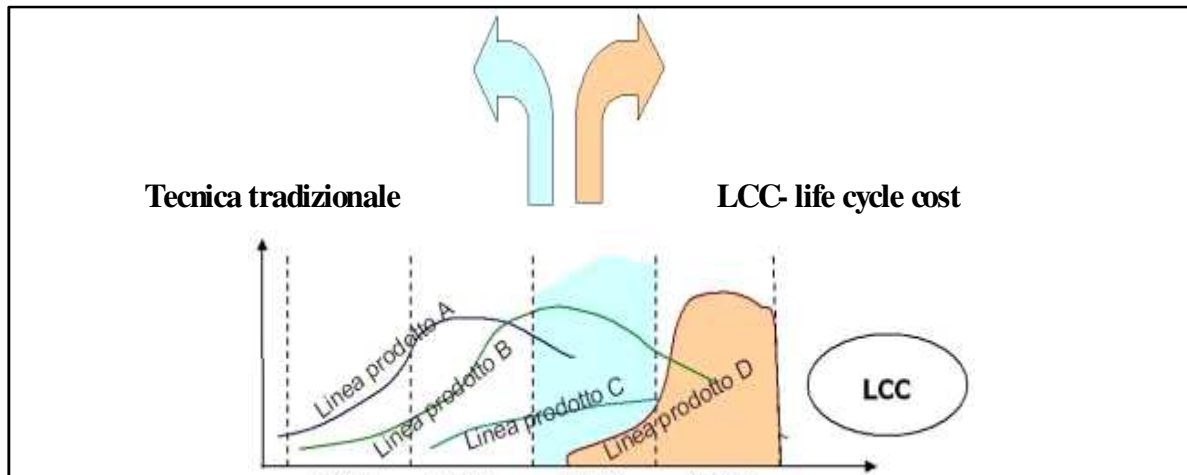


Figura 6.113: Confronto tra tecnica tradizionale e L.C.C.

La metodologia L.C.C. esprime un nuovo modo di concepire la gestione di una flotta di autobus a cominciare dalle valutazioni delle componenti di costo, non più riferite alla sola fase di acquisto, ma comprensive di tutte le voci di costo indotte dalla fase di esercizio. Vengono in tal modo compresi tutti i costi fissi (assicurazioni, tasse, etc...), quelli variabili dovuti ai consumi (carburante, lubrificante, etc...) e quelli relativi alla manutenzione (ricambi, mano d'opera, etc...). Tralasciando i costi fissi, si può procedere alla seguente disaggregazione:

- \* costo d'acquisto, in cui si includono i costi di sviluppo del mezzo, di investimento e di produzione;
- \* costi indotti dalla fase operativa dell'autobus, che consistono nei costi di supporto, di modifica e di esercizio; questi si possono ulteriormente specificare nei seguenti altri costi:
  - \* costi dei ricambi;
  - \* le attrezzature e gli apparecchi speciali necessari per la manutenzione;
  - \* l'addestramento e la manualistica;
  - \* costi annuali di manutenzione preventiva (espressi in termini di manodopera e materiali);
  - \* costi annuali di manutenzione correttiva (espressi in termini di manodopera e materiali).

Inoltre, nella valutazione del costo del ciclo di vita dobbiamo tener conto di:

- \* ore di funzionamento del mezzo;

- \* materiali di consumo;
- \* costi della documentazione;
- \* possibili strategie alternative per la manutenzione;
- \* costi di manutenzione;
- \* addestramento del personale;
- \* affidabilità dei mezzi;
- \* disponibilità dei mezzi;
- \* logistica;
- \* tempo di riparazione dei componenti;
- \* tempi morti;
- \* tasso di guasto dei componenti.

Questo elenco riguarda aspetti che si riferiscono a momenti diversi nella produzione di un servizio di trasporto e induce a guardare l'L.C.C. come ad un processo, con cui si predispongono una serie di fasi integrate che, partendo da una determinata strategia di sviluppo, arrivano fino al momento dell'esercizio. Il modello integrato L.C.C. di gestione per processi della flotta è schematizzato come riportato in figura 1.1. Nell'analisi del processo, la prima fase, che si riferisce alla strategia di sviluppo del parco autobus (quale elemento di competenza determinante per poter procedere alla stesura coerente dei capitolati), rappresenta il vero input della fase successiva di definizione dei veicoli. Mentre l'ultima fase, relativa all'uscita del veicolo dal parco, coincide con il momento in cui esso giunge alla fine della sua vita utile ed in corrispondenza del quale occorre tenere in massima considerazione, in ottica L.C.A., le problematiche legate allo smaltimento del rottame. Per quanto riguarda l'L.C.A. è importante che sin dalla progettazione siano definite le modalità di smaltimento del dispositivo progettato. L'L.C.C. è un elemento fondamentale per la progettazione, lo sviluppo e la successiva gestione del veicolo proponendo un insieme di dati condivisi tra costruttore ed esercente capace di migliorare il mezzo in termini di performance economiche. È possibile porre attenzione, ora, alla correlazione tra la metodologia del costo del ciclo di vita dei veicoli e le diverse fasi gestionali di cui si compone il

processo integrato dell'L.C.C. Questo concetto è riportato nella schematizzazione seguente (figura 6.115):

Va ricordato che un'età media della flotta di 7 anni, ad acquisti annuali costanti nel tempo, implica un'età massima di 14 anni. Ferme restando le stesse ipotesi sulla consistenza e sulla cadenza degli acquisti, ad un'età media di 10 anni corrisponde un'età massima di 20 anni. Dunque, se il veicolo dovrà essere utilizzato per più di 14 anni, dovranno essere previsti nell'arco della vita aziendale del mezzo alcune attività di manutenzione straordinaria. Osservando la figura 6.114, possiamo notare come la

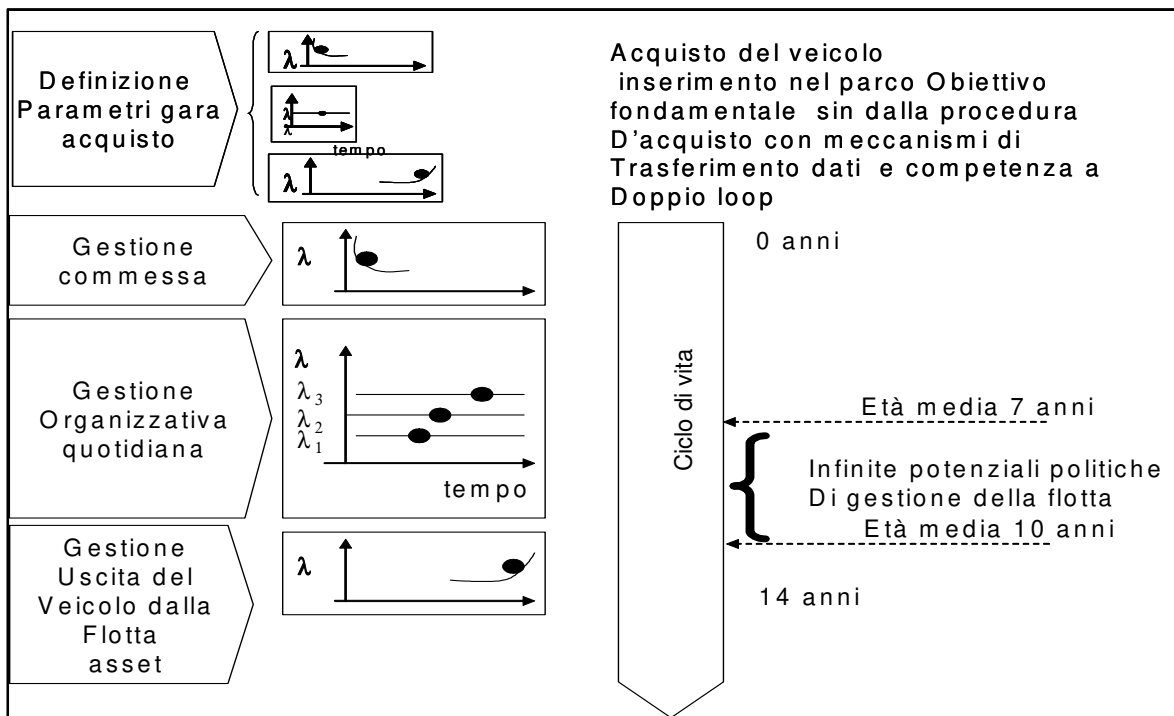


Figura 6.114: Correlazione tra la metodologia del costo del ciclo di vita e le diverse fasi gestionali

“lotta al guasto” prenda avvio fin dal momento della definizione delle specifiche d’acquisto che hanno lo scopo di formalizzare tutte le informazioni di ritorno dal campo. La lotta poi prosegue durante la gestione della commessa, in corrispondenza della quale, interventi sul veicolo in allestimento capaci di tenere conto della realtà operativa, possono ridurre sensibilmente i guasti e quindi, i problemi in esercizio. Inizia quindi la fase di utilizzo; in questo periodo, guasti in linea ed indisponibilità provocano uno spreco di risorse dell’operatore Tpl. Si termina con la fase di usura finale che dovrà portare a scelte di politiche manutentivo di tipo straordinario

adeguate alla permanenza prevista del veicolo nel parco autobus ed alle risorse disponibili per il rinnovo della flotta. La finalità dell'L.C.C. va riconosciuta nel cercare di ottenere una caratterizzazione della flotta secondo un elevato rapporto qualità/prezzo. L'L.C.C., quindi, nel mantenere la successione tra le fasi, sviluppa una sequenza di attività e relazioni tra i soggetti coinvolti che volge ad innalzare le performance della flotta. Si può, dunque, intuire come la validità del modello dipenda in maniera sostanziale dalla capacità di riuscire a strutturare un'intensa collaborazione tra fornitore e acquirente e tra l'esercizio e la manutenzione. Un'ulteriore aspetto che presenta criticità è dato dalla compilazione del capitolato di gara per l'acquisto dei mezzi, sulla base del quale i fornitori formalizzano la propria offerta. Tale criticità potrebbe farsi sentire nel caso in cui venissero tralasciate voci invece importanti per il calcolo e la valutazione dei costi che si incontrano durante la vita utile dell'autobus; inoltre, dobbiamo considerare l'incertezza che caratterizza l'affidabilità dei dati necessari alla compilazione di un L.C.C. (soprattutto nel caso di veicoli di nuova produzione). Queste criticità potrebbero minare l'offerta e rivelarsi controproducenti sia per il fornitore che per il cliente. Da un lato infatti, il fornitore potrebbe fornire valori ottimistici dell'L.C.C., considerando interventi modesti e costi relativamente contenuti rispetto alle effettive esigenze del lotto di autobus; dall'altro però, queste previsioni errate (facilmente smentite nel periodo di validazione seguente alla consegna del veicolo) porterebbero l'azienda di tpl a un ripensamento delle proprie politiche di esercizio e di manutenzione, costringendo il fornitore a subire le eventuali penalità per il mancato conseguimento degli obiettivi dichiarati.

## 6.1 I vantaggi apportati dall'L.C.C. nella gestione della flotta per Tpl

Se da un lato, l'azienda che decide di intraprendere la metodologia L.C.C. deve farsi carico di elevati investimenti per adeguare la propria organizzazione all'impostazione richiesta da tale metodologia, dall'altro l'adozione dell'L.C.C. comporta una serie di vantaggi estremamente significativi. Tale modello, infatti, riesce a indurre meccanismi virtuosi che impattano su più aspetti della gestione della

flotta, rendendone maggiormente significativo il contributo. Un primo aspetto di vantaggio risulta legato alla conoscenza di tutte le informazioni prestazionali dei veicoli in dotazione per un dato numero di anni pari, come minimo, alla durata del contratto di servizio. Attraverso questa conoscenza passerà in primo luogo, la definizione del livello di servizio che si è in grado di assicurare al cliente; tale livello dipenderà, infatti, oltre che dalle caratteristiche di qualità intrinseche al veicolo (ad esempio, comfort, accessibilità, caratteristiche tecniche, etc...), in particolare dall'indice di disponibilità dei veicoli, che discende a sua volta dall'applicazione del piano di manutenzione. La possibilità, inoltre, di poter stimare i costi legati alla gestione del parco autobus consente di poter fornire un'offerta qualitativa, concepita come un'attenta offerta economica che mette al riparo da valutazioni di costo incerte. In tal modo, il veicolo entra a pieno titolo nella dinamica del piano di business di un'azienda Tpl, non restando più relegato a comparire come mera voce di costo, per assumere un ruolo di strumento di produzione e profitto. Un secondo aspetto di vantaggio da attribuire all'adozione della metodologia L.C.C., va riconosciuto nel nuovo tipo di rapporto che si viene a instaurare tra il proprietario della flotta dei veicoli e il fornitore. In primo luogo, possiamo sottolineare gli effetti che si possono ottenere in termini di sviluppo mezzi sia dal punto di vista tecnologico che prestazionale. Infatti, le interazioni che si creano tra Sistemi Qualità delle due parti e l'integrazione tra le specifiche di progetto, possono portare a ricercare migliori requisiti di manutenibilità ed affidabilità per le nuove commesse di autobus e ad ottenere una riduzione dei costi che accompagnano la vita del mezzo. A tale proposito, si considera l'ipotesi per cui, alcune aziende di Tpl, hanno fornitori disposti ad acquistare i dati direttamente dal gestore della flotta; questa situazione, è sintomatica di una competizione tra fornitori che si gioca sia sulla capacità di rendere interessante un'offerta dal punto di vista economico che sulla tendenza ad inseguire nuove soluzioni tecnologiche. È quindi, interesse per entrambi i soggetti coinvolti, quello di trasformare una relazione contrattuale in un più proficuo e importante percorso di reciproco supporto; sarebbe opportuno, in tal senso, assistere alla

costruzione di sempre più diffusi e duraturi legami di partnership tra fornitore ed acquirente. L'acquirente sarebbe infatti portato a rinnovare una commessa ad un fornitore che conosce nelle soluzioni tecniche e nei comportamenti, e rispetto al quale c'è un rapporto di fiducia; il fornitore, dal canto suo, sarebbe maggiormente favorito nella formulazione della propria offerta, basandosi anche sull'esperienza passata. Si vedrebbe, infatti, notevolmente ridotto il rischio di pattuire stime economiche e modalità d'intervento che potrebbero risultare errate e, per questo, gravemente penalizzanti (figura 6.115).

In virtù di questo nuovo rapporto, si dovrebbe vedere realizzata la condizione per cui il divario tra il piano di manutenzione del costruttore (PMC) e il piano di manutenzione del gestore (PMG) arrivi ad una sostanziale coincidenza. Quanto detto nella pagina precedente si può schematizzare nel modo seguente:

**PMG=PMC (5)**

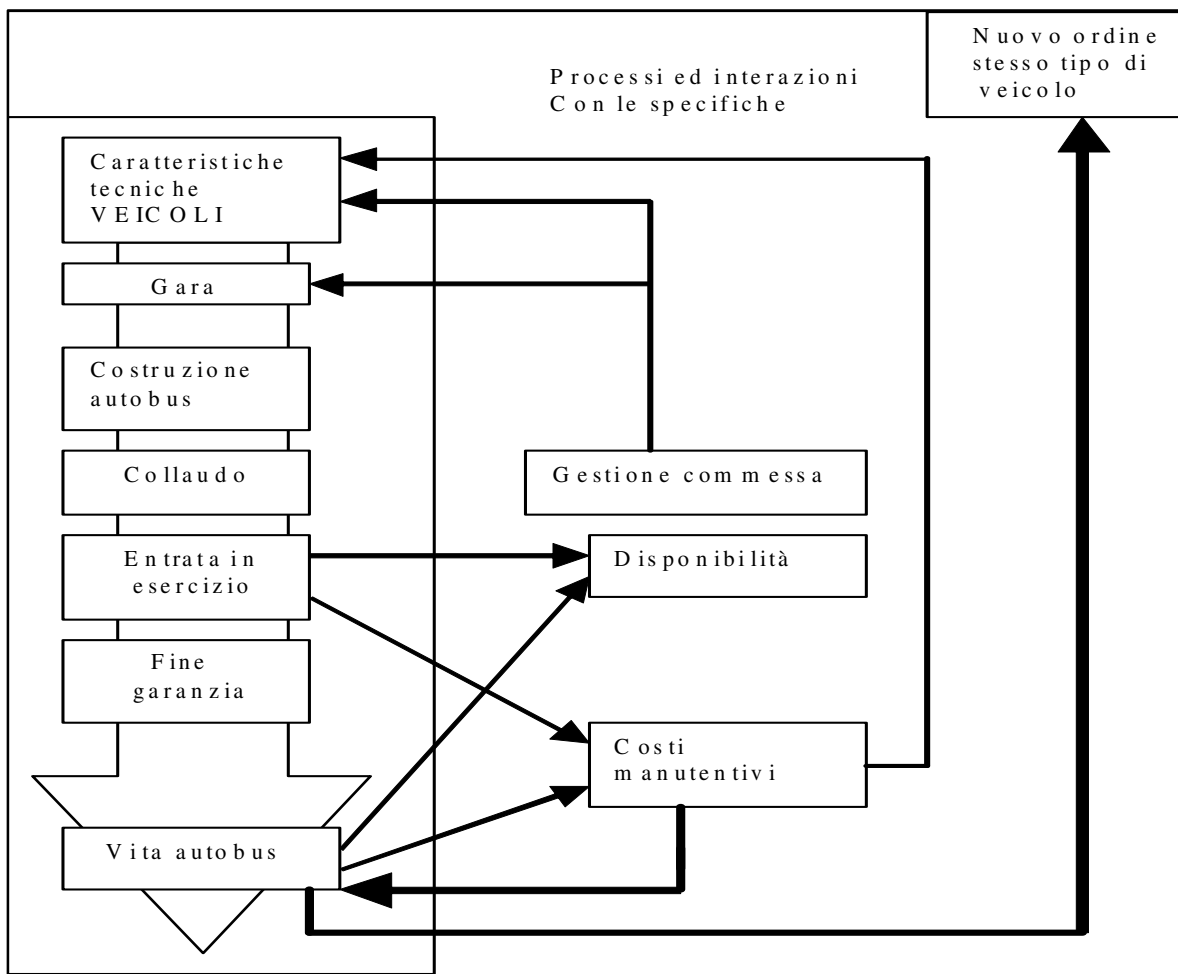


Figura 6.115 Le retroazioni indotte dall'applicazione dell'L.C.C. nei rapporti acquirente-fornitore.

Sono possibili sia il caso in cui le attività svolte siano in numero maggiore rispetto a quelle prescritte, sia il caso in cui risultano essere in numero inferiore. Nel primo caso, siamo in presenza di uno spreco di risorse, nel secondo caso siamo in presenza di una politica manutentiva che potrebbe portare anche a guasti gravi. Possiamo avere una flotta composta da più tipologie di veicoli acquistati da più fornitori, così come i flussi di informazione scambiati tra un gestore e più costruttori di autobus. Il meccanismo risulterebbe facilmente riproducibile, dando origine ad una fitta rete di legami che non possono che tradursi in una crescita consapevole delle performance, in una migliore gestione delle risorse, in un consolidamento della conoscenza. Inoltre, si può osservare come le attività manutentive, che presuppongono precisi interventi sull'organizzazione e l'implementazione di adeguate procedure, discendono direttamente da scelte strategiche quali le specifiche di sviluppo del parco autobus e la definizione del relativo budget. Infine, non può sfuggire l'attenzione al monitoraggio interno ed esterno, il quale si traduce in una continua ricerca di efficienza e di azioni migliorative, in un quadro caratterizzato dalla massima coerenza tra tutte le varie entità aziendali coinvolte nell'acquisto, nell'utilizzo e nella gestione dei veicoli.

## 6.2 I sistemi informativi per la gestione integrata delle flotte per il Tpl

All'interno di un operatore Tpl, i sistemi informativi della manutenzione costituiscono un sistema primario il cui sviluppo è senza dubbio di tipo strategico, riferendosi ad un processo che è parte del core business dell'erogazione del servizio di trasporto. L'evoluzione dell'ICT permette ora di sviluppare più rapidamente gli applicativi, consentendo di rendere più aderente la velocità di questo stesso sviluppo con quella richiesta dal cambiamento organizzativo; infatti, il sistema informativo rappresenta un elemento fondamentale a supporto dello sviluppo organizzativo.

Inoltre, il sistema informativo per la gestione delle flotte di veicoli per il Tpl è organizzato su una molteplicità di applicativi con dati integrati. Sul mercato mondiale esistono applicativi di Fleet Management integrati in tutte le funzioni.

In particolare, i tre parametri per i quali è indispensabile poter disporre di opportuno monitoraggio relativamente alle performance dei veicoli la cui gestione è regolata da contratto L.C.C., risultano essere i seguenti sintetizzate in tabella 20:

Tabella 20: I tre principali ambiti di monitoraggio di un contratto L.C.C.

LCC	1	Livello disponibilità veicoli
	2	Percorrenza parti principali
	3	Costo del ciclo di Vita

1. Livello di disponibilità dei veicoli → si definiscono dei valori in termini % di disponibilità (detta anche "Availability") dei veicoli, ossia il tempo (espresso ad esempio, in giorni dell'anno) in cui il veicolo è effettivamente in grado di svolgere la sua attività di esercizio. La disponibilità offerta in gara dai costruttori dovrà essere monitorata ogni giorno e per ogni singolo lotto di autobus. Il progetto L.C.C. richiede un sistema puntuale di registrazione della disponibilità quotidiana che consenta, nel contempo, di valutare le richieste organizzative dei singoli impianti. In forma analitica, la disponibilità può essere determinata in base alla seguente espressione:

$$A = TU / TU+TD \quad (6)$$

Dove:

- TU = Time Up, ossia l'intervallo di tempo durante il quale il veicolo si trova in uno stato di disponibilità.

- TD = Time Down, ossia l'intervallo di tempo durante il quale il veicolo permane in uno stato di indisponibilità.

2. Percorrenza parti principali → I componenti principali dei veicoli sono garantiti per una percorrenza minima, in caso di guasto prima di tale limite il fornitore è tenuto a partecipare al costo del componente. Questo è un classico esempio della coerenza complessiva del percorso di gestione asset basato sulla metodologia L.C.C.

3. Costo del ciclo di vita.

Si tratta di tre grandezze i cui valori sono dichiarati e garantiti dal costruttore, perciò, definiti formalmente a livello di contratto che stabilisce i rapporti tra le parti anche



attraverso meccanismi di penalità. La gestione del monitoraggio del ciclo di vita dei suoi oggetti, ossia gli autobus deve essere realizzata su una piattaforma web che, implementando algoritmi generici; consente la gestione completa della *disponibilità* dei veicoli in regime di L.C.C. Attingendo ai dati che derivano dalla gestione scarti del sistema informativo della manutenzione, la piattaforma web produce una comunicazione giornaliera dei fermi macchina rivolta, oltre ai costruttori, anche a tutta la supervisione della manutenzione mezzi. Un sistema di reportistica consente, inoltre, attraverso una serie di viste, una rappresentazione dei dati secondo diversi livelli di dettaglio e di aggregazione. Un sistema di calcolo porta infine ad ottenere, sulla base degli scostamenti tra valori di disponibilità dichiarati e valori di disponibilità effettivamente esercitati, l'ammontare delle penali da comunicare a ciascun costruttore.

Una logica simile è prevista per quanto riguarda il monitoraggio della *percorrenza delle parti principali*, il cui non raggiungimento rispetto a quanto dichiarato dal costruttore può determinare, come già accennato precedentemente, un trasferimento o una compartecipazione, in termini di costi, a cui il costruttore stesso è chiamato a rispondere. Quanto detto è riassunto nella figura 6.116.

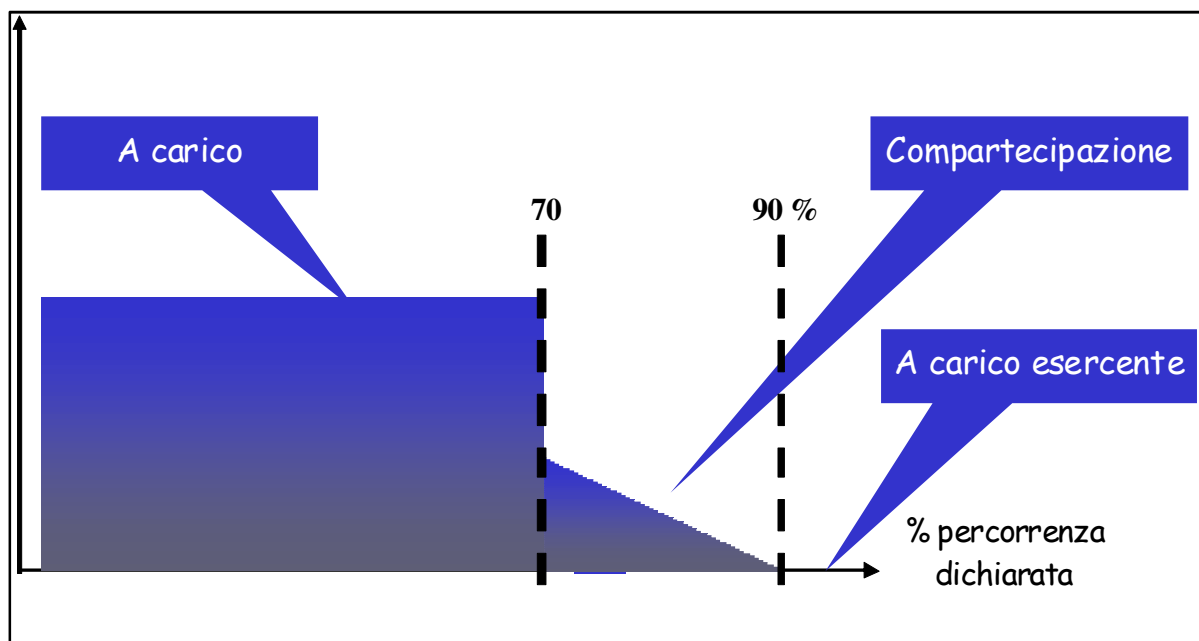


Figura 6.116: Le soglie di percorrenza raggiunta che determinano le diverse azioni nei confronti del costruttore.

Nel sistema informativo, questa gestione ha previsto di “marcare” i lavori in sostituzione che si riferiscono a quei complessivi compresi nell’elenco delle parti principali e poi di specificare, ancora a livello di lavoro, il valore della percorrenza dichiarata dal costruttore. Quindi, in fase di apertura di un ODL, in corrispondenza della tabella del database del sistema informativo, viene riportato il valore del contachilometri del veicolo in quello stesso momento. Ciò consente di rispondere allo scopo di poter mantenere la corretta tracciatura delle attività di manutenzione eseguite e la corretta elaborazione dello scadenziario. Conseguentemente, un ODL in cui viene inserito un lavoro di sostituzione con le caratteristiche prima descritte, ossia riferito ad una parte principale, rappresenta lo strumento che contiene tutti gli elementi su cui deve poggiare la comparazione con la maschera di report relativa alla percorrenza delle parti principali. Qualche maggiore difficoltà caratterizza, invece, il monitoraggio dell’andamento dei *costi* che si determinano durante il *ciclo di vita* di un veicolo. Queste difficoltà vanno individuate nella complessità che deriva dalla necessità di matchare, per poi elaborare dati che, per la loro stessa natura, risiedono su temi differenti e spesso vengono implementati secondo logiche di funzionamento anche molto lontane tra loro.

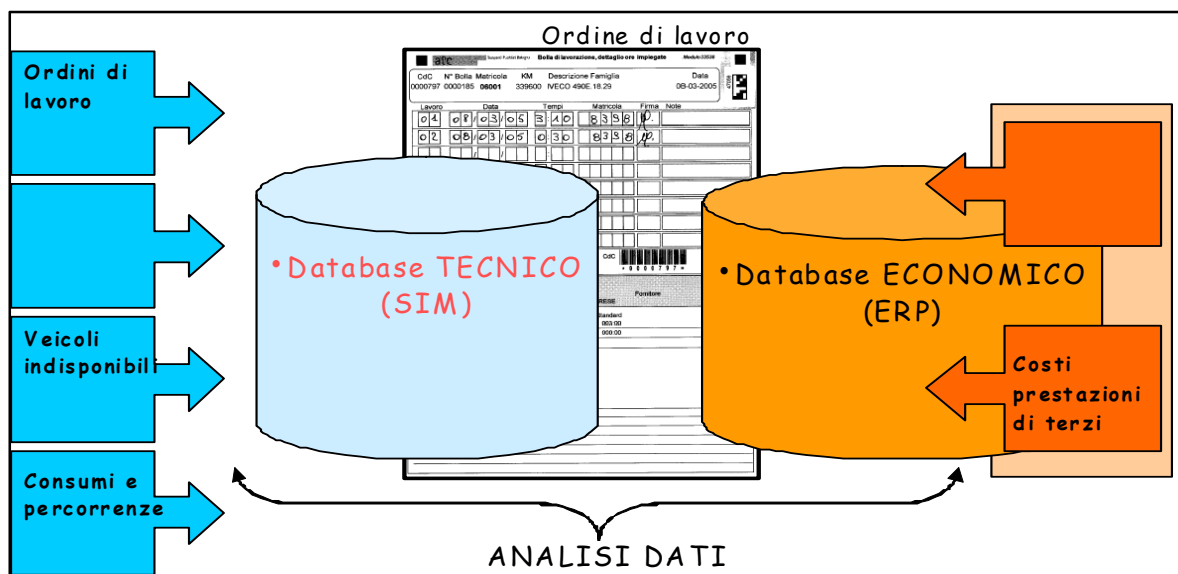


Figura 6.117: I sistemi informativi e i dati necessari per la gestione dell’L.C.C

Così, come mostrato in figura 6.117, si tratta di trovare un punto in cui far confluire informazioni di carattere squisitamente tecnico, normalmente raccolte nel sistema

informativo della manutenzione (SIM), ed informazioni puramente economiche, a loro volta normalmente raccolte nell'ERP aziendale. Questo punto d'incontro si è individuato nell'ODL - ordine di lavoro.

In questo capitolo si vogliono inoltre analizzare e quantificare su base chilometrica, le tipologie di costo spiegate nel precedente capitolo 3, per i diversi sistemi di trazione e combustibili adottati da TPER S.p.A. per i propri veicoli di trasporto pubblico locale. Il lavoro si è focalizzato sull'analisi approfondita della flotta esistente e, accanto ai dati tradizionali, è stata sviluppata anche un'analisi dei costi totali comprensivi anche delle esternalità (emissioni e energia) calcolate come da direttiva 2009/33/CE.

I costi che si sono considerati sono quelli legati alla manutenzione, quelli relativi all'energia (combustibile erogato o energia elettrica fornita dalla rete), e infine quelli legati alle emissioni. Tutti i dati della ricerca, sono stati tratti dalle schede tecniche e manutentive dei vari modelli di autobus presenti nel parco veicolare.

### 6.3 I costi di manutenzione: il metodo del Life Cycle Cost (LCC)

Per quanto riguarda i costi di manutenzione mezzi, è necessario fare una premessa di contesto, spiegando come è sviluppata la strategia manutentiva aziendale in TPER S.p.A. La manutenzione mezzi si basa fundamentalmente sulla metodologia del costo del ciclo di vita LCC, in uso sin dal 2001. La TUA SpA ha introdotto nell'ultimo lotto di 36 autobus a gasolio l'LCC e oggi anche CONSIP prevede tale metodologia nei capitolati tecnici di gara.

In sede di gara d'acquisto di nuovi veicoli, viene richiesta ai costruttori l'elaborazione di un'offerta tecnica che riassume le caratteristiche tecniche dei veicoli (come ad esempio misure, pesi, prestazioni, consumi...) ed un'offerta economica, che invece riguarda il prezzo unitario e complessivo del lotto dei veicoli in questione, ed anche gli oneri manutentivi durante l'intero ciclo di vita dei mezzi.

Specifiche per la fornitura di autobus (lotti 01_14/ 02_14/ 03_14)														
SCHEMA n° 7.2./B		PARTE TECNICA - MANUTENZIONE												pag 1/1
TIPO AUTOBUS														
PARAGR. DI RIF.	OGGETTO	ANNI												COSTO TOTALE
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
7.3.2.	** MANUTENZIONE programmata (MDO)													
	** MANUTENZIONE programmata (MAT)													
7.3.3.	*Sostituzione parti principali (MDO)	GAR	GAR	GAR	GAR									
	*Sostituzione parti principali (MAT)	GAR	GAR	GAR	GAR									
7.3.4.	Manutenzione correttiva (MDO + MAT)													
TOTALE PARTE TECNICA														
MO = Mano d'opera (costo orario pari a Euro/Ora)					MAT = Materiali									
** Costo riferito all'esecuzione del piano di manutenzione periodica del fornitore, allegato all'offerta (schede 7.3.2/a e 7.3.2./b)														
* Costo riferito alla percorrenza dichiarata dal fornitore per i complessivi riportati nella lista parti principali (scheda 7.3.3.)														

Figura 6.118: Scheda di riepilogo dati manutentivi L.C.C

I costi manutentivi, quindi, sono stati ricavati dalle schede specifiche in formato standardizzato (Scheda n°3.3./B prima dell'anno 2002 o Scheda n° 7.2./B per gli anni successivi, esempio in figura 6.118) presenti dei contratti d'acquisto.

Per svolgere tutte le elaborazioni si è fatto riferimento alle schede LCC dei lotti di fornitura TPER. Con LCC si intende l'insieme di tutti i costi che accompagnano l'esistenza di un mezzo, che vengono dichiarati dal costruttore nel momento in cui procede ad avanzare la propria offerta di fornitura all'azienda acquirente. I costi cui ci si riferisce sono quelli che si determinano, quindi, non solo al momento dell'acquisto (come già affermato), ma anche quelli legati alla successiva fase di esercizio. Vengono così ad essere compresi tutti i costi fissi (assicurazioni, tasse, ...) quelli dovuti ai consumi (carburante, lubrificante, ...) e quelli da ricondursi infine alla manutenzione (ricambi, manodopera, ...). Come si può vedere dalla figura 6.118 si può notare che i costi sono ripartiti in diverse voci, tutte con una certa assegnata categoria temporale. I costi legati all'acquisto rimangono percentualmente molto

inferiori rispetto a quelli che derivano dall'uso e dalla manutenzione, che ammontano a circa il 75 % di costi totali stimati nell'arco di vita del mezzo.

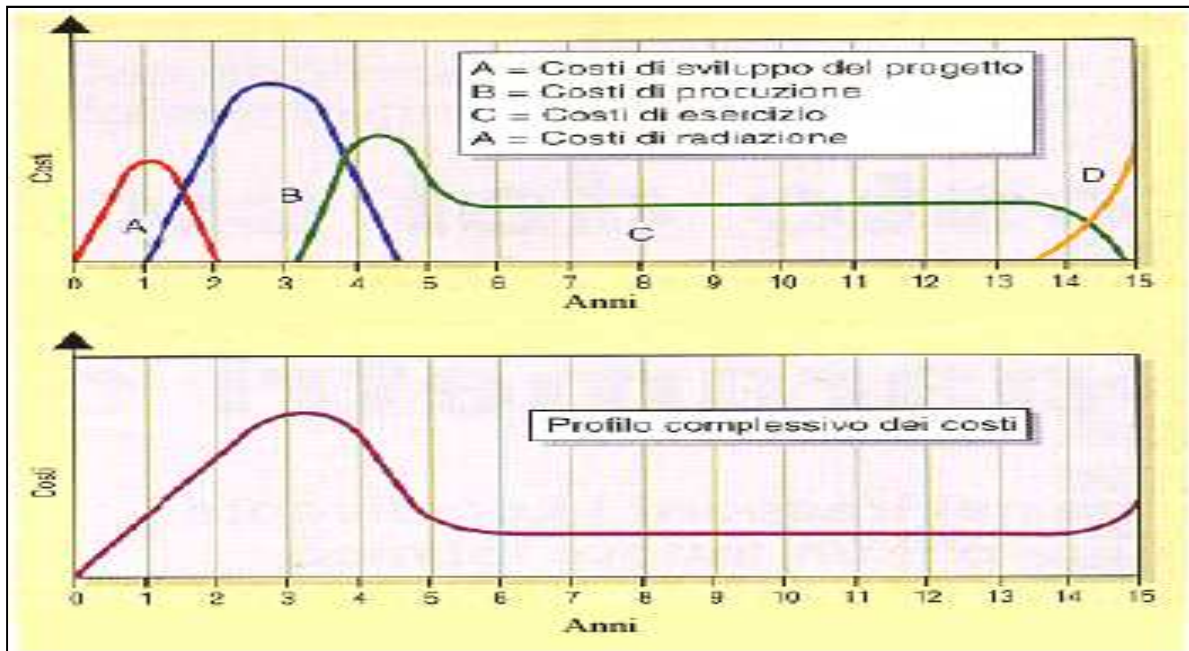


Figura 6.119: Costi L.C.C

Il profilo complessivo dei costi è riportato nella figura 6.119, e si evince essere di tipo crescente, in generale fino ai 3 – 4 anni di vita del mezzo, poi decrescente fino a essere costante per la maggior parte del tempo (circa 9 – 10 anni), ed infine torna a crescere per via dei costi di radiazione (dopo i 14 anni).

Si può anche vedere l'insieme dei costi come un "iceberg" (figura 6.120), la cui punta viene individuata dai costi d'acquisto, inclusi quelli di sviluppo, investimento e produzione, mentre la struttura "invisibile" (al di sotto, nascosta alla vista)

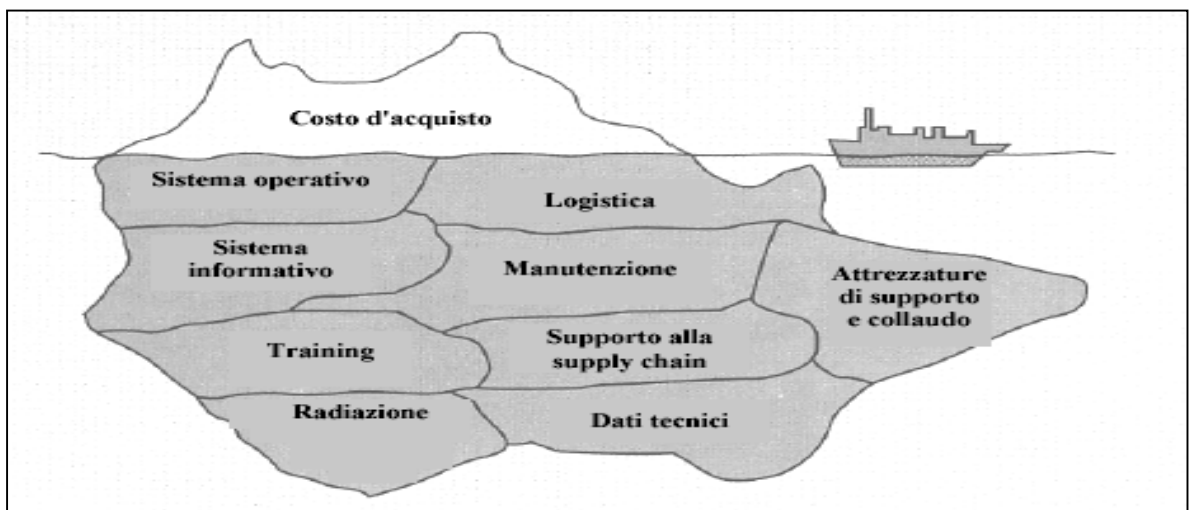


Figura 6.120: La totalità dei costi di LCC

rappresenta tutti i costi relativi alla fase operativa dell'autobus che trovano esplicitazione nei costi di supporto, di modifica e di esercizio.

Il Life Cycle Cost è un processo di fasi integrate a partire dalle specifiche tecniche di flotta fino all'esercizio vero e proprio. Durante la stesura della propria offerta, il costruttore si impegna contrattualmente a definire il ciclo di manutenzione che è da prevedersi per la maggior parte della vita del mezzo, che può essere 10, 12, 14 anni (facendosi carico di tutte le possibili inefficienze non previste con un metodo di penali o deprezzamento del prodotto). Da un punto di vista operativo, viene predisposto un piano di manutenzione che specifica, a vari livelli e secondo precise tempificazioni, tutti gli interventi richiesti dal mezzo in termini di manutenzione periodica, preventiva e correttiva. Possono anche essere previste soluzioni tecniche alternative che contemplano, ad esempio, infittire le operazioni di manutenzione preventiva poco costose per evitare futuri interventi di manutenzione correttiva molto onerosi, o, al contrario, suggeriscono di adottare scelte economicamente e tecnicamente pesanti ma che si dimostrano più affidabili e durature, richiedendo un numero di interventi minori.

Con questa particolare procedura, viene cambiato completamente il rapporto fra costruttore di veicoli di trasporto ed acquirente (inteso come gestore del servizio di trasporto pubblico). Infatti mentre con il metodo tradizionale l'operatore di TPL era il solo interessato alla ottimizzazione dei piani di manutenzione per contenere i costi (poiché il rapporto fra costruttore e gestore si limitava al solo periodo di garanzia di legge – 2 anni), con il metodo LCC il costruttore al momento dell'offerta, si impegna con un proprio piano sia dal punto di vista tecnico (attività di manutenzione previste) sia per l'impatto economico del costo €/km dell'adozione di tale piano. In sede di gara, vengono specificate le percorrenze delle parti principali (componenti meccaniche soggette a deperimento/usura) e se esse durante il ciclo di vita concordato non vengono soddisfatte, saranno generate delle penali e sarà il costruttore che, "sanzionato", dovrà preoccuparsi del costo della riparazione. Se quindi un intervallo temporale (o chilometrico) è troppo ampio e tale per cui le parti in oggetto non

riescono a raggiungere la percorrenza dichiarata in offerta, con il modello LCC sarà il costruttore a pagare l'effettuazione più ravvicinata di sostituzione. Con il metodo tradizionale ne era assolutamente disinteressato.

### 6.3.1 I costi manutentivi del parco mezzi

I costi legati alla manutenzione, come accennato, sono stati raccolti dalle schede LCC dei veicoli aziendali che attualmente sono ancora nel periodo LCC: questo vuol dire che se un veicolo è stato acquistato nel 2002 con LCC di 12 anni, non è possibile stabilire un costo di manutenzione annuale dal 2014 in poi, poiché è uscito dalla categoria "veicoli LCC" dal 2015 (compreso). I costi annuali, sono poi stati divisi per i chilometri di profilo missione, ottenendo un costo specifico chilometrico €/km.

Per tutti i veicoli che o non sono mai stati in LCC o che sono già usciti dal piano, si è posta l'ipotesi verosimile di un costo pari a 0,35 €/km di manutenzione Full Service.

Si sono quindi raccolti i costi annuali dei veicoli LCC, categorizzandoli per alimentazione e sistema di trazione, e rapportandoli ai chilometri di profilo missione, al fine di ottenere una cifra in €/km. Per tutti gli altri veicoli, è stato assunto un costo chilometrico di manutenzione di 0,35 €/km. Analizzando i dati è stato possibile evidenziare una certa ripartizione dei costi chilometrici in base all'alimentazione e al sistema di trazione. Si è proceduto eseguendo delle medie pesate sul numero di veicoli appartenenti alle diverse alimentazioni e sistemi di trazione analizzati, affinché potesse assumere una certa rilevanza il peso che ha il numero di veicoli per ogni tipologia di veicolo.

I dati di manutenzione euro/km sono influenzati dai costi riportati nelle schede LCC di ogni veicolo analizzato: quindi la percentuale di ripartizione cambia nel momento in cui cambiano le cifre dei costi di manutenzione riportati annualmente nelle schede. Più semplicemente, i dati riportati dipendono fortemente dal lasso temporale analizzato: per questo motivo, per ogni anno possono essere calcolati costi chilometrici diversi, a seconda dei valori riportati nelle offerte economiche.

La flotta analizzata risulta essere composta come riportato nella figura 6.121:

Trazione	Alimentazione	% sul tot.
Batterie	Elettrico	≈ 1 %
Filobus	Filovia	≈ 18 %
Ibrido	Diesel	≈ 7 %
Termico tradizionale	Diesel	≈ 33 %
	Metano	≈ 41 %

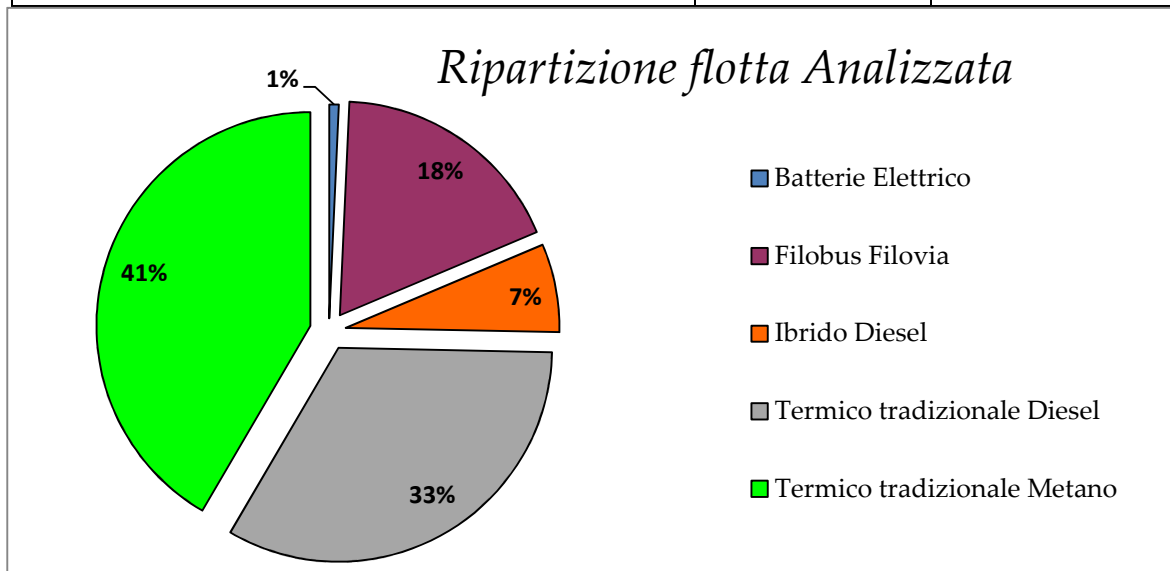


Figura 6.121: Composizione della flotta analizzata

Quest'ultimo scenario riporta un'analisi dei costi sul medio periodo. L'azienda ha sostituito progressivamente i veicoli più vecchi e più inquinanti (gli EURO 1 a gasolio rimasti nel precedente scenario, diesel EURO 2 e metano EURO 2) con veicoli nuovi

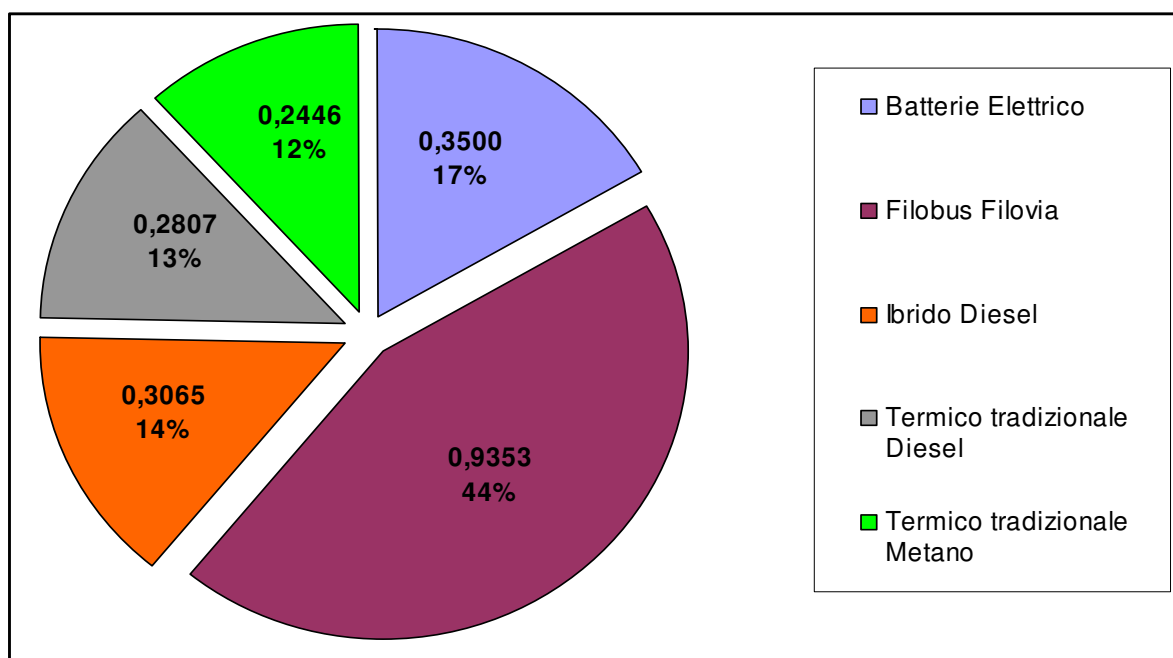


Figura 6.122: Costo chilometrico manutentivo Flotta



ed ecologici. Sono perciò stati eliminati: Fiat 490, 393, 490SN, 491; Breda Menarini 221, 321 SN; CamAlè termici; BUS8; Carvin 59; Mercedes 405 e 440; Van Hool AG300.

Nell'anno 2020, si prevede una manutenzione chilometrica maggiore per i filosnodati che, si ricorda, occuperanno il 18 % della flotta. La percorrenza che si prevede di effettuare con questa tipologia di mezzi è di circa 7.500.000 km, ovvero 6 volte maggiore della percorrenza rilevata nel 2015. La figura 6.122 riporta il costo manutentivo €/km dei diversi sistemi di trazione componenti la flotta analizzata.

#### 6.4 I costi esterni: energia ed emissioni

Per calcolare i costi esterni, a cui partecipano emissioni inquinanti (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC, PM) ed energia (combustibile ed elettricità) sono servite le schede tecniche di ogni mezzo della flotta. In tali documenti, sono riportati dai costruttori di autobus i consumi e, limitatamente ai veicoli più recenti (dal 2000 in poi) anche le emissioni dichiarati. Come spiegato nei paragrafi 3.8 e 3.9, grazie alle prove su cicli di guida predefiniti dalle normative (SORT e simili), le case di produzione dei veicoli dichiarano sia le percorrenze chilometriche coperte per unità di combustibile erogato (o di energia elettrica in caso di filobus o veicoli a batterie) in quei cicli di prova, che le emissioni che in tali cicli vengono rilevate, cosicché, possano poi essere classificati secondo le norme anti inquinamento vigenti (Classi Ambientali CE). Per i veicoli di cui non erano disponibili queste informazioni, sono stati considerati i fattori emissivi calcolati dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA).

Il calcolo dei costi è stato effettuato seguendo scrupolosamente le indicazioni della direttiva 2009/33 CE, trattata nel paragrafo 5.5.

La procedura ha visto anzitutto la ricerca di un elenco di tutte le tipologie di autobus presenti e l'eliminazione delle tipologie di veicoli che si è ritenuto di dover radiare entro gli anni prestabiliti. Si è poi compilata una tabella excel in cui sono state riportate le emissioni inquinanti e i consumi dichiarati dai costruttori per tutti i modelli di autobus. È stata eseguita l'eventuale conversione delle unità di misura (Es. gr/kWh in gr/km), tramite la conoscenza dei contenuti energetici dei diversi

combustibili (36 MJ/l per il gasolio e 49 MJ/km per il gas naturale) e i profili di missione dei vari veicoli. È poi stata eseguita una semplice moltiplicazione fra i grammi totali di inquinanti emessi e il costo in €/gr di ogni inquinante per avere il valore espresso in €.

Dal punto di vista del costo energetico unitario del combustibile, è stato considerato:

- \* Il prezzo del gasolio, medio per l'anno 2018, desunto dai litri consumati per l'autotrazione e le spese affrontate nel relativo anno. Inoltre si è tolto il contributo dell'IVA (22 %) e la quota parte di accise che possono essere poste in detrazione dall'importo complessivo. Si è ottenuto un valore di 0.9207 €/litro.
- \* Il prezzo del metano, medio per l'anno 2018, tramite i consumi rilevati per autotrazione e le spese affrontate nel relativo anno. Si è dovuta necessariamente considerare anche una quota parte di energia "consumata" per la compressione del metano da 12 a 200 bar, senza il cui ausilio sarebbe stato impossibile rifornire i mezzi a CNG della flotta. Si è quindi calcolata l'energia spesa per tale compressione per ogni chilogrammo di metano elaborato, e la si è aggiunta al costo del metano per chilogrammo, dedotto dai soli consumi. Il prezzo finale è risultato pari a 0,446 €/kg.
- \* Il prezzo del chilowattora (kWh), è stato anch'esso calcolato da una media dei costi dell'anno 2018. Si è calcolato un costo medio di 0.1625 €/kWh.

Nel successivo paragrafo 6.5, si è poi ricavato il costo medio chilometrico appartenente alla flotta, sommando tutti i costi energetici, ambientali e manutentivi. In particolare si sono calcolati dapprima i costi specifici chilometrici somma delle voci emissioni, energia e manutenzione, su base alimentazione e trazione. Dopodiché si è eseguita una media ponderata sul numero di veicoli, il cui valore rappresenta il costo chilometrico di flotta dello scenario considerato. Si noterà che le emissioni di veicoli filoviari e di veicoli elettrici essendo nulle, non contribuiscono in nessun modo al costo chilometrico legato alle esternalità. Questo è un fatto molto importante nella valutazione complessiva dei costi analizzati: infatti nonostante i filodati, come già

spiegato, abbiano dei costi manutentivi elevati, da parte loro apportano dei costi nulli ambientali e sotto questo punto di vista sono molto competitivi. Sempre dal punto di vista delle emissioni, i veicoli alimentati a metano hanno costi paragonabili agli ibridi, costi che, confrontati con quelli dei veicoli a gasolio sono pari a circa la metà. Il costo minore tra tutte le alimentazioni, considerati anche i consumi specifici di ogni tipologia di autobus, lo si ha per i mezzi a metano (escludendo gli elettrici a batteria corti). Infatti questa alimentazione riporta 0,19 €/km contro 0,35 €/km per i diesel e 0,22 per gli ibridi a gasolio. Anche i filobus mediamente hanno un costo energetico maggiore, pari a 0,28 €/km, ma è necessario tenere a mente che questi sono tutti autobus snodati, e che quindi, avendo una capienza maggiore (e maggiori masse trasportate), necessitano di conseguenza di maggiori energie di propulsione. Si riporta la tabella 21 riassuntiva dei costi esterni di emissione ed energia, suddividendo le tipologie di veicoli in base all'alimentazione e ai sistemi di trazione adottati.

*Tabella 21: Costi esterni, ambientali ed energetici per tipologia di sistemi di trazione*

<b>Trazione</b>	<b>Alimentazione</b>	<b>€/km Emissioni</b>	<b>€/km Energia</b>
Batterie	Elettrico	0,0000	0,0700
Filobus	Filovia	0,0000	0,3583
Ibrido	Diesel	0,0639	0,2513
Termico tradizionale	Diesel	0,0782	0,3708
	Metano	0,0654	0,1860
<i>Totale</i>		<i>0,2074</i>	<i>1,2364</i>

## 6.5 I COSTI CHILOMETRICI della flotta

Si riportano gli istogrammi complessivi (figura n°6.123) che sintetizzano quanto affrontato finora.

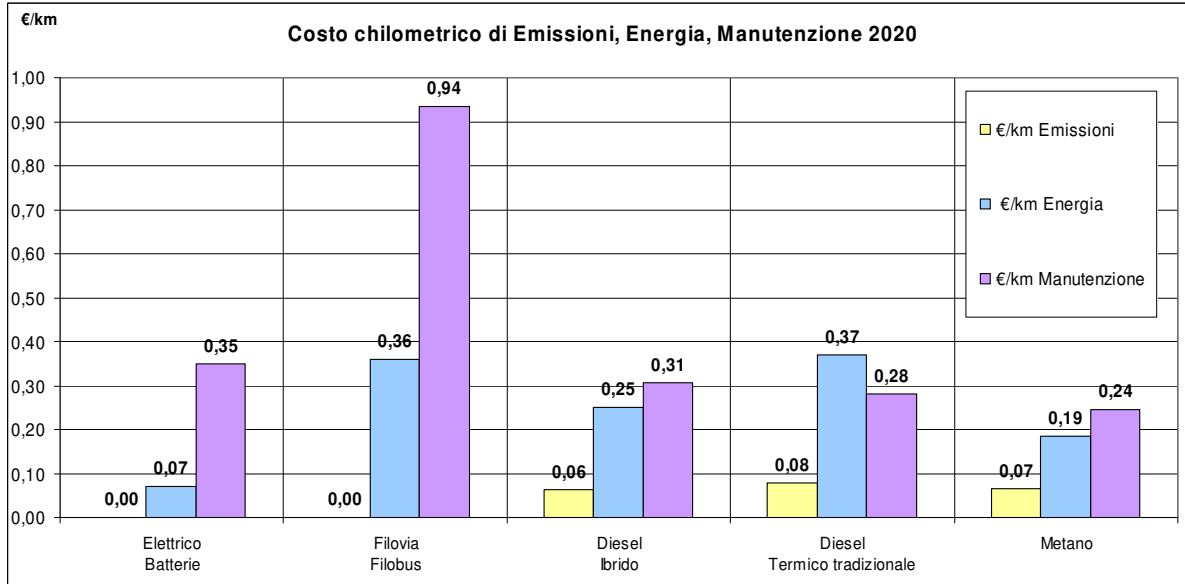


Figura 6.123: Costi chilometri della flotta –Emissioni, Energia, Manutenzione

Il costo specifico di ogni alimentazione, somma di tutte le voci considerate, ed il costo medio di flotta è rappresentato in figura 6.124.

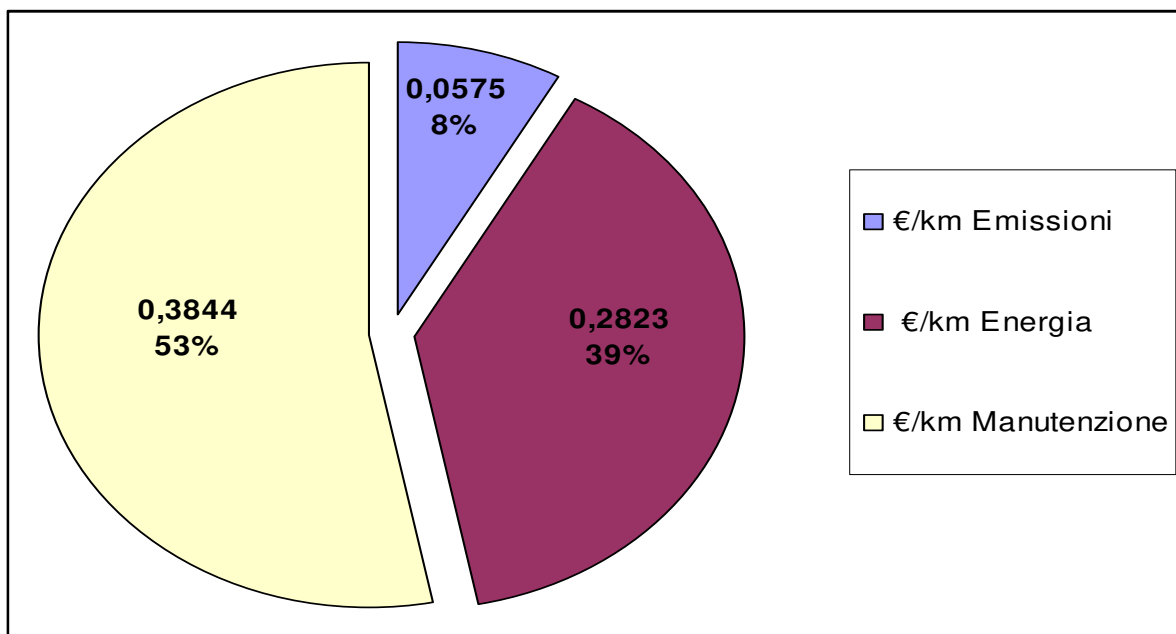
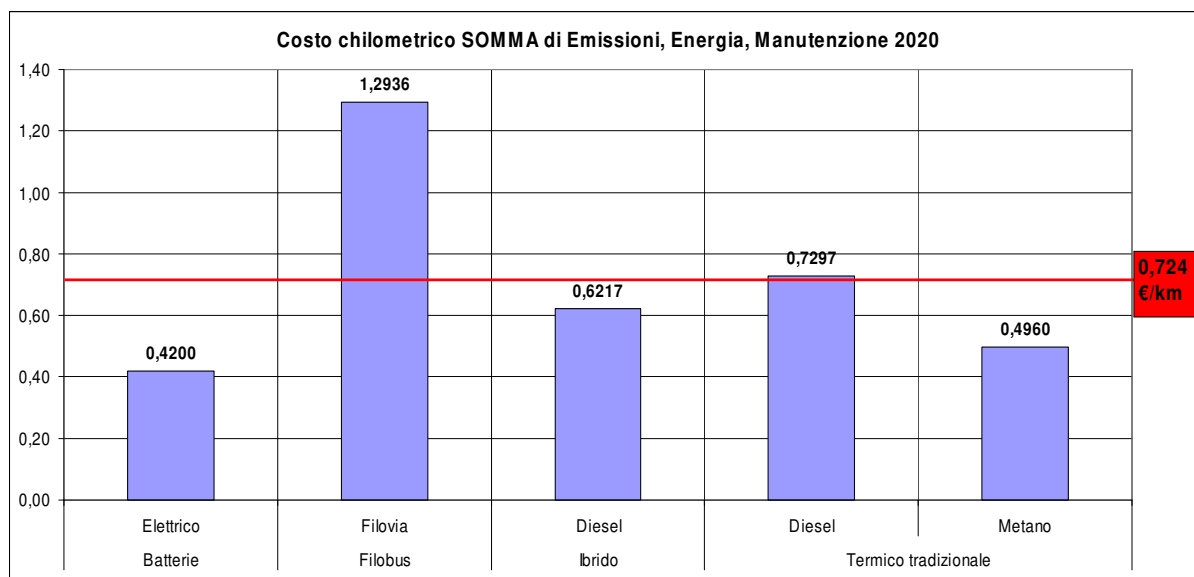


Figura 6.124 Ripartizione costi euro/km e % voci di costo sul totale flotta

Il costo chilometrico medio di flotta, pesato sui veicoli in base alle diverse alimentazioni e sistemi di trazione, è pari a 0.724 €/km. Ponendo l'attenzione alla



*Figura 6.125: Costo chilometrico totale diviso per sistema di trazione*

ripartizione delle voci di costo della figura n°6.125 si trova che, grazie ai cambiamenti aggressivi nella composizione della flotta, i costi ambientali chilometrici e ancor di più quelli complessivi di flotta, diminuiscono.

## **CAPITOLO 7- Elaborazione dei dati di manutenzione**

### **7.1 Analisi dei dati manutentivi**

La fase operativa di raccolta ed analisi dei dati, riguarda la rilevazione delle schede L.C.C., riferite a una serie determinata di flotte di autobus, in cui compaiono costi relativi principalmente ai seguenti tre elementi:

- Manutenzione Programmata (relativamente ai costi per la manodopera e per i materiali/ricambi);
- Sostituzione delle Parti Principali (costo riferito alla percorrenza dichiarata dal fornitore per i complessivi riportati nella lista parti principali);
- Manutenzione Correttiva (relativa ai costi per manodopera e materiali insieme).

Riportiamo di seguito le definizioni di Manutenzione Programmata e Correttiva che sono state dichiarate dalle norme UNI EN 13306:2003 e in particolare si ha che:

➤ *Manutenzione Programmata* → è definita come una manutenzione preventiva, eseguita in base a un programma/intervallo temporale o a un numero stabilito di grandezze; tale grandezze possono essere, ad esempio, il numero di ore di produzione, un numero di avvii o di fermate, i chilometri percorsi, etc...

➤ *Manutenzione Correttiva o a Guasto* → è definita come una manutenzione che viene eseguita a seguito della rilevazione di un'avaria e volta a riportare l'entità nello stato in cui essa possa eseguire una funzione richiesta.

Mentre, per quanto riguarda la Sostituzione delle Parti Principali, i costi relativi a quest'azione, possono ricadere nella Manutenzione Programmata o in quella Correttiva, a seconda che la richiesta avvenga a seguito di un guasto oppure a seguito di una programmazione effettuata a priori. Uno schema che riassume graficamente le varie tipologie di manutenzione, sempre secondo le norme UNI EN 13306:2003, è il seguente (figura 7.126):

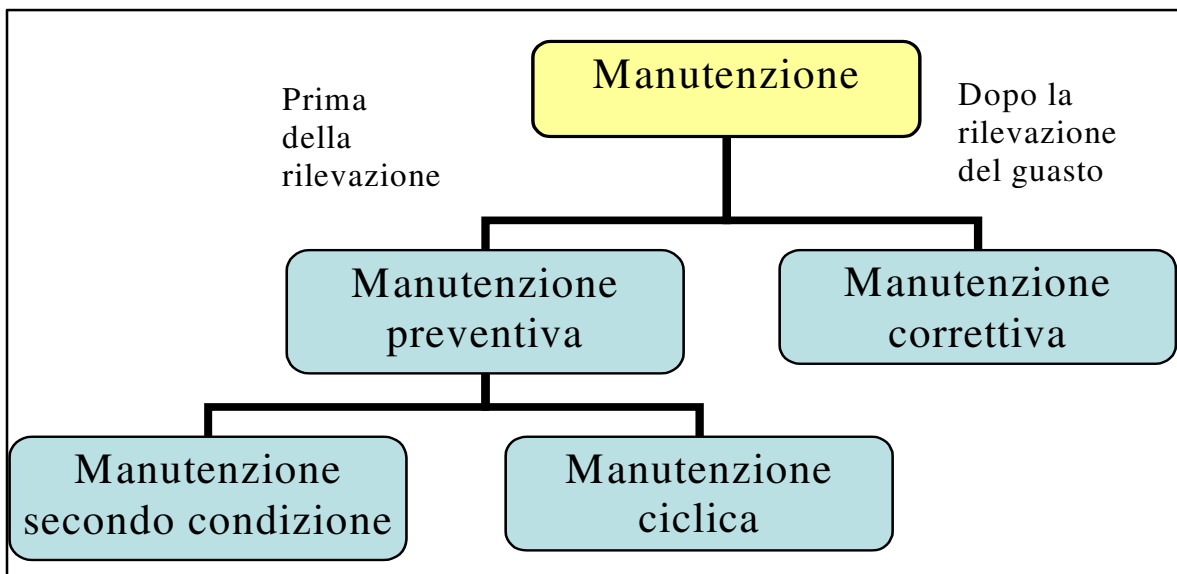


Figura 7.126 Organigramma generale della manutenzione secondo norma UNI EN13306:2003.

In altre parole, per Manutenzione Programmata s'intende una politica di manutenzione che si prefigge l'obiettivo di eseguire un intervento manutentivo di "revisione", "sostituzione" o "riparazione", prima che nel componente si manifesti il guasto. Mentre, per Manutenzione Correttiva (detta anche "Manutenzione a Guasto") s'intende una politica di manutenzione che prevede un intervento di riparazione, sostituzione o revisione, solo a guasto avvenuto; l'azione manutentiva è quindi

subordinata all’attesa del manifestarsi del guasto. Quindi, solo a guasto avvenuto, viene preparato ed eseguito un intervento di “ripristino” che riporta la prestazione del sistema al livello che aveva prima del manifestarsi del guasto di un suo componente. A partire dai dati L.C.C. che sono stati raccolti negli anni, nell’ambito delle diverse gare d’acquisto, si è deciso di finalizzare la loro analisi ed elaborazione alla valutazione delle principali tipologie di costo che riportiamo come segue:

- \* Ricambi: Analisi delle filosofie di progetto dei diversi sistemi di trazione più maturi;
- \* Sistemi di trazione: Verifica, in termini economici relativi alla manutenzione, delle politiche relative alla sostenibilità.

Riportiamo, ora un esempio delle tabelle Excel relative ai costi L.C.C. di diverse flotte con sistemi di trazione differenti che riporteremo per completezza in appendice 12.5. Tali tabelle riportano i costi [€/a] relativi alla Manutenzione Programmata, Manutenzione Correttiva e Sostituzione delle Parti Principali riferiti a un singolo veicolo per flotta, in un orizzonte temporale che prende un periodo di almeno 10 anni, *Tabella 22 Scheda L.C.C. della flotta di autobus numero 21*

		IBRIDO-DIESEL/ELETRICO BATTERIA														
Tipo Flotta	Oggetto	ANNI														COSTO TOT
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
		2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	
Flotta 21	** MANUTENZIONE programmata	1687,30	1607,40	1889,40	1922,30	1438,20	2509,80	1438,20	1922,30	1889,40	1607,40	1438,20	2824,70	1438,20	1085,70	24698,50
	** MANUTENZIONE programmata	1390,00	1602,00	1810,00	2297,00	1304,00	2614,00	1304,00	2297,00	1810,00	1602,00	1304,00	3309,00	1304,00	1039,00	24986,00
Flotta 21	*Sostituzione parti principali (MDO)	0,00	0,00	366,13	794,30	1954,73	441,80	643,04	1086,09	2632,00	2381,91	2472,72	1236,10	201,63	1438,20	15648,65
	*Sostituzione parti principali (MAT)	0,00	0,00	1273,58	1959,00	13554,89	15016,38	14086,15	21680,62	84610,39	58358,99	42283,48	21358,10	21418,42	14172,42	309772,42
Flotta 21	Manutenzione correttiva (MDO + MAT)	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	7000,00
TOTALE PARTE TECNICA		3577,30	3709,40	5839,11	7472,60	18751,82	21081,98	17971,39	27486,01	91441,79	64450,30	47998,40	29227,90	24862,25	18235,32	382105,57

e quindi avremo:

MDO = Mano d'opera (costo orario pari a 35 Euro/Ora) e MAT (RIC) = Materiali/Ricambi;

\* Costo riferito alla percorrenza dichiarata dal fornitore per i complessivi riportati nella lista parti principali;

\*\* Costo riferito all'esecuzione del piano di manutenzione periodica del fornitore, allegato all'offerta.

## 7.2 Elaborazione incidenza Costo Ricambi

La prima parte di elaborazione dei dati raccolti, riguarda l'analisi dei costi [€/Km] complessivi delle flotte prese in esame al fine di valutare l'incidenza che i costi relativi ai soli ricambi (RIC) [€/Km], hanno sui costi totali (MDO + RIC) [€/Km].

In secondo luogo, si prenderanno in considerazione i costi assoluti (RIC) [€/a], quindi relativi alla sola parte dei ricambi, riferiti alle medesime voci indicate nelle schede L.C.C. viste sopra e infine il Totale parte tecnica. A partire da questi dati, troveremo l'incidenza dei costi (RIC) sui costi totali (MDO + RIC) come data dal rapporto:

$$\text{Costi (RIC) / Costi (MDO + RIC)} \quad (7)$$

L'incidenza dei costi (RIC) sui costi totali, viene calcolata a partire dai costi totali (MDO + RIC) [€/Km], e dai costi (RIC) [€/Km] sempre della totalità delle flotte considerate. In primo luogo, si prenderanno in esame i profili di missione di ogni flotta (ossia, i chilometri di percorrenza annui previsti dal fornitore in sede di stipulazione del contratto L.C.C.).

A partire, quindi, dai seguenti profili di missione e considerando i costi [€/a] delle singole flotte rispettivamente alle voci di Manutenzione Programmata, Sostituzione Parti Principali e Manutenzione Correttiva, siamo in grado di andare a calcolare i Costi [€/Km] dati dal rapporto:

$$\text{Costi [€/a] / Profilo di missione[Km/a]} \quad (8)$$

e ottenere i Costi (MDO + RIC) e (RIC) [€/Km] rispettivamente alle voci di Manutenzione Preventiva, Sostituzione Parti Principali, Manutenzione Correttiva e il Totale parte tecnica. A partire da questi dati, troveremo l'incidenza dei costi (RIC) sui costi totali (MDO + RIC) come data dal rapporto:

$$\text{Costi (RIC) / Costi (MDO + RIC)} \quad (9)$$

Si può determinare il valore percentuale dell'Incidenza dei costi (RIC) [€/Km] sui costi



totali per ciascuna delle tre voci di costo indicate nelle schede L.C.C. e per il Totale parte tecnica che risulta essere di circa il 70%.

La seconda parte di elaborazione dei dati riguarda l'analisi a livello microscopico delle flotte, procedendo a realizzare un confronto fra l'andamento di tutte le flotte alimentate a Gasolio con quelle alimentate a Metano, relativamente alle tre voci di costo elencate precedentemente, ossia i Costi (MDO), i Costi (RIC) e i Costi Totali.

Partiamo con il considerare il primo step di analisi:

Nelle pagine seguenti, riportiamo i valori e gli andamenti che sono stati individuati per lo studio delle flotte. Si inizia ad analizzare la Flotta 1 (tabella 23); per essa osserveremo i valori di costo calcolati e il loro andamento nell'orizzonte temporale di 10 anni. Di seguito, analizzeremo la Flotta 2, la Flotta 3... fino all'ultima flotta che è la Flotta 21.

*Tabella 23: Costi [€/Km] della flotta di autobus numero 1*

Flotta 1	ANNI									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>** MANUTENZIONE programmata (MDO) [€/Km]</b>	0,008	0,018	0,014	0,015	0,008	0,025	0,008	0,015	0,014	0,018
<b>** MANUTENZIONE programmata (RIC) [€/Km]</b>	0,006	0,017	0,016	0,016	0,006	0,026	0,006	0,016	0,016	0,017
<b>*Sostituzione parti principali (MDO) [€/Km]</b>	0,000	0,000	0,010	0,014	0,013	0,037	0,012	0,014	0,013	0,000
<b>*Sostituzione parti principali (RIC) [€/Km]</b>	0,000	0,000	0,010	0,242	0,031	0,335	0,054	0,242	0,031	0,000
<b>***Manutenzione correttiva (MDO) [€/Km]</b>	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
<b>***Manutenzione correttiva (RIC) [€/Km]</b>	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

A partire da questi costi [€/Km], come già accennato, si trovano i costi (MDO), i costi (RIC) e i costi totali (come somma delle due voci di costo precedenti), e quindi avremo la seguente tabella:

Tabella 24: Costi [€/Km] di manodopera, ricambi e totali della flotta numero 1

Flotta 1	ANNI									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Costi totali[€/Km]	0,018	0,038	0,053	0,292	0,062	0,426	0,085	0,292	0,077	0,038
Costi MDO[€/Km]	0,010	0,019	0,025	0,031	0,023	0,063	0,022	0,031	0,029	0,019
Costi RIC[€/Km]	0,008	0,019	0,028	0,260	0,039	0,363	0,063	0,260	0,048	0,019

Considerando i valori dei costi riportati in tabella 24, andiamo ad osservare come varia l'andamento della flotta 1, relativamente alle tre voci di costo [€/Km], rispettivamente alla Manodopera, ai Ricambi e al Totale, nell'orizzonte temporale considerato pari a 10 anni.

L'andamento nel tempo dei costi (MDO) è significativamente inferiore rispetto a quello per i costi (RIC) e conseguentemente per i costi totali; tale rappresentazione è coerente con quanto sperimentato nell'analisi di incidenza dei costi (RIC) sui costi totali [€/Km], dove si è sottolineato come i costi (RIC) pesino sui costi totali per circa il 70%. In particolare, si può notare in figura 7.127 come, il VI anno rappresenti un anno in cui il fornitore prevede possano manifestarsi dei guasti rilevanti ai bus, indicati con Sostituzione Parti Principali alla parte dei ricambi, che fanno innalzare l'andamento dei costi (RIC) [€/Km] in modo considerevole rispetto all'andamento negli altri anni.

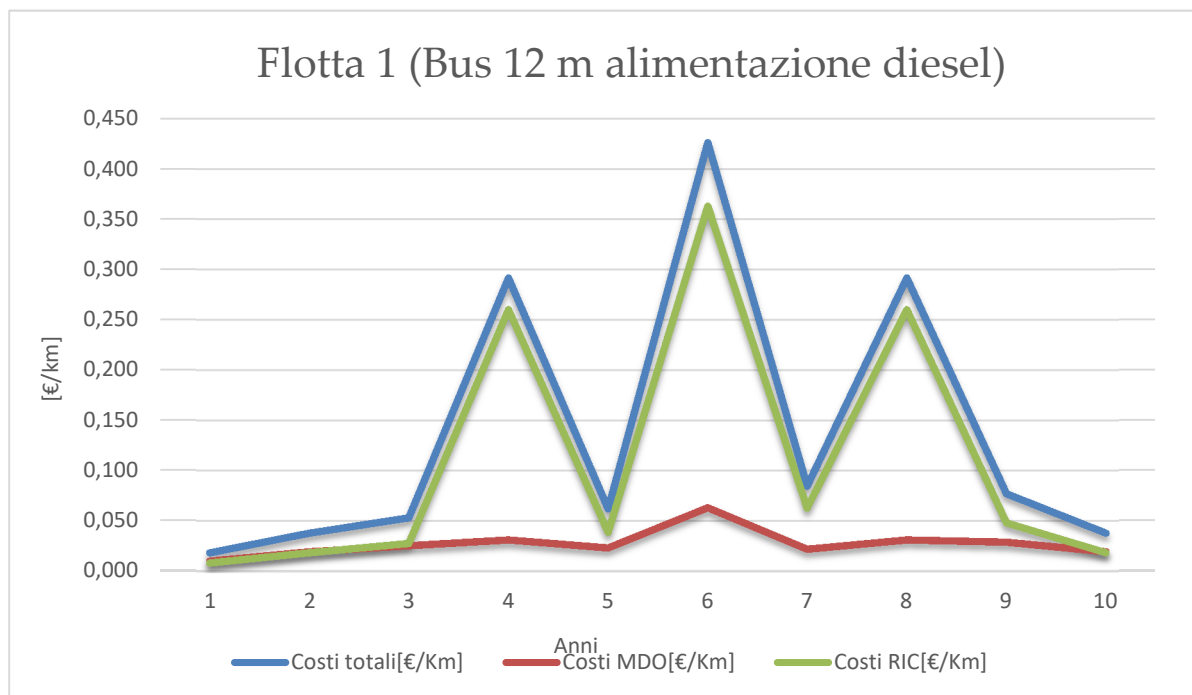


Figura 7.127: Andamento dei Costi [€/Km] della flotta numero 1

Passiamo, ora, ad analizzare la Flotta di snodati 18 m alimentati a metano numero 9, per la quale osserveremo i valori di costo calcolati e il loro andamento nell'orizzonte temporale di 10 anni come riportato in tabella 25.

Tabella 25: Costi [€/Km] della flotta di autobus numero 9.

Flotta 9	ANNI									
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
** MANUTENZIONE programmata (MDO) [€/Km]	0,016	0,014	0,018	0,017	0,018	0,024	0,016	0,016	0,031	0,015
** MANUTENZIONE programmata (RIC) [€/Km]	0,015	0,015	0,026	0,024	0,027	0,027	0,015	0,024	0,038	0,024
*Sostituzione parti principali (MDO) [€/Km]	0,000	0,005	0,014	0,025	0,015	0,053	0,064	0,019	0,031	0,006
*Sostituzione parti principali (RIC) [€/Km]	0,018	0,033	0,098	0,117	0,171	0,533	0,588	0,077	0,287	0,074
***Manutenzione correttiva (MDO) [€/Km]	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
***Manutenzione correttiva (RIC) [€/Km]	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

Da cui, quindi avremo:

Tabella 26: Costi [€/Km] di manodopera, ricambi e totali della flotta numero 9

Flotta 9	ANNI									
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Costi totali[€/Km]	0,054	0,071	0,160	0,188	0,235	0,642	0,687	0,140	0,390	0,123
Costi MDO[€/Km]	0,019	0,021	0,034	0,044	0,034	0,079	0,081	0,037	0,064	0,023
Costi RIC[€/Km]	0,035	0,050	0,126	0,143	0,200	0,562	0,605	0,103	0,327	0,100

Considerando i valori dei costi riportati in tabella 26, andiamo ad osservare come varia l'andamento della flotta 9, relativamente alle tre voci di costo [€/Km], rispettivamente alla Manodopera, ai Ricambi e al Totale, nell'orizzonte temporale considerato pari a 10 anni.

Il grafico 7.128 riportato nella pagina seguente, mostra l'andamento descritto sopra.

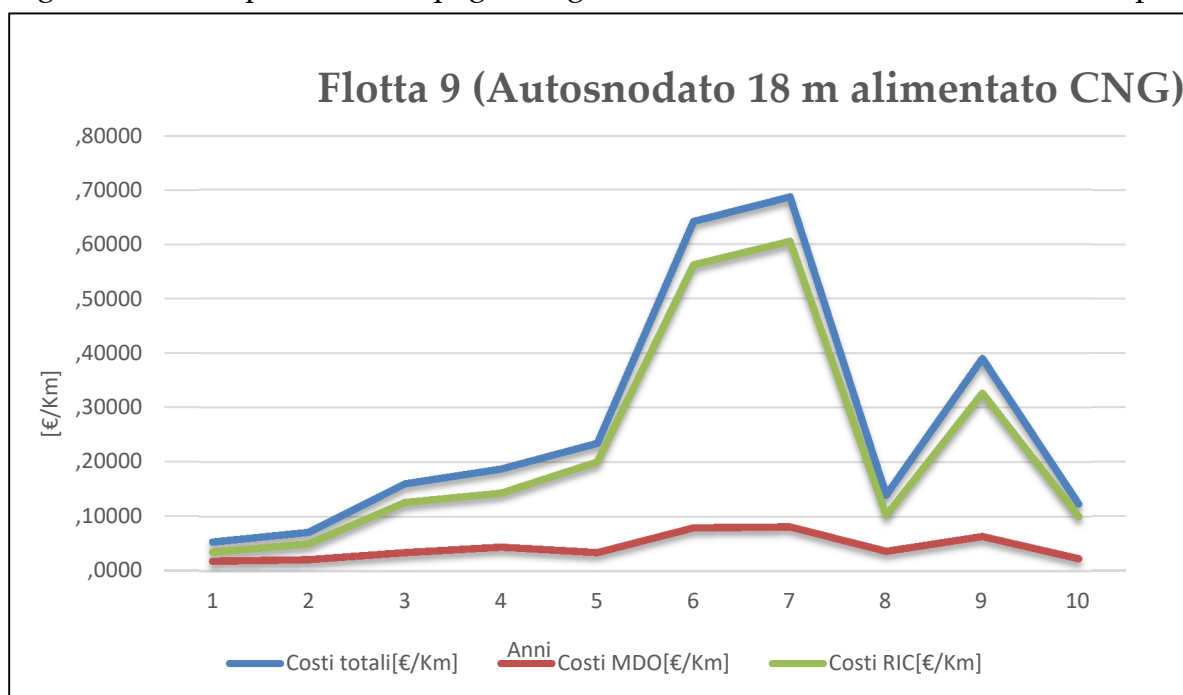


Figura 7.128: Andamento dei Costi [€/Km] della flotta numero 9

Per la flotta 9, le osservazioni relative agli andamenti, sono analoghe a quelle descritte per la flotta precedente; in questo caso però, non si registra più un solo anno rispetto al quale si ha un picco di Costi (RIC) sui Costi (MDO), bensì si registra per due anni consecutivi, ossia il VI e il VII.

L'analisi generale dell'andamento delle curve è in linea con quanto osservato finora, infatti la curva dei Costi (RIC) è ben superiore a quella dei Costi (MDO) nel tempo; in

questo caso, però, si rileva una coincidenza delle due curve nell'anno VII, causata dal fatto che il fornitore ipotizza guasti per la Sostituzione Parti Principali (RIC) di bassa entità in corrispondenza del VII anno di vita utile della flotta.

Gli andamenti generali delle altre flotte analizzate rispecchiano l'andamento sopra descritto e pertanto l'analisi effettuate è sufficiente per dimostrare i primi risultati di sintesi ottenuti che verranno riportati nel capitolo delle conclusioni di questo lavoro di ricerca.

### 7.3 Utilizzo dell'L.C.C. per comparare i diversi sistemi di trazione in ottica di sostenibilità dello sviluppo della Flotta

Giunti a questo livello di analisi, è possibile procedere con il cuore del confronto tra Flotte a Gasolio e Flotte a Metano che sono quelle tecnologicamente più mature. La comparazione conferma che, tra sistemi di alimentazione diversi, si deve procedere per costi globali su una valutazione congiunta di tutti i driver di costo. Si procede, ora, ponendo il focus d'indagine sul confronto tra i Totali dei Costi [€/Km], rispettivamente alle tre voci di analisi di costo, ossia Costi (MDO), Costi (RIC) e Costi Totali. E quindi avremo il confronto Gasolio-Metano sui Costi Totali [€/Km] rispetto ai Costi Totali. A partire dai Costi Totali per le Flotte a Gasolio calcolati precedentemente, si ottiene il Totale Costi Totali [€/Km] come somma dei costi calcolati per le singole Flotte nel periodo di tempo di riferimento pari a 10 anni; stesso procedimento si attua alle Flotte a Metano. Quanto descritto viene riportato nella seguente tabella 24:

Tabella 27: Totale Costi Totali [€/Km] di Flotte a Gasolio e di Flotte a Metano

Oggetto	ANNI									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>TOT Costi totali[€/Km] bus a Gasolio</b>	0,144	0,326	0,565	0,974	0,845	2,307	1,190	1,839	1,036	1,101
<b>TOT Costi totali[€/Km] bus a Metano</b>	0,368	0,817	1,041	1,380	1,648	2,573	1,986	2,274	2,214	2,454

Da cui, quindi avremo il grafico di figura 7.129:

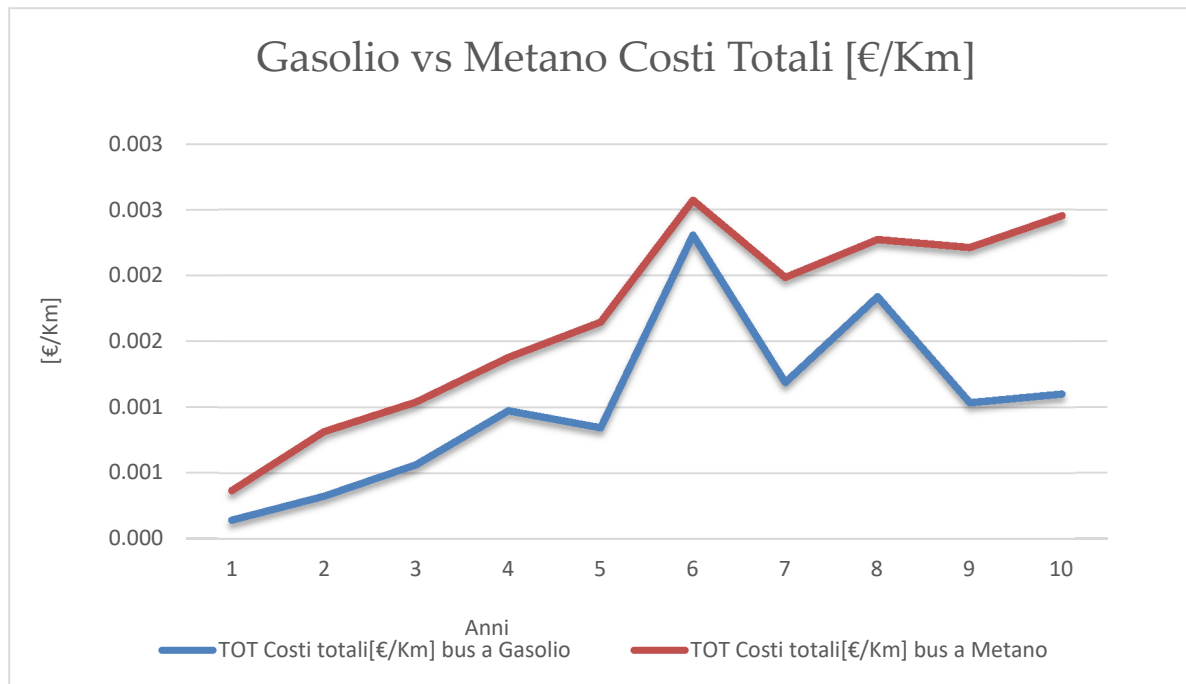


Figura 7.129 Andamento Totale Costi Totali [€/Km] dei bus a Gasolio e di quelli a Metano.

Da confronto abbiamo una duplice conferma: da un lato l'andamento dei costi totali calcolato per le flotte a Gasolio è inferiore rispetto a quello calcolato per le flotte a Metano, dall'altro l'andamento per le due flotte calcolato sui Costi Totali è molto simile a quello visto precedentemente per i Costi (RIC), poiché questi ultimi pesano maggiormente sui Costi Totali.

Riassumendo, tale elaborazione dei dati mette in luce alcuni aspetti significativi quali:

- l'individuazione degli anni "più critici", rispetto ai quali ci si dovrà aspettare un maggiore impatto dei Costi [€/Km];
- come le Flotte alimentate a Gasolio comportino un complessivo Costo [€/Km] minore nel tempo rispetto a quelle alimentate a Metano (possibile causa dovuta al tipo di manutenzione richiesta da queste ultime);
- come il focus d'analisi sia concentrato sui Materiali (Ricambi) piuttosto che su quello della forza Lavoro (Manodopera), poiché quest'ultimo aspetto ha bassa incidenza sui Costi complessivi che l'azienda dovrà affrontare per la manutenzione del parco autobus in un certo orizzonte temporale.

Riportando nel grafico di figura 7.130 il costo dei ricambi in ascissa e quello della manodopera in ordinata di tutte le flotte osservate negli anni (dal 2001 in poi)

indipendentemente dal sistema di trazione utilizzato si giunge ad un importante risultato e cioè che il trend dell'incidenza dei ricambi sulla manodopera risulta essere sempre più importante, dimostrando una politica "spare parts intensive" da parte dei costruttori.

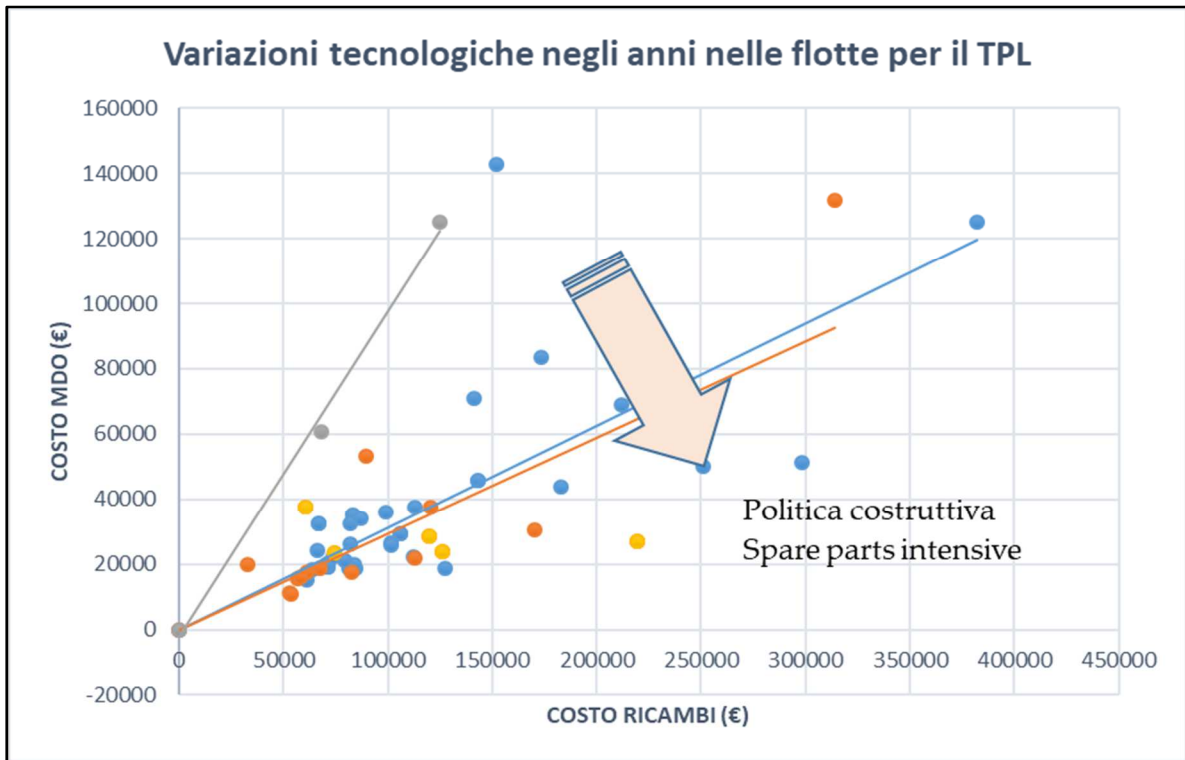


Figura 7.130: Rette di regressione lineare dei dati LCC dei diversi sistemi di trazione negli anni

Per gli ibridi a batteria i costi dei materiali sovrastano nettamente i costi della manodopera poiché le batterie devono essere sostituite dopo circa 5 anni di esercizio ed il loro costo risulta essere superiore ai 10000 euro ciascuna. La quasi totalità dei veicoli ibridi a batteria si posiziona nella parte in alta a destra del grafico. Questo comporta ovviamente un'elevata spesa in materiali e contemporaneamente numerose ore di manodopera. In questo caso però l'elevato costo manutentivo sostenuto dall'azienda di trasporto viene parzialmente ripagato dal bassissimo grado d'inquinamento del veicolo. Non bisogna dimenticare che la valutazione economica dell'investimento per un'azienda di trasporto pubblico è basata sul modello costi/benefici e tale metodo trasforma in linea di principio i benefici generati dall'investimento alla collettività in ricavi. L'adozione di veicoli ibridi genera in

questo senso un enorme beneficio, è infatti la voce della collettività che determina le priorità e l'importanza dei parametri utilizzati in questa tipologia di valutazione.

I veicoli a trazione diesel invece si posizionano nel grafico vicino all'origine degli assi e questo rispecchia la minore complessità tecnologica di tali veicoli e la lunga esperienza che porta ad una progressiva eliminazione dei guasti ed un costo manutentivo costantemente sotto controllo. Questo comporta inoltre il vantaggio di poter scartare in fase di gara le offerte che comportano costi elevati senza introdurre significativi benefici.

Anche i veicoli alimentati a metano si posizionano sul grafico vicino all'origine degli assi anche se alcuni lotti si discostano anche notevolmente. Si nota che tra i veicoli che si allontanano dall'origine degli assi quelli che si posizionano lungo la retta  $MDO=MAT$  risultano essere più vicini all'origine e quindi preferibili a livello di costo manutentivo totale, mentre quelli che presentano una maggiore incidenza di costi dei ricambi sono preferibili per quanto riguarda le poche ore di fermo tecnico del bus.

Nel grafico sopra si nota una diminuzione dei coefficienti angolari delle rette di regressione lineare partendo dai veicoli più anziani fino a quelli più recenti. La progressiva introduzione di innovative tecniche di progettazione e costruzione e la sempre più diffusa tendenza alla modularizzazione stanno, come si supponeva, portando il costo della manodopera e quindi il numero di addetti alle lavorazioni a diventare costante e calante nel tempo. Questo significa per interventi costosi in termini di materiali le ore di manodopera tendono ad essere uguali a quelle necessarie per interventi poco costosi o per controlli ispettivi. Mantenere pressoché costante l'apporto di manodopera per soddisfare le necessità manutentive della flotta dei veicoli, semplifica notevolmente il lavoro organizzativo e consente di stimare in modo molto preciso in termini di budget i costi che anno per anno il reparto di manutenzione mezzi sarà costretto a sostenere.



Entrando nel grafico con una serie di dati riferiti alle diverse velocità commerciali sui dati manutentivi dei diversi sistemi di trazione a batteria, diesel, CNG, filobus ed ibridi emerge che i costi di manutenzione sono più elevati nel caso di servizi con velocità commerciale più bassa (vedi grafico 7.131).

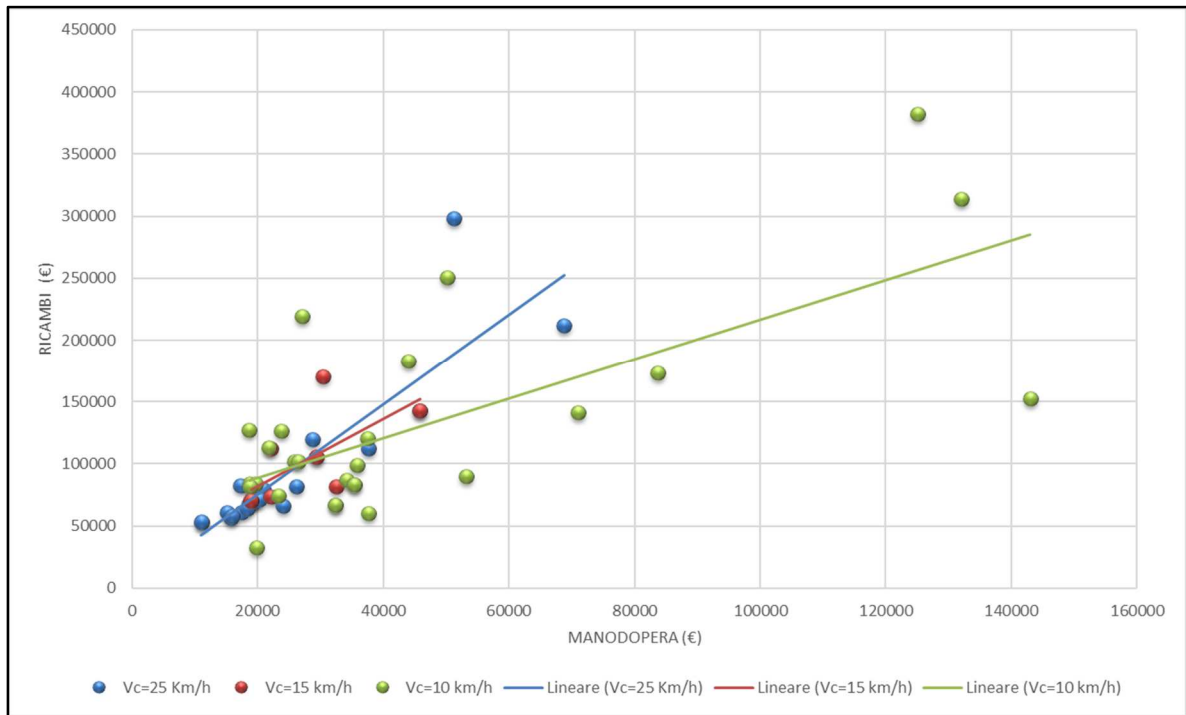


Figura 7.131: Riscontro dell'influenza della Vc sui costi della manutenzione

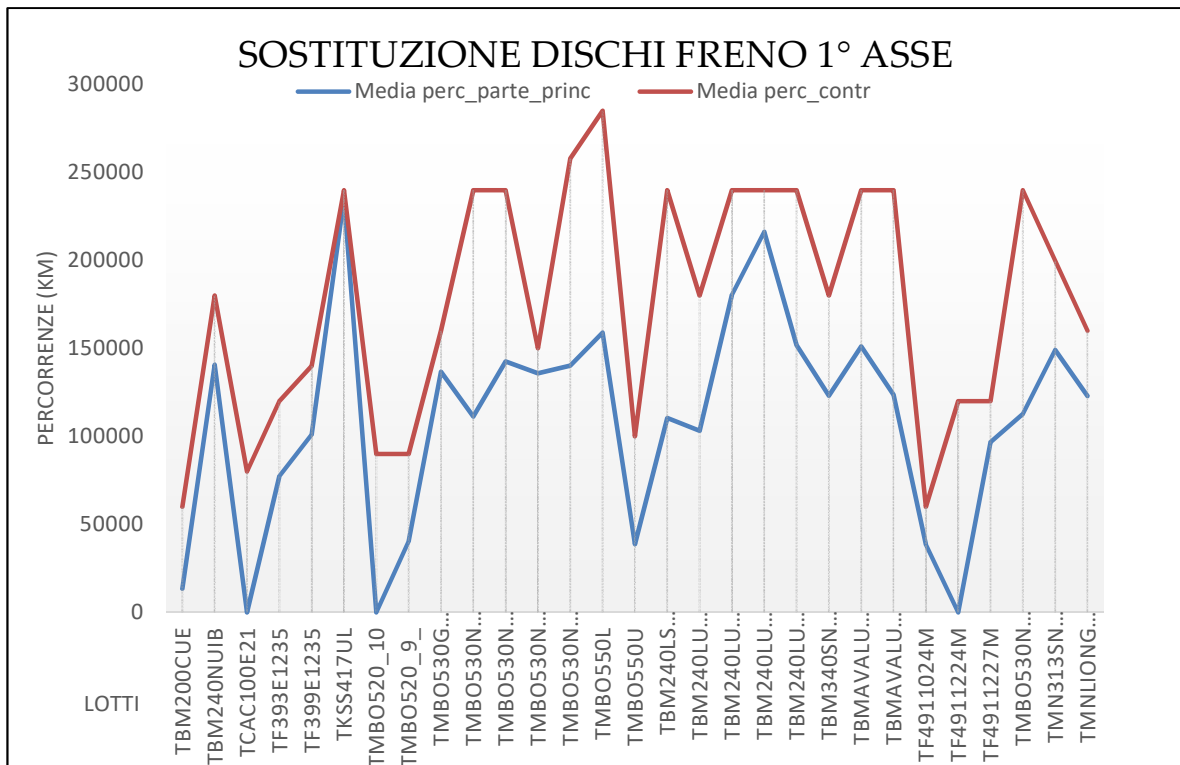


Figura 7.132: Confronto percorrenza reale/dichiarata per il componente disco Freno

Un'ulteriore analisi che ci ha permesso di validare il metodo LCC è stata condotta sulle percorrenze effettive dei componenti principali dei diversi sistemi di trazione. Ricavando la media delle percorrenze dei vari veicoli appartenenti ad uno stesso lotto di fornitura si sono riportati in grafici con in ascissa i lotti ed in ordinata sia le percorrenze dichiarate che quelle medie effettivamente avvenute (vedi figura 7.132). In una seconda tipologia di grafico si sono inoltre riportati i rapporti tra le due percorrenze avendo in ordinata i km dichiarati ed in ascissa i km medi effettivi (ogni punto indica un lotto di fornitura autobus). Effettuando una regressione lineare ed ottenendo il suo andamento si è notato che indipendentemente dal sistema di trazione e delle relative velocità commerciali all'aumentare del chilometraggio dichiarato diminuisce la media delle percorrenze effettive del componente prima di arrivare a sostituzione.

#### 7.4 Impatto della Metodologia Life Cycle Cost sulla gestione del magazzino ricambi in un'azienda di trasporto pubblico locale

La riduzione delle scorte di magazzino e dei conseguenti costi è l'obiettivo di tutte le aziende di Trasporto Pubblico Locale. La vetustà del parco mezzi di un'azienda TPL e il coercitivo adeguamento sostenibile dello stesso rendono l'aftermarket del prodotto artigianale Autobus complesso e non in grado di soddisfare le aziende di TPL. Il Life Cycle Cost come soluzione nella supply chain della manutenzione della flotta di autobus per il TPL.

L'Automotive Aftermarket è definito come il mercato secondario all'interno del più ampio settore automobilistico. Esso comprende le varie fasi di produzione, distribuzione, vendita al dettaglio di ricambi e componenti elettriche e meccaniche, i vari prodotti chimici, le attrezzature, gli equipaggiamenti, le parti di carrozzeria, gli accessori interni ed esterni, per tutti i veicoli commerciali, industriali, automobili e autocarri e autobus.

Per mercato secondario del settore automotive intendiamo lo specifico business che riguarda i veicoli già in circolazione: ogni veicolo infatti viene prodotto ed assemblato

all'interno delle case costruttrici e una volta venduto ed immatricolato, è l'aftermarket e i vari operatori in esso presenti che si occupano della distribuzione delle componenti e parti, della manutenzione e riparazione, ordinaria e straordinaria. Il settore dell'aftermarket o del post-vendita automobilistico è un mercato assai complesso, consolidato e altamente competitivo. Esso vede al centro della sua esistenza una rete eterogenea di soggetti che operano su milioni di automobili, furgoni, camion e autobus. I molteplici e differenti segmenti dell'aftermarket automobilistico, coprono l'intera fornitura di componenti per la riparazione, e lo spettro di servizi che vanno dalla vendita al montaggio fino alla manutenzione. Il prodotto autobus finito che arriva sul mercato, pronto per la vendita e l'immatricolazione è frutto di un lungo lavoro, che va dalla realizzazione del progetto iniziale fino all'assemblaggio finale (il listino ricambi di un autobus è composto da circa 350.000 articoli). Il processo è composto da numerose fasi complesse e specializzate che nessuna casa costruttrice è oggi in grado di svolgere autonomamente al proprio interno alle condizioni efficienti ed economiche del mercato. Dunque per questa ragione nella produzione di un autobus è coinvolto un numero elevatissimo di operatori che cercano continuamente di realizzare innovazioni da apportare ai processi e alle parti prodotte, in modo da soddisfare le richieste del cliente finale ma anche e soprattutto quelle degli altri soggetti che lavorano nelle diverse fasi. La ricerca e lo sviluppo di innovazioni tecniche e tecnologiche presentano però dei costi altissimi, che spingono gli operatori del settore a creare delle relazioni di lungo periodo e sancire accordi strategici per ottimizzare il processo produttivo degli autobus.

Per il settore del Trasporto Pubblico Locale, la continua ricerca di sistemi di trazione sostenibili dal punto di vista ambientale rappresenta un tema non soltanto economico ma principalmente valoriale e di competenze.

L'inserimento nella flotta di autobus sostenibili dal punto di vista ambientale implica modifiche infrastrutturali dovute alla costruzione delle stazioni di rifornimento e/o dell'officina di riparazione dei mezzi. La sostenibilità si realizza sempre con sistemi

sia che si tratti di autobus elettrici, di filobus, di mezzi alimentati a metano, CNG (Compressed Natural Gas), LNG (Liquefied Natural Gas) sia di autobus Fuel Cell, ma non con veicoli isolati come nel caso degli autobus alimentati a gasolio. La gestione ottimale di una flotta di autobus a bassa/Zero emissione è legata alla manutenzione, al miglioramento tecnologico di parti o di sistema, al corretto mix di approvvigionamento dei ricambi. L'operatore Tpl si trova di fronte alla sfida di acquisire le competenze per svolgere attività completamente diverse dalla gestione di una flotta di autobus a gasolio. Le scelte ambientali sono scelte strategiche di lungo periodo e i costi devono essere valutati su questo orizzonte temporale così come lo sviluppo delle competenze.

Il complesso sistema dell'aftermarket automobilistico, lo sviluppo di nuovi sistemi di trazione sostenibili e la necessità di mantenere la flotta in esercizio non deve portare all'aumento sconsiderato delle giacenze di magazzino, a un numero elevato di fermi tecnici giornalieri o a fenomeni di cannibalizzazione. Al fine di correlare il fermo tecnico giornaliero e le rotture di stock dei materiali di ricambio si è realizzato un database di dati relativi al fermo tecnico di un'azienda di trasporto pubblico locale e dei suoi dati di magazzino suddividendo le cause che hanno portato alla mancata disponibilità del mezzo al servizio.

Come evidenziato in figura n°7.133, i fermi riconducibili all'esecuzione di attività manutentive programmate sono trascurabili, mentre sono significativi quelli riconducibili a sinistri e alla mancanza di ricambi in magazzino (linea di colore celeste). Le "altre cause" invece sono legate all'efficienza dell'intero sistema manutentivo.

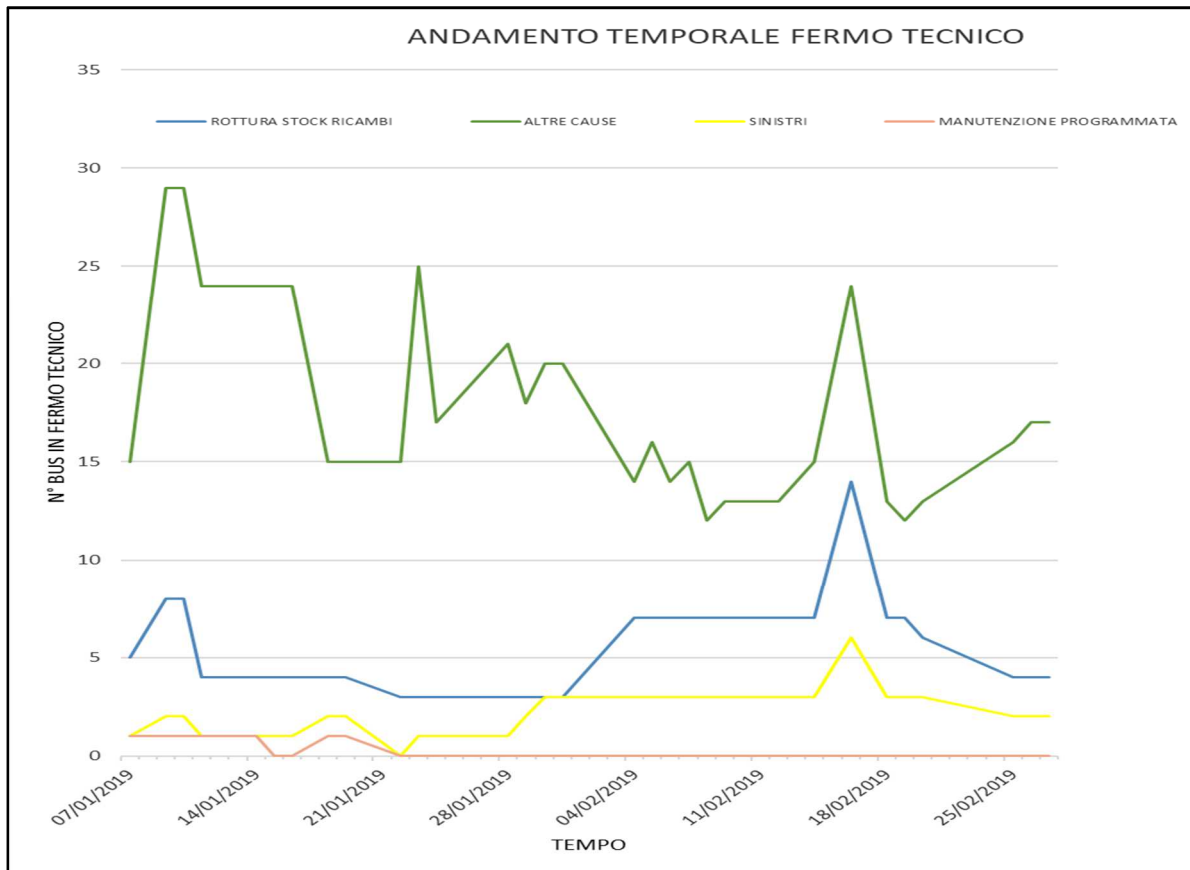


Figura 7.133: Andamento temporale dei fermi tecnici suddivisi per causale

Inoltre, in considerazione della realizzazione di autobus sempre più "Spare parts intensive" da parte dei costruttori e dell'importanza di avere sempre ricambi disponibili per la manutenzione abbiamo analizzato anche i dati di magazzino di un'azienda di Trasporto Pubblico Locale.

Nel caso di tali aziende i sistemi MRP pianificano la produzione secondo esigenze e quantitativi determinati ad un livello gerarchico superiore (in base alla domanda reale o stimata di autobus disponibili al servizio), detto MPS (Master Production Schedule). Il Material Requirements Planning (detto anche pianificazione dei fabbisogni di materiali e abbreviato in MRP o MRP 1) è una tecnica che calcola i fabbisogni netti dei materiali e pianifica gli ordini di produzione e di acquisto,

tenendo conto della domanda del mercato, della distinta base, dei lead time di produzione e di acquisto e delle giacenze dei magazzini. Al fine di valutare l'influenza sull'andamento dei fermi tecnici (autobus indisponibili) si possono individuare due grandi famiglie:

- Ricambi per Revisioni periodiche e programmate;
- Ricambi per Guasti e incidenti;

I primi, considerato i tempi e quantità noti si possono gestire a fabbisogno. I secondi hanno invece una ripercussione sul livello di servizio che l'azienda deve assicurare. Il guasto come da definizione ISO 10147/UNI 9910 è la cessazione dell'attitudine di un'entità a eseguire la funzione richiesta che ne caratterizza l'uso. Il guasto è un evento caratterizzato dal passaggio da uno stato ad un altro, in cui l'entità perde la sua funzionalità originaria determinando una variazione inaccettabile delle caratteristiche prestazionali del sistema. Lo stato di avaria è una conseguenza del guasto. Se il dispositivo è inserito in un sistema più complesso, il suo guasto può anche non causare il guasto dell'intero sistema, pur avendo effetti negativi sulla sua affidabilità. È utile richiamare la tipologia di guasto poiché la classificazione di questi si riflette su quella dei ricambi da tenere in scorta di sicurezza in magazzino:

- Guasti di primaria importanza: riducono la funzionalità dell'intero sistema del quale fanno parte;
- Guasti di secondaria importanza: non riducono la funzionalità dell'intero sistema del quale fanno parte;
- Guasti critici: rappresentano un rischio per l'incolumità delle persone e per questo motivo risultano ancora più gravi dei guasti di primaria importanza.

Mentre per un'azienda di TPL è importante assicurare un buon livello di bus disponibili c'è la necessità di contenere il valore della giacenza dei ricambi a magazzino e di aumentare l'indice di rotazione dei ricambi. Tendenze che, complici anche l'inserimento nelle flotte di nuovi sistemi di trazione e il mercato dell'aftermarket in realtà abbiamo riscontrato andare in senso opposto (indice di rotazione calcolato 0.2 che vuol significare ricambi acquistati e non utilizzati per la

risoluzione dei guasti).

Una significativa riduzione dei fermi tecnici riportati nella figura 7.133 si ottiene applicando le clausole contrattuali previste nella metodologia del Life Cycle Cost poiché i dati di L.C.C. segnalati dal costruttore costituiscono elemento vincolante sottoponibile a penalità/rimborsi nel caso di mancato rispetto dei valori dichiarati.

La metodologia Life Cycle Cost consente di creare una distinta base (bill of materials) che descrive tutti i componenti di un autobus con progressivo dettaglio avendo come obiettivo quello di determinare il fabbisogno di ricambi o complessivi che verranno utilizzati per ridurre al minimo l'indisponibilità del mezzo nella sua vita utile. Nella figura 7.135 si mostra come ha origine il flusso di dati occorrenti ad alimentare la metodologia.

I risultati ottenuti nella parte tecnica dei costi dell'LCC sono riassunti nella scheda riepilogativa mostrata in figura 6.118, compilata a cura del costruttore, ripartiti per mano d'opera (MO) e materiali (MT). I dati riportati, per il periodo di riferimento individuato e il relativo profilo di missione fissato si riferiscono alla:

1) Manutenzione Programmata.

- *Interventi di controllo, registrazione, sostituzione (anche di oli e refrigeranti), lubrificazioni da eseguire a scadenza chilometrica oppure temporale prefissata, secondo il piano di manutenzione previsto dal costruttore;*

- *Operazioni, essenzialmente di controllo visivo, che hanno come scopo la verifica del buono stato degli organi delle apparecchiature e dei differenti equipaggiamenti del veicolo in modo da garantirne il corretto funzionamento. Dette operazioni sono di norma effettuate in base a liste prestabilite.*

2) Sostituzione parti principali:

- *Interventi di ripristino (stacco e riattacco) su componenti di elevata importanza economica, in termini sia di frequenza di sostituzione, sia di costo di acquisizione.*

3) Manutenzione correttiva;

- *Tutti gli interventi non compresi nei paragrafi precedenti, necessari per garantire ai veicoli l'esecuzione della manutenzione.*

Si riporta nella successiva figura 7.134 la composizione del costo € /km del Life Cycle Cost come descritto.

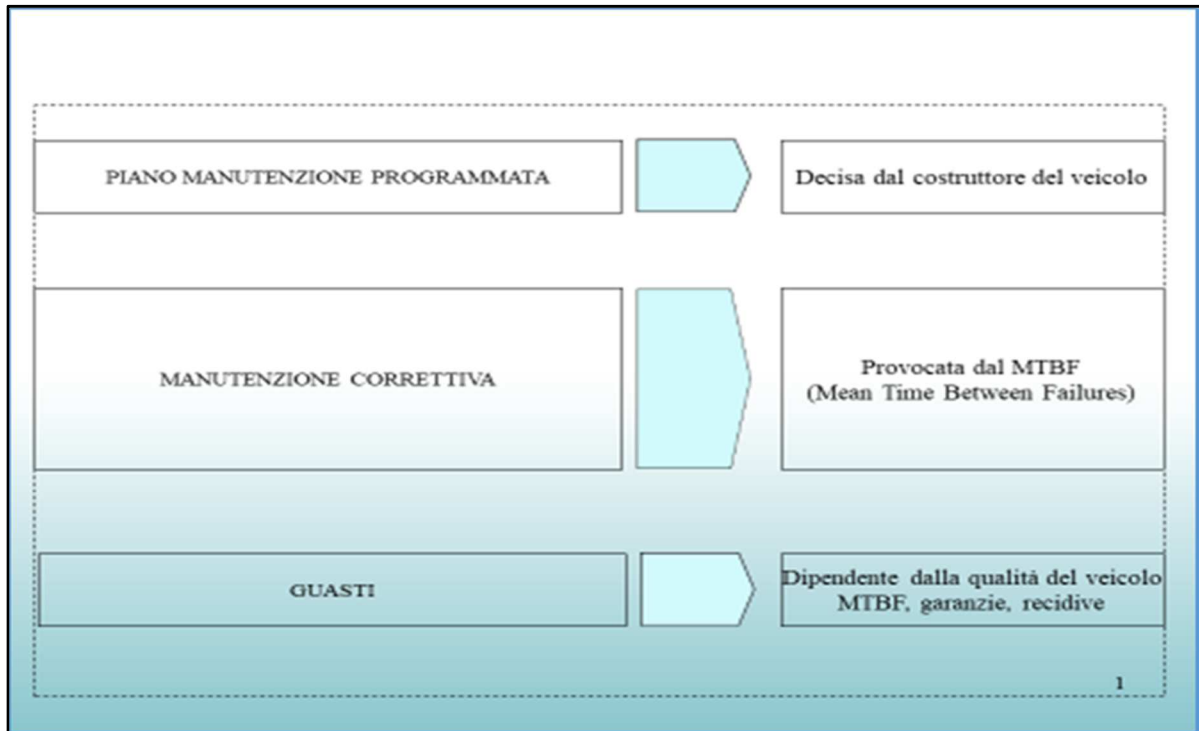


Figura 7.134 Composizione costo € /km del Life Cycle Cost

Annualmente come schematizzato in figura 7.135 si procederà alla verifica complessiva del rispetto delle dichiarazioni effettuate dai Costruttori relativamente al costo del ciclo di vita dei veicoli offerti: in questa sede verrà effettuata una consuntivazione dei costi sostenuti e si procederà ad un riscontro con quanto dichiarato in sede di gara relativamente al valore del costo al km. Negli obblighi di garanzia a carico del costruttore garantiti da penalità si comprende anche:

- il mancato rispetto dei lead time di fornitura ricambi.
- la performance affidabilistica tale da realizzare, nell'ambito del ciclo di vita, una indisponibilità inferiore a quella dichiarata.

Tutto quanto sopra riportato vincola il costruttore all' esercente il TPL e riduce i fermi tecnici della figura 7.133 alle sole "altre cause" permettendo una corretta e scientifica applicazione del Material Requirements Planning (MRP).

I ricambi critici comportano un livello di disservizio elevato. L'applicazione della metodologia Life Cycle Cost su tutta la flotta consente di avere dei lead Time dei



ricambi ridotti e una riduzione dei fermi tecnici giornalieri del 10%.

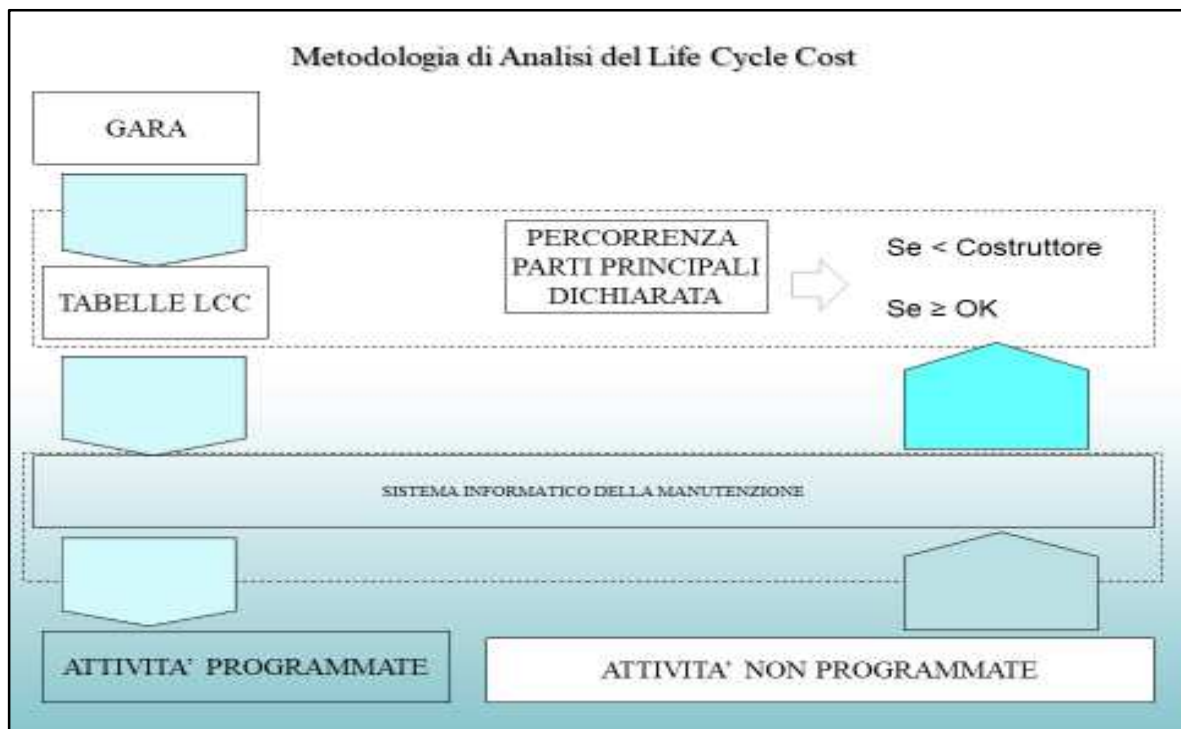


Figura 7.135 Metodologia di analisi del Life Cycle Cost

Dall'analisi delle giacenze di magazzino, degli indici di rotazione, dell'elevato numero di componenti che compongono un autobus e della disomogeneità di composizione della flotta di autobus derivante dall'acquisto mezzo gara pubblica, dall'analisi delle condizioni di mercato si evince che è fondamentale legare la casa costruttrice dell'autobus alla vita utile del mezzo obbligandolo al reperimento dei ricambi necessari alla corretta manutenzione e alla riduzione dei fermi tecnici.

## CAPITOLO 8 - Infrastrutture per i sistemi di trazione nel TPL

Quando si includono propulsori alternativi come quelli descritti in questo elaborato scientifico, ha senso non solo considerare i costi d'acquisto e manutentivi per i rispettivi veicoli, ma considerare anche la loro infrastruttura richiesta. Per consentire un confronto equo, tuttavia, il costo per una stazione di rifornimento diesel e di GNC costituita da due pompe è incluso nella tabella 28. Per il bus PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle), si assume che sia carico durante la notte, sebbene possa essere caricato da una stazione a pantografo se l'interoperabilità tra diversi fornitori e

produttori lo consente. La sensibilità del costo infrastrutturale consiste nel numero di autobus che potrebbero condividere l'infrastruttura. Dove decine di veicoli possono condividere le tradizionali stazioni diesel e metano, questo è molto meno il caso delle stazioni di carica dei bus elettrici. Pertanto, il costo dell'infrastruttura per un autobus elettrico diventa considerevolmente più elevato con il diminuire del tempo di ricarica specifico. Al fine di consentire un corretto orientamento da parte dell'operatore TPL nella scelta del corretto sistema di trazione si riepilogano i costi attuali delle infrastrutture necessarie per le attuali tecnologie sul mercato (tabella 28).

*Tabella 28: Costo dei sistemi di ricarica per flotte di autobus su gomma necessari per lo sviluppo della sostenibilità*

	Stazione di Ricarica	Costo Stazione di Ricarica (€)	Costo Infrastruttura in linea (€)
Autobus elettrici	OVER NIGHT	25.000 (50 kw)	/
	OPPORTUNITY	350.000 (450 kw)	0
	IN MOTION	1000/km	0
Filobus	/	/	1000/km
Autobus Metano	Metano	350.000	/
Autobus LNG	Metano Liquido	1.600.000	/
Autobus Diesel	Diesel	420.000	/
Fuel Cell	H2	100.000/bus	/

Per gli autobus elettrici, maggiore è la corrente di carica, più autobus possono condividere una stazione di ricarica.

Si supponeva che il costo annuale di manutenzione dell'infrastruttura fosse di € 1.500 per le infrastrutture diesel e metano. Per i caricatori di depositi e opportunità, sia gli orari di lavoro, i pezzi di ricambio e l'avvio iniziale dell'infrastruttura vengono recuperati dai dati del produttore. Laddove i caricatori per depositi possano essere utilizzati per più di un bus, è necessario selezionare la posizione di un caricatore di opportunità in modo che possa essere trovato in corrispondenza di un'intersezione di linee di autobus. In tal modo, diversi veicoli potrebbero utilizzare una stazione a pantografo, che potrebbe ridurre notevolmente i costi infrastrutturali per gli autobus che fanno affidamento su di essi. I costi presentati nella tabella 25 sono

omnicomprensivi della necessaria copertura per la trasformazione elettrica e cablaggio, nonché per l'infrastruttura fisica in loco. Nel nostro modello TCO, la manutenzione dell'infrastruttura PHEV comprende sia la stazione di rifornimento diesel che il caricabatteria da 50 kW. Allo stesso modo, il caricatore di opportunità viene caricato durante la notte e alle stazioni del pantografo durante il giorno. Un modo alternativo di considerare l'infrastruttura non è considerarlo come CAPEX, ma come servizio. In questo caso, terze parti potrebbero offrire opportunità di ricarica all'interno e intorno alle città, mentre gli operatori di autobus pagano per kWh di energia utilizzata. Questo sarà ulteriormente discusso nell'analisi della sensibilità. Contrariamente agli autobus, che sono ammortizzati a dieci percento del loro prezzo di acquisto originale dopo dieci anni di servizio, l'infrastruttura è interamente ammortizzata in un periodo di venti anni.

Coerentemente con gli obiettivi di questo lavoro di ricerca è utile riportare il costo d'investimento iniziale da affrontare sul prodotto autobus/filobus (tabella 29).

*Tabella 29: Upfront cost per technology*

<i>/</i>	<b>CAPital EXpenditure</b>
Diesel Euro VI	230.000 €
CNG	270.000 €
LNG	250.000 €
PHEV	445.000 €
Electric (whit battery)	502.500 €
Trolley	520.000 €
Trolley 18 m	900.000 €
H2/ibrid electric	800.000 €

Il costo del carburante è determinato per una distanza media annuale di 60.000 km percorsi indipendentemente dalla scelta del gruppo propulsore. I prezzi unitari per tipo di carburante si basano sui prezzi scontati di mercato per i grandi consumatori per il primo trimestre del 2018 e sono riportati nella tabella 30 insieme ai dati sul consumo di carburante specifici per il gruppo propulsore.

Tabella 30: Overview of fuel costs per technology

/	Diesel	CNG	PHEV	BEV
Kilometres/year	60000	60000	60000	60000
Fuel consumption	4,5 l/100 km	48,85 kg/100 km	34 l/100 km 1 kwh/km	1 kwh/km
Fuel price	1,01 €/l	0,6 €/kg	1,01 €/l 0,10 €/kwh	0,10 €/kwh
Fuel Cost	26.101,64 €	17.587,39 €	19952,28	6.000 €

A causa della sua limitata capacità della batteria, si presume che il bus PHEV guidi elettricamente per il 5% delle volte, mentre in realtà l'elettromotore potrebbe solo accelerare senza la possibilità di guidare in modalità completamente elettrica. Questa percentuale potrebbe comunque essere aumentata notevolmente se il bus PHEV si ricarica anche nei caricatori di opportunità del pantografo. Ciò, tuttavia, richiede compatibilità con i tassi di ricarica che caratterizzano le stazioni dei pantografi nonché un elevato grado di interoperabilità.

Questo modello mette in evidenza fuori da ogni possibile dubbio che se un operatore TPL ha un corretto, e quindi forte, orientamento all'ambiente dovrà sviluppare anche le sue competenze sui veicoli con particolare riferimento alla parte innovativa.

Ma come detto all'inizio di questo capitolo, la sostenibilità si realizza SEMPRE con sistemi (sia che si parli di autobus elettrici, di filobus o di mezzi alimentati a metano, CNG o LNG, o a idrogeno) non con veicoli isolati come era il caso degli autobus alimentati a gasolio. Sostituire l'autobus diesel con un autobus elettrico senza modifiche organizzative costituisce una grossa menzogna che può procurare soltanto ritardi allo sviluppo delle flotte di autobus elettrici che sono invece una reale necessità delle aree urbane densamente popolate del 2025-2030.

Si sottolinea che evidentemente sistemi di metropolitana, tram; sono ovviamente anch'essi sistemi elettrici per domande di trasporto ancora più elevate.



Come si può osservare in figura 8.137 la quantità di attività necessaria per esercire sistemi ad alta sostenibilità è elevata. L'operatore TPL diviene sempre più un utilizzatore e sempre meno un comaker, come nel passato. Il problema al momento per la parte elettrica è che non esistono ancora dominant design per le ricariche di uno dei qualunque tipi: ON, OPP e flash in linea.

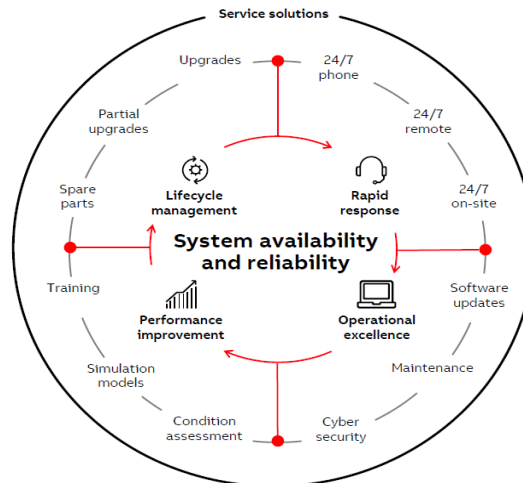


Figura 8.137: Le attività connesse con l'esercizio di un sistema su gomma innovativo a batteria

In figura 8.137 possiamo osservare una serie di attività connesse con la gestione di una flotta di autobus elettrici come il servizio continuo di assistenza 24/7, i servizi di supporto remoto 24/7, sviluppo delle soluzioni software per la gestione, ecc..

Come si può osservare dalla complessità di questi servizi, che iniziano con il progetto della loro adozione per verificare il sistema di ricarica lungo la rete più idoneo è una attività completamente diversa dalla gestione di un autobus a gasolio.

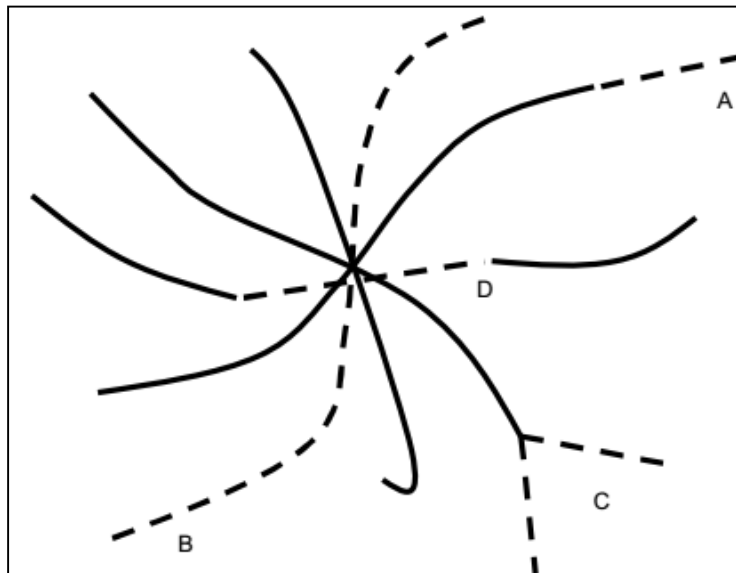
Come si può facilmente osservare le scelte ambientali sono scelte strategiche di lungo periodo e i costi devono essere valutati su questo orizzonte temporale così come lo sviluppo delle competenze. La variabilità dei costi con contratti di outsourcing porta in ogni caso ad incrementi dei costi, poiché si scaricano molto rischi al fornitore.

### 8.1.1 Flessibilità della trazione elettrica e dell'infrastruttura filoviaria

Il progetto di sistema di ricariche, pone gli elementi per flessibilizzare il servizio di TPL secondo diverse possibilità riportate (figura 8.138):

A. allungamento di una linea esercita senza la presenza di una filovia, ma in modalità elettrica;

- B. inserimento di una linea completamente elettrica senza utilizzare una filovia;
- C. una pluralità di capolinea aggiunti dove non sia possibile spingersi con le filovie a causa dell'urbanizzazione esistente;
- D. una linea in parte filoviaria ed in parte elettrica nel punto pregiato del centro storico.



*Figura 8.138: La flessibilità dell'infrastruttura elettrica autobus/filobus*

In figura 8.138 è riportata la rete filoviaria in tratto continuo e i prolungamenti in marcia elettrica in linea tratteggiata. La flessibilità poi può essere molto utile anche per motivi di puro esercizio, nei casi in cui lungo la linea filoviaria ci siano interruzioni per cantieri o interventi di terzi.

In tutti i capolinea, ove sarà possibile, saranno installati posti di ricarica per automobili, con un classico schema di integrazione modale di tipo elettrico.

L'operatore di TPL deve attuare strategie proprie, valutare linea per linea, sviluppando un sistema di trasporto flessibile, ben integrato nel territorio, che riesca a rispondere ad una domanda crescente di mobilità, e che sia sostenibile dal punto di vista ambientale ed economico.

### 8.1.2 I sistemi di ricarica elettrica per veicoli TPL

Per la scelta del sistema di ricarica i segnali tecnici indicano in quella conduttiva quella energeticamente più efficiente. Per quanto riguarda i dispositivi di ricarica ne

esistono di tantissime tipologie, e lo scopo del progetto è quello di trovare la soluzione più consona per le reti urbane gestite.

Grazie al sistema di ricarica veloce automatico, gli autobus elettrici possono restare in servizio 24 ore su 24, 7 giorni su 7, e realizzare quindi un sistema di trasporto urbano a zero emissioni. Grazie al sistema di collegamento automatico posto sul tetto e a tempi di ricarica di 4-6 minuti, la soluzione può essere facilmente integrata nelle linee urbane esistenti installando unità di ricarica rapida presso stazioni di capolinea, depositi e/o fermate intermedie. La concezione modulare con potenze di ricarica da 150 kW, 300 kW o 450 kW fornisce in pochi minuti a ciascun autobus l'energia necessaria per percorrere il proprio tragitto urbano per tutta la giornata. Il sistema di ricarica veloce rimuove così gli ostacoli principali all'adozione su larga scala di autobus elettrici a zero emissioni: lunghi tempi di ricarica e autonomia limitata.

Il sistema di collegamento automatico utilizza un classico pantografo (vedi figura



*Figura 8.139: Sistema di ricarica a Pantografo*

8.139) come quelli tradizionalmente installati su treni, tram e metropolitane, montato però in posizione rovesciata su un palo. Quando l'autobus arriva alla stazione di ricarica, il veicolo comunica via wireless con l'unità di ricarica e il pantografo viene abbassato automaticamente nella posizione richiesta. Dopo aver eseguito tutti i controlli di sicurezza, il sistema eroga all'autobus una ricarica veloce.



La soluzione automatica può essere utilizzata con qualsiasi autobus elettrico provvisto dell'apposita interfaccia collocata sul tetto. Il collegamento a pantografo rovesciato consente di installare sul tetto dell'autobus un'interfaccia economica e leggera costituita semplicemente da 4 barre di contatto del peso di circa 10 kg. I costruttori di autobus elettrici possono così ridurre il peso dei veicoli, aumentarne l'efficienza energetica e progettare autobus con costi più bassi.

### 8.2.3 La stazione di metano liquido

Le caratteristiche di una stazione di rifornimento di GNL sono descritte in figura 8.140.

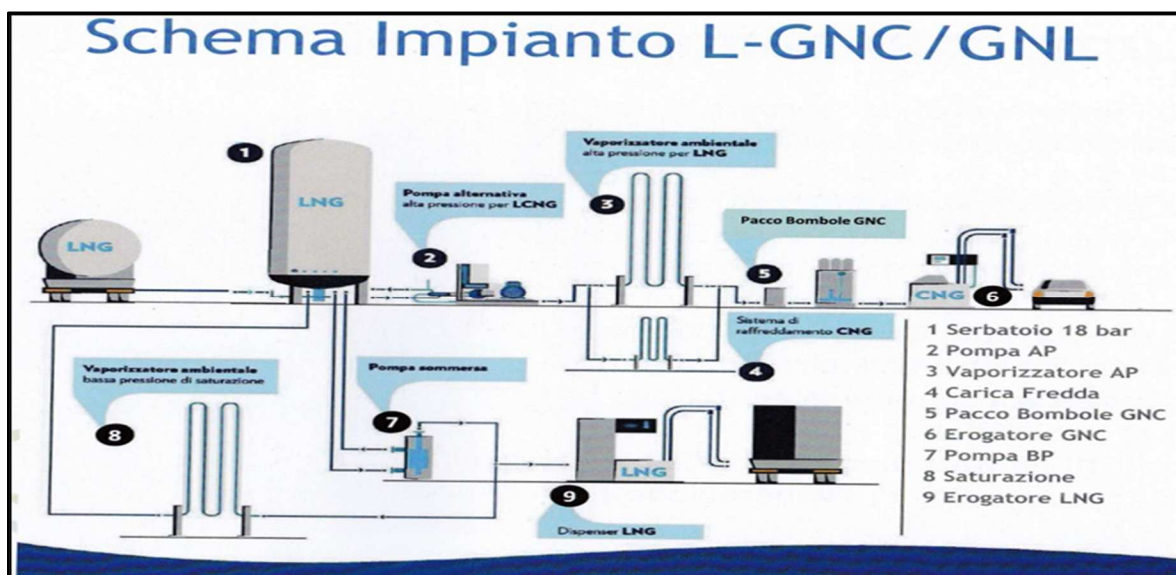


Figura 8.140: Caratteristiche stazione di ricarica L-GNC / GNL

È necessario:

- Installare un serbatoio criogenico a doppia parete, orizzontale o verticale, in acciaio inox con doppio isolamento, una camera con vuoto spinto e con linee di aspirazione e di ritorno;
- Installare una pompa di alta pressione per portare il metano liquido in pressione per produrre metano compresso L-CNG (processo maggiormente efficiente del corrispettivo processo di compressione degli impianti tradizionali);
- Vaporizzatore atmosferico alta pressione, in cui in GNL si trasforma in CNG per l'effetto dell'assorbimento di calore dall'ambiente esterno;

- Sistema di carica fredda, che ottimizza l'erogazione del GNC mantenendo la temperatura di riempimento del pacco bombole pari a 5 °C anche nel periodo estivo, garantendo un maggior riempimento e una maggior autonomia grazie alla bassa temperatura del prodotto;
- Pacco bombole accumulo GNC con sistema di smorzamenti delle vibrazioni (colpo d'ariete);
- Erogatori NGV1 e NGV2 con misuratori di portata, che garantiscono tempi di riempimento molto bassi grazie alla portata massima di 60 kg/min;
- Pompa di bassa pressione (16 bar), grazie cui è possibile il rifornimento di metano liquido direttamente a bordo veicolo;
- Sistema di saturazione necessario al corretto rifornimento dei veicoli a metano liquido;
- Erogatore di GNL con misuratore di portata, che garantisce tempi di rifornimento bassi, grazie alla portata massima di 50 kg/min;
- Compressore di Boil – Off gas che recupera i gas di evaporazione prodotti dal serbatoio criogenico fisso, dalla messa in freddo delle pompe e dal recupero del gas dai serbatoi dei mezzi da rifornire (in questo modo non si ha alcuna perdita di prodotto dovuta all'evaporazione, e si può anche utilizzare il Boil – Off gas come CNG).

I punti di forza di una stazione L-GNG/GNL, sono i seguenti:

1. Erogazione del gas naturale sia allo stato liquido che compresso;
2. Nessun costo di allacciamento al metanodotto;
3. Bassi costi elettrici di esercizio;
4. Bassi tempi di rifornimento di CNG e LNG;
5. Maggior riempimento dei serbatoi dei veicoli.

Per quanto riguarda i costi di investimento, essi vengono stimati di poco inferiori a 1.600.000 di euro, di cui circa 1.400.000 € realizzativi dell'impianto L-GNC e circa 200.000 € di "upgrade" per l'impianto L-GNL. La realizzazione dell'impianto non necessita di grandi tempistiche, pari a circa 3 giorni: il primo giorno viene trasportato

ed installato il serbatoio grazie ad apposite gru di sollevamento; il secondo giorno vengono montate tutte le tubature, gli accessori esterni, le pompe e gli erogatori; il terzo giorno si procede al collaudo finale e alla messa in freddo (figura 8.141).



Figura 8.141: Impianto LNG

In considerazione del fatto che attualmente il costo di un bus LNG è superiore di 20.000 € rispetto ad un bus alimentato a gasolio e che il Saving LNG/Gasolio attualmente ammonta a 0,25 €/km, considerando un profilo di missione di 40.000 km/anno, con l'acquisto di n°9 bus si recupera l'investimento iniziale in 20 anni (vedi figura 8.142).

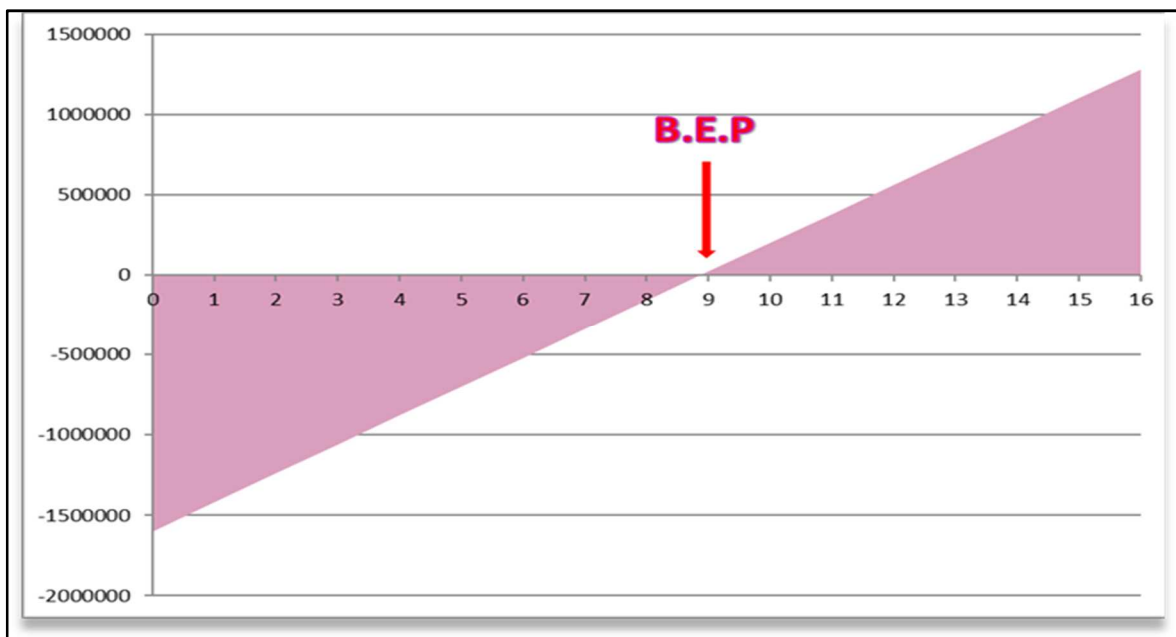


Figura 8.142: Break even point di un investimento su impianto LNG

## 8.2.4 Applicazione della modalità di scelta strategica all'offerta del mercato dei veicoli

La definizione di una strategia di sostenibilità dell'offerta di TPL richiede precise scelte poliennali per poter essere attuate in modo efficace. Non va tralasciato come lo sviluppo del parco debba avvenire mantenendo salda l'attenzione verso la ricerca di un equilibrio da ricercarsi tra le varie strategie di base. In altre parole non è ipotizzabile l'attuazione di strategie potenzialmente totalizzanti che portino ad avere tutto il parco filoviario, o a metano o ancora elettrico. La scelta strategica deve essere quindi in ogni caso sostituita da un mix che tenti di omogeneizzare diverse scelte tecnologiche. Esistono infatti una molteplicità di potenziali sistemi che devono essere valutati dal singolo operatore di TPL. Una scelta che vada a discriminare tra diverse tecnologie deve, in primo luogo, poggiare su di un'analisi che tenga conto delle relazioni che intercorrono tra tipo di esercizio da erogare (urbano, suburbano, extraurbano) e le caratteristiche dei sistemi di trazione. Un primo risultato di questa analisi viene riportato in tabella 32:

*Tabella 32: Le scelte operative possibili per i vari tipi di esercizio*

	<b>Urbano</b>	<b>Suburbano</b>	<b>Extraurbano</b>
<b>Termici</b>	Si: Euro III	Si: Euro III	Si: Euro III
<b>Metano</b>	Si: Estendibile su tutta l'area. Costruzione impianto in deposito per ricarica	Si: A volte per linee particolari che rientrano in deposito consentendo, in questo modo, il rifornimento dei veicoli	No
<b>Filobus</b>	Si: Solo per linee con infrastruttura filoviaria	No: Sistemi Bimodali in sede Propria	No: Solo soluzioni bimodali con termici in periferia ed elettrici nel centro storico
<b>Ibridi</b>	Si: Per linee che attraversano il centro e hanno un tracciato che consente la ricarica delle batterie	No: Applicazione non coerente	No
<b>Elettrici</b>	Si: Parziale. Solo per le linee che si mantengono all'interno del centro storico per capienza ed autonomie del veicolo contenute.	No: Applicazione non coerente	No

Dal punto di vista tecnico, le principali caratteristiche attorno alle quali deve formarsi il giudizio dell'operatore di TPL sono rappresentate da:

- La capienza del veicolo;
- La flessibilità di esercizio;
- Il livello di emissioni;
- L'accessibilità al sistema urbano, ovvero la penetrazione dell'area urbana alla ricerca di una nuova domanda di trasporto.

Riportiamo quindi su un grafico la relazione tra flessibilità in esercizio in ambito urbano e sistema di trazione (figura 8.143).

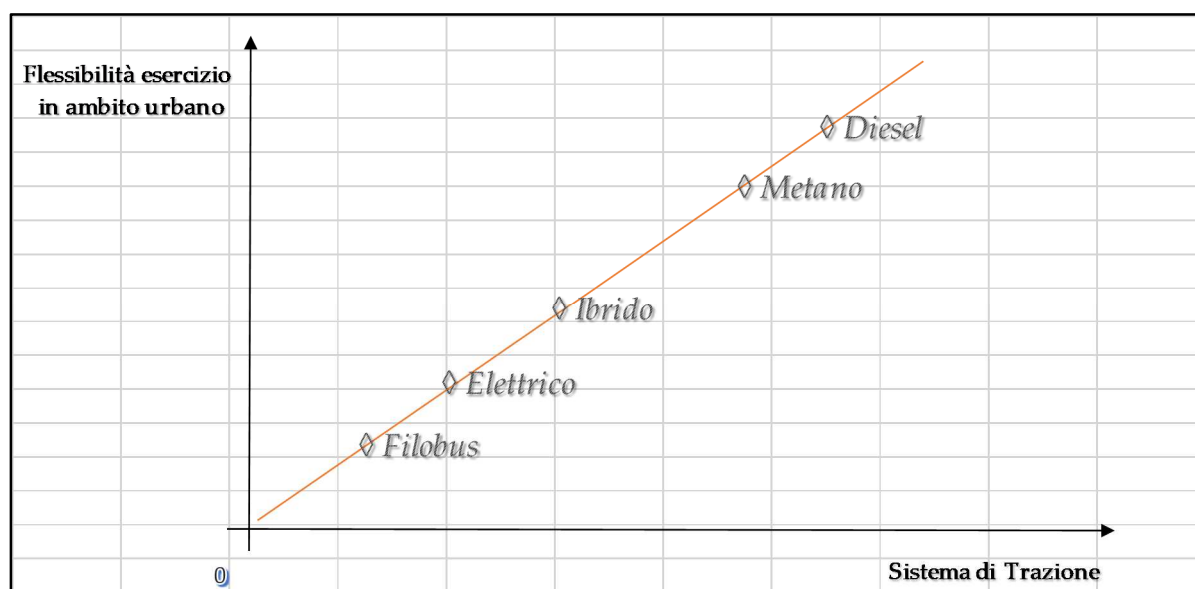


Figura 8.143 Relazione tra flessibilità in esercizio in ambito urbano e sistema di trazione

La figura sopra mostra quale rilevanza, nel determinare la flessibilità di esercizio di un sistema di offerta, viene giocata dal sistema di trazione. Nella figura 8.144 sottostante invece si ottiene un andamento esattamente antitetico rispetto al precedente ponendo l'attenzione sul livello delle emissioni.

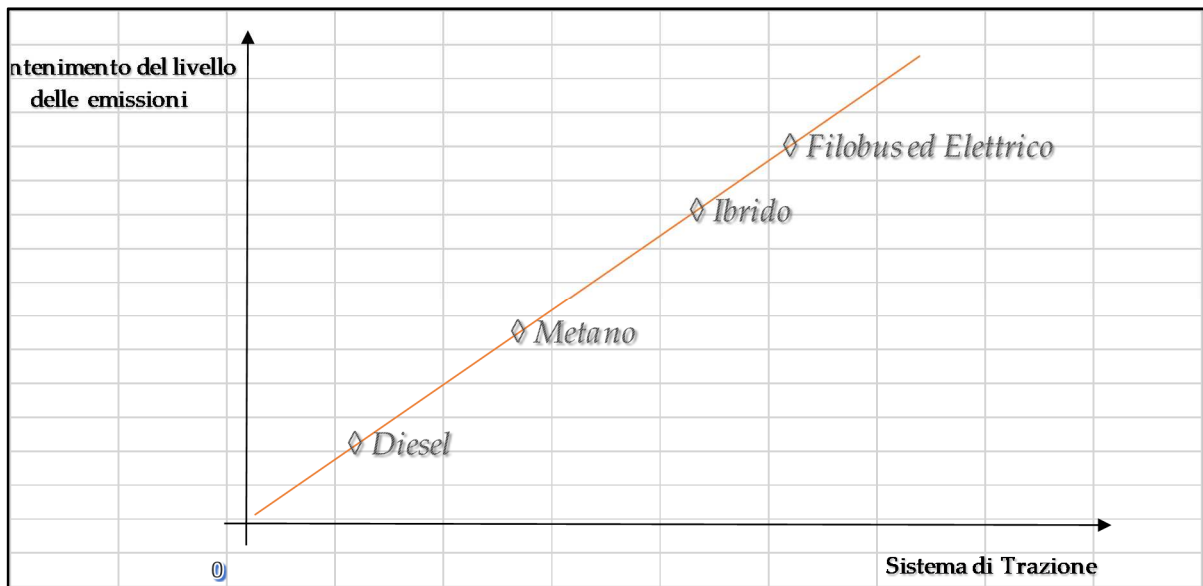


Figura 8.144: Correlazione tra contenimento del livello di emissioni e sistema di trazione

Detto questo si può aggiungere che, nel progetto del servizio, non può essere trascurata la classificazione appena introdotta, secondo la quale, i gradi di libertà che caratterizzano l'uso in esercizio dei vari sistemi di trazione crescono man mano che ci si allontana dai filobus per conoscere il minor numero di vincoli nel caso dei veicoli a metano ed a gasolio. Trova così ulteriore consistenza il concetto che non tutti i tipi di trazione possono essere considerati adatti per tutti i tipi di linea. Ciò viene a dipendere, oltre che dalle caratteristiche del veicolo rappresentate dai diversi ingombri dinamici e dalle diverse motorizzazioni, anche dal tipo di infrastruttura richiesta per l'esercizio. In quest'ultima direzione, l'esempio tipico è costituito appunto dalla trazione filoviaria la quale, pur non presentando particolari complessità dal punto di vista dell'esercizio, è invece penalizzata dalla presenza di una infrastruttura significativa, distribuita lungo la linea che ne vincola fortemente l'adozione.

Nel caso dei veicoli elettrici la scarsa flessibilità in esercizio va ricercata soprattutto nelle ridotte dimensioni piuttosto che negli impedimenti dovuti all'infrastruttura. Diciamo anzi che per questa tipologia di veicoli, così come peraltro accade per gli ibridi, l'infrastruttura si mantiene molto contenuta essendo costituita dalle sole colonnine di ricarica localizzate, per motivi di sicurezza, esclusivamente all'interno del deposito. La dislocazione delle colonnine di ricarica lungo la linea o più

precisamente ai capolinea, potrebbe infatti contribuire al mantenimento dello stato di ricarica della batteria ed assicurare quindi una maggiore autonomia.

### 8.2.5 Economie di scala nell'alimentazione di autobus a metano, elettrici, a batteria e filoviaria.

Una delle applicazioni ideali nell'uso del metano per il TPL è quella che si ottiene con un'adozione che si estenda su tutta la flotta. Se si volesse infatti tracciare l'andamento dei costi da sostenere per un impianto di rifornimento a metano in relazione al numero dei veicoli in parco, si otterrebbe la curva rappresentata in figura 8.145, quindi costi calanti al crescere del numero dei veicoli.

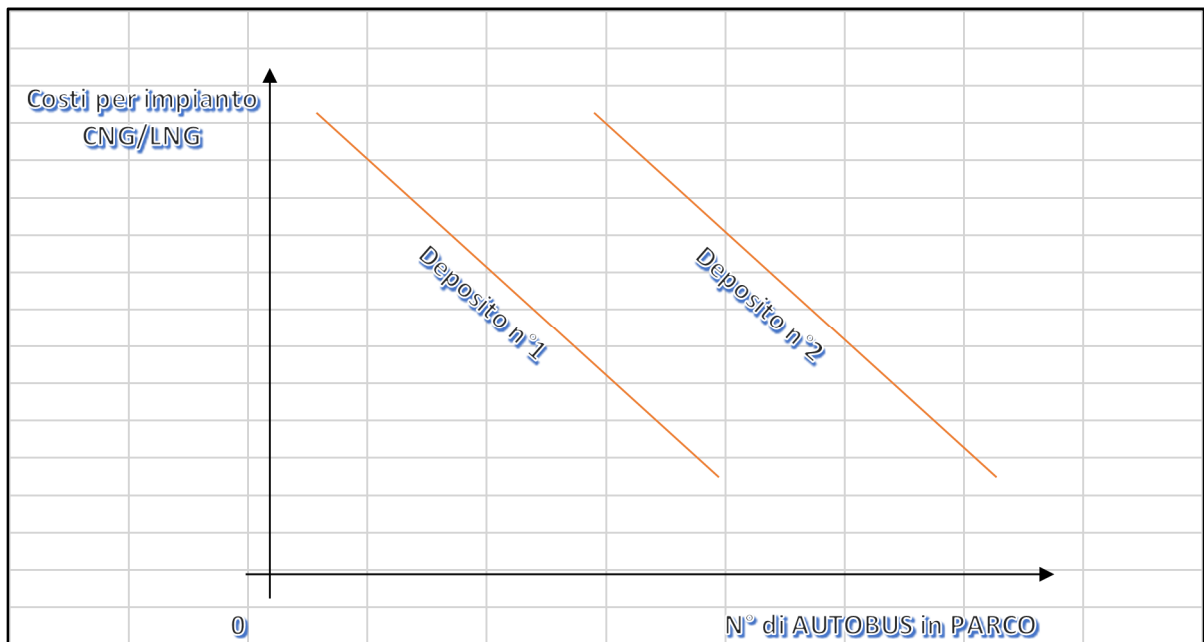


Figura 8.145: Andamento dei costi per un impianto a Metano (CNG/LNG) in un deposito con flotta significativa

Ecco perché l'operatore TPL che inizia progetti sia con alimentazione degli autobus a metano compresso, CNG, che a metano liquido LNG, incrementa via via la flotta al fine d'utilizzare appieno le economie di scala che ne derivano.





*Figura 8.146: Un compressore per una stazione di rifornimento di gas metano per il deposito di un operatore TPL*

In figura 8.146 è riportato un compressore per l'alimentazione di una stazione di rifornimento di gas metano compresso per una flotta di autobus. Per assicurare la regolarità del rifornimento devono essere almeno due per avere anche i tempi per eventuali manutenzioni e guasti ed un terzo compressore permetterebbe di avere meno complicazioni. Questo andamento è reso poi ancor più interessante dalla dinamica dei finanziamenti di carattere pubblico sui quali, come già si è detto, ha già potuto contare la costruzione di impianti di rifornimento del metano. Anche qui lo scotto maggiore pagato a livello di nuove competenze da sviluppare. Nel progetto di servizio del TPL, cioè nella definizione dei turni macchina quotidiani di ogni autobus, non possono essere trascurati i gradi di libertà che caratterizzano l'uso in esercizio dei vari sistemi di trazione in particolare in relazione all'autonomia e alla flessibilità. Si è introdotto il concetto, qui verificato, secondo cui non tutti i tipi di trazione possono essere considerati adatti per tutti i tipi di linea. Prova ne sia il fatto di poter arrivare a tracciare dei precisi campi di esistenza in particolare come vedremo per gli autobus elettrici a batteria.

Ciò viene a dipendere, oltre che dalle caratteristiche del veicolo rappresentate dai diversi ingombri dinamici e dalle diverse motorizzazioni, anche dal tipo di infrastruttura richiesta per l'esercizio. Ultimo ma non meno importante l'H<sub>2</sub> che non permette autonomie di km percorsi in esercizio paragonabili al metano e quindi si



pone in modo importante il tema dell'autonomia. Problema dell'autonomia che il metano CNG ha invece risolto grazie al passaggio negli autobus della quantità di gas metano da 1180 lt/bombola tipo II a 1480-1640 lt/bombola tipo III e tipo IV, queste ultime con autonomie paragonabili a quelle dell'alimentazione a gasolio. L'evoluzione delle bombole per il metano ha tolto il grande motivo dell'attacco degli anni '90 contro il CNG, cioè la ridotta autonomia, con queste bombole le autonomie sono del tutto comparabili. Discorso diverso per il metano liquido LNG, la filiera di questo carburante è esattamente uguale a quella del gasolio perché deve essere trasportato per via stradale.

L'idrogeno può essere anche essere utilizzato come fonte integrativa per i veicoli alimentati a metano poiché ne migliora il rendimento energetico complessivo come è stato dimostrato, ad esempio, nel progetto MYBUS sviluppato da Start Romagna che ha previsto di insufflare nel metano sino al 20% in volume, per aumentare il rendimento del motore ICE degli autobus alimentati a metano CNG.

La trazione filoviaria la quale, pur non presentando particolari complessità dal punto di vista dell'esercizio è invece penalizzata dalla presenza di un'infrastruttura significativa, distribuita lungo tutta la linea che ne vincola fortemente l'adozione.

Queste ultime considerazioni invitano a chiudere il ragionamento relativo ai costi di infrastruttura anche per poter giungere a disporre di qualche ulteriore elemento di comparazione tra la trazione filoviaria, elettrica ed ibrida rispetto al caso dei veicoli a metano già ampiamente discusso. Nel caso della trazione elettrica a BEV, i costi dell'infrastruttura hanno l'andamento della figura 8.147.

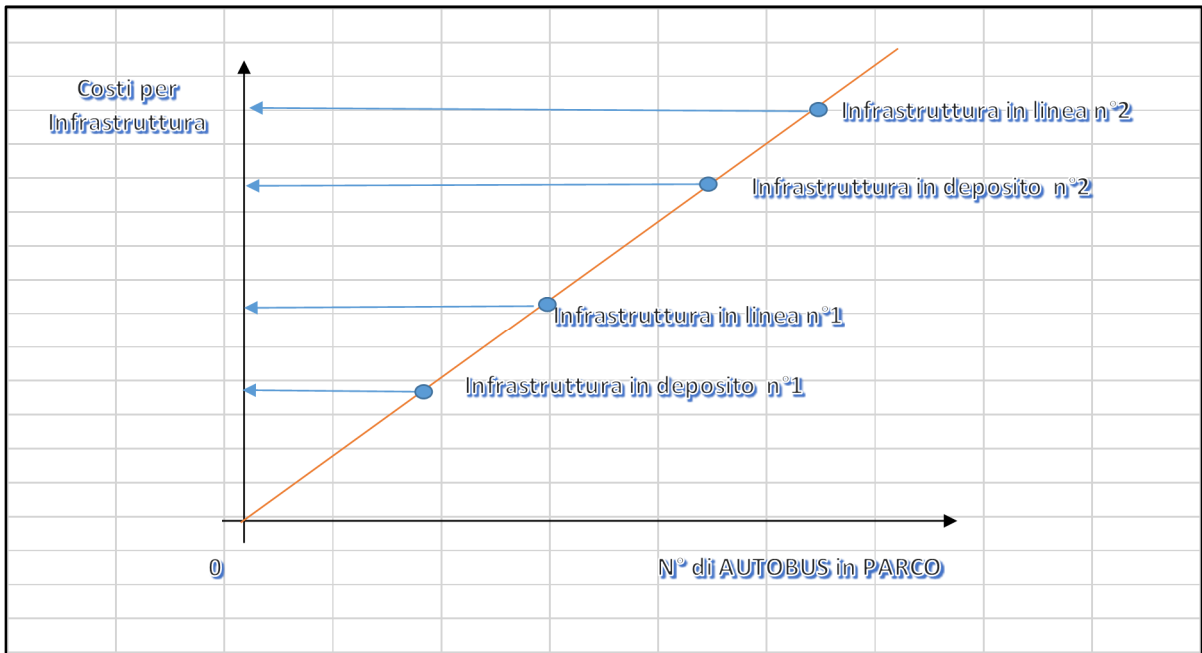


Figura 8.147: La relazione di linearità tra il costo d'infrastruttura e numero di veicoli in parco nel caso della trazione elettrica

Se si considera infatti una corretta gestione con procedura di ricarica notturna per il sistema Over Night, per ogni nuovo veicolo che entra in parco occorrerà predisporre un'apposita piazzola di stallo dotata di sistemi di ricarica mentre, come detto, oltre alle ricariche in deposito per le opportunity charge sono presenti anche le infrastrutture in linea.

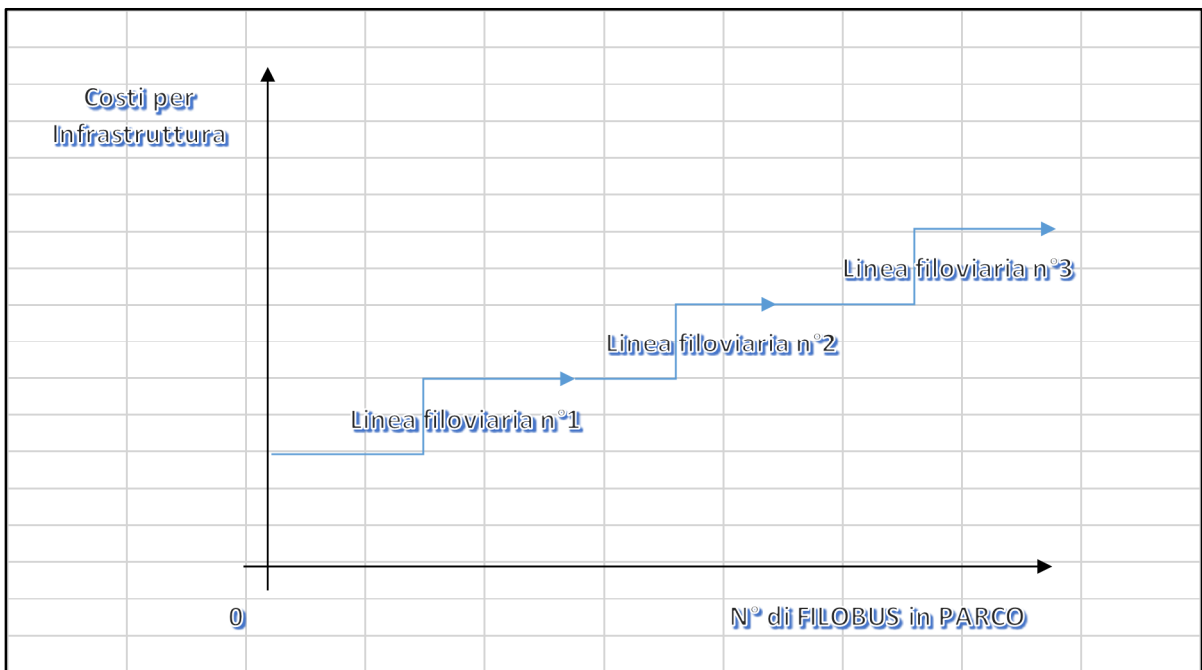


Figura 8.148: Andamento dei costi d'infrastruttura per l'avvio di un sistema filoviario in caso di nuovi impianti

Nel caso della trazione filoviaria l'andamento dei costi di infrastruttura di figura 8.148 presenta un caratteristico andamento a gradini che si incrementa in corrispondenza dell'entrata in esercizio di ogni nuova linea.

Per ogni nuova linea infatti deve essere prevista e realizzata lungo l'intero percorso la linea di contatto comprensiva di sospensioni meccaniche (pali, supporti etc...) e di relative sottostazioni elettriche di alimentazione. Rimane ovvio come gli stessi costi possano risultare notevolmente ridimensionati qualora si presenti l'opportunità di sfruttare o ripristinare infrastrutture già esistenti. Questa opportunità è davvero concreta in tutte quelle città in cui il declino della rete filoviaria vissuto negli anni 60-70 è stato accompagnato almeno da una lungimiranza che ha consigliato di non smantellare completamente le linee ormai non più esercite.

## **9.0 La valutazione dei risultati conseguiti**

Il presente lavoro di ricerca nasce dall'esperienza maturata nell'ambito della manutenzione mezzi e dalla volontà di cercare d'ottimizzare i costi che le aziende di trasporto sostengono e sosterranno in funzione dei nuovi sistemi di trazione sostenibili dal punto di vista ambientale.

Finora si è assistito al finanziamento di progetti pilota senza che questi avessero un seguito o sviluppo futuro. Il presente lavoro, partendo dalla costituzione di un database di dati manutentivi che provengono dal metodo del life cycle cost, ci ha permesso d'individuare i sistemi di trazione più idonei a determinati profili di missione, coerentemente con le linee programmatiche imposte dall'UE per il prossimo futuro. Inoltre la comparazione dei diversi sistemi di trazione in funzione dell'operatività, dei consumi e delle emissioni permette l'operatore del TPL di orientarsi in modo più efficace nella scelta per il rinnovo del parco rotabile.

In considerazione del fatto che il rinnovo del parco rotabile non avviene in unica soluzione, si sono forniti i parametri necessari per la valutazione coerente e di fattibilità dell'operazione d'inserimento in flotta di nuovi sistemi di trazione e l'impatto che essi hanno sui costi manutentivi.

Dall'analisi dei dati manutentivi di L.C.C. si è visto che se l'operatore TPL vuole ridurre l'impatto ambientale della sua flotta dovrà inevitabilmente aumentare i costi di manutenzione della stessa e considerando che la sostenibilità ambientale si realizza attraverso sistemi (infrastrutture) considerare anche i costi di manutenzione degli impianti di ricarica/rifornimento.

Il rischio tecnologico legato all'inserimento di e-bus o altri sistemi di trazione a basso impatto ambientale deve essere contenuto dall'applicazione della metodologia LCC. I limiti riscontrati nell'elaborazione dei dati di sostituzione parte principale come da modello di Life cycle cost sono la serietà del costruttore e la consistenza di dati per i nuovi sistemi di trazione.

I costi manutentivi hanno un andamento prevedibile solo sulla base del metodo LCC. Questo permette di valutare per i sistemi di trazione più maturi tecnologicamente di anno in anno il costo chilometrico imputato alla manutenzione di ogni veicolo e di sviluppare assieme al costruttore le nuove tecnologie attraverso feed-back continui dall'esercizio mettendo a riparo l'operatore di TPL da costi inaspettati e non governabili legati alla non maturità del prodotto offerto.

Si vuole riportare che si è riscontrato un costo specifico di manutenzione maggiore per la categoria filobus. Questo è dato dal fatto che la manutenzione per questa tipologia di veicoli ha un elevato grado di specializzazione dal punto di vista della manodopera e i relativi ricambi hanno un costo del tutto differente da quelli impiegati per le tecnologie convenzionali dei mezzi a gasolio.

I costi ambientali chilometrici diminuiscono con l'inserimento in flotta dei nuovi sistemi di trazione. Le emissioni di veicoli filoviari e di veicoli elettrici essendo nulle, non contribuiscono in nessun modo al costo chilometrico ambientale. I veicoli alimentati a metano hanno costi chilometrici paragonabili agli ibridi che, confrontati con quelli dei veicoli a gasolio, sono pari a circa la metà.

La correlazione di quanto illustrato sopra è riportata nella successiva figura 9.149.

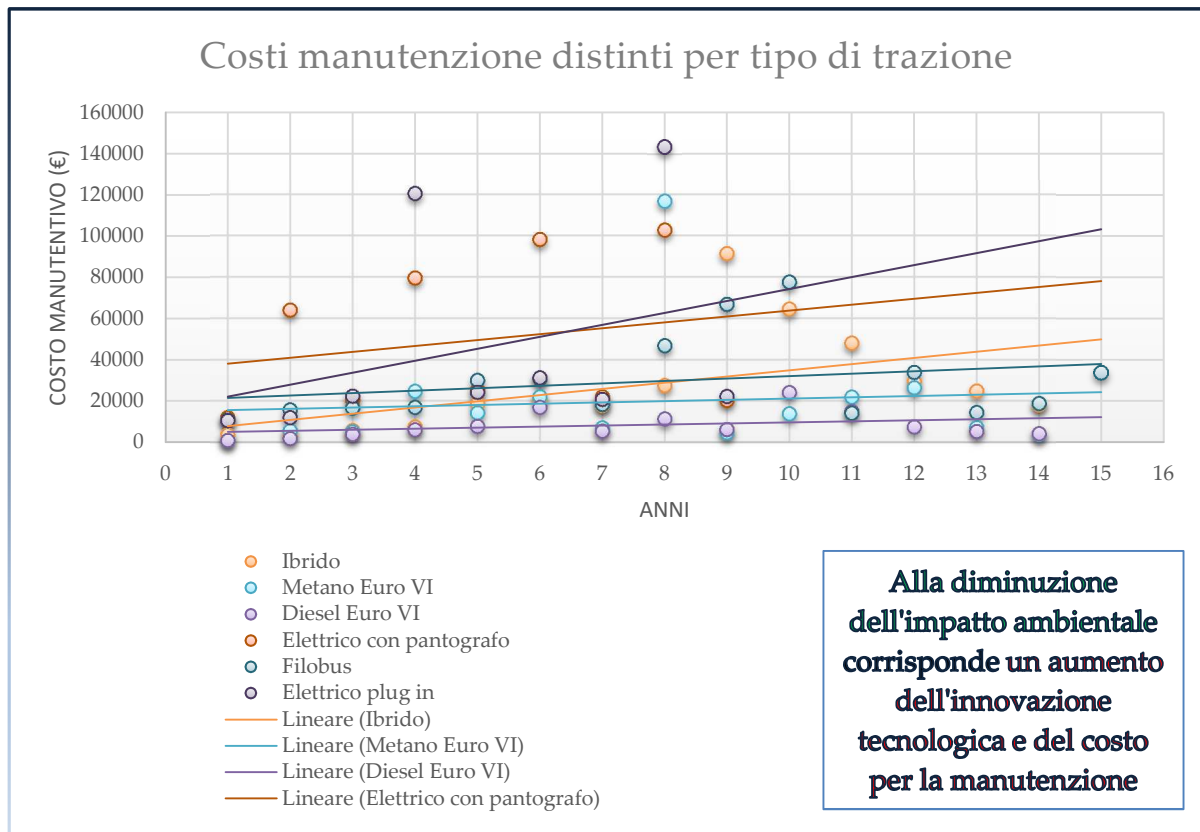
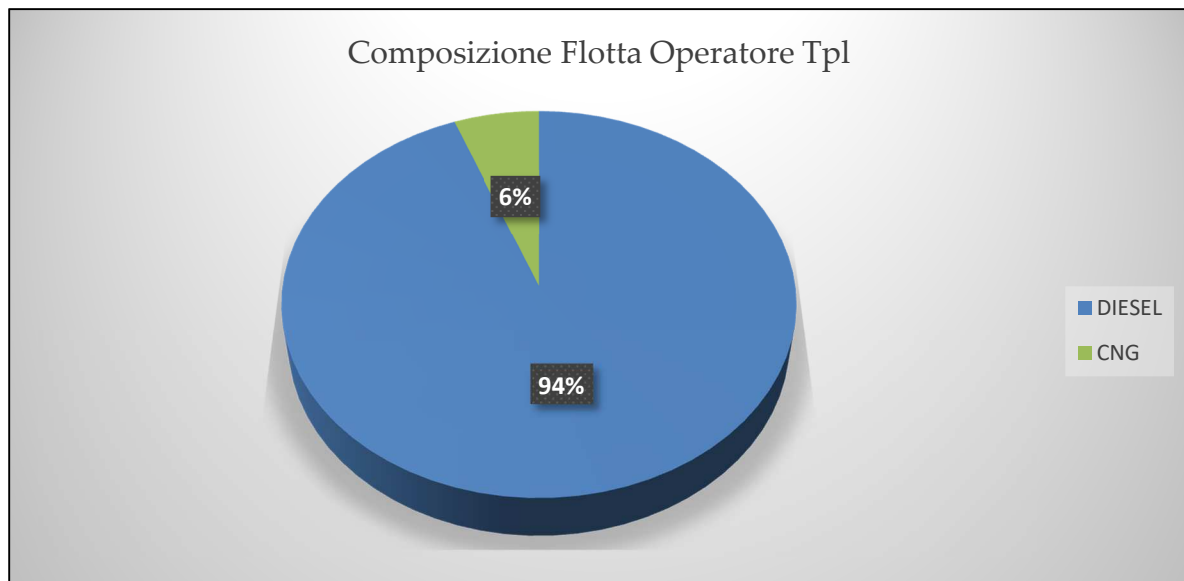


Figura 9.149: Correlazione Innovazione tecnologica/manutenzione/impatto ambientale

## 10.0 Applicazioni

In questo capitolo cercheremo di analizzare le possibili applicazioni in ambito nazionale ed internazionale dei risultati ottenuti durante il dottorato di ricerca.

Alla luce di quanto esaminato nel presente lavoro di ricerca di dottorato industriale, piace effettuare una prima applicazione all'azienda di trasporto per la quale svolgo la mia attività lavorativa. Il suo sviluppo effettivo di lungo periodo al 2030 è stabilito in Europa dalla Direttiva 94/2014 che ha stabilito quali siano i veicoli sostenibili per il TPL. Il cambiamento delle flotte per il TPL non può essere ipotizzato a rampa rettangolare poiché i costi per un gran numero di autobus e i tempi per le infrastrutture necessarie sono significativi. L'attuale flotta della TUA Spa è composta da autobus alimentati a gasolio e da una parte di veicoli alimentati a metano CNG come mostrato nella figura 10.150 che segue:



*Figura 10.150: S<sub>0</sub> - Composizione Flotta iniziale di un operatore TPL*

In considerazione dei dati esaminati nel corso del lavoro, è opportuno per un'azienda che si trova nelle condizioni della TUA Spa, sviluppare un piano d'acquisto di autobus ibridi correlato alla saturazione dell'unico impianto di ricarica gas CNG. L'azienda quindi potrebbe avere importanti ritorni in termini di costi completi di asset (TCO)/ambientali e conoscere con il metodo LCC, di cui è stata verificata l'affidabilità, i costi certi di gestione.

L'analisi dei dati manutentivi e di Life Cycle Cost di autobus a trazione Diesel, CNG, Ibridi, Filobus come verifica dell'evoluzione temporale dei costi. La metodologia L.C.C. è l'unica che consente di tenere sotto controllo i costi manutentivi e di migliorare il prodotto autobus attraverso il coinvolgimento del costruttore nella fase di esercizio. Attraverso la convalida sperimentale dei dati aziendali di sistemi di trazione più maturi, si è evidenziata la necessità, per l'operatore di TPL che deve introdurre sistemi di trasporto sempre più sostenibili, di caratterizzarli sulla base della metodologia LCC.

Si è verificato che sistemi di trazione non maturi tecnologicamente, benché riducano localmente le emissioni di GHG non riescono a raggiungere la necessaria affidabilità per il servizio con costi di manutenzione elevati. Riporto per esempio in figura 10.151 la differenza tra percorrenza dichiarata ed effettiva delle batterie di trazione plug-in per autobus ibridi. Questo risultato fa sì che qualora la Tua Spa decidesse di inserire

in flotta autobus ibridi dovrà farlo assegnandogli un profilo di missione su tratte urbane e coinvolgendo il costruttore sui guasti infantili che si dovessero manifestare contrariamente a quanto stabilito nel contratto di LCC in fase di gara.

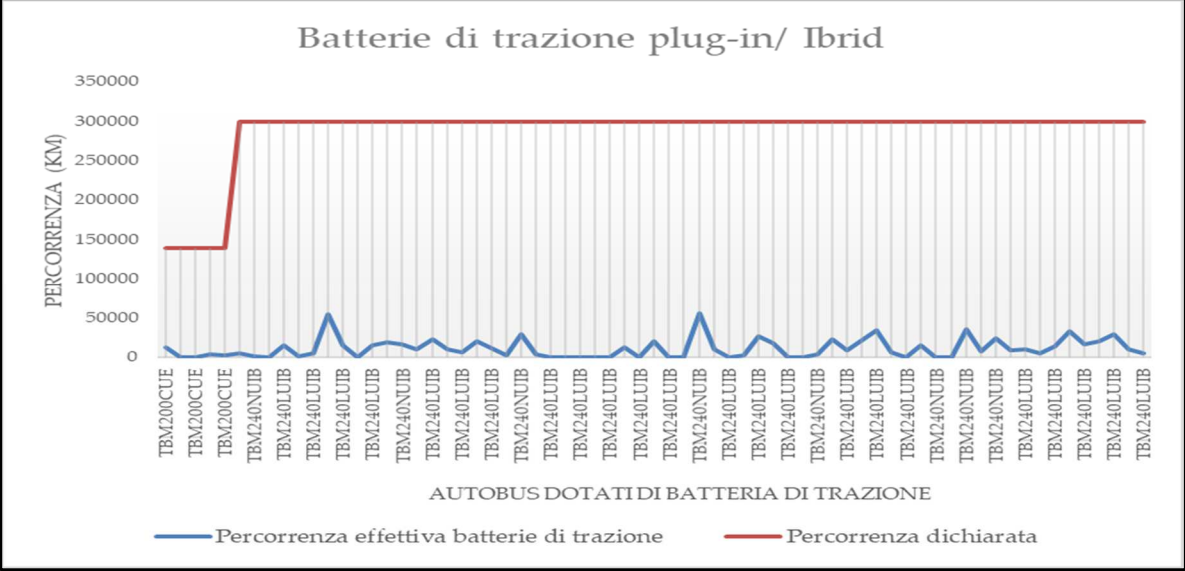


Figura 10.151: Differenza tra percorrenza dichiarata ed effettiva di batterie di trazione plug-in/ Ibrid

La retta di regressione lineare della moltitudine di dati relativi alla sostituzione dei componenti principali di un autobus costituisce l'indicatore del corretto impiego del bus su una determinata linea. Il metodo LCC ci permette di evidenziare ed apportare un'azione correttiva sulla progettazione del componente "non prestante" e di

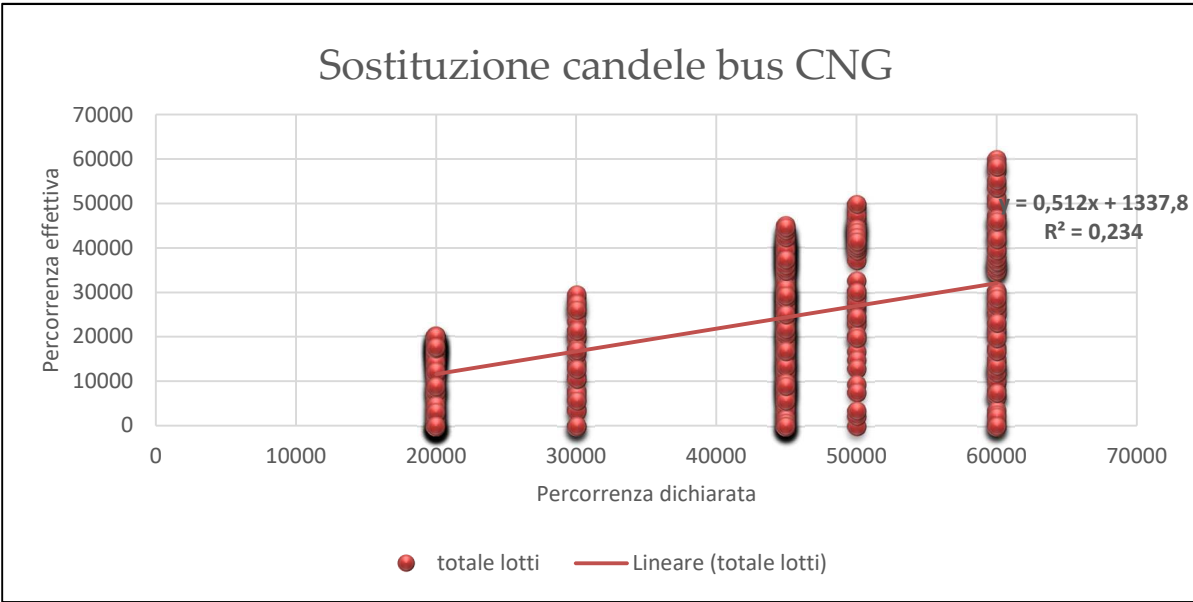


Figura 10.152: Andamento corretto della retta di regressione lineare dei dati percorrenza effettiva

modificarlo unitamente al costruttore dell'autobus. L'andamento corretto è visibile nella figura 10.152 (caso specifico delle candele per autobus con alimentazione CNG). Se dall'analisi dei dati di percorrenza principale dei componenti otteniamo una linea di tendenza decrescente (percorrenza dichiarata dal costruttore non è ancora raggiunta in fase di esercizio), eliminati guasti dovuti a "mortalità infantile" dovremo rivedere le linee assegnate a tale bus in quanto non adatte al sistema di trazione che si sta impiegando.

Pertanto la metodologia LCC rimane l'unica garanzia per l'esercente il TPL al fine di una maturazione del prodotto autobus e di sostenere costi certi qualora si è costretti all'inserimento in flotta di sistemi di trasporto sostenibili.

La strategia di sviluppo della sostenibilità, che persegue la UE già da tempo appare molto chiara e basata su questi pilastri mostrati in figura 10.153:

- trasporto urbano: trazione elettrica/idrogeno;
- trasporto suburbano: trazione CNG, LPG, Idrogeno;
- trasporto extraurbano: trazione biofuel, synthetic fuel, LNG.

Per brevi distanze	Elettricità idrogeno
Per medie distanze	Idrogeno, Metano CNG, LPG
Per lunghe distanze	Biofuel, synthetic fuel, Metano LNG

Figura 10.153: Indicazioni della politica energetica sui trasporti della UE

Pur tenendo conto delle indicazioni di massima della comunità Europea l'analisi dell'andamento dei dati reali di sostituzione delle parti principali di un autobus è identificativo del corretto impiego dello stesso qualora all'aumentare della percorrenza dichiarata dal costruttore corrisponde un aumento della percorrenza reale del componente.

L'applicazione principale di tutto quanto detto sopra consiste per la TUA Spa nel



sostituire la congestionata linea parallela alla strada parco di Pescara oggi servita con autobus con alimentazione Diesel con autobus elettrici con sistema di ricarica in-motion che sfruttano l'infrastruttura esistente per 10 km di linea aeree e proseguono su altre linee sfruttando l'autonomia di carica delle batterie. Si otterrebbe così una significativa riduzione delle emissioni locali (figura 10.154).

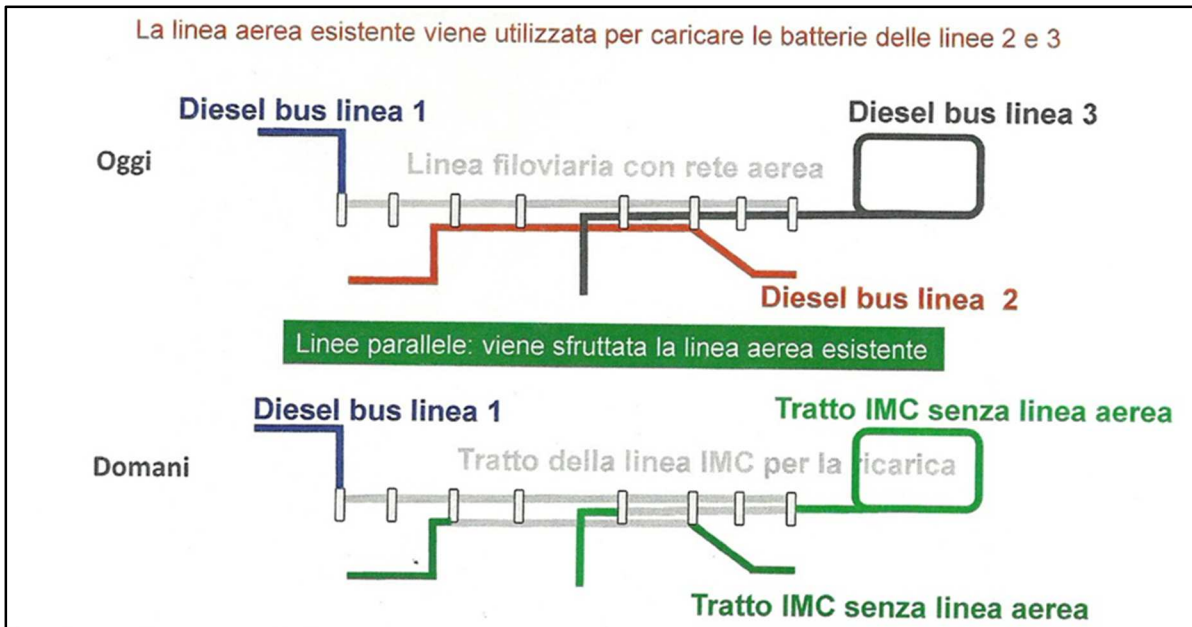


Figura 10.154: Trasformazione di una linea DIESEL in una linea parzialmente IMC

## 11.0 CONCLUSIONI

In questo lavoro di ricerca sono state comparate le diverse tecnologie dei bus in funzione delle caratteristiche operative, emissive (GHG), costi manutentivi e maturità della tecnologia del sistema di trazione. In particolar modo si è effettuato un confronto dei diversi total cost ownership al fine di rendere completa ed esaustiva la ricerca. L'analisi dei dati manutentivi reali e quelli dichiarati dal costruttore hanno permesso di analizzare le percorrenze dei componenti principali del bus e attraverso la costruzione di rette di regressione lineare è stato possibile legare l'andamento delle stesse al corretto impiego del sistema di trazione su determinate linee. Si è analizzata inoltre l'influenza della velocità commerciale e delle pendenze delle linee sui costi di manutenzione.

Le principali conclusioni alle quali si è arrivati rispetto alle principali tecnologie di trazione dei bus sono le seguenti:

■ L'autobus con sistema di trazione diesel è risultato quello con il total cost ownership inferiore.

■ Il Compressed Natural Gas ha raggiunto un buon grado di maturità tecnologica presso i principali produttori di autobus presentando caratteristiche tecniche (alto potere calorifico, ottima resistenza alla detonazione, ecc..) che lo rende particolarmente interessante come combustibile da utilizzare nei motori destinati all'autotrasporto. I problemi di produzione, trasporto, stoccaggio e distribuzione di questo combustibile limitano ancora la sua diffusione (solo parzialmente risolvibili con il Liquefied Natural Gas), che è invece sempre più favorito dai progressi tecnici nella realizzazione dei relativi impianti di alimentazione, ormai in grado di permettere ai motori di fornire prestazioni del tutto simili a quelle ottenute con i combustibili tradizionali. Sono inoltre allo studio tecnologie produttive che svincolino l'approvvigionamento di metano dalle grandi linee di trasporto ad alta pressione, investendo sul biometano (vedi filiera del biometano in appendice 12.2).

Il contributo degli autobus alimentati con CNG nel contenere l'impatto ambientale è sintetizzabile con il fatto che essi riducono sia le emissioni di benzene (tipiche dei veicoli a benzina) sia di particolato (tipiche dei veicoli a gasolio), tanto da potersi definire ad emissione zero di PM e benzene. Nei loro gas di scarico sono inoltre assenti i prodotti di ossidazione dello zolfo e gli I.P.A. (idrocarburi policiclici aromatici), che sono sospetti cancerogeni. È quindi consigliabile continuare il rinnovamento delle flotte di autobus urbani con alimentazione a metano e nel contempo favorire con incentivi le modifiche di autoveicoli privati a benzina, tali da renderli BiFuel. Tuttavia i vantaggi in riferimento alle emissioni si sono leggermente ridotti rispetto al diesel con l'introduzione dell'Euro VI.

■ I full electric buses attualmente stanno diventando commercialmente disponibili. L'autonomia e gli elevati costi delle batterie sono ancora un problema da risolvere. Dove le infrastrutture sono già presenti va valutato un più ampio impiego di questo sistema di trazione. L'elettrico puro è probabilmente il futuro dell'autotrazione, ma molti passi in avanti devono essere compiuti per:

- aumentare la vita utile e la densità energetica d'immagazzinamento delle batterie onde aumentare l'autonomia del veicolo alimentato e ridurre i costi di produzione delle stesse;

- predisporre un'efficiente rete di ricarica dei veicoli elettrici, contemplando anche il forte aumento di richiesta di energia elettrica in risposta all'utilizzo massiccio di veicoli elettrici.

- Produrre l'energia elettrica necessaria ai veicoli elettrici tramite fonte rinnovabile o a basse emissioni (nucleare, impianti tradizionali coal/gas con Carbon Capture and Sequestration).

■ I Fuel Cell Bus ad idrogeno sono attualmente considerati come una possibilità promettente, ma attualmente sono ancora in una fase sperimentale. I costi di acquisto per i prototipi sono molto alti. L'idrogeno potrebbe risultare conveniente solo come "vettore energetico" cioè come mezzo per immagazzinare e trasportare l'energia (prodotta per altra via) nel luogo in cui occorre utilizzarla, mentre lo è molto meno come combustibile vero e proprio: si è sperimentato da qualche tempo l'idrometano (miscela di H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>), come combustibile di transizione ma senza grandi risultati.

■ Sia per i bus elettrici che per quelli fuel cell ad idrogeno sono necessari alti costi di investimento in infrastrutture.

■ Gli autobus ibridi hanno un TCO paragonabile a quello degli autobus diesel con una significativa riduzione delle emissioni.

Per tutte queste tecnologie sono disponibili dei combustibili rinnovabili o vettori energetici di origine BIO. La riduzione dei gas ad effetto serra (GHG) e di altri indicatori di prestazioni in materia di criteri di sostenibilità ambientale sono molto dipendenti dalla sorgente della biomassa e dalla produzione di biocarburante.

I biocombustibili di prima generazione sono molto interessanti come mezzo per diversificare le fonti di approvvigionamento dell'energia, ma rischiano di ridurre l'estensione dei terreni utilizzabili per la produzione agricola, provocando un aumento del prezzo dei generi alimentari: per superare tale grosso limite, si stanno studiando biocombustibili di seconda generazione, provenienti da colture erbacee e

lignee (con alte percentuali di cellulosa e lignina). Inoltre, pur avendo emissioni di inquinanti molto inferiori alle benzine/gasoli tradizionali, sussistono forti dubbi sulle emissioni di composti aldeidici che hanno effetti mutagenici a livello di DNA. Le tecnologie sono anche valutate rispetto alla loro capacità di contribuire agli obiettivi europei per il 2030-2050 in materia di riduzione delle emissioni e alla domanda di energia rinnovabile dei vettori. Gli obiettivi UE sono stati ampiamente riportati nel capitolo 2, in questa sede ricordiamo che per il 2050 c'è l'obiettivo di riduzione del 60% delle emissioni di gas serra nel settore dei trasporti. Questi obiettivi si possono raggiungere attraverso:

- L'introduzione di bus ibridi diesel/electric o a CNG in grado di ridurre le emissioni di gas serra di circa il 20%.
- Per gli autobus diesel le miscele di prima o seconda generazione il biodiesel possono essere utilizzate per aumentare le quote di fonti energetiche rinnovabili.
- Per motori CNG, il biogas può essere utilizzato per aumentare la quota di combustibile da fonte rinnovabile (fino al 100%).

I Full Electric buses ed eventualmente anche i bus ad idrogeno mostrano il maggior potenziale nel contribuire ad obiettivi a lungo termine grazie alla loro elevata efficienza energetica in combinazione con la possibilità di utilizzare l'energia solare o eolica. È importante iniziare a costruire esperienze in esercizio di queste tecnologie al fine di consentirne un pieno sviluppo attraverso il metodo dell'LCC.

Oltre alle conclusioni relative al confronto delle diverse Bus option si evidenziano i principali risultati ottenuti dall'analisi dei valori di TCO in letteratura e da dati reali in aziende di TPL:

- L'estensione o la riduzione della durata del periodo di LCC rispetto ai 10 anni standard ha un effetto simmetrico sul TCO per i sistemi di trazione a combustione interna tradizionali, mentre ha un effetto più pronunciato sugli e-bus. Estendendo la durata del periodo di LCC si allarga ulteriormente la forbice tra TCO autobus elettrici e diesel/CNG convenzionali.
- Il TCO dell'e-bus si può abbassare ricorrendo a terzi che offrono il servizio di

ricarica consentendo all'operatore di TPL di escludere il costo sostanziale della costruzione delle infrastrutture.

■ Secondo gli obiettivi della UE nel 2030 il 37.5% degli autobus a gara dovranno essere a zero emissioni. La Carbon Intensity of EU grid (275.9 gCO<sub>2</sub>/kWh) contribuisce notevolmente al valore del TCO degli autobus elettrici. Soltanto dopo il definitivo superamento della generazione di energia elettrica da carbone nel 2025 si potrà avere un'effettiva riduzione dei GHG legata all'utilizzo della trazione elettrica.

Infine si riportano le conclusioni alle quali si è arrivati dall'analisi dei dati di manutenzione di aziende di TPL come mostrato per completezza in appendice 12.5.

■ Complessivamente i costi dovuti ai ricambi pesano sui costi totali per un valore pari al 72% (ossia, un peso significativo e preponderante rispetto ai costi per la manodopera). In valori percentuali, considerando gli [€/km], si è trovata conferma nel trovare lo stesso risultato; infatti i costi (RIC) pesano sui costi totali per il 69,7%;

■ Dall'analisi sugli andamenti di ognuna delle flotte studiate, rispetto alle tre voci di costo [€/km] di manodopera, ricambi e totale, è stato possibile osservare come l'andamento nel tempo dei costi (MDO) sia sempre inferiore rispetto a quello per i costi (RIC) e conseguentemente, per i costi totali. Tale rappresentazione resta quindi coerente con quanto ottenuto dall'analisi di incidenza dei costi (RIC) sui costi totali [€/km];

■ È possibile trarre le stesse conclusioni del punto precedente, se si osservano gli andamenti degli autobus alimentati a gasolio e di quelli alimentati a metano. L'andamento dei costi [€/km] dei ricambi per tutte le flotte a gasolio o a metano è, infatti, praticamente coincidente con quello dei costi totali [€/km], fatto che conferma la maggiore incidenza che i costi (RIC) rappresentano sui costi totali rispetto a quelli della manodopera (che hanno un andamento di gran lunga inferiore);

■ Indipendentemente dal sistema di trazione a batteria, diesel, CNG, filobus o ibridi emerge che i costi di manutenzione sono più elevati nel caso di servizi con velocità commerciale più bassa.

■ Dal confronto fra i costi dei diversi sistemi di trazione a metano e a gasolio, è

possibile concludere che l'andamento dei costi manutentivi [€/km] calcolato per tutte le flotte alimentate a gasolio, è significativamente inferiore a quello calcolato per quelle alimentate a metano (possibile causa dovuta al tipo di manutenzione richiesta da queste ultime). Ciò non mette comunque in discussione la valutazione economica del progetto metano, resa comunque vantaggiosa sia in virtù del progetto di sostenibilità ambientale sia in quanto ideale nel poter sfruttare i benefici riconoscibili nell'implementazione di economie di scala. Realizzato l'impianto a metano, infatti, ogni veicolo inserito sino a saturazione della stazione di ricarica, abbassa il costo medio per autobus del costo impiantistico e rende nei fatti economica questa alimentazione proprio per le grandi flotte pubbliche.

- Ad una diminuzione dell'impatto ambientale corrisponde un aumento dei costi manutentivi e dell'innovazione tecnologica. La trazione diesel risulta essere una trazione matura come quella CNG. In fase di sviluppo quella LNG. La tecnologia ibrida risulta essere ancora una tecnologia innovativa in fase di sviluppo con basso impatto ambientale.

- I costi manutentivi hanno un andamento prevedibile solo sulla base del metodo del L.C.C.

- Linee con significative variazioni di pendenza aumentano i costi manutentivi ed i relativi costi di TCO poiché vengono sollecitati il sistema frenante, lo sterzo e tutta la catena cinematica in generale.

- La regressione lineare dei dati LCC e i relativi grafici che riportano i rapporti tra le due percorrenze: avendo in ordinata i km dichiarati e in ascissa i km medi effettivi ci ha consentito di capire l'andamento delle sostituzioni delle parti principali in funzione dei chilometri percorsi. All'aumentare del chilometraggio dichiarato corrisponde un aumento anche del chilometraggio effettivo prima di arrivare a sostituzione o viceversa.

- Dalle analisi dei dati sopra e sintetizzati nella seguente figura n°11.155 per quanto riguarda ad esempio la pompa acqua del motore, possiamo concludere che la linea di tendenza ha un andamento crescente per i componenti di bus tecnologicamente

maturi mentre per i componenti di autobus con tecnologie innovative si nota una linea di tendenza decrescente che sta a significare che la percorrenza dichiarata dal costruttore non è ancora raggiunta in fase di esercizio. Pertanto la metodologia LCC

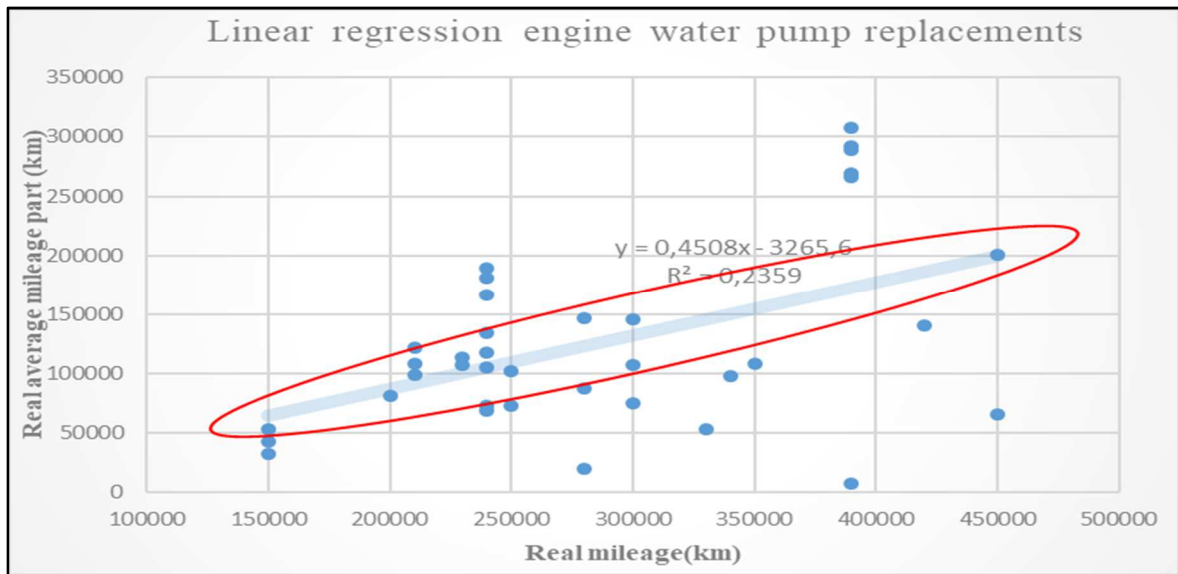


Figura 11.155: Andamento corretto della retta di regressione lineare

rimane l'unica garanzia per l'esercente il TPL al fine di una maturazione del prodotto autobus e sostenere costi certi qualora si è costretti all'inserimento in flotta di sistemi di trasporto sostenibili.

In figura 11.156 invece, si riportano i risultati dell'analisi dei dati del complessivo cambio. Il risultato raggiunto ci permette di concludere che la retta di regressione corretta è quella evidenziata in rosso, dimostrando un corretto utilizzo del componente e di conseguenza dell'autobus. In sostanza l'andamento della retta di

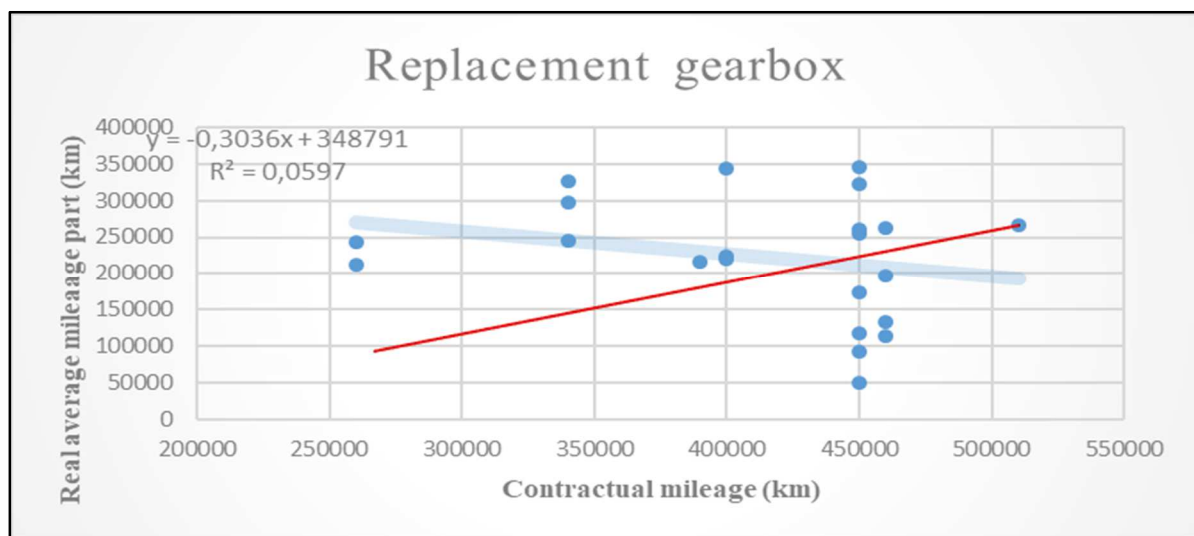


Figura 11.156: In rosso linea che mostra corretto impiego dell'autobus sulla linea

regressione dei dati reali di percorrenza ci permettono di ottimizzare l'impiego dell'autobus con determinate caratteristiche tecniche su linee di esercizio.

■ I risultati dell'analisi numerica dei dati LCC di flotte di autobus sottoposti a vincolo LCC dimostrano di essere sempre più spare parts intensive. Come mostrato nei grafici sopra la sostituzione dei componenti per i sistemi di trazione più maturi avviene tendenzialmente vicina a quella dichiarata dal costruttore. I componenti degli autobus più innovativi tecnologicamente per consentire di pari passo una riduzione del loro impatto ambientale dimostrano invece di essere lontani dalla percorrenza "pensata" in fase di progetto e che risulterà essere determinante in fase di esercizio con i conseguenti costi per l'operatore di TPL. In figura 11.157 si riportano le differenti soluzioni tecnologiche più adatte alle diverse linee come risultato delle analisi eseguite in precedenza.

Il rischio tecnologico legato all'inserimento di sistemi di trazione a basso impatto ambientale deve essere contenuto dall'applicazione della metodologia LCC al fine di standardizzare i costi e permettere al costruttore di far maturare tecnologicamente il prodotto.




Different Solutions Needed for Different Mission Profiles Composition of the fleet at S0, Well to wheel, TCO		
	Hybrids & Electrification	Urban Lines
	CNG	Suburban Lines
	LNG	Extra-urban Lines

Figura 11.157: No "Silver bullets"

■ Sulla base delle considerazioni riportate in questo lavoro di ricerca si evidenzia l'importanza che ogni azienda deve rivolgere alla fase di transizione dal sistema S0 al sistema S1 attraverso i parametri ampiamente discussi nel capitolo 3.



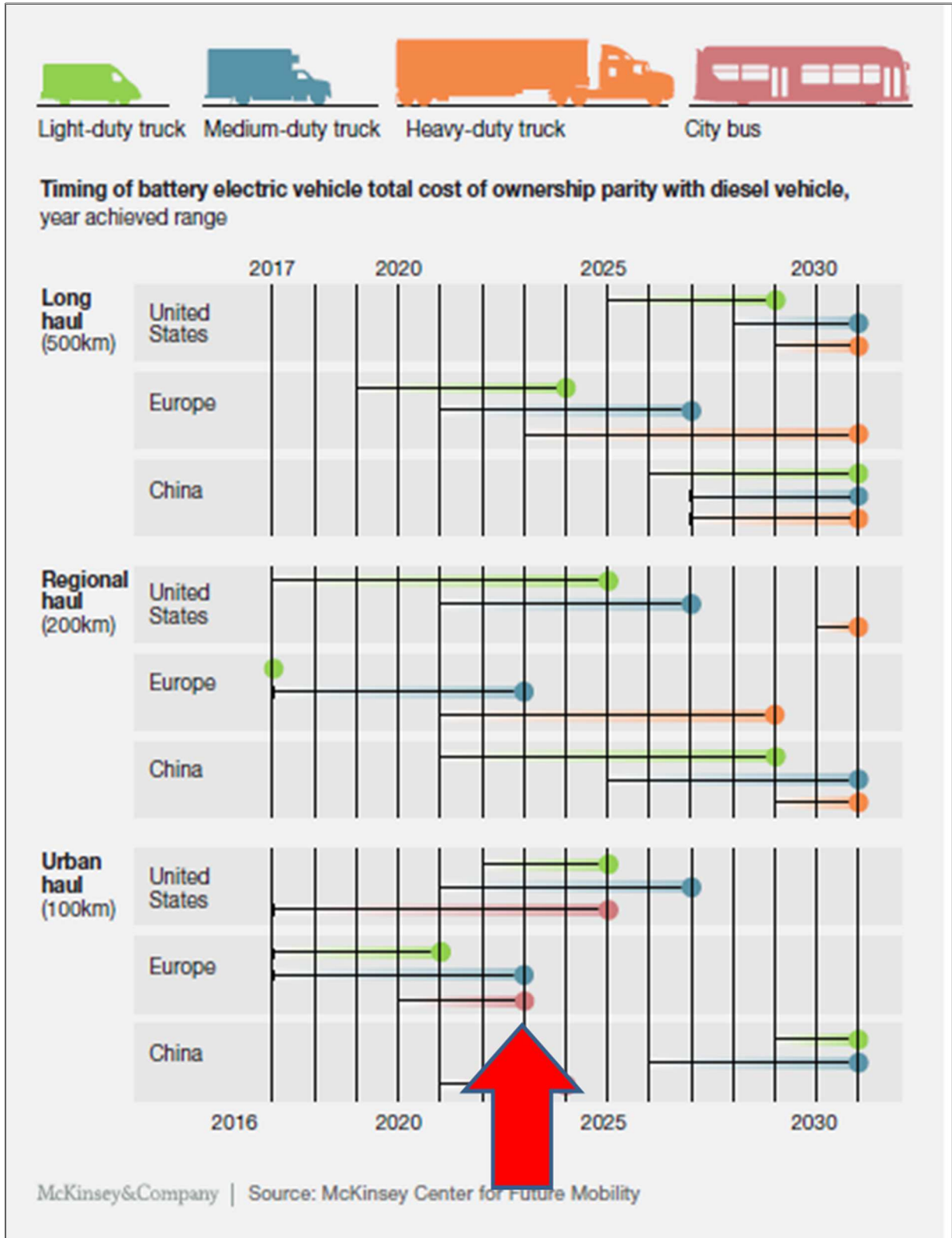
- Pur dimostrando significativi miglioramenti sulle emissioni, gli autobus diesel Euro VI e CNG non sono conformi alla politica di lungo termine di riduzione del numero di veicoli che utilizzano combustibili fossili e potrebbero affrontare costi operativi più elevati dovuti all'aumento dei prezzi del carburante;
- I bus CNG, i bus ibridi diesel/elettrico, nonché bus alimentati a bioetanolo e ad idrogeno hanno maggiori problemi di sicurezza;
- HVO (Hydrogenated Vegetable Oil), bioetanolo e idrogeno rappresentano vettori energetici alternativi per gli autobus, ma che attualmente hanno una limitata produzione in Europa;
- Gli e-bus sono oggi considerati la tecnologia più pulita, ma rimangono molto costosi e richiedono investimenti elevati sull'infrastruttura di ricarica.

A conclusione del lavoro di ricerca svolto si riporta in appendice 12.6 l'esperienza del Busworld 2019 di Bruxelles che mi ha confermato le tendenze descritte in questo lavoro di ricerca e che ha consentito di scoprire ed allargare le mie conoscenze.

Si riscontra che gran parte dell'offerta globale di mobilità è orientata sulla trazione elettrica. Molti costruttori oltre a progettare gli autobus elettrici offrono assistenza nel dimensionamento, progettazione e fornitura dell'intero sistema di ricarica. Coerentemente con questo lavoro di ricerca sarà molto importante per l'operatore di TPL definire i requisiti energetici sulla base della diversa configurazione delle linee da elettrificare (lunghezza, distanza tra le fermate, profilo, condizioni climatiche) e del servizio operativo da fornire (chilometraggio giornaliero, comfort climatico, tempo ai capolinea). Sulla base dei risultati raggiunti in questo lavoro è necessario sviluppare modelli di simulazione energetica che consentano di definire agli operatori la tecnologia di batterie, la strategia di ricarica e l'ubicazione dei punti di ricarica ottimali per un funzionamento in massima efficienza.

## 12.0 Appendice

12.1 Appendice: Different application and Weight classes will see varying breakeven points for electric vehicle TCO





### 12.3 Appendice: Comparison of BUS technologies on a set of indicators

Bus technology/ energy source	Fossil fuel			Biofuel			Electricity			Hydrogen	Hybrid
	Euro V diesel	Euro VI diesel	CNG	FAME B100	HVO B100	Bioethanol	Opportunitiy	Overnight charging	Trolley bus	Hybrid hydrogen/ electric	Serial Hybrid electricity/ diesel
<b>Fuel availability</b>											
Renewable fuel or not	Non renewable	Non renewable	Non renewable	Depends on feedstock used	Depends on feedstock used	Renewable	Renewable	Renewable	Renewable	Depends on hydrogen production	Combination
Current fuel/ energy source availability	High, decreasing in the long term	High, decreasing in the long term	High, decreasing in the long term	Rather high	1% of total diesel demand	Very limited	High	High	High	Limited	High
Possibility of bus technology to adapt to another fuel/energy carrier	Yes, for biofuels use	Yes, for biofuels use	Yes Biogas (upgraded to natural gas quality) is possible	Yes, to diesel	Yes, to diesel	No	Possible for the usage of fossil or sun, wind based electricity	No	No	Possible for the usage of fossil or bio, sun, wind based hydrogen	Yes to fully electric
Powertrain configuration	Conventional diesel combustion engine	Conventional diesel combustion engine	Conventional CNG combustion engine	Biofuel adapted conventional diesel combustion engine	Biofuel adapted conventional diesel combustion engine	Conventional engine adapted for the ethanol usage	Purely electric motor with medium battery capacity	Purely electric motor with high battery capacity	Electric powered bus with overhead line or ground contact	Serial hybrid configuration of fuel cell system and electric drive	Serial hybrid configuration of dominating electric system
<b>Operational performance</b>											
Range, km	600-900	600-900	350-400	570-850	570-850	400-600	<100	100-200	Limited by electric supply network	200-400	600-900
Zero emission range, km	No	No	No	No	No	No	<50	150	>300	>300	No
Route flexibility	High	High	High	High	High	High	Limited	High	Limited	High	High
Refueling/ recharging needs	Every 2 <sup>nd</sup> day, 5-10 min	Every 2 <sup>nd</sup> day, 5-10 min	Every 2 <sup>nd</sup> day, 5-10 min	Every 2 <sup>nd</sup> day, 5-10 min	Every 2 <sup>nd</sup> day, 5-10 min	Each 1 – 2 days, 5 – 10 min	Multiple time a day	Every day, 3-8 hours	No	Every day, 5 - 10 min	Every 2 <sup>nd</sup> day, 5 -10 min
Energy consumption, kWh/km	4,13	4,13	5,21	4,13	4,13	4,13	1,8	1,91	1,8	3,2	3,34
<b>Infrastructure</b>											
Need in additional infrastructure	No	No	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
EU coverage with fuelling infrastructure	High	High	Low	High	High	Low	Limited	Limited	Limited	Very limited	High

Bus technology/ energy source	Fossil fuel			Biofuel			Electricity			Hydrogen	Hybrid
	Euro V diesel	Euro VI diesel	CNG	FAME B100	HVO B100	Bioethanol	Opportunity	Overnight charging	Trolley bus	Hybrid hydrogen/ electric	Serial Hybrid electricity/ diesel
<b>Emissions</b>											
CO <sub>2</sub> eq, g/km	1000	834	1000	≥ 500	≥ 500	400-600	0 - 500	0 - 500	0 - 500	1500*	700 - 1000
NO <sub>x</sub> , g/km	3,51	1,1	1.4-4.5	4,39	3,16	3,51	0	0	0	0	3,51
PM <sub>10</sub> , g/km	0,10	0,03	0.005-0.03	0,04	0,08	0,10	0	0	0	0	0,10
Noise standing, dB	80	80	78	80	80	80	n/a	n/a	62	63	69
Noise passing by, dB	77	77	78	77	77	77	n/a	n/a	72	69	73
<b>Economy</b>											
Indication purchase price, 1000euro	+/- 220	+/- 220	+/- 250	+/-220	+/-220	+/-250	+/-400	350-500	+/-300	800	270
TCO 2012, euro/ km	2,1	2,1	2,1	2,22	2,35	2,52	3,2	5,5	3,1	4,6	2,4
TCO 2030, euro/ km	2,5	2,5	2,6	n/a	n/a	n/a	2,9	3,8	3,4	2,72	2,7
Additional infrastructure investment, 1000 euro	No	No	500-1000 per fuelling station	+/-50	+/-50	+/-200 per fuelling station	+/-10 per bus per station	+/-100 per bus per station	1000 euro/ km	100 per bus per station	No
<b>Other considerations</b>											
Main advantages	Efficiency, maintenance and exploitation costs are predicatble, as well as residual (or second-market value)	Efficiency, maintenance and exploitation costs are predicatble, as well as residual (or second-market value)	Offers energy diversity	Provide good improvements in emissions with relatively low additional investments	Provide good improvements in emissions with relatively low additional investments	Offers energy diversity	Offers energy diversity, one of the cleanest available technology	Offers energy diversity, one of the cleanest available technology	Offers energy diversity, one of the cleanest available technology	Renewable energy source with probable good opportunities for production	Reduced emissions
Main disadvantages	Upcoming shortage of fossil fuels and EU regulations on clean vehicles in the cities in 2050	Upcoming shortage of fossil fuels and EU regulations on clean vehicles in the cities in 2050	Safety concerns (additional costs possible to fulfill safety requirement) Upcoming shortage of fossil fuels	Special type approval for Euro VI. Then still increasing maintenance costs. More expensive than diesel	Special type approval for Euro VI (not needed for HVO30). Much more expensive than diesel	Only one HD engine supplier (Scania) Safety concerns (additional costs possible to fulfill safety requirement)	High purchase price and investments in infrastructure ; no yet information on second- market value and long-term usage constraints	High purchase price and investments in infrastructure ; no yet information on second- market value and long-term usage constraints	Currently very expensive	Safety concerns	Might have safety implications due to high voltage system



12.4 Appendice: Confronto sistemi di trazione Autobus

	Diesel EEV	CNG EEV	Elettrico a batt.	Ibrido Dies/EI	Ibrido CNG/EI	FC ad idrogeno
<b>Azienda di trasporti</b>	Idonea? <b>SÌ</b>	<b>SÌ</b>	<b>NO</b>	<b>MEDIAMENTE</b>	<b>MEDIAMENTE</b>	<b>NO</b>
Motivazioni	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acquisto economico</li> <li>- Nessuna installaz. di nuovi impianti</li> <li>- TCO complessivo favorevole</li> <li>- Manutenzione e tecnol. propulsiva consolidate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acquisto <math>\sim +20\%</math></li> <li>- Costo CNG <math>-30\div 35\%</math></li> <li>- compensa eventuale spesa per impianti</li> <li>- TCO complessivo favorevole: <math>-5\div 10\%</math></li> <li>- Manutenzione e tecnol. propulsiva consolidate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acquisto <math>\sim +130\%</math></li> <li>- <b>Infrastr. di ricarica</b></li> <li>- <b>Ricambio batterie</b></li> <li>- "Carburante" <math>-35\div 45\%</math> e manut. <math>-35\div 40\%</math></li> <li>- TCO complessivo sfavorevole <math>\sim +30\%</math></li> <li>- Sviluppo batterie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acquisto <math>\sim +45\%</math></li> <li>- Alti costi di sostit. Batterie e manut.</li> <li>- Nessuna installaz. di nuovi impianti</li> <li>- Consumi ridotti <math>-15\div 35\%</math></li> <li>- TCO complessivo mediocre <math>+5\div 10\%</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acquisto <math>\sim +65\%</math></li> <li>- Alti costi di sostit. Batterie e manut.</li> <li>- Eventuale install. di nuovi impianti</li> <li>- Costo della marcia ridotto: <math>-30\div 50\%</math></li> <li>- TCO complessivo medio <math>+0\div 5\%</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acquisto <math>\sim +400\%</math></li> <li>- Ricambio batterie</li> <li>- Eventuale install. di nuovi impianti</li> <li>- H<sub>2</sub> molto costoso: <math>+600\div 900\%</math></li> <li>- TCO complessivo molto alto: <math>\sim +325\%</math></li> <li>- Tecnologia 'nuova'</li> </ul>
<b>Ambientale</b>	Idonea? <b>NO</b>	<b>MEDIAMENTE</b>	<b>SÌ</b>	<b>MEDIAMENTE</b>	<b>MEDIAMENTE</b>	<b>MEDIAMENTE</b>
Motivazioni	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevate emissioni di inquin. e CO<sub>2</sub> TTW</li> <li>- Elevati costi esterni</li> <li>- Elevati consumi energetici WTW</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emiss. CO<sub>2</sub> <math>+5\div 10\%</math> e consumi energ. WTW <math>\sim +30\%</math></li> <li>- Ma emissioni di inquinanti <math>-40\div 50\%</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissioni TTW = 0</li> <li>- Emissioni WTW= 0 se elettr. da rinnov.</li> <li>- Consumi energ. TTW <math>-45\div 60\%</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissioni di CO<sub>2</sub> <math>-15\div 35\%</math> e inquin. <math>-20\div 40\%</math></li> <li>- Consumi energ. WTW <math>-15\div 35\%</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissioni di CO<sub>2</sub> <math>-10\div 30\%</math> e inquin. <math>-50\div 65\%</math></li> <li>- Consumi energ. WTW simili</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissioni TTW = 0</li> <li>- Emissioni WTW= 0 se H<sub>2</sub> da rinnov.</li> <li>- Consumi energ. WTW <math>\sim +40\%</math></li> </ul>
<b>Migrazione dal petrolio</b>	Idonea? <b>NO</b>	<b>SÌ</b>	<b>SÌ</b>	<b>NO</b>	<b>SÌ</b>	<b>SÌ</b>
Motivaz.	Del tutto dipendente dal petrolio	Totalmente indipend. dal petrolio	Elettricità può essere prodotta indipend. dal petrolio	Del tutto dipend. dal petrolio	Del tutto indipend. dal petrolio	H <sub>2</sub> può essere prodotto indipend. dal petrolio
<b>Lungo termine</b>	Idonea? <b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>SÌ</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>SÌ</b>
Motivazioni	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dipendente da combustibili fossili</li> <li>- Nuove norme della Commiss. Europea sulle emiss. di CO<sub>2</sub> al 2050</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dipendente da combustibili fossili</li> <li>- Nuove norme della Commiss. Europea sulle emiss. di CO<sub>2</sub> al 2050</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Può essere indep. dai comb. fossili</li> <li>- <math>\eta</math> motore elettrico</li> <li>- Ok per norme della Commiss. Europea sulle emiss. di CO<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dipendente da combustibili fossili</li> <li>- Norme della C. E. sulle emiss. di CO<sub>2</sub> rispettate solo per alti liv. di ibridaz.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dipendente da combustibili fossili</li> <li>- Norme della C. E. sulle emiss. di CO<sub>2</sub> rispettate solo per alti liv. di ibridaz.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Può essere indep. dai comb. fossili</li> <li>- <math>\eta</math> fuel cell buono</li> <li>- Ok per norme della C. E. sulle emissioni di CO<sub>2</sub></li> </ul>

12.5 Appendice: Costi LCC delle flotte analizzate (parte del database)

FILOBUS-ALIMENTAZIONE DA RETE

Tipo Flotta	Oggetto	ANNI															COSTO TOT
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
Flotta 14	** MANUTENZIONE programmata (MDO)	3880,39	4706,39	4763,09	4446,92	5524,34	4365,14	3857,05	7100,04	4365,14	5306,17	4204,14	5224,04	4018,05	4204,14	5685,34	<b>71650,38</b>
	** MANUTENZIONE programmata (MAT)	4034,34	5853,65	5795,30	5375,90	7605,74	5653,21	4199,95	7691,69	5653,21	7477,14	4890,66	6409,14	4962,50	4890,66	8368,29	<b>88861,38</b>
Flotta 14	*Sostituzione parti principali (MDO)	0,00	61,60	246,05	175,00	404,25	664,30	122,50	1085,82	846,47	1893,15	167,30	807,80	142,10	77,00	698,60	<b>7391,94</b>
	*Sostituzione parti principali (MAT)	0,00	1650,72	2630,55	2889,88	9434,56	11389,10	6431,27	24046,80	44462,00	35463,00	1448,77	13506,90	2280,25	5331,53	11159,78	<b>172125,11</b>
Flotta 14	Manutenzione correttiva (MDO + MAT)	3023,26	3515,13	3217,94	4006,39	6997,50	8739,68	3770,79	6846,98	11520,40	27358,60	3514,52	7989,21	3023,26	4262,66	8049,96	<b>105836,28</b>
<b>TOTALE PARTE TECNICA</b>		<b>10937,99</b>	<b>15787,49</b>	<b>16652,93</b>	<b>16894,09</b>	<b>29966,39</b>	<b>30811,43</b>	<b>18381,56</b>	<b>46771,33</b>	<b>66847,22</b>	<b>77498,06</b>	<b>14225,39</b>	<b>33937,09</b>	<b>14426,16</b>	<b>18765,99</b>	<b>33961,97</b>	<b>445865,09</b>

TOT MDO	5122	6429	5529	4480	8686	5712	7699	4871	6532	4660	4781	6884	79542
TOT RIC	8766	17540	17542	11131	32238	50615	43440	6839	20416	7743	10722	20028	261486

MO = Mano d'opera (costo orario pari a 35 Euro/Ora) MAT = Materiali

\*\* Costo riferito all'esecuzione del piano di manutenzione periodica del fornitore, allegato all'offerta

\* Costo riferito alla percorrenza dichiarata dal fornitore per i complessivi riportati nella lista parti principali

PLUG IN-ELETTRICO

Tipo Flotta	Oggetto	ANNI									COSTO TOT	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
		2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027		
Flotta 16	** MANUTENZIONE programmata (MDO)	2365,42	2365,42	2365,42	2365,42	2610,42	2365,42	2365,42	2365,42	2365,42	2365,42	21533,78
	** MANUTENZIONE programmata (MAT)	1346,00	1346,00	1346,00	1346,00	1443,50	1346,00	1346,00	1346,00	1346,00	1346,00	12211,50
Flotta 16	*Sostituzione parti principali (MDO)	1190,00	1260,00	2401,00	5320,00	1820,00	2978,50	1487,50	6135,50	2296,00		24888,50
	*Sostituzione parti principali (MAT)	3500,00	4706,00	13990,00	108626,00	15720,00	21922,00	12500,00	130476,00	13040,00		324480,00
Flotta 16	Manutenzione correttiva (MDO + MAT)	2250,00	2250,00	2250,00	2700,00	2700,00	2700,00	3150,00	3150,00	3150,00		24300,00
<b>TOTALE PARTE TECNICA</b>		10651	11927	22352	120357	24294	31312	20849	143473	22197		<b>407413,78</b>

TOT MDO	8185	4930	5844	4353	9001	5161	46922
TOT RIC	110472	17664	23768	14346	132322	14886	337192

MO = Mano d'opera (costo orario pari a 35 Euro/Ora)

MAT = Materiali

\*\* Costo riferito all'esecuzione del piano di manutenzione periodica del fornitore, allegato all'offerta

\* Costo riferito alla percorrenza dichiarata dal fornitore per i complessivi riportati nella lista parti principali



12.5 Appendice: Costi LCC delle flotte analizzate (parte del database)

id_contratto	descrizione_parte_principale	percorrenza_parte_principale	percorrenza_parte_principale_contrattuale
TBM200CUE	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	13370	60000
TBM240LSM1	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	110414	240000
TBM240LUM1	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	103100	180000
TBM240LUM2	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	197485	240000
TBM240LUM2	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	195000	240000
TBM240LUM2	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	49750	240000
TBM240LUM2	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	225080	240000
TBM240LUM2	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	234715	240000
TBM240LUM3	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	204400	240000
TBM240LUM3	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	220885	240000
TBM240LUM3	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	226600	240000
TBM240LUM3	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	224020	240000
TBM240LUM3	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	205500	240000
TBM240LUM4	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	190030	240000
TBM240LUM4	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	200175	240000
TBM240LUM4	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	162000	240000
TBM240LUM4	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	169000	240000
TBM240LUM4	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	9860	240000
TBM240LUM4	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	180000	240000
TBM240NUIB	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	140745	180000
TBM340SNUM	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	121520	180000
TBM340SNUM	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	109480	180000
TBM340SNUM	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	159600	180000
TBM340SNUM	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	135655	180000
TBM340SNUM	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	94000	180000
TBM340SNUM	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	118440	180000
TBM240LUM1	SOSTITUZIONE DISCHI FRENI 1° ASSE -	224881	240000

id_contratto	descrizione_parte_principale	percorrenza_parte_principale	percorrenza_parte_principale_contrattuale
TMBO530GM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	104531	130000
TMBO530GM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	47975	130000
TMBO530GM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	75085	130000
TMBO530NM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	77575	130000
TMBO530GM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	47975	130000
TMBO530NM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	45010	130000
TMBO530NM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	74135	130000
TMBO530GM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	62300	130000
TMBO530GM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	113080	130000
TMBO530NM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	25955	130000
TMBO530GM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	114625	130000
TMBO530GM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	106990	130000
TMBO530GM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	11360	130000
TMBO530NM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	28325	130000
TMBO530GM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	118950	130000
TMBO530GM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	80135	130000
TMBO530GM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	75700	130000
TMBO530GM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	58952	130000
TMBO530NM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	79250	130000
TMBO530NM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	114200	130000
TMBO530NM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	37600	130000
TMBO530NM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	41650	130000
TMBO530NM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	75070	130000
TMBO530GM1	SOSTITUZIONE BOBINE A.T. MOTORE	73292	130000

12.6 Appendice: Busworld experience – Bruxelles, October 2019

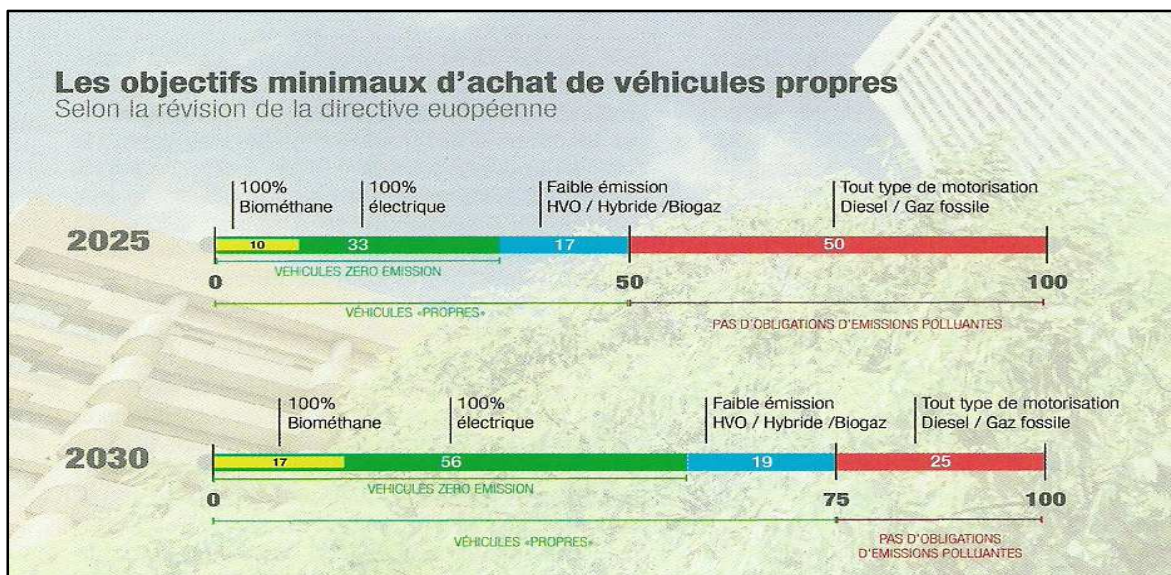


Figura 12.159: Decarbonizzazione del settore trasporti sulla base della proposta di direttiva EU del 11.02.2019

**+20 ANNI**

**CICLO DI VITA PROLUNGATO**

Aptsis è stato progettato per una vita operativa di oltre 20 anni, grazie alla sua solida architettura. Un rinnovamento a metà della vita utile del mezzo, per l'adeguamento delle apparecchiature obsolete, è possibile grazie alla facile accessibilità data dal posizionamento sul tetto, senza rigide limitazioni di spazio.

Figura 12.158: Total Cost Ownership di alcuni bus elettrici con durata spinta ai 20 anni

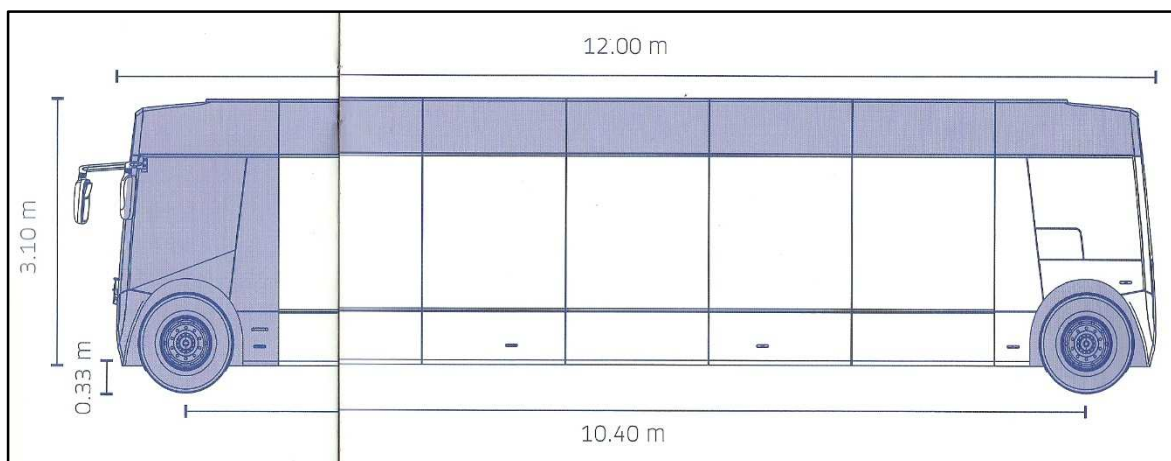


Figura 12.160: Architettura innovativa di un autobus elettrico





Figura 12.162: Elementi costruttivi per la riduzione del TCO (competizione in atto tra costruttori di autobus)

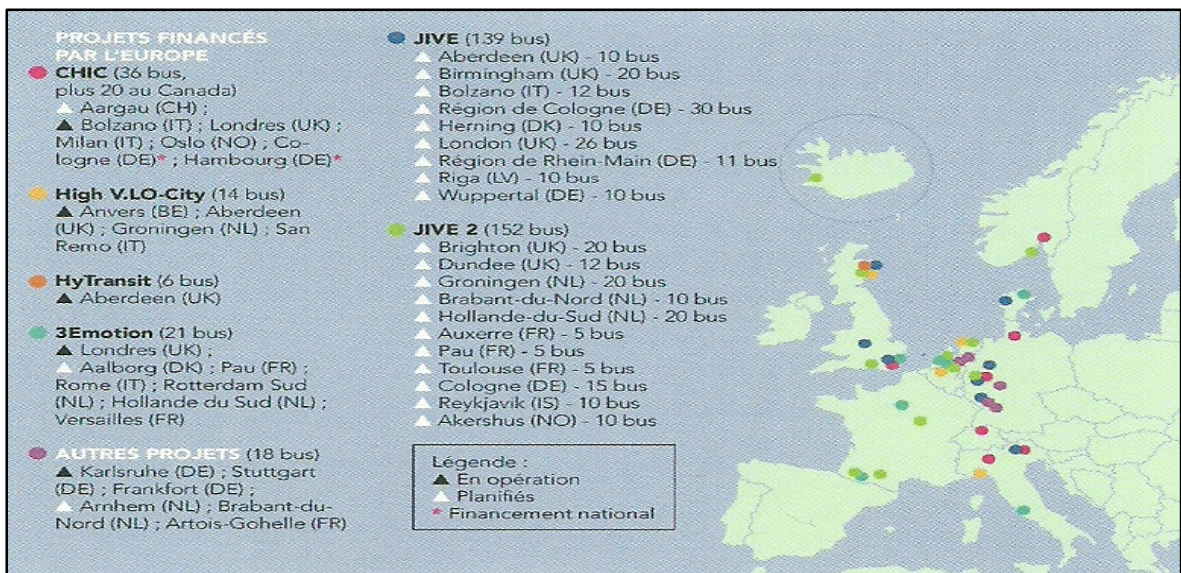


Figura 12.161: Sviluppo dei progetti pilota in Europa di autobus Fuel Cell

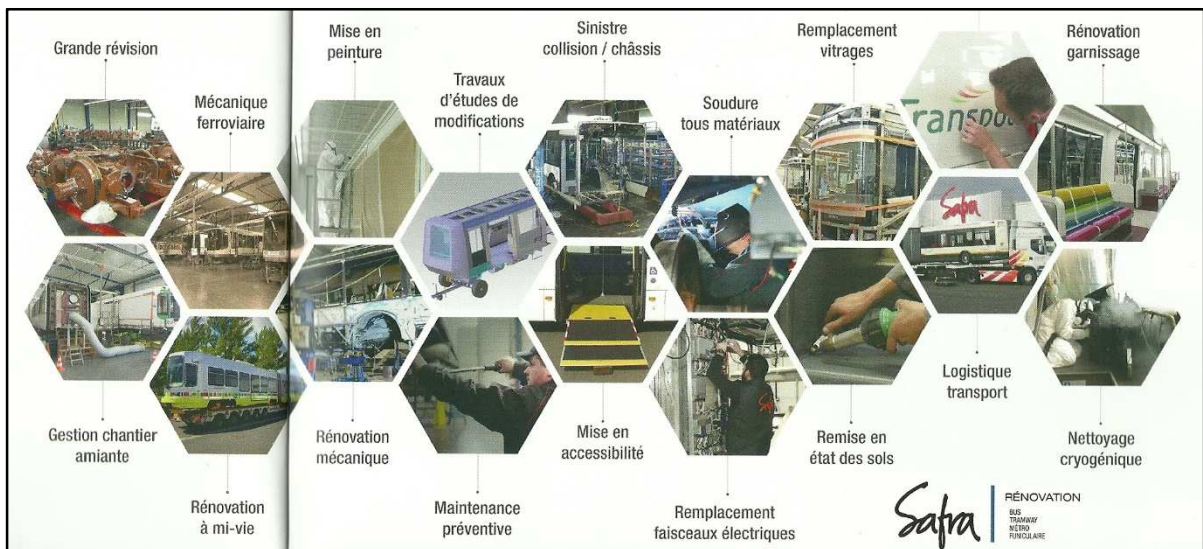


Figura 12.163: L'esperienza dell'architettura tramviaria riconvertita sulla trazione ad idrogeno



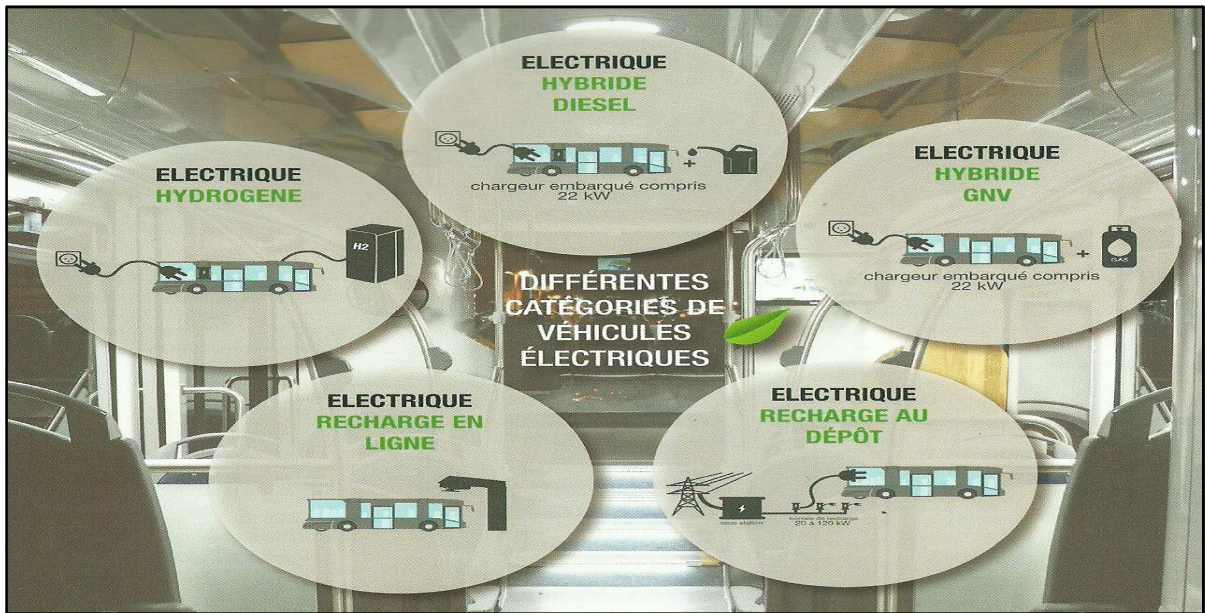


Figura 12.166: Al busworld 2019 i costruttori puntano sulla trazione elettrica



Figura 12.165: Tecnologia Ibrida diesel/elettrico MAN



Figura 12.164: Sistema di recupero energia in frenata

## Acronyms

**LCC** Life cycle Cost;  
**CNG** Compressed Natural Gas;  
**LNG** Liquefied Natural Gas;  
**EU** European Union;  
**EEV** Enhanced Environmentally Vehicle;  
**FC bus** Fuel Cell Electric Bus;  
**HEV** Hybrid electric vehicle;  
**FCEV** Fuel Cell Electric Vehicle  
**FAME** Fatty Acid Methyl Ester  
**BEV** Battery electric vehicle;  
**MDO** Manodopera;  
**PBEV** Plug in battery electric vehicle;  
**E-REV** Extended Range electric vehicle;  
**PHEV** Plug-in Hybrid Electric Vehicle;  
**GHG** Greenhouse Gas;  
**HRS** Hydrogen Refueling Station;  
**TCO** Total Cost of Ownership;  
**TPL** Trasporto Pubblico Locale  
**WTW** Well-to-Wheel;  
**PISI** Port Injection \_ Spark Ignition  
**DISI** Direct Injection \_ Spark Ignition  
**DICI** Direct Injection \_Compressed Ignition  
**RIC** Ricambi;  
**HVO** (Hydrogenated Vegetable Oil).

## Bibliografia

- [1]. A. Bottazzi (2012) . Volume I: Scenari, metodologie e processi organizzativi relativi alla gestione delle flotte di veicoli per i servizi pubblici fondate sull'utilizzo della metodologia del costo del ciclo di vita;
- [2]. A. Bottazzi (2012) . Volume II: Definizione del posizionamento strategico della manutenzione mezzi, strategie ecosostenibili, realizzazione organizzativa delle strategie, dimensionamento delle infrastrutture deposito-officina;
- [3]. A. Bottazzi (2012) . Volume III; Total Service Maintenance con applicazione alle flotte per il TPL (Strategia,processi,competenze);
- [4]. A. Bottazzi (2012) . Volume IV: Completamento della Total Service Maintenance (struttura organizzativa progettata con la metodologia della learning organization, risorse umane, cultura con analisi del social loafing e delle resources, sistemi informativi, dati e sostenibilità flotte, stile direzionale;
- [5]. Frank Kreith and R.E. West, While the idea of using hydrogen to replace fossil fuels may seem like a dream come true, reality is more complex, MECHANICAL ENGINEERING POWER 2003 Gauging Efficiency, Well to Whell;
- [6]. Bettina Kampman (2013), Ruud Verbeek, Anouk van Grinsven, Pim van Mensch, Harry Croezen, Artur Patuleia: 'Options to increase EU biofuels volumes beyond the current blending limits'. July 2013.
- [7]. European Commission, DG Energy. CIVITAS Guard. Biofuels cities. Handbook for 'The local implementation of clean(er) fuel policies in Europe', 2009
- [8]. EC, (2011), A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050, COM (2011)112
- [9]. Eurostat <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>
- [10]. M.McDonald, R.Hall, T.Felstead, G.Sammer, O.Roider, Dr. R.Klementschitz (2010), CIVITAS Pointer, Cluster report 2: Clean Vehicles and Fuels, Deliverable 2.2
- [11]. McKinsey (2012) Urban buses: alternative powertrains for Europe. A fact-based analysis of the role of diesel hybrid, hydrogen, fuel cell, trolley and battery electric powertrains
- [12]. Nylund, N-O., Erkkila, K., Ahtiainen, M., Murtonen, T.,
- [13]. Saikkonen, P., Amberla, A., Aatola, H. (2011), Optimised usage of NExBTL renewable diesel fuel
- [14]. Penny Atkins, Richard Cornwell, Nick Tebbutt, Niki Schonau, (2012), Preparing a low CO<sub>2</sub> technology roadmap for buses, ed. Ricardo.
- [15]. Roland Berger, Integrated Fuels and Vehicles, Roadmap to 2030+;
- [16]. Transport & Environment, Electric buses arrive on time – Marketplace, economic, technology, environmental and policy perspective for fully electric buses in the EU;
- [17]. Andrea Bottazzi, La gestione delle flotte di veicoli per i servizi pubblici, Pitagora, Bologna, vol. I, vol. II, vol. III e vol. IV;
- [18]. CIVITAS, Smart choices for cities –Alternative Fuel Buses;
- [19]. Roland Berger, Fuel Cell Electric Buses –Potential for Sustainable Public Trasport in Europe;
- [20]. CIVITAS, Smart choices for cities – Clean Buses for your city;
- [21]. Comparison of the Lifecycle Cost Structure of Electric and Diesel Buses,
- [22]. Analysis of the potential for electric buses, European Copper Institute
- [23]. McKinsey (2012) Urban buses: alternative powertrains for Europe. A fact-based analysis of the role of diesel hybrid, hydrogen, fuel cell, trolley and battery electric powertrains;
- [24]. AA.VV. Well to wheels analisys of future automotive fuels and powertrains in the Europe context, JEC WTW study version 4,JRC-EUROCAR-CONCAWE,2014.
- [25]. AA.VV. Electric buses arrive on time, Transport & environment, November 2018
- [26]. AA.VV. Alternative fuel buses, CIVITAS, 2016
- [27]. AA.VV. Clean buses for your city, CIVITAS, 2013;
- [28]. AA.VV. Urban Buses: alternative powertrain for Europe, Mc Kinsey,2012;
- [29]. AA.VV. Europe bus market outlook report 2017-2030, Global Mass transit Research;

- [30]. AA.VV. Study on European urban transport road maps 2030, European platform on sustainable urban mobility plans, 2016;
- [31]. AA.VV. Future transport Fuels, Report of the expert group on future transport fuels, January 2011;
- [32]. AA.VV., McKinsey, what's spurring electric vehicle adoption in the truck industry?
- [33]. AA.VV. WEB Volvo;
- [34]. AA.VV, WEB VDL;
- [35]. AA.VV, WEB Daimler;
- [36]. AA.VV, WEB ABB il Sistema TOSA;
- [37]. AA.VV, Clean Buses conference, Global mass transit, Amsterdam, Aprile 2018;
- [38]. AA.VV. WEB Van Hool;
- [39]. AA.VV, McKinsey, Urban Buses: Alternative powertrains for Europe, A fact-based analysis of the role of diesel hybrid, hydrogen fuel cell, trolley and battery electric powertrains.
- [40]. Aida Abdulah, ZeEBUS, Putting electric buses at the core of public transport, UITP R&I, 27 settembre 2017;
- [41]. A. Bottazzi, L'introduzione di LEV (low emission vehicles) e ZEV (Zero emission Vehicles) per la riduzione delle emissioni, Energetica per un futuro sostenibile, Somedia, Milano, 13 marzo 2008
- [42]. A. Bottazzi, Sostenibilità e trasporto pubblico, Autopromotec, Bologna, 26 maggio 2017.
- [43]. D.W. Galletti, J. Lee, Benchmarking procedure for fleet Management, proceeding of the 2002 ASEE conference, University of Louisiana at Lafayette, American Society for Engineering Education, March 20-22, 2002;
- [44]. Orlandi, Principi di Ingegneria dei trasporti, Patron, Bologna 1979;
- [45]. Orlandi A., Lo studio dei sistemi di Trasporto, Pitagora, Bologna;
- [46]. Ard Romers, Bus manufacturer's perspective, Clean Buses conference, Amsterdam 18 April 2018;
- [47]. Atti di conferenza - Busworld Europe 2019 – Bruxelles 18-23 ottobre 2019;
- [48]. M.J. Bradley & Associates, Hybrid-electric drive heavy-duty vehicle testing project final report, NAVC, 2000;
- [49]. A. Bottazzi, Le trazioni alternative in Tper Spa, con particolare attenzione alle scelte strategiche o di progetto pilota relative all'elettrico, Università di Genova, La Spezia, 23 Novembre 2018;
- [50]. A. Bottazzi, Il metano liquido per autobus all'interno delle strategie di sviluppo sostenibile delle flotte di TPL, CIFI, Bologna, 29 settembre 2017;
- [51]. AA.VV, Global energy perspective 2019: Reference case, Energy inside by McKinsey, January 2019;
- [52]. AA.VV, Well to Wheel analysis of future automotive fuels and powertrain in the European context, version 2c, EUCAR, March 2007;
- [53]. AA.VV. Web Heliox;
- [54]. AA.VV., Web Bombardier, il Sistema Prime Mover;
- [55]. AA.VV., Scenari di consumi elettrici al 2050, ISPRA, 213, 2015;
- [56]. AA.VV., Raccomandazioni per l'acquisto di autobus classe I di 12 m, ASSTRA, Roma;
- [57]. AA.VV., Well to Wheel 2001, Intertech, 14-16 May 2001, Nice, France;
- [58]. AA.VV., Urban Transportation efficiency, July 26-27, 1976, American Society of Civil Engineers, 1977, New York;
- [59]. AA.VV., Bus Maintenance Improvement, Special Report 198, Transportation Research Board, 1983;
- [60]. AA.VV., Piano strategico nazionale della mobilità sostenibile per il rinnovo del parco mezzi su gomma per i servizi di trasporto pubblico locale ed il miglioramento della qualità dell'aria, ai sensi della legge n. 232/2016, art. 1, commi 613-614 e 615, Ministeri Infrastrutture e Trasporti, Sviluppo Economico, dell'Economia e Finanza, dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare, Dicembre 2018;