

UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA



UNIVERSITA' DELLA CALABRIA

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica e Gestionale

Dottorato di Ricerca in
INGEGNERIA CIVILE ED INDUSTRIALE

CICLO

XXXI

**SVILUPPO, REALIZZAZIONE E TEST SPERIMENTALI SU STRADA DI UN
POWERTRAIN IBRIDO A CELLE A COMBUSTIBILE E BATTERIE PER UN BUS
URBANO E SUB-URBANO**

Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/09

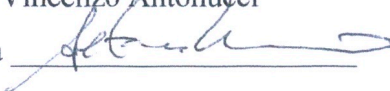
Coordinatore: Ch.mo Prof. Franco Furgiuele

Firma 

Supervisore: Ch.ma Prof.ssa Petronilla Fragiacomò

Firma 

Tutor: Dott. Vincenzo Antonucci

Firma 

Dottorando: Ing. Laura Andaloro

Firma 

Indice

Introduzione	3
<i>Reference</i>	5
1 Le Celle a combustibile a membrana polimerica (PEFC)	6
1.1 <i>Brevi cenni sulle Celle a Combustibile: tipologia e classificazione</i>	6
1.2 <i>Celle a combustibile a elettrolita polimerico (PEFC)</i>	8
1.2.1 <i>Struttura e principio di funzionamento delle PEFC</i>	9
1.2.2 <i>Stato attuale della tecnologia PEFC</i>	11
1.3 <i>Le applicazioni delle PEFC</i>	11
1.3.1 <i>Applicazione delle PEFC nei campi stazionario e portatile</i>	11
1.3.2 <i>Applicazione delle PEFC nel campo dei trasporti</i>	14
1.3.2.1 <i>Auxiliary power units (APUs)</i>	15
1.3.2.2 <i>Utilizzo delle PEFC nei veicoli leggeri (LFCVs)</i>	16
1.3.2.3 <i>Utilizzo delle PEFC nei veicoli elettrici (FCEVs)</i>	16
1.3.2.4 <i>Utilizzo delle PEFC negli aerei</i>	20
1.3.2.5 <i>Utilizzo delle PEFC nelle imbarcazioni</i>	21
<i>Reference</i>	23
2 Classificazione dei powertrain	28
2.1 <i>I powertrain convenzionali con motore a combustione interna (cenni)</i>	29
2.2 <i>I powertrain ibridi</i>	29
2.2.1 <i>Il mercato delle auto ibride in Italia</i>	34
2.3 <i>I powertrain elettrici</i>	36
2.3.1 <i>Stato dell'arte delle batterie per applicazioni nei trasporti</i>	38
2.3.2 <i>Tipologie di ricarica elettrica</i>	40
2.4 <i>I powertrain elettrici a fuel cell</i>	45
2.5 <i>Stato dell'arte dei powertrain a FC usati a bordo dei bus</i>	47
2.6 <i>Il powertrain proposto: configurazione ibrida "range extender"</i>	50
<i>Reference</i>	52
3 Attività sperimentale sui principali componenti innovativi del powertrain proposto	54
3.1 <i>I componenti innovativi del powertrain proposto</i>	54
3.2 <i>Le batterie al litio più promettenti per applicazioni automotive</i>	54
3.2.1 <i>Batterie basate su tecnologia Litio-Polimeri (LiPo)</i>	55
3.2.2 <i>Batterie basate su tecnologia Litio Ferro Fosfato (LiFePO₄)</i>	55
3.3 <i>Test a banco delle due tipologie di batterie</i>	56
3.3.1 <i>Test di caratterizzazione</i>	57
3.3.2 <i>Test di carica/scarica</i>	57
3.3.3 <i>Efficienza energetica ed amperometrica</i>	62
3.3.4 <i>Effetto del BMS sul comportamento del pacco batterie</i>	63
3.3.5 <i>Conclusioni sui test delle batterie</i>	63
3.4 <i>Test a banco di short stack di tipo PEFC</i>	64
3.4.1 <i>Test di caratterizzazione</i>	65
3.4.2 <i>Conclusioni sui test di uno short stack di tipo PEFC</i>	69
<i>Reference</i>	71
4 Descrizione di un caso studio reale	74
4.1 <i>Caso studio: descrizione di un minibus elettrico ibrido e delle infrastrutture di ricarica e di rifornimento di idrogeno realizzati dal CNR ITAE</i>	74

4.1.1	Descrizione del minibus elettrico ibrido.....	74
4.1.1.1	Valutazione energetica e dimensionamento dei principali sottosistemi	75
4.1.1.2	Architettura del powertrain.....	77
4.1.1.3	Strategia di gestione dei flussi energetici: modalità di ricarica delle batterie, modalità di funzionamento del veicolo	79
4.2	<i>Descrizione dell'infrastruttura di ricarica elettrica e di rifornimento di idrogeno: piattaforma energetica a supporto della mobilità.....</i>	<i>81</i>
4.2.1	Infrastruttura di ricarica elettrica (colonnina di ricarica)	81
4.2.2	Infrastruttura di rifornimento di idrogeno	83
4.2.3	Infrastrutture a supporto della mobilità: impianto fotovoltaico e sistema di accumulo in batterie	84
	<i>Reference.....</i>	<i>86</i>
5	Test su strada del minibus elettrico ibrido realizzato presso il CNR ITAE.....	87
5.1	<i>Test su strada effettuati durante la visita di luoghi identificati nel programma “Conoscere il territorio..... Capo d'Orlando ed oltre.....”</i>	<i>87</i>
5.2	<i>Test su strada finalizzati al raggiungimento delle condizioni limite, in modalità puramente elettrica e in modalità ibrida.....</i>	<i>97</i>
5.2.1	Test in modalità puramente elettrica (BE Mode).....	98
5.2.2	Test in modalità ibrida (FCHE Mode).....	99
5.3	<i>Conclusioni.....</i>	<i>101</i>
	<i>Reference.....</i>	<i>101</i>
	Conclusioni	102

Introduzione

In Europa il settore dei trasporti è responsabile di quasi un quarto delle emissioni di gas serra ed è la causa principale dell'inquinamento atmosferico nelle città. Tra le diverse misure d'intervento sono attualmente in atto una migliore pianificazione urbana, miglioramenti tecnologici e un uso più ampio di combustibili alternativi. Oggi l'elettificazione dei veicoli rappresenta un importante tassello dell'approccio alla mobilità sostenibile, per questo motivo il pilastro principale di questo campo di ricerca è rivolto allo sviluppo di veicoli a zero/basse emissioni caratterizzati dall'installazione di dispositivi innovativi carbon-free. Attualmente uno dei grandi problemi dei veicoli elettrici è la durata della batteria a causa della loro bassa capacità [1,2]. Inoltre, i lunghi tempi di ricarica si sono rivelati un ostacolo importante se posti a confronto con i tempi di rifornimento dei veicoli tradizionali con motore a combustione interna. D'altro canto i veicoli ibridi (motore a combustione e motore elettrico), grazie alla presenza di una componente elettrica consentono di ottenere un risparmio di carburante e di sfruttare l'infrastruttura di alimentazione esistente, ma di contro dipendono ancora interamente dal petrolio sia per caricare la batteria che per l'alimentazione del motore termico [3-6]. La tecnologia delle celle a combustibile, con particolare riferimento alle celle a combustibile di tipo polimerico (PEFC - Polymer Electrolyte Fuel Cell), caratterizzata da bassa rumorosità, assenza di inquinanti, elevata autonomia e tempi di rifornimento paragonabili a quelli dei veicoli convenzionali può aiutare lo sviluppo di veicoli a zero emissioni riducendo le problematiche delle batterie e garantendo un approvvigionamento energetico sicuro [7,8]. Ad oggi sono stati proposti diversi veicoli a FC basati sulle sole tecnologie dell'idrogeno, ma i costi dei sistemi a celle a combustibile e dell'idrogeno limitano la loro penetrazione sul mercato [9-12]. La roadmap sui veicoli elettrici ibridi ed elettrici plug-in (*Technology Roadmap - Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles*) identifica per la prima volta uno scenario dettagliato per l'evoluzione di veicoli ibridi elettrici a celle a combustibile e batterie (Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle -FCHEV) che offrono la possibilità di unire i vantaggi di entrambe le tecnologie.

In questo contesto la presente tesi di Dottorato propone lo studio relativo allo sviluppo, realizzazione e test di un powertrain di un minibus elettrico ibrido alimentato da batterie e celle a combustibile.

In una prima fase è stato dato spazio alla descrizione della tecnologia cella a combustibile di tipo PEFC e all'analisi dello stato dell'arte delle applicazioni delle PEFC nel settore trasporti dando, per completezza, brevi cenni anche sulle applicazioni in ambito stazionario e portatile (Capitolo 1).

Prima di trattare la descrizione del powertrain proposto per il minibus elettrico ibrido è stata affrontata una classificazione dei veicoli, approfondendo i powertrain ibridi convenzionali (motore elettrico e motore termico) nei vari possibili livelli di ibridazione, i powertrain puramente elettrici ed infine i powertrain elettrici ibridi (batterie e celle a combustibile). Nell'ambito di quest'ultima tipologia di powertrain è stato analizzato lo stato dell'arte dei bus a celle a combustibile ed, infine, è stata introdotta l'architettura selezionata per il powertrain oggetto di studio (Capitolo 2).

La progettazione e lo sviluppo del powertrain proposto hanno incluso la selezione dei componenti che lo compongono, particolarmente delle batterie e del sistema a celle a combustibile; pertanto attraverso test sperimentali effettuati in laboratorio presso l'Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia del CNR (CNR ITAE) sono state messe a confronto due tipologie di batterie (LiPo e LiFePO₄) particolarmente idonee per le applicazioni sui veicoli. Dai test effettuati è stato possibile scegliere la tecnologia più performante per l'installazione a bordo veicolo. Parallelamente, attraverso un'indagine di mercato, è stato selezionato un sistema di celle a combustibile PEFC le cui prestazioni sono state valutate tramite test di caratterizzazione elettrochimica su uno short stack (2 kW) equivalente a quello individuato ma di potenza inferiore (Capitolo 3).

Dopo aver definito i due principali componenti innovativi del powertrain è stato realizzato, sempre presso il CNR ITAE, il powertrain oggetto della tesi. L'architettura *range extender*, ritenuta ottimale per un minibus ad uso urbano e/o sub-urbano, è stata progettata per operare in una modalità di estensione dell'autonomia con l'obiettivo di superare i limiti di integrazione energetica e tecnologica tra cella a combustibile e batterie. Si è scelto di far funzionare la cella a combustibile a potenza costante (condizione ideale per una maggiore durata), senza fare l'inseguimento del profilo di carico dinamico richiesto dal motore elettrico, poiché le batterie coprono i picchi di potenza richiesti. Si è scelto, inoltre, di abilitare due modalità di marcia del veicolo: modalità puramente elettrica (solo batterie) e modalità ibrida (batterie e celle a combustibile). Per quest'ultimo caso è stata, quindi, definita la strategia di gestione dei flussi energetici implementando la logica di intervento del sistema a celle a combustibile in funzione dello stato di carica delle batterie (SOC) (Capitolo 4).

Infine, i test del powertrain così realizzato e installato a bordo del minibus, sono stati eseguiti direttamente su strada implementando cicli di guida reali relativi a trasferte giornaliere (andata e ritorno) inserite in un programma di servizio ai cittadini del Comune di Capo d'Orlando (ME), al quale il minibus è stato dato in comodato d'uso. Finalità di tale impiego sono la valutazione dell'affidabilità, dell'autonomia e delle logiche di gestione e controllo dei flussi energetici, oltre che rendere un servizio gratuito al comune di Capo d'Orlando che ha inserito il veicolo all'interno propria programmazione sulla mobilità.

Inoltre sono stati implementati cicli finalizzati a verificare le condizioni limite, ovvero verificare l'autonomia massima del veicolo, sia in modalità elettrica (cioè con la sola presenza delle batterie) che in modalità ibrida (batterie e cella a combustibile) (Capitolo 5).

Reference

- [1] Yong Jia Ying, Ramachandaramurthy Vigna K, Tan Kang Miao, Mithulananthan N. A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;49:365-85.
- [2] Kumar Lalit, Jain Shailendra. Electric propulsion system for electric vehicular technology: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;29:924-40.
- [3] Chan CC. The state of the art of electric, hybrid and fuel cell vehicles. *Proc IEEE* 2007;95(4):704-18.
- [4] Gao Yimin, Ehsani M, Miller JM. Hybrid electric vehicle: overview and state of the art industrial electronics. *Proc IEEE Int Symposium* 2005;1:307-16.
- [5] Chau KT, Wong YS. Overview of power management in hybrid electric vehicles. *Energy Convers Manag* 2002;43(15):1953-68.
- [6] Karden E, Ploumen S, Fricke B, Miller T, Snyder K. Energy storage devices for future hybrid electric vehicles. *J Power Sources* 2007;168:2-11.
- [7] Grotsch Markus. Development of a fuel cell range extender for commercial vehicles. *Electr Syst Aircr Railw Ship Propuls* 2012:1-5.
- [8] Eaves S, Eaves J. A cost comparison of fuel-cell and battery electric vehicles. *J Power Source* 3 May 2004;130(1e2):208-12.
- [9] Treffinger P, Friedrich H, Brinner A, Philipps F. Investigations on dynamics of fuel cell systems for vehicle applications. In: *VDI-conference innovative power train systems, Dresden; 2004*.
- [10] Dong TQ, Sutula R, Barnes JA, Bezanson C, Kirk RS, Battaglia V, et al. Status report on U.S. Department of energy electric and hybrid electric vehicle energy storage technologies research, EVS, Pusan. 2002.
- [11] Boettner DD, Moran MJ. Proton exchange membrane (PEM) fuel cell-powered vehicles performance using direct hydrogen fueling and on-board methanol reforming. *Energy* October-December 2004;29(12e15):2317-30.
- [12] Jeong KS, Oh BS. Fuel economy and life-cycle cost analysis of a fuel cell hybrid vehicle. *J Power Sources* 2002;105(1):58-65.

1 Le Celle a combustibile a membrana polimerica (PEFC)

1.1 Brevi cenni sulle Celle a Combustibile: tipologia e classificazione

Una cella a combustibile (Fuel Cell – FC) è un dispositivo elettrochimico capace di convertire l'energia chimica di un combustibile direttamente in energia elettrica [1]. E' un sistema termodinamico aperto che opera sulla base di reazioni elettrochimiche consumando reagenti da una fonte esterna [2-6]. Infatti, a differenza delle batterie, che sono sistemi chiusi, le celle a combustibile per funzionare richiedono una fonte costante di combustibile (H_2 , CH_4 , alcoli) e ossigeno (solitamente fornito attraverso l'aria) e sono in grado di produrre energia elettrica per tutto il tempo in cui vengono forniti questi reagenti dall'esterno. Il processo delle celle a combustibile, basato su una sola conversione (da energia chimica a energia elettrica), offre numerosi vantaggi rispetto ai processi multi-conversioni coinvolti nei motori termici a combustione (da energia chimica a energia termica, a energia meccanica ed infine a energia elettrica). Raggiungono efficienze molto elevate (40-85%) [7] rispetto ai convenzionali sistemi di energia distribuita (6-42%), hanno un design semplice e un funzionamento affidabile [8-13].

Le attuali tecnologie di generazione di energia basate sulla combustione, oltre a dipendere dai combustibili fossili (risorse limitate e in diminuzione), sono anche molto dannose per l'ambiente. Le celle a combustibile, invece, producendo energia elettrica tramite un processo efficiente e pulito sono compatibili con le fonti rinnovabili e con i moderni vettori energetici (vale a dire, l'idrogeno) per lo sviluppo sostenibile e la sicurezza energetica. Di conseguenza, sono considerati da molti i dispositivi di conversione dell'energia del futuro. Inoltre, la loro natura statica si traduce in un funzionamento silenzioso privo di rumori e vibrazioni, mentre la loro intrinseca modularità consente una costruzione semplice e una vasta gamma di applicazioni nella generazione di energia portatile, stazionaria (anche in sistemi cogenerativi CHP) e nel settore dei trasporti [1]. Tuttavia, nonostante i vantaggi, alcune limitazioni condizionano a tutt'oggi l'utilizzo delle celle a combustibile; ad esempio, gli impulsi a cui sono sottoposte e le impurità contenute nei flussi di gas comportano una riduzione del tempo di vita [2], inoltre i costi elevati e le scarse infrastrutture basate sulla produzione e sull'utilizzo dell'idrogeno ostacolano ancora la diffusione di tale tecnologia su larga scala.

Tipologie di celle a combustibile

Esistono diversi tipi di celle a combustibile disponibili oggi sul mercato che si differenziano per le potenze erogate, le temperature operative, le efficienze elettriche e le applicazioni [2]. I possibili combustibili e le temperature di esercizio dipendono dai materiali impiegati, in particolare dal tipo di catalizzatori per elettroliti ed elettrodi. Infatti, le FC sono solitamente classificate in base all'elettrolita impiegato [14] in 6 gruppi:

1. Celle a combustibile alcaline (Alkaline Fuel Cell - AFC)
2. Celle a combustibile ad acido fosforico (Phosphoric Acid Fuel Cell - PAFC)
3. Celle a combustibile a ossido solido (Solid Oxide Fuel Cell - SOFC)
4. Celle a combustibile a carbonati fusi (Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC)
5. Celle a combustibile ad alcol diretto (Direct Methanol Fuel Cell - DMFC)
6. Celle a combustibile ad elettrolita polimerico (Polymer Electrolyte Fuel Cell - PEFC)

Di seguito è riportata una brevissima descrizione delle principali caratteristiche e applicazioni delle tipologie di celle a combustibile sopra elencate ad eccezione delle celle a combustibile ad elettrolita polimerico (PEFC) che saranno oggetto del paragrafo successivo.

Celle a combustibile alcaline (AFC)

Le celle a combustibile alcaline generano energia elettrica utilizzando l'idrossido di potassio elettrolitico alcalino (KOH) in soluzione acquosa. Generalmente funzionano a temperature comprese tra 60 e 90 °C; anche se in recenti progetti possono funzionare a basse temperature tra 23 e 70 °C e pertanto sono classificate come celle a combustibile a bassa temperatura con catalizzatori a basso costo. Il catalizzatore più comune per accelerare le reazioni elettrochimiche lato catodo e anodo è il nichel. L'efficienza elettrica delle AFC è di circa il 60-70% e l'efficienza in configurazione CHP è superiore all'80% [15,16]. La NASA ha utilizzato per la prima volta le AFC per fornire acqua potabile e energia elettrica alle missioni shuttle in applicazioni spaziali. Attualmente sono impiegate in sottomarini, imbarcazioni, carrelli elevatori e applicazioni di trasporto di nicchia [17]. Le AFC sono considerate il tipo più economico di celle a combustibile poiché l'elettrolita utilizzato è un idrossido di potassio chimico standard (KOH) e il catalizzatore per gli elettrodi è il nichel, poco costoso rispetto ad altri tipi di catalizzatori. Le AFC consumano idrogeno e ossigeno puro per produrre elettricità, calore e acqua potabile, valutata molto utile a bordo di astronavi e shuttle. Nonostante i vantaggi le AFC, presentano un importante limite legato all'avvelenamento da anidride carbonica. La soluzione alcalina a base acquosa (KOH) assorbe CO₂ attraverso la conversione di KOH in carbonato di potassio (K₂CO₃) che di conseguenza avvelena la cella. Pertanto, le AFC tipicamente devono usare aria purificata o ossigeno puro che comporta un aumento dei costi operativi. Quindi, la ricerca è volta a trovare una alternativa all'elettrolita KOH [15, 18].

Celle a combustibile ad acido fosforico (PAFC)

Le celle a combustibile a acido fosforico (PAFC) utilizzano elettrodi di carbon paper e come elettrolita acido fosforico liquido (H₃PO₄) che è un liquido trasparente incolore utilizzato in fertilizzanti, detersivi, aromi alimentari e prodotti farmaceutici. La conducibilità ionica dell'acido fosforico è bassa a basse temperature, pertanto le PAFC operano nell'intervallo di temperatura di 150-220 °C. Il vettore di carica in questo tipo di cella a combustibile è lo ione idrogeno (H⁺ o protone) e l'acqua che si forma come prodotto di scarto viene solitamente utilizzata per il riscaldamento dell'acqua o per la produzione di vapore a pressione atmosferica. Tuttavia, le reazioni di steam reforming producono monossido di carbonio (CO) che potrebbe avvelenare la cella influenzandone le prestazioni. Per ridurre l'assorbimento di CO si aumenta la temperatura all'anodo in quanto a temperature elevate aumenta la tolleranza al CO che viene desorbito al catalizzatore. Le PAFC non richiedono ossigeno puro per il funzionamento e possono utilizzare combustibili fossili da reformer. Attualmente, i sistemi PAFC sono in fase commerciale con capacità fino a 200 kW e sono già stati testati sistemi con capacità più elevate (11 MW). Sono costose da produrre a causa della necessità di ricoprire gli elettrodi con catalizzatore al platino finemente disperso. A differenza delle AFC, l'impurità del vapore di idrogeno (CO₂) non influisce sulle prestazioni. L'efficienza elettrica di questo tipo di celle a combustibile è compresa tra il 40 e il 50% e l'efficienza in configurazione CHP è circa l'85%. Sono tipicamente utilizzati per applicazioni stazionarie sul posto [19-21].

Celle a combustibile a ossido solido (SOFC)

Le SOFC sono celle a combustibile ad alta temperatura con elettrolita in ceramica solida ad ossido metallico e usano generalmente aria come ossidante e una miscela di idrogeno e monossido di carbonio, formato da combustibile idrocarburico prodotto tramite reformer interno, come combustibile [6]. L'ossido di zirconio stabilizzato con ittrio (YSZ) è l'elettrolita più comunemente utilizzato per le SOFC a causa della sua elevata stabilità chimica e termica e della conduttività ionica pura [22, 23]. Le SOFC molto utilizzate con sistemi di generazione di energia distribuita su larga scala con capacità di centinaia di MW. Il calore derivato come sottoprodotto viene solitamente utilizzato per generare ulteriore energia elettrica attraverso l'utilizzo di turbine a gas con conseguente aumento dell'efficienza di cogenerazione tra il 70 e l'80%. I sistemi SOFC

sono affidabili, modulari e si prestano all'utilizzo di combustibili riformati. Possono trovare applicazione come sistemi di generazione di energia locali per aree rurali prive di accesso alla rete elettrica pubblica. Inoltre, le SOFC sono caratterizzate da un funzionamento silenzioso e bassi costi di manutenzione.

D'altra parte, i lunghi tempi di avvio (start-up) e di raffreddamento, nonché i vari problemi di compatibilità meccanica e chimica, ne limitano l'uso. Sono in corso studi che analizzano le possibili soluzioni per ridurre la temperatura operativa delle SOFC che potrebbero condurre tale tecnologia a rappresentare una nuova generazione della produzione energetica [23-27].

Celle a combustibile a carbonati fusi (MCFC)

Le MCFC sono celle a combustibile ad alta temperatura e usano un elettrolita composto da sali di carbonati fusi sospesi in una matrice, chimicamente inerte, porosa e realizzata in ceramica di BASE (*Beta-alumina solid electrolyte*) [28]. Le MCFC sono attualmente impiegate per le centrali elettriche a carbone e metano in applicazioni elettriche, industriali e militari. I loro vantaggi e svantaggi sono strettamente correlati alla elevata temperatura di funzionamento. Le MCFC possono essere alimentate direttamente con idrogeno, monossido di carbonio, gas naturale e propano e non richiedono catalizzatori di metalli nobili per l'ossidazione e la riduzione elettrochimica. Inoltre, non necessitano di alcuno sviluppo infrastrutturale per l'installazione; tuttavia, occorre molto tempo per raggiungere la temperatura operativa e la potenza di generazione [29-31].

Celle a combustibile ad alcool diretto (DMFC)

Le celle a combustibile a metanolo diretto operano a temperature comprese tra 70 e 100°C, presentano efficienze intorno al 40-45% e sono alimentate direttamente con metanolo (combustibile allo stato liquido), il quale viene ossidato elettrochimicamente all'anodo [32]. La possibilità di utilizzare il combustibile direttamente in cella rende le DMFC particolarmente adatte per lo sviluppo di generatori portatili in piccole e medie dimensioni (alimentazione di telefoni cellulari e computer portatili) grazie al funzionamento a bassa temperatura, alla lunga durata e al fatto che l'accumulo e la ricarica del metanolo sono senz'altro più semplici rispetto all'idrogeno [2, 33]. La commercializzazione della tecnologia DMFC è stata ostacolata in quanto per l'applicazione pratica restano da risolvere una serie di problemi legati essenzialmente ad una reattività elettrochimica del metanolo non abbastanza elevata, che limita la densità di potenza, ed al fatto che si registrano effetti di trasporto del combustibile attraverso la membrana (crossover) che provocano una degradazione delle prestazioni di cella [32,34].

1.2 Celle a combustibile a elettrolita polimerico (PEFC)

Le PEFC sono celle a combustibile che operano a temperature di esercizio comprese tra 60 e 100°C ed utilizzano come elettrolita una membrana perfluorosulfonica ad elevata conducibilità protonica (in particolare Nafion). Gli elettrodi sono strutture porose a base di carbone, su cui è disperso il catalizzatore costituito da platino o sue leghe [2, 32]. Sono sistemi compatti, leggeri, caratterizzati da elevata densità di potenza, assenza di problemi di corrosione tipici di altri tipi di celle con elettrolita liquido e da una relativa semplicità costruttiva. Inoltre, uno dei principali vantaggi è rappresentato dalla rapidità di avviamento a freddo (dell'ordine del minuto). Rispetto alle altre tipologie di celle a combustibile le PEFC presentano una durata maggiore e un processo di produzione più economico [35-37].

D'altro canto la bassa temperatura operativa è fonte di alcuni svantaggi rispetto alle altre tipologie di cella: una scarsa tolleranza alla presenza del CO nel combustibile e una più difficile integrazione termica fra sistema di trattamento del combustibile e stack. Per ovviare a questi svantaggi le ricerche sono orientate allo sviluppo di membrane in grado di lavorare a temperature più elevate (fino a 200°C). Tuttavia,

temperatura di lavoro superiore a 100°C comportano la vaporizzazione dell'acqua provocando la disidratazione della membrana con conseguente riduzione della conduttività protonica della membrana. Dal punto di vista dell'efficienza, maggiore è la temperatura di lavoro, maggiore è l'efficienza; ciò è dovuto alla maggiore velocità di reazione. Pertanto l'efficienza elettrica delle PEFC è compresa tra il 40 e il 50% [32].

1.2.1 Struttura e principio di funzionamento delle PEFC

Il cuore di una cella a combustibile è costituito dal MEA (Membrane Electrode Assembly), ovvero dall'assemblaggio elettrodo-elettrolita, alla cui interfaccia si sviluppa il processo elettrochimico. Un ruolo molto importante è svolto dal gas diffusion layer (GDL) che ha il compito di migliorare la conduttività aiutando il gas a venire in contatto con il catalizzatore. Il principio di funzionamento di una singola cella a combustibile PEFC è schematizzato in fig. 1.1. L'idrogeno viene fornito all'anodo dove si ossida a ione H⁺ (protone) con cessione di elettroni. Gli elettroni, sono bloccati dalla membrana e fluiscono attraverso un circuito esterno producendo energia elettrica, per poi giungere al catodo dove si riducono con l'ossigeno a ione OH⁻. Gli ioni H⁺ passano, attraverso l'elettrolita, dall'anodo al catodo dove si combinano con l'ossigeno formando acqua come prodotto di scarto del processo. Infine, la trasformazione elettrochimica è accompagnata da produzione di calore (reazione esotermica) che è necessario estrarre per mantenere costante la temperatura di funzionamento della cella.

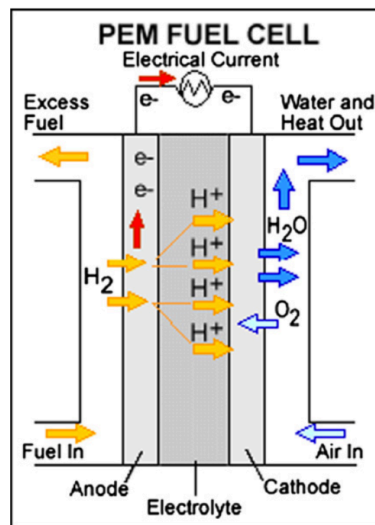


Figura 1.1: Schema di una cella a combustibile PEFC e principio di funzionamento [38, 39]

Le reazioni che avvengono in una cella ad elettrolita polimerico sono:

- Semi-reazione anodica: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
- Semi-reazione catodica: $1/2 O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

L'acqua prodotta viene espulsa al catodo insieme all'eccesso di aria. Al processo partecipano idrogeno e ossigeno e nel caso in cui si utilizzano gas di sintesi è necessario convertire l'ossido di carbonio (CO), eventualmente presente, in anidride carbonica ed idrogeno in quanto come già precedentemente detto la presenza - anche in tracce - di CO nel gas alimentato all'anodo comporta un avvelenamento del catalizzatore elettrodico, in quanto il tenore di CO ammesso dalla cella è 10-20 ppm a 80°C [40, 41].

Una singola cella produce normalmente una tensione di circa 0,6-0,7 V e correnti comprese tra 300 e 800 mA/cm², quindi per ottenere la potenza ed il voltaggio desiderato più celle sono disposte in serie, a mezzo

di piatti bipolari, a formare il cosiddetto "stack". Gli stack a loro volta sono assemblati in moduli, per ottenere generatori della potenza richiesta.

In uno stack PEFC il MEA è disposto tra due piatti bipolari, eccetto per la prima e l'ultima cella, per le quali il piatto esterno (detto end-plate) è a contatto con un solo elettrodo. Gli end plates hanno il compito di serrare tutti i componenti imprimendo una pressione prestabilita (tramite chiave dinamometrica) al fine di evitare trafile e perdite.

I piatti bipolari debbono assolvere diverse funzioni:

- fornire la connessione elettrica tra le celle (conducibilità elettrica);
- distribuire il flusso gassoso del combustibile e dell'ossidante ai singoli elettrodi in maniera più uniforme possibile attraverso dei canali - flow fields - ricavati sulla superficie;
- rimuovere l'acqua prodotta nella reazione;
- permettere un'efficace dissipazione del calore;
- separare combustibile ed ossidante tra le celle connesse in serie.

La struttura di uno stack di tipo PEFC è rappresentata in fig. 1.2.

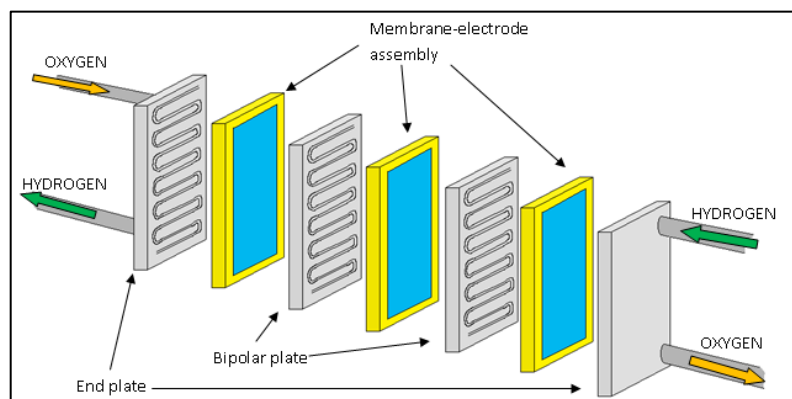


Figura 1.2: Schema di uno stack di tipo PEFC

Gli elettrodi a diffusione gassosa utilizzati nelle PEFC sono normalmente formati da uno strato diffusivo composto da una miscela carbone/PTFE, che ha la funzione di diffondere i reagenti gassosi ed uno strato catalitico composto da un catalizzatore a base di platino/carbone miscelato con un polimero. I due strati vengono depositati su un supporto poroso che serve a dare resistenza meccanica all'elettrodo senza tuttavia limitarne le proprietà diffusive e la conducibilità elettrica. Come supporti sono in genere impiegati carbon cloth o carbon paper. Questi supporti di spessore variabile differiscono fra di loro per le caratteristiche di porosità e conducibilità elettrica, quindi hanno anche influenza sulle caratteristiche e prestazioni dell'elettrodo. Inoltre, hanno diversa resistenza meccanica e rigidità, che determinano differenze nella configurazioni di cella. Il carico di catalizzatore dell'elettrodo è intorno a 0,2 mg/cm². Allo stato attuale il catalizzatore anodico maggiormente usato per celle che operano con contenuti di CO dell'ordine delle decine di ppm è costituito da platino (Pt) supportato su carbone. Come accennato, la maggior parte delle celle PEFC usano membrane perfluorosulfoniche tipo Nafion che possiedono un'elevata stabilità chimica a lungo termine in condizioni sia ossidanti che riducenti. La membrana deve operare in condizioni di umidificazione tali da ottimizzare la conduzione protonica; tuttavia una eccessiva umidificazione non comporta un aumento della conduzione protonica, ma provoca l'allagamento dell'elettrodo e una resistenza nella diffusione dei gas.

1.2.2 Stato attuale della tecnologia PEFC

Sebbene negli ultimi anni siano stati fatti notevoli passi avanti nel settore celle a combustibile esistono ancora forti impedimenti tecnologici ed economici alla loro diffusione nel mercato. I fattori tecnologici che intervengono sono legati alle condizioni operative (temperature, pressione ed umidificazione) a cui l'intero sistema deve essere sottoposto.

Ad esempio, evitare l'allagamento degli elettrodi è di fondamentale importanza per prestazioni e durata ottimali delle celle a combustibile; tuttavia questo fenomeno non è ancora ben compreso.

Un aspetto critico è la gestione della portata dei reagenti ai compartimenti di reazione (anodo e catodo) e delle reazioni elettrochimiche che si sviluppano agli elettrodi, in particolare nel catodo in cui la reazione di riduzione dell'ossigeno è lenta e inefficiente e viene generata acqua. La comprensione dell'attività elettrochimica ai confini della three-phase-boundary zone (TPB), ovvero la zona in cui avviene il contatto tra il catalizzatore, il reagente e l'elettrolita e che dunque rappresenta l'area superficiale attiva di reazione (ECSA - Electro Chemical Surface Area), è una chiave fondamentale per eventuali ulteriori riduzioni del carico di Pt.

Un altro limite delle PEFC è dato dalla possibilità di avvelenamento anodico dovuto alla presenza di piccole percentuali di CO imputabile all'impiego di idrogeno prodotto da steam reforming. Tale processo, infatti, produce idrogeno con purezza nettamente inferiore rispetto all'idrogeno prodotto da processo elettrolitico. A tal proposito è importante far presente che ad oggi la maggior parte dell'idrogeno prodotto al mondo proviene da reforming. Temperature di funzionamento più elevate (al di sopra degli 80-90°C dell'attuale stato dell'arte) favorirebbero l'ossidazione del CO in CO₂ riducendo, quindi, le probabilità di avvelenamento anodico. D'altro canto innalzare troppo la temperatura comporterebbe il problema della vaporizzazione dell'acqua con conseguente essiccamento della membrana oltre che sottoporrebbe componenti e materiali a forti stress termici e meccanici compromettendone stabilità, affidabilità e tempo di vita.

Il tempo di vita richiesto a una cella a combustibile di tipo PEFC commerciale supera le 5.000 ore di funzionamento per i veicoli leggeri e oltre 40.000 ore per la generazione di energia stazionaria con meno del 10% di decadimento delle prestazioni. Attualmente, la maggior parte delle celle a combustibile mostra un notevole declino delle prestazioni dopo circa 1.000 ore di funzionamento [42-45]. Gli obiettivi del DOE entro il 2020 prevedono di raggiungere una durata di vita di 60.000 ore con un'efficienza maggiore del 45% per la potenza distribuita e una durata di 5.000 ore con un'efficienza del 65% per i trasporti [46, 47].

Pertanto la commercializzazione a livello mondiale delle celle a combustibile PEFC è attualmente ancora ostacolata da due importanti fattori: la durata e il costo.

1.3 Le applicazioni delle PEFC

Le PEFC sono particolarmente adatte all'utilizzo nel settore dei trasporti (oggetto del prossimo paragrafo 1.3.2) ma trovano applicazione anche nel settore stazionario-residenziale (2-50 kW), commerciale (250-500 kW) e nella generazione portatile.

1.3.1 Applicazione delle PEFC nei campi stazionario e portatile

Le applicazioni stazionarie includono l'alimentazione dei cosiddetti sistemi UPS (Uninterruptible Power Supply), l'alimentazione di aree remote (RAPS – Remote Area Power Supply) e la generazione distribuita di energia o di cogenerazione [48]. Il range di potenza delle celle a combustibile in applicazioni stazionarie in generale copre un intervallo ampio, 1-50 MW sebbene esistano generazioni su piccola scala, ad es. per l'applicazione di telecomunicazione remota, con range 100-1 kW [49].

Grazie alla loro elevata energia e densità di potenza, modularità, tempi di funzionamento più lunghi (2-10 volte più lunghi rispetto alle batterie al piombo attualmente utilizzate), dimensioni compatte e capacità di operare in condizioni ambientali difficili, le celle a combustibile PEFC stanno diventando un'alternativa incoraggiante per batterie nel mercato degli **UPS**, in particolare nel mercato delle telecomunicazioni [50]. Il mercato degli UPS, caratterizzato dall'esigenza di un'elevata affidabilità ma non necessariamente elevata durata operativa, rappresenta quindi uno dei mercati di maggior successo per le celle a combustibile PEFC. I principali clienti nell'ambito di tale mercato sono banche, ospedali, data center, agenzie governative e società di telecomunicazioni che richiedono potenze affidabili (in genere tra 2 e 8 kW) per evitare interruzioni improvvise di energia e mantenere la propria attività / funzionamento.

Un'altra importante applicazione stazionaria delle PEFC è rappresentata dalla fornitura di energia elettrica in luoghi isolati come isole, deserti, foreste, installazioni tecniche remote e strutture di ricerca a distanza, che rientrano nella categoria di alimentazione di area remota (**RAPS**). Generalmente fornire energia alle aree rurali e urbane off-grid utilizzando le soluzioni RAPS risulta più economico rispetto all'ampliamento delle linee della rete elettrica. Ciò è particolarmente vero per le aree rurali in cui la natura geografica dei terreni sconnessi (foreste, montagne, ecc.) rende l'ampliamento della rete elettrica un approccio irrealistico. Infatti, gli esperti affermano che l'estensione delle linee di rete elettrica alle zone rurali è più costosa rispetto alle località urbane a causa delle basse densità di carico, alle elevate perdite di trasmissione per le aree distanti e all'alto costo dell'infrastruttura rurale richiesta che deve affiancare l'ampliamento della rete [51]. Le aree rurali fuori rete, in particolare nei paesi in via di sviluppo, sono un tipico esempio che potrebbe beneficiare in modo significativo delle soluzioni di generazione di energia RAPS [52-56].

Anche famiglie in aree urbane ma fuori rete utilizzano varie soluzioni RAPS per il loro fabbisogno energetico [57, 58]. Attualmente, le soluzioni energetiche RAPS sono a base di idrocarburi [58], su fonti energetiche rinnovabili [52, 55, 56, 59], o su una combinazione di entrambi [57]. L'espansione della cogenerazione per le attuali soluzioni RAPS è un'altra opzione studiata al fine di aumentare l'efficienza complessiva del sistema e aggiungere un'altra utile produzione di energia, specialmente per le aree RAPS urbane residenziali dove l'aumento aggiuntivo del costo del capitale potrebbe essere tollerato [60]. Allo stesso modo, applicazioni industriali e commerciali off-grid leggere, come installazioni tecniche, pompe per l'acqua e centri medici utilizzano soluzioni RAPS [52, 55, 59]. Classicamente, i motori diesel sono stati i dispositivi di conversione dell'energia scelti per le RAPS. Tuttavia, i motori diesel presentano elevate carbon footprints oltre ad un funzionamento molto rumoroso pertanto i sistemi a celle a combustibile alimentati tramite gas naturale o gas da reforming potrebbero rappresentare una valida alternativa per le RAPS [58]. Tuttavia, la fornitura di gas naturale o di idrocarburi attraverso condotte o altri mezzi rende questa alternativa meno attraente per le zone rurali e remote. Sistemi energetici ibridi e integrati che accoppiano una fonte di energia rinnovabile (ad esempio idroelettrica, biomassa, solare, eolica, ecc.), a seconda delle risorse naturali disponibili, con un meccanismo di stoccaggio (batterie al piombo, batterie agli ioni di litio, sistemi a idrogeno, ecc.) forniscono una soluzione più sostenibile e autonoma per le RAPS [52]. La Cina e l'India, per esempio, stanno lavorando al fine di indirizzare le risorse verso l'utilizzo di sistemi integrati basati sulle fonti rinnovabili per l'alimentazione delle zone rurali [51]. Entro il 2030 si prevede, infatti, che i sistemi RAPS basati su PV ammonteranno a 130 GW, con circa la metà della capacità installata da utilizzare nelle applicazioni industriali e commerciali e l'altra metà nel settore residenziale [61]. Un sistema a idrogeno accoppiato con una fonte di energia rinnovabile è tipicamente composto da un elettrolizzatore, un sistema di stoccaggio dell'idrogeno e una cella a combustibile. Il sistema di idrogeno compenserebbe il problema di intermittenza di cui soffrono molte fonti rinnovabili, rendendo il sistema nella sua totalità affidabile e sostenibile. Tuttavia, i sistemi PV in applicazioni RAPS sono tipicamente accoppiati con batterie per lo stoccaggio di energia. Quindi, ancora una volta, le celle a combustibile sono in competizione con le batterie per la stessa

quota di mercato. In un confronto condotto da Perrin e Lemaire-Potteau [61] tra diversi tipi di batterie e sistemi a idrogeno per applicazioni RAPS, è stato riscontrato che le batterie sembrano essere superiori rispetto al sistema a idrogeno per le loro prestazioni termo-economiche visto l'elevato costo e la bassa efficienza complessiva di un sistema a idrogeno. Tuttavia, un sistema RAPS che utilizza un sistema a idrogeno per lo stoccaggio stagionale potrebbe rivelarsi favorevole. Zoulias e Lymberopoulos [62] hanno riconosciuto che la sostituzione completa delle batterie con un sistema a idrogeno per applicazione RAPS a batterie e impianto PV reali è tecnicamente possibile, ma non ancora economicamente conveniente a causa degli alti costi di capitale per le apparecchiature del sistema a idrogeno. Munuswamy et al. [55] hanno condiviso le conclusioni di Zoulias e Lymberopoulos [62], sottolineando che la riduzione dei costi dei componenti dei sistemi a idrogeno è vitale per la penetrazione di tecnologie basate su fonti rinnovabili e sull'idrogeno. Riduzioni dei costi di circa il 50% per l'elettrolizzatore, del 40% per i serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno e un costo di € 300/kW per il sistema a celle a combustibile renderebbero il sistema idrogeno economicamente superiore alle batterie convenzionali [62]. Khan e Iqbal [57] hanno raggiunto conclusioni simili per un sistema basato sulla fonte eolica che utilizza l'idrogeno per l'accumulo di energia concludendo che, per fare in modo che il sistema a idrogeno integrato a fonte eolica possa essere vantaggioso rispetto all'opzione diesel-eolico-batteria, il costo della cella a combustibile dovrebbe essere ridotto del 70% rispetto al valore attuale. Pertanto con quasi due miliardi di persone che vivono senza elettricità da rete, lo sviluppo di soluzioni energetiche RAPS sostenibili e affidabili diventa una necessità in cui le celle a combustibile e i sistemi a idrogeno potrebbero fare una sostanziale differenza se i loro problemi di costo, efficienza generale e durata fossero risolti.

Le celle a combustibile rappresentano, inoltre, uno strumento in grado di favorire il passaggio dalla grande generazione centralizzata di energia alla generazione distribuita decentralizzata. Grazie alla loro natura statica, alle emissioni ridotte, all'eccellente capacità di inseguire il carico (i.e. load-following) e all'alta efficienza le celle a combustibile potrebbero essere impiegate per la produzione di energia elettrica residenziale e per la cogenerazione (**CHP – Combined Heat and Power**) distribuita residenziale sia a livello domestico [63-65] che di distretto [66, 67]. In questo mercato il Giappone è l'attuale leader con migliaia di famiglie che si affidano già a sistemi di celle a combustibile CHP distribuiti per le loro esigenze di energia elettrica e riscaldamento [48]. Un sistema residenziale CHP basato sull'impiego di celle a combustibile varia da pochi kilowatt a pochi megawatt a seconda del carico di base previsto ed è in grado di fornire energia elettrica, riscaldamento dell'ambiente e acqua calda sanitaria per uso domestico. Anche il raffreddamento può essere aggiunto alla produzione di energia e al riscaldamento (CCHP – Combined Cooling, Heating and Power) integrando un refrigeratore ad assorbimento, una pompa di calore azionata termicamente con un sistema per utilizzare il calore di scarto della cella a combustibile in un ciclo di riscaldamento/raffreddamento a doppia modalità [65, 67, 69, 70]. I sistemi CHP e CCHP possono raggiungere efficienze complessive fino all'80% [63, 70]; tuttavia, necessitano ancora studi al fine di raggiungere ulteriori sfide tecniche e ridurre i costi d'investimento.

Le applicazioni portatili per celle a combustibile si concentrano su due mercati principali. Il primo è il mercato dei generatori di energia portatili leggeri progettati per usi personali all'aperto come il campeggio e simili, applicazioni commerciali portatili come segnaletica, sorveglianza e interventi di emergenza. Il secondo è il mercato dei dispositivi elettronici di consumo come laptop, telefoni cellulari, radio, videocamere e qualsiasi dispositivo elettronico che funziona tradizionalmente con una batteria. Le celle a combustibile portatili hanno in genere una gamma di potenza compresa tra 5 e 500 W, con micro FC aventi potenza inferiore a 5 W e in alcuni casi di elettronica portatile si raggiunge il livello del kW. A differenza delle applicazioni stazionarie, le celle a combustibile portatili sono trasportabili da un individuo e possono essere utilizzate per una varietà di applicazioni. La modularità e l'elevata densità energetica (5-10 volte più

alta densità di energia rispetto a una tipica batteria ricaricabile) rendono le celle a combustibile forti candidati per la futura elettronica personale portatile. Infine, grazie al funzionamento silenzioso, all'elevata potenza, alla densità di energia e al peso ridotto rispetto alle batterie, un'altra importante applicazione portatile in crescita per le PEFC è quella delle attrezzature militari; in questo caso è doveroso notare che anche le celle a combustibile a metanolo diretto (DMFC) e a metanolo riformato (RMFC) sono particolarmente adatte alla specifica applicazione [71, 72].

Oltre al peso ridotto e alla maggiore densità energetica, il fatto che le celle a combustibile non richiedano la ricarica da una fonte di energia elettrica le rende più favorevoli rispetto alle batterie nel futuro mercato dei dispositivi portatili. Tuttavia, il costo e la durata non hanno ancora raggiunto gli obiettivi prefissati. Altri mercati in rapida crescita nel settore portatile includono carica-batterie portatili, piccoli veicoli dimostrativi a controllo remoto, giocattoli, kit e piccoli sistemi a carattere educativo-scolastico come quelli prodotti da Horizon [73] e Heliocentris [74].

Sebbene rispetto alla potenza installata il settore portatile rappresenta meno dell'1% a livello mondiale [48], la produzione di celle a combustibile per applicazioni portatili raggiunge circa la metà del numero totale di unità [39]. Tuttavia, prima che possano essere registrati significativi progressi nel settore portatile dovranno essere affrontate problematiche relative a: dissipazione del calore, rumore, stoccaggio e consegna del combustibile, resistenza agli urti e alle vibrazioni, tempi di risposta a forti fluttuazioni della richiesta energetica, funzionamento in varie condizioni operative, tolleranza alle impurità dell'aria, possibilità di riuso e riciclabilità dei serbatoi del combustibile.

1.3.2 Applicazione delle PEFC nel campo dei trasporti

Essendo responsabile di circa 1/4 - 1/5 delle emissioni di gas serra a livello mondiale ogni anno, l'industria dei trasporti (auto, camion, aerei, navi) costituisce una delle principali potenze nello sviluppo di tecnologie per l'energia pulita. Pertanto la prospettiva del settore è investire in tecnologie che offrano sia riduzioni significative delle emissioni inquinanti sia una migliore efficienza energetica. Di conseguenza, l'attuale dipendenza dalle tecnologie basate sulla combustione che utilizzano combustibili fossili derivati dal petrolio rende lo sviluppo di tecnologie alternative a ridotto/nullo impatto ambientale una necessità piuttosto che un'opzione. È qui che entrano in gioco le celle a combustibile polimeriche (PEFC) che offrono al settore dei trasporti zero (o quasi zero) emissioni senza compromettere l'efficienza del sistema di propulsione. Infatti, le PEFC presentano efficienze (dal 53% al 59%) che sono quasi il doppio dell'efficienza dei motori convenzionali a combustione interna [75]. Inoltre, aggiungendo vantaggi come funzionamento statico, flessibilità del combustibile, modularità e bassi requisiti di manutenzione, le celle a combustibile polimeriche diventano un'alternativa ideale agli attuali motori a combustione. Tutto ciò se fosse realmente rispettata la previsione sulla tempistica necessaria per i raggiungere i target di durabilità e di costo delle PEFC e se l'infrastruttura basata sull'idrogeno fosse idonea a supportare tale tecnologia. Per questi motivi l'utilizzo delle celle a combustibile in vari mezzi di trasporto, con particolare attenzione per le autovetture per passeggeri, è stato uno dei principali settori di ricerca negli ultimi dieci anni. Il Giappone, per esempio, ha annunciato un piano di sviluppo aggressivo per realizzare due milioni di veicoli elettrici a celle a combustibile (FCEV) con un migliaio di stazioni di rifornimento di idrogeno entro il 2025 [76]. La gamma di potenza tipica per le applicazioni delle PEFC nelle autovetture, nei veicoli commerciali e negli autobus va da 20 kW a 250 kW, distinguendone l'utilizzo come segue: in unità di potenza ausiliaria (Auxiliary Power Units - **APUs**), in veicoli leggeri a FC (Light FC Vehicles - **LFCVs**), in veicoli elettrici a FC (Fuel Cell Electric Vehicles - **FCEV**) ed infine utilizzo negli aerei e nelle imbarcazioni. Come verrà osservato di seguito la maggior parte degli sforzi nell'area dei trasporti si concentra su APU e FCEV.

1.3.2.1 Auxiliary power units (APUs)

L'unità di alimentazione ausiliaria di bordo (APU) viene utilizzata per la generazione di potenza non propulsiva. Il carico che una APU deve soddisfare può variare da meno di un kW fino a 500 kW (su aerei, imbarcazioni, ecc.). Questo è il motivo per cui la separazione del sistema di propulsione principale dall'APU è una buona strategia per ottimizzare il consumo energetico complessivo del veicolo. L'APU fornisce energia per climatizzazione (refrigerazione/riscaldamento), intrattenimento, illuminazione, comunicazione e qualsiasi apparato elettrico presente a bordo di auto, imbarcazioni, navi, locomotive, aerei, camion, autobus, sottomarini, astronavi, veicoli militari o qualunque altro veicolo con necessità di energia a bordo. Tuttavia, yacht, aerei, veicoli per il tempo libero (i.e. camper) [77], camion [78,79]; veicoli di servizio; veicoli delle forze dell'ordine e veicoli di refrigerazione (veicoli frigoriferi) rappresentano i mercati più promettenti per le APU a causa della loro elevata domanda di energia elettrica a bordo [80-82]. In particolare, i veicoli per il tempo libero dispongono di APU fino a oltre 38 kW, come si vede dalla Tabella 1.1 che elenca le richieste di APU per un tipico veicolo di lusso [83] e mette in evidenza come con l'aumento dei comfort a bordo e dei dispositivi elettrici nell'industria automobilistica, la domanda che un'APU deve soddisfare è in costante crescita.

Tabella 1.1 – Potenze richieste per APU in veicoli di lusso per passeggeri [83]

Accessori	Richiesta di potenza (W)
Tergicristallo posteriore	90
Pompa del parabrezza	100
Volante riscaldato	120
Tetto apribile	200
Sensori di vicinanza di veicoli	200
Tergicristalli del parabrezza	300
Pompa d'aria	400
Serrature per porte elettriche	400
Pompa del liquido di raffreddamento del motore	500
Pompa antibloccaggio (ABS)	600
Luci	600
Alzacristalli elettrici	700
Ventilatore elettrico	800
Sbrinamento posteriore	1.000
Sedili elettrici	1.600
Controllo automatizzato dei comandi	1.800
Controllo elettronico della frenata	2.000
Sedili anteriori riscaldati	2.000
Parabrezza riscaldato	2.500
Catalizzatore di riscaldamento	3.000
Controllo elettromeccanico della valvola	3.200
Aria condizionata	4.000
Sospensione attiva	12.000

Per avere un'idea della possibile riduzione delle emissioni se le celle a combustibile fossero utilizzate come APU, Gaines e Hartman [84], in uno studio condotto negli Stati Uniti, hanno valutato che l'utilizzo di APU a celle a combustibile anziché delle due APU comunemente usate nei camion pesanti (che assorbono energia dal motore diesel principale addetto alla propulsione e da generatori diesel separati a bordo) potrebbero ridurre le emissioni di PPM fino al 65%, le emissioni di NO_x fino al 95% e le emissioni di CO₂ di oltre il 60%. Altri studi dimostrano che un camion che mantiene il motore acceso a minimo (è prassi tenere acceso il motore quando non si muove per scopi HVAC - Heating, Ventilation, and Air Conditioning, per il funzionamento degli elettrodomestici o solo per mantenere il motore pronto) rappresenta il 20-40% del

tempo di funzionamento complessivo del motore (circa 6 h/g) che alimenta tali servizi (APU) assorbendo energia dal motore stesso con un'efficienza energetica del 3% [81]. Di conseguenza, un camion in modalità di riposo consumerebbe circa un gallone di carburante diesel all'ora. Ciò rappresenta un grande spreco di energia e di carburante, un onere aggiuntivo per il motore, una fonte importante di emissioni nocive (che ha portato a determinate legislazioni che limitano/vietano ai camion di mantenere il motore a minimo in aree popolate) e una cattiva pratica ingegneristica. Attualmente le PEMFC e le DMFC sono i tipi di celle a combustibile maggiormente usati per applicazioni APU su veicoli (trasporto su gomma). Altri veicoli ad alta intensità energetica, come aeroplani e navi mercantili, richiedono APU con elevati livelli di energia, per i quali le celle a combustibile ad alta temperatura (SOFC e MCFC) diventano i candidati migliori.

1.3.2.2 Utilizzo delle PEFC nei veicoli leggeri (LFCVs)

I veicoli a trazione leggera (LFCVs) comprendono scooter, sedie a rotelle personali, biciclette elettriche, rimorchiatori aeroportuali, motociclette, golf car, ecc. oltre a veicoli e attrezzature per la movimentazione di materiali (carrelli elevatori, carroattrezzi, transpallett ecc.). I carrelli elevatori sono stati la dimostrazione di maggior successo delle celle a combustibile nel settore dei trasporti e una delle dimostrazioni di maggior successo per le celle a combustibile in generale. Carrelli elevatori e altri veicoli per la movimentazione dei materiali sono utilizzati in modo esaustivo nel settore del magazzinaggio e della distribuzione, con quasi 2,5 milioni di carrelli elevatori in funzione in Nord America [85]. La maggior parte dei carrelli elevatori utilizzano batterie ricaricabili piombo-acido (solitamente con recupero di energia in frenata rigenerativa) o motori a combustione. Tuttavia, poiché le PEFC richiedono solo pochi minuti per il rifornimento di idrogeno è possibile aumentare l'efficienza operativa rispetto alla ricarica delle batterie (6-8 h) o alla loro sostituzione (circa 30 minuti) e pertanto hanno un enorme potenziale per sostituire gradualmente i carrelli elevatori convenzionali. Inoltre, a differenza delle batterie, le celle a combustibile hanno cicli di funzionamento più lunghi rispetto ai cicli della batteria che di solito durano meno di 8 ore (di nuovo, aumento dell'efficienza operativa), sono meno sensibili alla temperatura ambiente (soprattutto nei magazzini refrigerati), non si auto-degradano con cicli di carica e scarica, non producono emissioni nocive rispetto ai motori a combustione interna, possono operare all'interno o all'esterno a differenza di molti carrelli elevatori a combustione che non possono funzionare in ambienti chiusi, hanno elevate efficienze, hanno un'eccellente capacità di seguire le dinamiche del carico e richiedono poca manutenzione.

È importante notare, inoltre, che i sistemi di alimentazione a idrogeno gassoso o liquido sono molto più pratici dei sistemi di reforming a bordo che tendono ad essere ingombranti e rallentano significativamente i tempi di risposta. Attualmente sono circa 1300 i carrelli elevatori operativi nel mercato statunitense azionati da celle a combustibile PEFC con potenza da 5 a 20 kW [86]. Plug Power rimane il più grande player nel mercato dei carrelli a fuel cell poiché la società è focalizzata esclusivamente sul mercato della movimentazione dei materiali. Scooter [87, 88] e biciclette elettriche alimentati a celle a combustibile [89] rappresentano un altro promettente mercato in fase di sviluppo. Per i motivi già elencati per i carrelli elevatori (emissioni, tempo di ricarica, durata dell'operazione, ecc.), gli scooter e le biciclette elettriche a fuel cell sono preferibili a quelli con motore a combustione e a batteria. Ulteriori veicoli a trazione leggera alimentati a fuel cell sono i carrelli leggeri [90] e le sedie a rotelle [91].

1.3.2.3 Utilizzo delle PEFC nei veicoli elettrici (FCEVs)

In questa categoria di veicoli (FCEVs) la cella a combustibile (PEFC) è impiegata per il sistema di propulsione e rispetto ai veicoli elettrici a batteria (Battery Electric Vehicles – BEVs) offrono una maggiore autonomia, minori tempi di rifornimento (pochi minuti), maggiore tolleranza al freddo e minor peso. Tuttavia, i costi

della tecnologia FC e la mancanza di infrastrutture a idrogeno rappresentano ancora le principali ragioni per cui i FCEVs disponibili sul mercato sono a tutt'oggi pochi.

General Motors, Toyota, Mazda, Daimler AG, Volvo, Volkswagen, Honda, Hyundai, Nissan e altre importanti case automobilistiche fanno costantemente importanti progressi verso la commercializzazione di veicoli a FC. Il 26 febbraio 2013 rappresenta un'importante pietra miliare nella storia dell'industria delle celle a combustibile, in quanto Hyundai ha annunciato il completamento della sua prima linea di assemblaggio di un FCEV prodotto in serie, l'ix35 [92]. Il veicolo ha un'autonomia di quasi 600 km e una velocità massima di 160 km/h utilizzando un sistema a FC alimentato a idrogeno/aria, che può funzionare fino a -25 °C, accoppiato a una batteria agli ioni di litio per il recupero dell'energia in frenata rigenerativa. I componenti tipici principali di un FCEV comprendono il sistema a FC, il sistema di raffreddamento dello stack, il motore elettrico e la trasmissione, i serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno ad alta pressione (o qualsiasi sistema di stoccaggio compatto, leggero e ad alta densità energetica), l'unità di controllo dell'alimentazione principale, le batterie ad alta tensione e/o ultracapacitori per il recupero di energia in frenata rigenerativa (che potrebbe aumentare il range di autonomia del 5-20% [93]), i sistemi di alimentazione dei gas (aria e idrogeno), l'elettronica di potenza e altri componenti ausiliari del BoP. La Fig. 1.3 mostra un tipico FCEV [94].

Nel luglio 2015 il Gruppo Toyota lancia sul mercato la prima auto a FC di serie, la MIRAI, con un prezzo di listino di 57.000,00 \$ (tasse escluse). La potenza della cella a combustibile è circa 115 kW, alimentata a idrogeno compresso stoccato in due serbatoi con una capacità complessiva di 122 litri a 700 bar che garantiscono un'autonomia di circa 550 km e i tempi per fare il pieno sono circa 3-5 minuti [95].

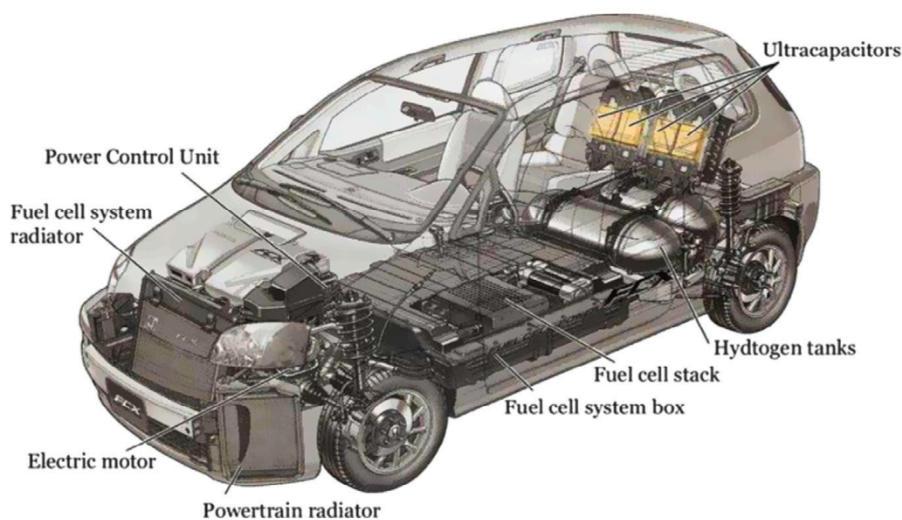


Figura 1.3: Esempio di veicolo a FC (FCEV) [94]

Nel settore della mobilità elettrica i principali competitors dei FCEVs sono i veicoli a batteria (BEVs), con batterie al nickel metal-idruro (Ni-MH) e batterie agli ioni di litio (Li-ion) che attualmente dominano il mercato e si stanno progressivamente imponendo come scelta futura [95]. Entrambe le tipologie di veicoli (FCEV e BEV) presentano vantaggi e svantaggi dipendenti da vari fattori: fonte di energia primaria (fossile, rinnovabili, biomassa, ecc.), catena di conversione dell'energia (ad esempio, produzione di idrogeno, trasporto e metodi di stoccaggio) e requisiti di progetto (velocità massima, campo di guida, capacità di carico di passeggeri, ecc.). Diversi studi, tra cui quello condotto da Campanari et al. [96], finalizzati a confrontare le caratteristiche energetiche e ambientali dei BEV e dei FCEV, reputano che i veicoli a FC elettrici ibridi (FCHEV), ovvero che utilizzano sia batterie che celle a combustibile siano in grado di

combinare i vantaggi delle due tecnologie e potrebbero essere una soluzione fino a quando una delle tecnologie (PEFC e batterie che sono ancora immature e in rapida evoluzione tecnologica) mostrerà una evidente superiorità rispetto all'altra. In una configurazione ibrida la domanda di potenza è distribuita tra la cella a combustibile e la batteria; in particolare si ritiene una strategia ottimale soddisfare la potenza media tramite la FC e lasciare l'inseguimento del carico alla batteria così da preservare la durata della cella a combustibile che in tal modo non è sottoposta a continue fluttuazioni di tensione e dunque a stress che potrebbero comprometterne i tempi di vita. Inoltre, seguendo tale approccio si evita anche il sovradimensionamento del sistema a celle a combustibile vista la sola necessità di soddisfare il carico medio e non quello di picco (soddisfatto dalle batterie).

Oltre alle automobili, i veicoli elettrici a celle combustibili comprendono anche veicoli pesanti come autobus, autocarri, locomotive, furgoni, camion di servizio, flotte di servizio, ecc.

Tenuto conto che nel 2015 gli autobus a FC in servizio operativi in Europa erano 84 [97] è ragionevole affermare che gli autobus elettrici a celle a combustibile (Fuel Cell Electric Bus - FCEB) stanno diventando uno dei migliori strumenti di dimostrazione pubblica e fonti di ricerca e sviluppo nel settore dei trasporti delle PEFC. Inoltre, in un'era in cui le smart cities and communities sono oggetto di grande attenzione da parte delle programmazioni politiche europee e nazionali e le norme imposte al trasporto pubblico al fine di contribuire a ridurre le emissioni nocive ed evitare congestioni del traffico dovute all'uso di auto personali sono sempre più stringenti, gli autobus costituiscono una delle applicazioni più interessanti per la tecnologia delle celle a combustibile proiettate verso il trasporto pubblico pulito.

Rispetto ai bus convenzionali basati su motori diesel, i FCEB producono emissioni molto basse (zero se utilizzano solo celle a combustibile a idrogeno e batterie), hanno un funzionamento silenzioso e una maggiore efficienza, pertanto sono visti favorevolmente sia a livello pubblico che politico. Rispetto ad altri veicoli alimentati a celle a combustibile, gli autobus a FC offrono una progettazione e un'installazione più flessibile avendo minori vincoli di peso e dimensioni per il sistema di stoccaggio dell'idrogeno e requisiti di infrastruttura dell'idrogeno meno complessi (poiché le linee degli autobus sono di solito fisse). Questo è il motivo per cui sono stati trovati numerosi programmi di finanziamento, sia dai governi che dal settore privato, con l'obiettivo di mettere in circolazione FCEB negli Stati Uniti, in Canada, Europa, Giappone, Cina, Australia e Sud America. Esempi chiave a livello mondiale includono l'iniziativa del programma STEP (Sustainable Transport Energy Programme) in Australia [98], il progetto "Hydrogen Fuel Cell Demonstration Project" in Canada [99], il progetto "Urban-Route Buses Trial Project" in Cina [100], il progetto "Brazilian Fuel Cell Bus Project" in Brasile [101] e la dimostrazione "Zero Emission Bay Area" (ZEBA) in California [102]. In Europa: Clean Urban Transport for Europe (CUTE) (programma di dimostrazione dei FCEB più grande del mondo con 33 FCEBs realizzati), HyFLEET, Clean Hydrogen In European Cities (CHIC), High V.LO-City, HyTransit and 3Emotion projects [97, 103] (fig. 1.4).

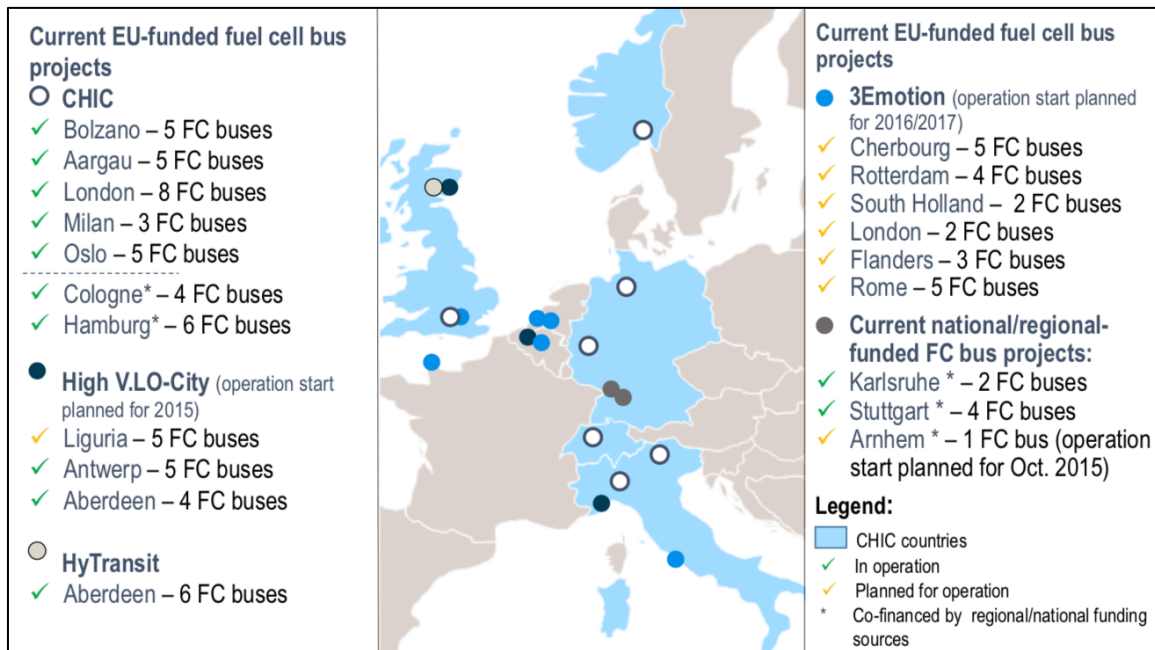


Figura 1.4: Bus a FC in Europa realizzati al 2015 [97]

La fig. 1.5 mostra i componenti principali in un tipico FCEB; è abbastanza evidente la flessibilità utilizzabile nella progettazione ed nell'installazione dei dispositivi potendo utilizzare lo spazio sul tetto, sul davanti e sul retro del bus. I componenti principali sono molto simili a quelli precedentemente descritti per le autovetture.

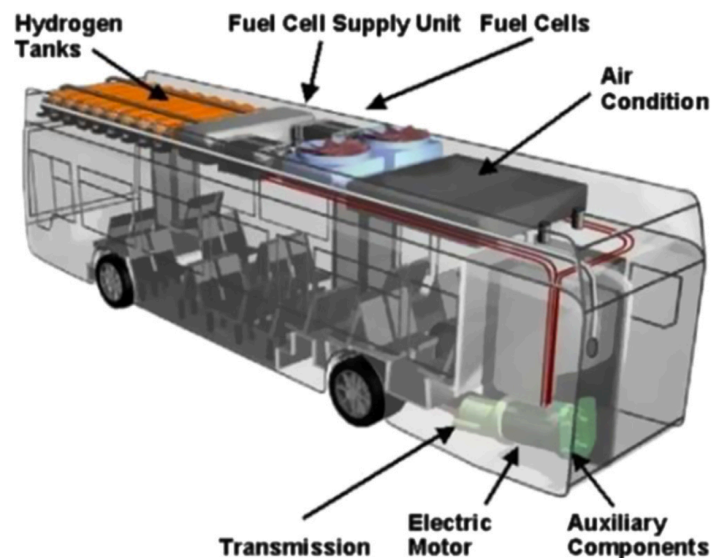


Figura 1.5: Principali componenti in un tipico FCEB basata su Mercedes-Benz Citaro Fuel Cell EcoBus

Un'ampia coalizione europea di stakeholder promuove la commercializzazione degli autobus a FC avendo come obiettivo generale quello di distribuire un numero totale di 300-400 autobus a FC in Europa entro il 2020 al fine di ottenere effetti di scala che dovrebbero ridurre i costi della tecnologia e i costi di implementazione per gli operatori (fig. 1.6).

La coalizione è sostenuta da un partenariato pubblico-privato della Commissione europea, partner industriali e istituti di ricerca (FCH JU) e sta supportando vari progetti dimostrativi su autobus a FC in tutta

Europa, dimostrando l'applicabilità di veicoli in diverse condizioni climatiche e geografiche e preparandosi per l'introduzione sul mercato. Attualmente la coalizione vede la partecipazione di 84 membri tra amministrazioni locali, produttori di autobus, fornitori di tecnologie delle celle a combustibile, produttori e fornitori di infrastrutture per l'idrogeno, associazioni e altri attori del mercato.

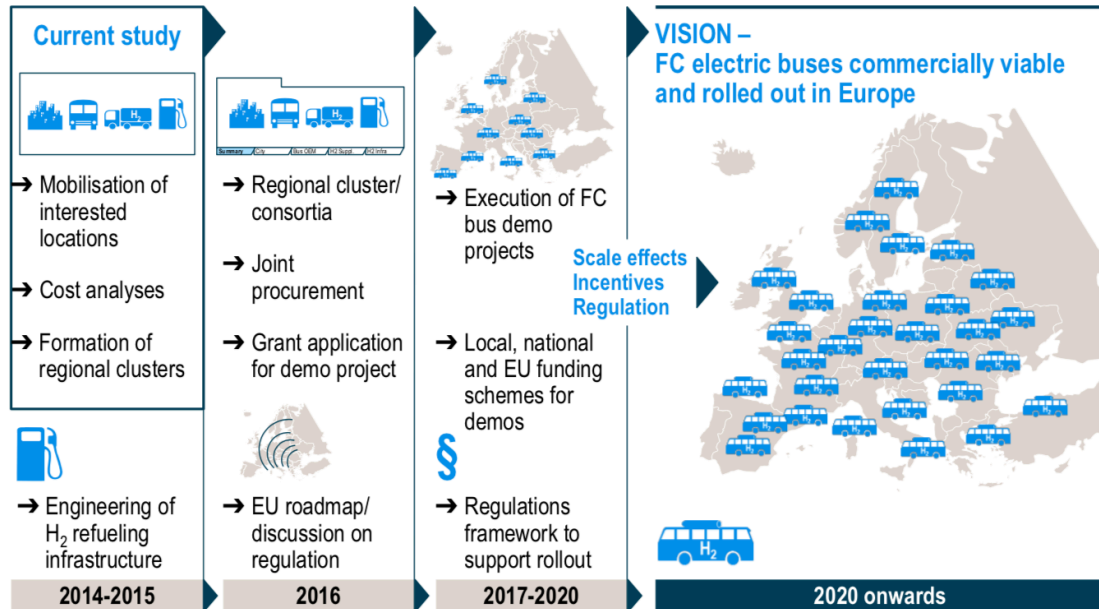


Figura 1.6: Scenario futuro della commercializzazione dei FCEBs in Europa [97]

1.3.2.4 Utilizzo delle PEFC negli aerei

Altre applicazioni delle celle a combustibile includono le industrie spaziali e aeronautiche con piccoli veicoli aerei senza equipaggio (Unmanned Aircraft Vehicles - UAVs) che rappresentano l'obiettivo principale per le celle a combustibile nel settore della propulsione aerea. Gli UAVs vengono utilizzati principalmente per scopi di rilevamento, sorveglianza e ricognizione grazie alla loro natura segreta e alla mancanza di rischi per la vita umana. E con il crescente interesse per gli UAVs da parte di autorità militari e commerciali (droni), lo sviluppo di sistemi di propulsione più duraturi e affidabili è diventata una necessità. Le celle PEFC stanno chiaramente diventando i candidati ideali per alimentare i futuri UAVs. La natura invisibile degli UAVs è supportata dal funzionamento statico delle celle a combustibile e dalla bassa dissipazione del calore, entrambi importanti vantaggi rispetto agli UAVs con motori a combustione interna. Sebbene anche le batterie presentino gli stessi due vantaggi, la bassa densità di energia e il peso elevato delle batterie rendono gli UAVs a FC superiori rispetto a quelli a batterie. Il peso contenuto e la maggiore densità energetica delle celle a combustibile consentono una maggiore autonomia (fino a 24 ore [86]) rispetto a una media di un'ora per gli UAVs a batteria. Inoltre, contrariamente agli UAVs a combustione, che soffrono di bassa efficienza quando progettati per applicazioni su piccola scala, le FC grazie alla loro modularità sono promettenti anche per applicazioni su piccola scala. In uno studio condotto da Bradley et al. [104] sono stati confrontati cinque diversi sistemi di propulsione per UAVs: un sistema PEFC alimentato a idrogeno gassoso compresso, un sistema SOFC alimentato a propano, una batteria litio-polimeri, una batteria zinco-aria e un piccolo motore a combustione interna. Tra i 5 sistemi quello PEFC è risultato avere il potenziale più elevato sia per l'autonomia che per la resistenza.

Un altro veicolo aereo innovativo ed estremamente efficiente è stato l'Helios UAV della NASA che ha utilizzato un sistema di propulsione ibrido costituito da celle fotovoltaiche, una cella a combustibile

rigenerativa e batterie di riserva per il raggiungimento sia di alte altitudini sia di voli lunghi. La cella a combustibile rigenerativa funziona come un elettrolizzatore che genera idrogeno durante il giorno utilizzando la potenza delle celle fotovoltaiche e quindi funziona come una cella a combustibile che utilizza questo idrogeno per il volo durante la notte. Altre dimostrazioni includono un volo a lunga durata di EnergyOr Technologies per oltre 10 ore con il suo UAV alimentato a celle a combustibile [48]. Il mercato dei veicoli aerei militari e commerciali con equipaggio è ancora impraticabile per le celle a combustibile a causa dei requisiti di alta densità di energia, alta densità di potenza, durata e affidabilità imposti dal mercato.

Ciononostante, nel 2008 la Boeing ha annunciato il successo del collaudo di un piccolo aeroplano che utilizza un sistema ibrido PEFC a idrogeno (sviluppato da Intelligent Energy), accoppiato a un motore e a batterie agli ioni di litio [105]. In seguito sono stati anche dimostrati alcuni altri velivoli equipaggiati con celle a combustibile, tra cui una dimostrazione della DLR in Germania che faceva affidamento esclusivamente su una cella a combustibile a idrogeno con un'autonomia di 750 km, una durata di 5 ore e un'efficienza delle celle a combustibile del 52% che ha utilizzato esclusivamente un sistema basato su una cella a combustibile a idrogeno con una portata di 750 km, una resistenza di 5 ore, e un'efficienza delle celle a combustibile del 52% [106].

La NASA ha utilizzato celle alcaline (AFC) e polimeriche (PEFC) per i suoi progetti spaziali con equipaggio già negli anni '60 e, dopo un periodo di poco interesse, negli ultimi 10-15 anni si registra nuovamente una crescita di attenzione verso le FC per le applicazioni spaziali [107-109]. Le celle a combustibile, infatti, sono interessanti per le applicazioni spaziali grazie ai loro molteplici vantaggi rispetto ad altre tecnologie di generazione di energia. Tuttavia, il fatto che l'acqua sia un sottoprodotto delle reazioni elettrochimiche all'interno di una cella a combustibile lo rende ancora più attraente per le applicazioni spaziali in cui l'aria, l'acqua e le forniture alimentari sono della massima importanza.

1.3.2.5 Utilizzo delle PEFC nelle imbarcazioni

Anche se l'uso più comune delle celle a combustibile nell'industria marittima è quello delle APU a bordo di barche, yacht e grandi navi da crociera, esistono mercati molto promettenti anche per la propulsione marina a FC per sottomarini, traghetti, sommergibili, barche, yacht e navi mercantili. Gli ormai noti benefici delle FC (basse emissioni, alta efficienza e funzionamento statico) sono controbilanciati da problematiche ancora oggetto di ricerca come l'affidabilità, la durata, la resistenza agli urti e la tolleranza al contenuto di sale nell'aria di mare. Nel 2003, il primo yacht con un sistema ibrido PEFC/batterie piombo-gel certificato sia per la propulsione che per APU è stato dimostrato con successo in Germania [110]. Sempre in Germania, nel 2008, è stata messa in servizio la prima nave commerciale passeggeri del mondo con un sistema ibrido PEFC/batterie piombo-gel. La nave ha una capacità di 100 passeggeri e offre il doppio dell'efficienza di una nave convenzionale a base diesel [111]. Un'altra imbarcazione innovativa a FC a idrogeno è stata sviluppata in Austria nel 2009 [112]. Il sistema di propulsione è costituito da pannelli fotovoltaici, un elettrolizzatore, un sistema di stoccaggio dell'idrogeno ad alta pressione e un sistema a FC. L'energia solare è utilizzata per alimentare l'elettrolizzatore e decomporre l'acqua in idrogeno e ossigeno. L'idrogeno viene, quindi, usato dal sistema a celle a combustibile per la propulsione della barca. Gli sviluppatori dichiarano un'autonomia di 80 km, che è il doppio del range di una tradizionale imbarcazione a batteria. Inoltre, nel 2011, il primo traghetto al mondo a celle a combustibile è stato utilizzato quotidianamente in Germania [48]. Anche i sottomarini, che utilizzano celle a combustibile alimentate ad ossigeno (non aria) e idrogeno sia per la propulsione che per soddisfare le esigenze del carico ausiliario sono stati impiegati con successo. Una serie di sottomarini ibridi basati su tecnologia PEFC sono stati sviluppati in Germania per le marine tedesche e italiane [113]. I sottomarini utilizzano un sistema di alimentazione ibrido costituito da un sistema di celle a combustibile Siemens, un generatore diesel e una

batteria ad alta tensione. I principali vantaggi dei sottomarini basati su celle a combustibile rispetto a quelli basati sul diesel sono: la possibilità di rimanere sott'acqua senza affiorare per il rifornimento di carburante molto più a lungo rispetto a un sottomarino elettrico-diesel tradizionale (i sottomarini tedeschi a FC sono in grado di rimanere sott'acqua per settimane alimentati dall'ossigeno e dall'idrogeno immagazzinati in confronto a un limite di soli due giorni se il sistema di propulsione fosse basato esclusivamente su diesel), hanno un'efficienza del 70% grazie all'uso di ossigeno puro nella cella a combustibile invece dell'aria, producono un calore inferiore, rilasciano meno tracce e sono molto più silenziosi grazie al funzionamento statico della cella a combustibile. Questi vantaggi rendono i sottomarini a FC non rilevabili e quindi ideali per le esigenze militari al punto che hanno incoraggiato le flotte italiane, greche e sudcoreane a investire e ad interessarsi ai sottomarini a celle a combustibile [114].

Reference

- [1] Omar Z. Sharaf, Mehmet F .Orhan. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32(2014)810–853
- [2] S. Mekhilef, R. Saidur, A. Safari. Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 981–989
- [3] Connihan MA. Dictionary of energy. Routledge and Kegan Paul; 1981.
- [4] Fuel cell, Wikipedia, the free encyclopaedia. Available online at: <http://en.wikipedia.org/wiki/Fuelcell>[accessed 08.04.10].
- [5] Cook B. An introduction to fuel cells and hydrogen technology. Vancouver, Canada: Heliocentris; 2001.
- [6] Mark Ormerod R. Solid oxide fuel cells, the royal society of chemistry. *Chem Soc Rev* 2003; 32:17–28
- [7] Kirubakaran A, Jain S, Nema RK. A review on fuel cell technologies and power electronic interface. *Renew Sustain Energy Rev* 2009; 13:2430 – 40.
- [8] Zhang X, Shen Z. Carbon fiber paper for fuel cell electrode. *Fuel* 2002; 81 (December (17)):2199–201.
- [9] Larrosa-Guerrero A, Scott K, Head IM, Mateo F, Ginesta A, Godinez C. Effect of temperature on the performance of microbial fuel cells. *Fuel* 2010; 89 (December (12)):3985–94.
- [10] Xu H, Kong L, Wen X. Fuel cell power system and high power dc–dc converter. *IEEE Trans Power Electron* 2004; 19:1250–5.
- [11] <http://www.distributed-generation.com/technologies.html>.
- [12] Rayment C, Sherwin S. Introduction to fuel cell technology. Notre Dame, IN, USA: Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame; 2003, May.
- [13] Grove WR. On voltaic series and the combination of gases by platinum. *Philos Mag J Sci* 1839; XIV:127–30.
- [14] G. Squadrito, L. Andaloro, M. Ferraro And V. Antonucci. Chapter 16: Hydrogen fuel cell technology in *Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution*, p. 451-498
- [15] Crawley G. Fuel cell today. Johnson Matthey Plc. 04241894; 2006, March. Available online at: <http://www.fuelcelltoday.com>.
- [16] Comparison of fuel cell technologies. US Department of Energy Hydrogen Program. Available online at: <http://www.hydrogen.energy.gov>[accessed December 2008].
- [17] Kordesch K. Alkaline fuel cells applications, innovative energy technology. Austria: Institute of High Voltage Engineering, U Graz; 1999.
- [18] Larminie J, Dicks A. Fuel cell system explained. 2nd ed. United Kingdom: John Wiley & Sons; 2003
- [19] Remick RJ, Wheeler D, Singh P. MCFC and PAFC R&D workshop summary report. U.S. Department of Energy; 13 January 2010.
- [20] Phosphoric acid fuel cell. Irvine: National Fuel Cell Research Centre, University of California; 2009. Available online at: <http://www.nfrcr.uci.edu/EnergyTutorial/pafc.html>.
- [21] Phosphoric acid fuel cell (PAFC). The U.S. Department of Defense (DoD) Fuel Cell Test and Evaluation Centre (FCTec); 2010. Available online at: <http://www.fctec.com/fctecabout.asp>.
- [22] Will J, Mitterdorfer A, Kleinlogel C, Perednis D, Gaukler LJ. Fabrication of thin electrolytes for second-generation solid oxide fuel cells. *Solid State Ionics* 2000; 131:79–96.
- [23] Singhal SC. Advances in solid fuel cell technology. *Solid State Ionics* 2000; 135:305–13.
- [24] Tanaka K, Wen C, Yamada K. Design and evaluation of combined cycle system with solid oxide fuel cell and gas turbine. *Fuel* 2000; October (79)(12):1493–507.

- [25] Sahibzada M, Steele BCH, Barth D, Rudkin RA, Metcalfe IS. Operation of solid oxide fuel cells at reduced temperatures. *Fuel*1999; 78 (May(6)): 639–43.
- [26] Hibino T, Hashimoto A, Inoue T, Tokuno J, Yoshida S, Sano M. A low-operating-temperature solid oxide fuel cell in hydrocarbon–air mixtures. *Science*2000;16(June):288.
- [27] Shao Z, Sossina M, Halle A. high-performance cathode for the next generation of solid oxide fuel cells. *Nature*2004; 9 (September):431.
- [28] Ovshinsky SR, Venkatesan S, Corrigan DA. Molten carbonate fuel cell. United States Patent Application Publication. Pub.No.: US2006/0204830A1
- [29] Chudej K, Bauer M, Pesch HJ, Schittkowski K. Numerical simulation of a molten carbonate fuel cell by partial differential algebraic equations. Universität Bayreuth;2008.
- [30] He W. Dynamic performance of a reformer for molten carbonate fuel cell power-generation systems. *Fuel Process Technol* 1997;53(November (1–2)):99–113.
- [31] Gon Lee C, Sam Kang B, Kung Seo H, Chun Lim H. Molten carbonate fuel cell. United States Patent Application Publication. Pub.No.:US2003/0072989A1.
- [32] M. Ronchetti. Celle a combustibile –Stato di sviluppo e prospettive della tecnologia. Ricerca Sistema Elettrico. Report ENEA RSE/2009/180
- [33] J.M. Andùjar, F. Segura. Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 2309–2322
- [34] M.P. Hogarth and G. A. Hards. Direct Methanol Fuel Cells. Technological Advances And Further Requirements. Johnson Matthey Technology Centre
- [35] Sopian K. Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells. Elsevier Ltd.; 2005.
- [36] Therdthianwong A, Saenwiset P, Therdthianwong S. Cathode catalyst layer design for proton exchange membrane fuel cells. *Fuel* 91 (2012) 192-199.
- [37] Comparison of fuel cell technologies. DOE Energy Efficiency and Renewable Energy Information Center; 2008. Available online at: <http://www.hydrogen.energy.gov>.
- [38] DOE-EERE. FCT fuel cells: types of fuel cells; 2009 <[https:// www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html](https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html)> [05.28.10].
- [39] Yun Wang, Ken S. Chen, Jeffrey Mishler, Sung Chan Cho, Xavier Cordobes Adroher. A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. *Applied Energy* 88 (2011) 981–1007
- [40] Timothy Myles, Leonard Bonville and Radenka Maric. Catalyst, Membrane, Free Electrolyte Challenges, and Pathways to Resolutions in High Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *Catalysts* January 2017
- [41] Shao, Y.; Yin, G.; Wang, Z.; Gao, Y. PEMFC from low temperature to high temperature: Material challenges. *J. Power Sources* 2007, 167, 235–242
- [42] Gittleman C, DM, Jorgensen S, Waldecker J, Hirano S, Mehall M. Automotive fuel cell R&D needs. In: DOE fuel cell pre-solicitation workshop. Department of Energy, Lakewood, Colorado; 2010.
- [43] Borup R, et al. PEM fuel cell durability. 2008 DOE hydrogen program review June 9–13, 2008, 5. <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/ fc_26_borup.pdf>.
- [44] Schmittinger W, Vahidi A. A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells. *J Power Sources* 2008;180(1):1–14.
- [45] Borup R et al. Scientific aspects of polymer electrolyte fuel cell durability and degradation. *Chem Rev* 2007;107(10):3904–51.
- [46] DOE Technical Targets for Fuel Cell Systems and Stacks for Transportation Applications | Department .webarchive (2015)

- [47] DOE Technical Targets for Fuel Cell Systems for Portable Power and Auxiliary Power Applications | De.webarchive (2015)
- [48] Breakthrough Technologies Institute. 2011 Fuel cell technologies market report. US Department of Energy. DOE/EE-0755; 2012
- [49] Lipman T, Sperling D. Market concepts, competing technologies and cost challenges for automotive and stationary applications. In: Vielstich W, Gasteiger H, Lamm A, editors. Handbook of fuel cells: fundamentals, technology and applications. John Wiley & Sons, Ltd.; 2003. p. 1318–28.
- [50] Varkaraki E, Lymberopoulos N, Zachariou A. Hydrogen based emergency back-up system for telecommunication applications. *J Power Sources* 2003;118:14–22.
- [51] Liming H. Financing rural renewable energy: a comparison between China and India. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13:1096–103.
- [52] Abdullah MO, Yung VC, Anyi M, Othman AK, Ab. Hamid KB, Tarawe J. Review and comparison study of hybrid diesel/solar/hydro/fuel cell energy schemes for a rural ICT Telecenter. *Energy* 2010;35:639–46.
- [53] Bauen A, Hart D, Chase A. Fuel cells for distributed generation in developing countries—an analysis. *Int J Hydrog Energy* 2003;28:695–701.
- [54] Contreras A, Posso F, Guervos E. Modelling and simulation of the utilization of a PEM fuel cell in the rural sector of Venezuela. *Appl Energy* 2010;87:1376–85.
- [55] Munuswamy S, Nakamura K, Katta A. Comparing the cost of electricity sourced from a fuel cell-based renewable energy system and the national grid to electrify a rural health centre in India: a case study. *Renew Energy* 2011; 36:2978–83.
- [56] Santarelli M. Design and analysis of stand-alone hydrogen energy systems with different renewable sources. *Int J Hydrog Energy* 2004;29:1571–86.
- [57] Khan MJ, Iqbal MT. Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland. *Renew Energy* 2005;30:835–54.
- [58] Wallmark C, Alvfors P. Technical design and economic evaluation of a stand- alone PEFC system for buildings in Sweden. *J Power Sources* 2003;118:358–66.
- [59] Agbossou K, Chahine R, Hamelin J, Laurencelle F, Anouar A, St-Arnaud JM, et al. Renewable energy systems based on hydrogen for remote applications. *J Power Sources* 2001;96:168–72.
- [60] Shabani B, Andrews J. An experimental investigation of a PEM fuel cell to supply both heat and power in a solar-hydrogen RAPS system. *Int J Hydrog Energy* 2011;36:5442–52.
- [61] Perrin M, Lemaire-Potteau E. Applications: stationary: remote area power supply: batteries and fuel cells. In: Garche J, editor. Encyclopedia of electrochemical power sources. Amsterdam: Elsevier; 2009.
- [62] Zoulias EI, Lymberopoulos N. Techno-economic analysis of the integration of hydrogen energy technologies in renewable energy-based stand-alone power systems. *Renew Energy* 2007;32:680–96.
- [63] Briguglio N, Ferraro M, Brunaccini G, Antonucci V. Evaluation of a low temperature fuel cell system for residential CHP. *Int J Hydrog Energy* 2011;36:8023–9.
- [64] Gigliucci G, Petrucci L, Cerelli E, Garzisi A, La Mendola A. Demonstration of a residential CHP system based on PEM fuel cells. *J Power Sources* 2004;131: 62–8.
- [65] Kazempoor P, Dorer V, Weber A. Modelling and evaluation of building integrated SOFC systems. *Int J Hydrogen Energy* 2011;36:13241–9.
- [66] Burer M, Tanaka K, Favrat D, Yamada K. Multi-criteria optimization of a district cogeneration plant integrating a solid oxide fuel cell–gas turbine combined cycle, heat pumps and chillers. *Energy* 2003;28:497–518.

- [67] Margalef P, Samuelsen S. Integration of a molten carbonate fuel cell with a direct exhaust absorption chiller. *J Power Sources* 2010;195:5674–85.
- [68] Chan CW, Ling-Chin J, Roskilly AP. A review of chemical heat pumps, thermodynamic cycles and thermal energy storage technologies for low grade heat utilization. *Appl Therm Eng* 2013;50:1257–73.
- [69] Bendaikha W, Larbi S, Bouziane M. Feasibility study of hybrid fuel cell and geothermal heat pump used for air conditioning in Algeria. *Int J Hydrog Energy* 2011;36:4253–61.
- [70] Ma S, Wang J, Yan Z, Dai Y, Lu B. Thermodynamic analysis of a new combined cooling, heat and power system driven by solid oxide fuel cell based on ammonia–water mixture. *J Power Sources* 2011;196:8463–71.
- [71] Cowey K, Green KJ, Mepsted GO, Reeve R. Portable and military fuel cells. *Curr Opin Solid State Mater Sci* 2004;8:367–71.
- [72] Patil AS, Dubois TG, Sifer N, Bostic E, Gardner K, Quah M, et al. Portable fuel cell systems for America's army: technology transition to the field. *J Power Sources* 2004;136:220–5.
- [73] Horizon Fuel Cell Technologies. (<http://www.horizonfuelcell.com>)
- [74] Heliocentris. (<http://www.heliocentris.com>)
- [75] Wipke K, Sprick S, Kurtz J, Ramsden T. Controlled hydrogen fleet and infrastructure analysis. National Renewable Energy Laboratory. TV001; 2010.
- [76] The Department of Energy hydrogen and fuel cells program plan: An integrated strategic plan for the research, development, and demonstration of hydrogen and fuel cell technologies. US Department of Energy; 2011.
- [77] Beckhaus P, Dokupil M, Heinzl A, Souzani S, Spitta C. On-board fuel cell power supply for sailing yachts. *J Power Sources* 2005;145:639–43.
- [78] Blake GD. Solid oxide fuel cell development for auxiliary power in heavy duty vehicle applications. Delphi Corporation Fuel Cells and Reformers Product Team. FC_44_Blake; 2008.
- [79] Brodrick CJ, Lipman TE, Farshchi M, Lutsey NP, Dwyer HA, Sperling D, et al. Evaluation of fuel cell auxiliary power units for heavy-duty diesel trucks. *Transp Res Part D: Transp Environ* 2002;7:303–15.
- [80] Agnolucci P. Prospects of fuel cell auxiliary power units in the civil markets. *Int J Hydrog Energy* 2007;32:4306–18.
- [81] Henne RH, Friedrich KA. Applications: transportation: auxiliary power units: fuel cells. In: Garche J, editor. *Encyclopedia of electrochemical power sources*. Amsterdam: Elsevier; 2009.
- [82] Lutsey N, Brodrick CJ, Sperling D, Dwyer HA. Markets for fuel cell auxiliary power units in vehicles: a preliminary assessment. Institute of Transportation Studies. UCD-ITS-RP-02-44; 2002.
- [83] Krumpelt M. Auxiliary power units: what, why, how, when. In: *Proceedings of EU/US symposium*; 2001.
- [84] Gaines L., Hartman C.J.B. Energy use and emissions comparison of idling reduction options for heavy-duty diesel trucks. In: *Proceedings of the 88th annual meeting of the Transportation Research Board*; 2009.
- [85] Qi Z. Application: transportation: light traction: fuel cells. In: Garche J, editor. *Encyclopedia of electrochemical power sources*. Amsterdam: Elsevier; 2009.
- [86] Dicks AL. PEM fuel cells: applications. In: Sayigh A, editor. *Comprehensive renewable energy*. Oxford: Elsevier; 2012.
- [87] Colella WG. Market prospects, design features, and performance of a fuel cell-powered scooter. *J Power Sources* 2000;86:255–60.

- [88] Lin B. Conceptual design and modeling of a fuel cell scooter for urban Asia. *J Power Sources* 2000;86:202–13.
- [89] Hwang J, Wang D, Shih N, Lai D, Chen C. Development of fuel-cell-powered electric bicycle. *J Power Sources* 2004;133:223–8.
- [90] Hwang J, Wang D, Shih N. Development of a lightweight fuel cell vehicle. *J Power Sources* 2005;141:108–15.
- [91] Wang FC, Chiang Y-S. Design and control of a PEMFC powered electric wheelchair. *Int J Hydrog Energy* 2012;37:11299–307.
- [92] First Hyundai ix35 FCEV rolls off assembly line in Korea. *Fuel Cells Bulletin* 2013; 2013:2.
- [93] Hochgraf C. Application: transportation: electric vehicles: fuel cells. In: Garcke J, editor. *Encyclopedia of electrochemical power sources*. Amsterdam: Elsevier; 2009.
- [94] Zorpette G. Super charged [ultracapacitors]. *IEEE Spectr* 2005;42:32–7.
- [95] www.toyota.it
- [96] Campanari S, Manzolini G, Garcia de la Iglesia F. Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations. *J Power Sources* 2009;186:464–77.
- [97] Roland Berger. *Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe. A Study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (2015)*
- [98] Ally J, Pryor T. Life-cycle assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation systems. *J Power Sources* 2007;170:401–11.
- [99] Canada gets first fuel cell bus for 2010 winter Olympics fleet. *Fuel Cells Bulletin* 2009;2009:2.
- [100] Li X, Li J, Xu L, Yang F, Hua J, Ouyang M. Performance analysis of proton exchange membrane fuel cell stacks used in Beijing urban-route buses trial project. *Int J Hydrog Energy* 2010;35:3841–7.
- [101] Neves NP, Pinto CS. Licensing a fuel cell bus and a hydrogen fueling station in Brazil. *Int J Hydrog Energy* 2013;38:8215–20.
- [102] Eudy L, Chandler K. Zero emission bay area (ZEBA) fuel cell bus demonstration: second results report. National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP- 5600-55367; 2012.
- [103] Saxe M, Folkesson A, Alvfors P. Energy system analysis of the fuel cell buses operated in the project: clean urban transport for Europe. *Energy* 2008;33: 689–711.
- [104] Bradley TH, Moffitt BA, Mavris D, Parekh DE. Applications: transportation: aviation: fuel cells. In: Garcke J, editor. *Encyclopedia of electrochemical power sources*. Amsterdam: Elsevier; 2009.
- [105] Boeing fuel cell plane in manned aviation first. *Fuel Cells Bulletin* 2008; 2008:1.
- [106] Fuel cells power first takeoff for DLR's Antares aircraft. *Fuel Cells Bulletin* 2009; 2009:3.
- [107] Fuel cell project for space launch vehicles. *Fuel Cells Bulletin* 2002; 2002:2.
- [108] Sone Y, Ueno M, Kuwajima S. Fuel cell development for space applications: fuel cell system in a closed environment. *J Power Sources* 2004;137:269–76.
- [109] Sone Y, Ueno M, Naito H, Kuwajima S. One kilowatt-class fuel cell system for the aerospace applications in a micro-gravitational and closed environment. *J Power Sources* 2006;157:886–92.
- [110] First yacht with certified fuel cell propulsion. *Fuel Cells Bulletin* 2003; 2003:4–5.
- [111] First fuel cell passenger ship unveiled in Hamburg. *Fuel Cells Bulletin* 2008;2008:4–5.
- [112] Austrian collaboration unveils hydrogen fuel cell boat. *Fuel Cells Bulletin* 2009; 2009:5.
- [113] Third fuel cell submarine handed to German navy. *Fuel Cells Bulletin* 2006; 2006:10.
- [114] Psoma A, Sattler G. Fuel cell systems for submarines: from the first idea to serial production. *J Power Sources* 2002;106:381–3.

2 Classificazione dei powertrain

Il trasporto di beni e persone rappresenta circa il 20% dell'energia primaria globale consumata, circa il 23% delle emissioni di CO₂ e se si tiene conto di altri gas a effetto serra (GHG) come il metano, circa il 14% delle emissioni totali di gas serra globali [1-4]. A livello mondiale circa 1,2 miliardi di autovetture e 380 milioni di veicoli commerciali sono attualmente in circolazione [5] e si prevede che questi numeri possano aumentare, quasi interamente in paesi non-OCSE come la Cina e l'India [5,6]. Come è noto il trasporto è quasi interamente (> 99,9%) alimentato da motori a combustione interna (MCI) - trasporto terrestre e marittimo con MCI e trasporto aereo con motori a reazione. I combustibili liquidi sono diventati il carburante di scelta per il trasporto grazie alla loro elevata densità energetica e facilità di trasporto e stoccaggio, inoltre nel corso dell'ultimo secolo è stata costruita un'infrastruttura globale molto grande per supportare questo sistema. Attualmente circa il 95% dell'energia trasportata proviene da combustibili liquidi derivati dal petrolio e circa il 60% di tutto il petrolio prodotto è destinato alla produzione di carburanti per il trasporto [1,2,6,7,8]. Tuttavia le sempre più stringenti normative sulle emissioni e sui consumi e la società sempre più coinvolta nella necessità di proteggere l'ambiente, già da tempo hanno fatto crescere molto l'interesse verso forme alternative di propulsione.

Attualmente, le principali alternative ai combustibili fossili usati per i trasporti sono i biocarburanti, il gas naturale compresso (GNC) e il gas di petrolio liquido (GPL). Inoltre i veicoli elettrici a batteria (BEV), i veicoli elettrici ibridi (HEV) e i veicoli elettrici a celle a combustibile (FCEV) si stanno affermando sempre più velocemente nel settore automobilistico attirando grande attenzione da parte di politici e consumatori. Quindi sebbene i veicoli alimentati da MCI siano ancora la tecnologia dominante, l'elettrificazione dei trasporti è oggi ormai una realtà [9-15].

In questo capitolo saranno trattate e messe a confronto le architetture di powertrain attraverso una panoramica delle seguenti tipologie di veicoli (fig. 2.1):

1. veicoli convenzionali con MCI: i) motore a benzina o metano; ii) motore diesel
2. veicoli ibridi convenzionali
3. veicoli elettrici
4. veicoli ibridi elettrici

Di seguito verranno discusse le configurazioni dei veicoli semplificate tramite l'aiuto di immagini e schemi rappresentativi che consentiranno di illustrare ed evidenziare le principali differenze, vantaggi e svantaggi.

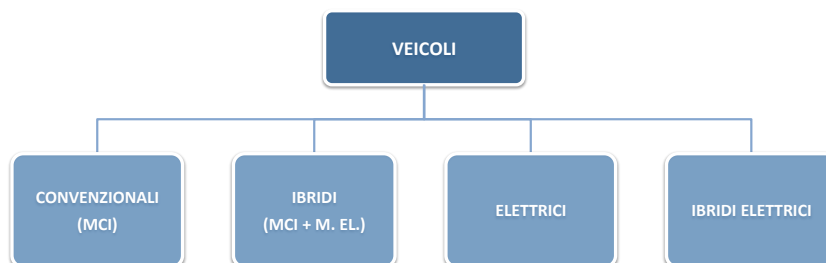


Figura 2.1: Classificazione dei veicoli

2.1 I powertrain convenzionali con motore a combustione interna (cenni)

I motori a combustione interna (MCI) utilizzati nei veicoli convenzionali sono di due tipi e si differenziano per il ciclo termodinamico impiegato per trasformare l'energia termica in energia meccanica (figura 2.2) [16, 17]:

- Ciclo Otto: combustione a scintilla e a volume costante, alimentato a benzina o a gas naturale;
- Ciclo Diesel: combustione ad accensione spontanea e a pressione costante, alimentato da diesel.

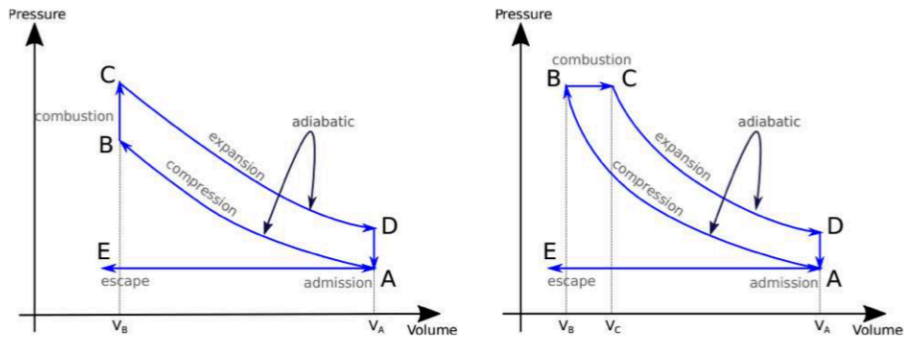


Figura 2.2: Ciclo Otto (sinistra) e ciclo Diesel (destra) [1]

Nonostante i notevoli miglioramenti ottenuti negli anni, l'efficienza media dei MCI, considerando il punto operativo ottimale, è circa pari al 25% per un ciclo Otto e al 30% per un ciclo Diesel. Tuttavia questi valori possono anche essere inferiori dal momento che il punto operativo in un veicolo non è sempre ottimale. Negli ultimi anni, principalmente a causa dell'aumento dei prezzi del carburante, i veicoli a gas (che funzionano con un ciclo Otto come quelli a benzina) hanno guadagnato slancio nel mercato. Nella configurazione tipica di un powertrain con MCI (figura 2.3), il motore termico è accoppiato, tramite una frizione e degli ingranaggi (cambio), all'asse motore mentre il carburante è contenuto nel serbatoio.

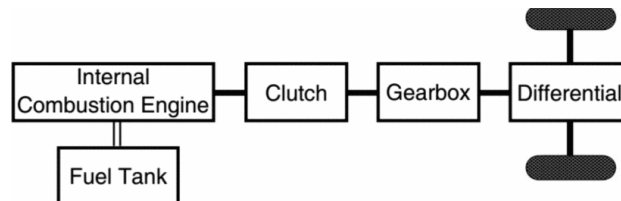


Figura 2.3: Struttura di un veicolo convenzionale a MCI [1]

Ad oggi questi veicoli continuano ad essere i più venduti e usati e continuano ad arrivare sul mercato quasi quotidianamente.

2.2 I powertrain ibridi

I veicoli ibridi possono essere classificati in funzione del livello di ibridazione/elettrificazione e in funzione della configurazione/architettura del sistema di propulsione (fig. 2.4). La tecnologia ibrida elettrica utilizza sia un MCI che un motore elettrico (EM), in varie configurazioni, per fornire alle ruote una adeguata potenza di trazione [14,18].

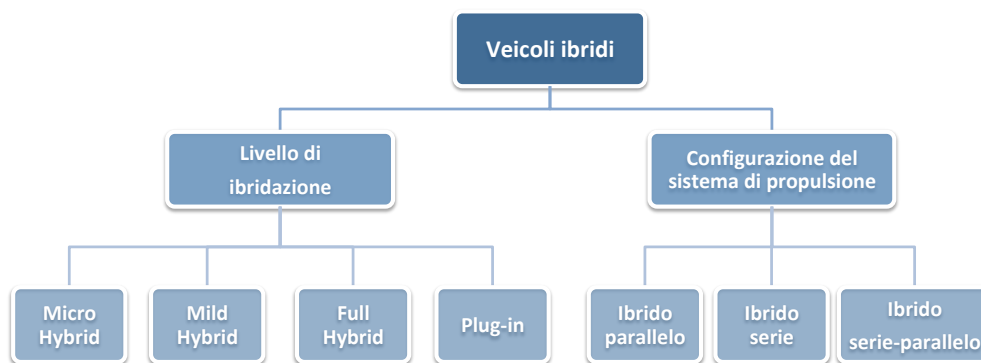


Figura 2.4: Classificazione dei veicoli ibridi

Esistono diversi stadi intermedi di elettrificazione che portano dal veicolo alimentato unicamente dal MCI al veicolo elettrico puro (BEV: Battery Electric Vehicle), ed in particolare:

- 1) Micro Hybrid (Micro-HEV)
- 2) Mild-Hybrid (Mild-HEV)
- 3) Full-Hybrid (Full-HEV)
- 4) Plug-in (PHEV).

Il rapporto di ibridazione, alto o basso, si riferisce al rapporto di produzione di energia rispettivamente dal motore elettrico (EM) e dal MCI [19].

Questi veicoli ibridi sono dotati di due o più sorgenti di potenza distinte in cui la sorgente principale è il motore a combustione interna e la sorgente secondaria è il motore elettrico.

L'uso di due differenti tipologie di propulsione permette di beneficiare dei vantaggi di ciascuno di essi e compensarne i difetti: il risultato è un veicolo con efficienza superiore a quella della soluzione tradizionale (alle basse velocità il rendimento del motore elettrico è maggiore di quello a combustione interna, mentre alle alte velocità il motore a combustione interna ha rendimenti superiori) in grado di risparmiare combustibile e ridurre le emissioni.

Inoltre, sebbene i veicoli ibridi utilizzino un motore elettrico, non richiedono necessariamente di ricaricare le batterie di bordo, come occorre invece fare per i veicoli elettrici, questo grazie a meccanismi di gestione dell'energia di bordo che altrimenti andrebbe dispersa.

Micro Hybrid: le auto che appartengono a questa categoria in realtà, non sono delle vere e proprie auto ibride, in quanto le unità elettriche installate a bordo non sono collegate al motore e non svolgono alcuna attività propulsiva. Tali auto si avvalgono della tecnologia detta:

- "Start&Stop": spegne il motore quando la macchina arresta la propria marcia e lo rimette in moto nel momento in cui il guidatore preme il pedale della frizione. Quando il veicolo è fermo tutti i dispositivi elettrici sono alimentati dalla batteria come il servofreno, servosterzo, autoradio, alzacristalli e aria condizionata. Questi dispositivi richiedono l'utilizzo di una batteria che resiste ai continui e numerosi avviamenti pertanto può essere necessario potenziare alcune parti meccaniche e riprogettare il motorino di avviamento per renderlo più robusto alle frequenti sollecitazioni. Il risultato finale di questo livello di elettrificazione è una riduzione del consumo di carburante approssimativamente del 10%. Ormai quasi tutte le nuove auto presenti sul mercato si avvalgono della tecnologia Start&Stop.

Mild Hybrid: questi veicoli, oltre ad avvalersi dello Start&Stop descritto precedentemente, sono equipaggiati con vero e proprio motore elettrico affiancato al motore a combustione interna. Questo piccolo motore può:

- recuperare energia in frenata (frenata rigenerativa - regenerative braking): il motore elettrico funge da generatore e permette di recuperare l'energia cinetica rilasciata dal veicolo in fase di decelerazione e in discesa, ricaricando le batterie. La frenata rigenerativa permette di incrementare l'efficienza del veicolo del 10-15 %, tale tecnologia non è utilizzabile singolarmente ma deve essere integrata a un sistema di frenatura meccanica;
- supportare il motore tradizionale nelle fasi di avviamento, accelerazione e ripartenza andando a sostituire il tradizionale motorino d'avviamento ma non è sufficiente per la propulsione del veicolo;
- funzionare da generatore in sostituzione del classico generatore già presente nei veicoli tradizionali.

Il risparmio di carburante in questo caso è circa il 15-20%.

Di seguito i principali modelli di auto Mild Hybrid: Audi A4 2.0 TFSI, Audi A5 2.0 TFSI, Audi A6, Audi A7, Audi A8, Mercedes-Benz CLS 450 EQ Boos, Renault Scénic Hybrid Assist, Suzuki Swift Hybrid, Suzuki, Baleno Hybrid, Suzuki Ignis Hybrid.

Full Hybrid: queste auto utilizzano due diversi tipi di motori:

- un motore a combustione interna;
- un motore elettrico.

La tecnologia Full Hybrid è la tecnologia ibrida più avanzata, in quanto sono le uniche in grado di viaggiare, sebbene per brevi tratti, in modalità solo elettrica. Le auto dotate di questa tecnologia possono essere alimentate dal solo motore elettrico, dal solo motore a combustione o da entrambi. Di norma all'avvio o a basse velocità la vettura è alimentata silenziosamente dal solo motore elettrico, il che significa senza alcuna produzione di emissioni di CO₂ e senza alcun consumo di carburante. Il motore a combustione subentra in modo fluido a velocità più elevate e, se necessario, il motore elettrico fornisce potenza supplementare (ad es. in fase di accelerazione). Il sistema full hybrid è in grado di selezionare in modo intelligente la sorgente di alimentazione più idonea con la possibilità di recuperare una quantità maggiore di energia attraverso la frenata in modo da caricare la batteria. Il risparmio di carburante in questo caso può arrivare fino al 30%.

Di seguito i principali modelli di auto Full Hybrid: DS 5 Hybrid, Ford Mondeo Hybrid, Honda NSX, Hyundai IONIQ, Infiniti Q50 Hybrid, Infiniti Q70 Hybrid, Kia Niro, Lexus CT Hybrid, Lexus IS-RC Hybrid, Lexus GS Hybrid, Lexus LS-LC Hybrid, Lexus NX Hybrid, Lexus RX Hybrid, Toyota Yaris Hybrid, Toyota Auris Hybrid, Toyota Prius, Toyota C-HR Hybrid, Toyota RAV4 Hybrid.

PHEV:

attualmente la tecnologia ibrida plug-in è la più performante, in quanto consente di aggirare uno dei limiti delle auto Full Hybrid, le cui batterie vengono caricate esclusivamente con il recupero di energia in frenata. Grazie alle auto ibride plug-in è possibile, infatti, percorrere diversi chilometri senza essere costretti ad utilizzare il motore a combustione interna (a benzina o a gasolio) evitando, quindi, di emettere sostanze inquinanti. A garantire questo risultato sono le batterie che, rispetto a quelle presenti nei modelli ibridi precedentemente descritti, sono più potenti. Tali accumulatori, inoltre, sono ricaricabili non solo nelle fasi di frenata/decelerazione, ma anche attraverso l'utilizzo di colonnine pubbliche o della rete elettrica domestica. Differente è anche l'elettronica di gestione.

Lo schema delle plug-in è identico a quello delle full hybrid – dove il motore elettrico può collaborare con quello termico o funzionare da solo – con l'unica differenza che le batterie hanno una maggiore capacità e soprattutto possono essere ricaricate con una normale presa di corrente domestica (nelle full hybrid la batteria è caricata esclusivamente con il recupero di energia di rilascio).

Di seguito i principali modelli di auto Plug-in: Audi A3 e-tron, Audi Q7 e-tron, BMW 225xe , BMW 330e, BMW 740e, BMW i8, BMW X5 xDRIVE40e, Hyundai IONIQ, Kia Optima, Mercedes C350, Mercedes GLC 350e, MINI Cooper SE Countryman ALL4, Porsche Cayenne S E-Hybrid, Porsche Panamera S E-Hybrid, Toyota Prius, Volkswagen Golf GTE , Volkswagen Passat GTE, Volvo V60, Volvo XC90 T8 Twin Engine.

In fig. 2.5 è riportato un confronto dei diversi livelli di ibridazione sopra esposti dal punto di vista della potenza installata, dei costi e del risparmio di combustibile.

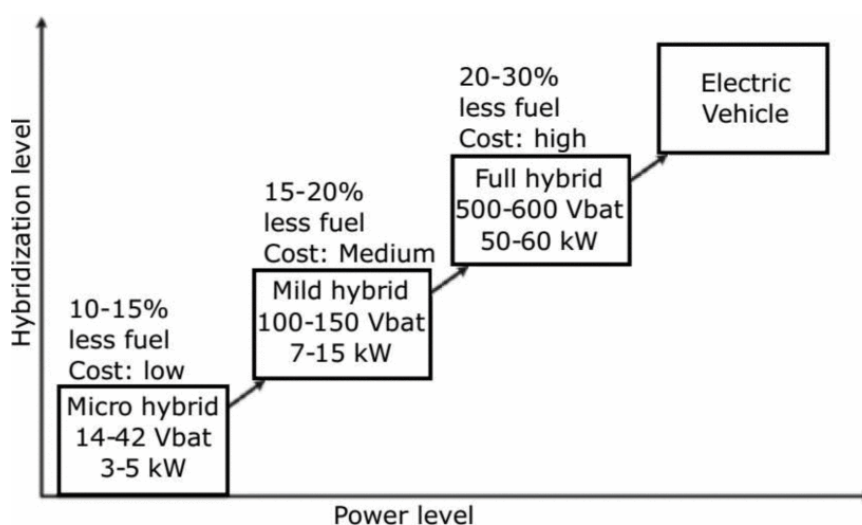


Figura 2.5: Confronto tra i livelli di ibridazione (costi e potenza)

Come precedentemente detto, è possibile effettuare un'altra importante classificazione dei veicoli ibridi in funzione dell'architettura del powertrain:

- 1) "ibrido parallelo",
- 2) "ibrido serie" (o "elettrica con range extender"),
- 3) "ibrido serie-parallelo".

Questa distinzione riguarda il modo in cui i flussi di potenza erogati dai motori termico ed elettrico si combinano, e ha anche implicazioni sulla possibilità di avere, eventualmente, propulsione esclusivamente elettrica.

Ibrido parallelo: Nella configurazione ibrido parallelo, fig. 2.6, presente sulla maggior parte dei veicoli ibridi in circolazione, entrambi i motori sia l'elettrico che il termico, contribuiscono alla propulsione del veicolo. La potenza per la trazione può provenire indipendentemente dal motore a combustione interna, dal motore elettrico, o da una combinazione di entrambi e pertanto la trazione può essere solo elettrica, solo termica o l'unione di entrambi. Le batterie possono essere ricaricate tramite la frenata rigenerativa, garantita dal motore elettrico, o tramite la produzione di corrente garantita dal motore termico [18,20,21].

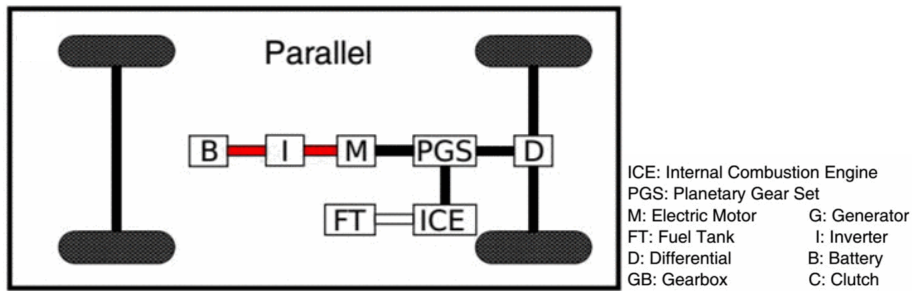


Figura 2.6: Configurazione ibrido parallelo

Ibrido serie: Nella configurazione ibrido serie il motore a combustione interna di bordo, spesso definito generatore, viene utilizzato per generare elettricità che viene trasferita al motore elettrico o stoccata in un pacco batterie come evidenziato in fig. 2.7 [18,20,21]. Definito molto spesso “range extender” è uno schema costruttivo in cui il motore termico è utilizzato per ricaricare in moto le batterie così da estendere l’autonomia totale del veicolo. Pertanto in questo tipo di vetture ibride il motore termico è meccanicamente scollegato alle ruote per trasmettere la trazione e assolve unicamente il compito di generare la corrente elettrica, o per alimentare il motore elettrico o per ricaricare le batterie. Il motore elettrico è quindi l’unico responsabile della trazione e attinge l’energia necessaria al suo sostentamento o dalle batterie, o dal motore termico, o da entrambi quando viene richiesta una grande quantità di energia. In alternativa quando non è richiesta grande quantità di energia l’energia superflua viene utilizzata per ricaricare le batterie.

Per poter beneficiare del massimo rendimento e ridurre al minimo le perdite di trasformazione, i motori a combustione interna in questo tipo di soluzione vengono progettati per girare sempre a un numero di giri ottimale corrispondente alla massima efficienza, evitando le continue accelerazioni e decelerazioni. Al contrario i motori elettrici, non soffrendo dal punto di vista dell’efficienza al variare del numero di giri motore, vengono fatti operare lungo tutto l’arco di regimi di rotazione (potendo contare su un’alta coppia già da zero giri motore). Nella conversione energetica termica-elettrica-cinetica però una buona parte dell’energia viene persa facendo crollare l’efficienza di questo tipo schema costruttivo. Ecco perché l’ibrido serie si è dimostrato ideale in quei veicoli che necessitano di continue frenate e ripartenze (guida in città) mentre risulta poco adatto in quei veicoli che viaggiano a velocità costanti o elevate dove prevalgono gli ibridi con trasmissione diretta, meccanica o elettrica [22].

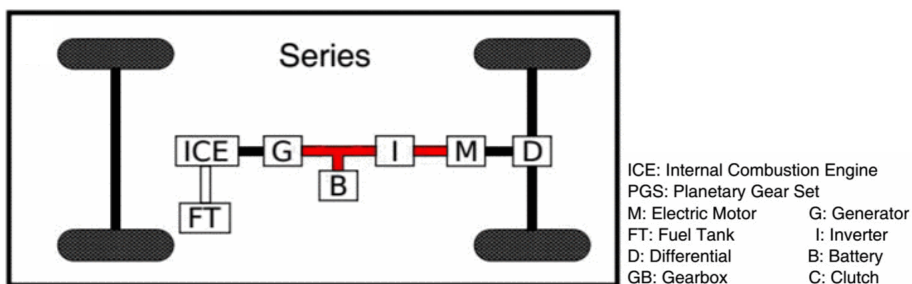


Figura 2.7: Configurazione ibrido serie

Ibrido serie-parallelo: Nello schema costruttivo misto troviamo, infine, la combinazione dei due schemi precedenti. Il complesso sistema, infatti, si compone di due macchine elettriche (un generatore e un motore elettrico) e di un motore termico (benzina o diesel) [23]. La modalità costruttiva con la quale vengono collegate queste tre unità propulsive può variare da veicolo a veicolo. L’architettura attualmente più diffusa e collaudata è quella della Toyota Prius indicata con HSD (Hybrid Synergy Drive) in cui

l'accoppiamento meccanico tra il motore termico, le due macchine elettriche e l'albero di trasmissione finale è stato realizzato tramite un rotismo epicicloidale e un riduttore (fig. 2.8).

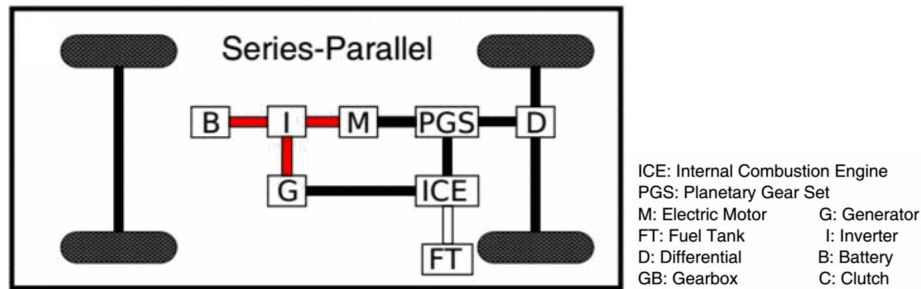


Figura 2.8: Configurazione ibrido serie-parallelo

Nonostante presenti i vantaggi di entrambe le precedenti configurazioni (ibrido serie e ibrido parallelo), il design di un HEV serie-parallelo è molto più complicato e costoso [20]. Tuttavia, considerando i vantaggi delle tecnologie di controllo, alcuni HEV moderni preferiscono adottare questo sistema [21,24].

2.2.1 Il mercato delle auto ibride in Italia

Il 2017 è stato un anno di crescita importante per quanto riguarda le immatricolazioni di auto ibride in Italia in quanto sono state vendute 66.760 auto ibride, con un incremento del 71% rispetto al 2016 (la crescita era stata del 50%), continuando dunque un trend di crescita che dura dal 2010.

In particolare le auto ibride che montano un motore termico a benzina sono quelle più presenti: 66.430 a benzina contro le 330 con motore diesel.

La scelta cade principalmente sulle ibride plug-in, la perfetta via di mezzo tra scelta termica ed elettrica, garantendo ottime distanze con il motore elettrico ma cancellando "l'ansia da colonnina" che affligge le auto elettriche.

I modelli di auto ibride più vendute in Italia evidenziano la dominante presenza del marchio Toyota (Prius, Yaris, C-HR, Auris, RAV4) che per primo ha creduto nelle potenzialità di questa nuova tecnologia. A partire dal lontano 1997 (primo modello della Prius), Toyota ha venduto in tutto il mondo ben 10 milioni di vetture ibride. Toyota è presente sul mercato Italiano anche con il marchio di lusso Lexus.

Di seguito una rapida carrellata delle auto ibride proposte dalle diverse case automobilistiche.

AUDI: La casa tedesca offre un ampio ventaglio di auto ibride, plug-in e mild. Su A3 è disponibile la soluzione plug-in, con un motore benzina 1.4 TFSI e-tron da 252 cavalli. Disponibile anche la SUV Q7 con motore ibrido plug-in, ma in versione diesel, con un 3.0 TDI e-tron. Molto più ampia la scelta nel caso di micro hybrid, con A4 (in tutte le sue versioni), A5 (berlina coupè e cabrio), A7 e la nuova A8.

BENTLEY: Anche chi cerca auto lussuose ha la possibilità di orientare la propria scelta su motorizzazione ibride. È il caso di Bentley, che propone la sua SUV Bentayga in versione ibrida plug-in che affianca al poderoso V6 un motore elettrico in grado di garantire una percorrenza di circa 50 km in modalità completamente elettrica.

BMW: è stata una delle prime case a proporre soluzioni ibride sia per la città che sportive. Ampia l'offerta di ibride plug-in, disponibili su 330e, 530e, 740e e X5 xDrive 40e con propulsori benzina 2.0 da 252 a 313 cavalli. La scelta più sportiva di BMW è senza dubbio la i8, di cui è stato presentato un restyling e una versione cabrio recentemente, che monta un propulsore 1.5 benzina. Disponibile anche la Serie 2 in versione ibrida plug-in, la 225xe Active Tourer, sempre con il 1.5 benzina.

DS: Il Marchio premium di PSA offre, attualmente la sola DS5, nella variante Hybrid Sport Chic, con trazione integrale e 200 cavalli complessivi. Per la parte termica è stato scelto un 2.000 4 cilindri diesel. Nel 2019 è atteso l'arrivo del SUV DS7 in versione ibrida, la E-Tense da 300 cavalli e circa 50 km in modalità elettrica.

FORD: il Marchio offre una sola scelta ibrida, la berlina Mondeo, disponibile con un motore 2.0 benzina da 187 cavalli. Il programma di Ford è quello di accoppiare al motore benzina un'unità elettrica per la frenata rigenerativa.

HONDA: Dal Giappone arriva una delle auto ibride più performanti disponibili sul mercato, la nuova NSX, disponibile in sola versione ibrida e che monta un motore benzina v6 3.5 e 3 motori elettrici, uno tra il motore e il cambio e due per le ruote anteriori. Potenza complessiva di 573 cavalli.

HUNDAY: La Casa coreana è l'unica a poter proporre sulla stessa carrozzeria ben 3 motorizzazioni: ibrida, ibrida plug-in ed elettrica. È la Ioniq, certamente uno dei prodotti più interessanti nel mercato. Il motore, nelle versioni Hybrid e Plug-in Hybrid, è un 1.6 benzina che, in coppia con il motore elettrico, garantisce una potenza complessiva di 141 cavalli.

INFINITI: Strettamente collegato con Nissan, di cui Infiniti rappresenta il mercato premium, l'offerta ibrida è votata principalmente alla sportività. Su Q50 e Q70 è montato un motore termico V6 3.500 cc che, insieme al motore elettrico, eroga una potenza di 364 cavalli. Su Q50 è anche disponibile la trazione integrale.

KIA: Sono due i modelli che offrono la motorizzazione ibrida per Kia, ovvero la SUV Niro e la berlina/station wagon Optima. Nel caso della Niro, il motore termico utilizzato è un 1.6 quattro cilindri benzina con una potenza complessiva di 141 cavalli in soluzione ibrida. Su Optima berlina e station wagon il motore scelto è un 2.0 benzina accoppiato a un motore elettrico da circa 50 km di autonoma in versione plug-in hybrid.

LAND ROVER: i modelli Range Rover Sport e Range Rover sono entrambi disponibili con unità propulsive ibride plug-in accoppiate a motori benzina. Potenza complessiva di 404 cavalli.

LEXUS: Anche in questo caso parliamo di una divisione premium con Lexus che presenta un ampio ventaglio di scelte ibride berline, SUV e sportive. CT, IS, LS, GS le SUV NX e RX e le coupè RC e LC sono il listino offerto da Lexus.

MERCEDES BENZ: Mercedes nel suo listino propone auto ibride plug-in e scelte mild hybrid. Partendo dalle plug-in, sono disponibili Classe C, GLC, GLC Coupè e GLE che montano motori benzina insieme al motore elettrico. Diversa la scelta per la C 300 h, una full hybrid con motore diesel e 231 cavalli complessivi. Parlando di mild hybrid, Mercedes ha disponibile, attualmente, la CLS 450 4Matic da 367 cavalli.

MINI: La scelta ibrida plug-in per il marchio inglese ricade sulla Countryman, la SUV, nella versione Cooper S All4. La parte termica è, come consuetudine, offerta dal 1.5 BMW in abbinamento al motore elettrico. Per la potenza complessiva si supera la soglia dei 200 cavalli.

MITSUBISHI: In listino, per quanto riguarda il marchio giapponese, è disponibile una sola scelta per chi cerca auto ibride. Si tratta della Outlander 2.0 Mivec 4 ruote motrici ibrida plug-in. La SUV ibrida, in questa configurazione, si presenta con un 2.0 benzina che, insieme al motore elettrico, arriva a 204 cavalli di potenza totale.

POLESTAR: il primo prodotto del neonato brand frutto del lavoro di Volvo e Geely è la Polestar 1. Tra le ibride è senza dubbio quella che offre, almeno da quanto comunicato dalla Casa, ben 150 km di autonomia. Un'auto decisamente sportiva, visti i 600 cavalli e ben 1.000 Nm di coppia.

PORSCHE: Uno dei marchi di punta del gruppo Volkswagen sta cominciando la "svolta green" da qualche tempo. Attualmente in listino è disponibili con la Gran Turismo Panamera. Nella variante Sport Turismo, l'ibrido plug-in è disponibile sulla 2.9 4 E-Hybrid da 462 cavalli e la 4.0 Turbo S E-Hybrid da 680 cavalli.

RENAULT: La casa francese, decisamente molto presente sul mercato elettrico con Zoe, Tweezy e Kangoo, quando si tratta di ibride punta sulla soluzione mild hybrid. Nello specifico tale soluzione è proposta sulla Scénic dCi 8V 110 cavalli Hybrid Assist, dove il motore elettrico assiste il motore termico per ridurre consumi ed emissioni.

TOYOTA: Uno dei marchi più attivi nello sviluppo di motori ibridi, con lo storico modello Prius. Attualmente sono disponibili: Yaris 1.5 Hybrid, Rav4 2.5 Hybrid, C-HR, Prius, Prius+ e Auris. La Prius è disponibile anche in versione plug-in in attesa delle nuove generazioni di Auris e Rav4.

SUZUKI: Così come Renault, anche Suzuki punta principalmente su tecnologie mild hybrid che trova applicazione su diversi modelli. Baleno, Ignis e Swift, equipaggiano un propulsore il 1.2 da 90 cavalli insieme a una piccola unità elettrica di servizio. Il sistema mild hybrid di Suzuki si trova anche sul 1.0 boosterjet Hybrid S da 111 cavalli.

VOLKSWAGEN: 50 km di autonomia in modalità elettrica, 204 cavalli insieme a un motore termico 1.4 benzina. Questa la dotazione tecnica della Volkswagen Golf GTE, cugina della Audi A3. Il modello è ibrido plug-in, ricaricandosi grazie alle colonnine.

VOLVO: Tutte plug-in le versioni ibride della casa svedese. Partiamo dalla V60 (presto sul mercato), mentre sono già disponibili la XC60, XC90, S60 e V90. Le potenze disponibili grazie al motore T8 Twin Engine con trazione integrale AWD sono 392 e 402.

2.3 I powertrain elettrici

I veicoli a trazione elettrica pura (BEV-Battery Electric Vehicle) hanno attraversato una serie di sviluppi tecnologici prima di guadagnare la recente popolarità. Il continuo sviluppo delle tecnologie è fondamentale per poter sostenere la competizione con i veicoli a motore a combustione interna. Pertanto l'attenzione è stata rivolta al miglioramento delle tecnologie, in particolare della catena cinematica, delle batterie e delle infrastrutture di ricarica.

I BEV sono alimentati da una batteria ricaricabile e azionati esclusivamente da un motore elettrico. L'energia proviene dall'elettricità immagazzinata nelle batterie, che possono essere ricaricate dalla rete elettrica, quando il veicolo si ferma, o tramite frenata rigenerativa [13].

I layout delle configurazioni del sistema di alimentazione nei BEVs possono essere suddivisi in due categorie: configurazioni centralizzate (motore singolo) e configurazioni distribuite (multi-macchina). Le configurazioni centralizzate sono state le prime ad essere utilizzate, poiché provengono dalla stessa configurazione del veicolo convenzionale. Negli ultimi anni, i sistemi di trazione multi-macchina sono al centro della comunità di ricerca [25] perché possono lavorare in varie modalità operative e ottimizzare il sistema di alimentazione, rendendo il veicolo molto più flessibile.

Nella fig. 2.9 sono rappresentate alcune delle configurazioni più comuni, descritte brevemente di seguito [11,16,25,26]:

1. **Configurazione 1:** è composta da un motore elettrico, frizione, cambio e differenziale. La frizione in combinazione con il cambio consente al conducente di passare tra i diversi rapporti coppia-velocità. Questa configurazione è più comunemente utilizzata negli adattamenti da convenzionale a elettrico, poiché consente la conversione modificando un numero minimo di componenti.
2. **Configurazione 2:** semplifica la configurazione precedente sostituendo il cambio con una marcia fissa e, quindi, non ha bisogno di una frizione. Queste modifiche sono possibili perché i motori elettrici sono in grado di fornire una potenza costante su un'ampia gamma di valori di velocità. Ciò consente di ridurre sia le dimensioni che il peso dell'intero sistema.
3. **Configurazione 3:** questa configurazione è simile al concetto di veicoli a motore a combustione interna a trazione anteriore. Motore elettrico, ingranaggio fisso e differenziale sono posizionati direttamente sull'albero che è fissato all'albero di trasmissione della ruota, semplificando così il treno di potenza.

4. **Configurazione 4:** in questo caso sono presenti due motori elettrici. A parte meccanicamente, l'azione del differenziale in curva può essere fornita elettronicamente tramite i due motori che funzionano a velocità diverse.
5. **Configurazione 5:** per semplificare la trasmissione meccanica, il motore elettrico può essere posizionato vicino alla ruota, che è anche conosciuta come *In-Wheel Drive*. Tra il motore e la ruota è posizionata una marcia fissa, responsabile della riduzione della velocità e dell'aumento della coppia.
6. **Configurazione 6:** con l'obiettivo di semplificare tutta la trasmissione meccanica nel veicolo, il motore elettrico può essere collegato direttamente, senza ingranaggi, alla ruota motrice. Ciò consente di ottimizzare l'efficienza della trasmissione e rende la struttura più compatta. Tuttavia, è necessario utilizzare motori elettrici a coppia elevata per accelerare il veicolo a basse velocità.
7. **Configurazione 7:** si tratta di una configurazione centralizzata multi-macchina, in cui vengono utilizzati due diversi motori elettrici attraverso un ingranaggio planetario [25]. In questo sistema, uno dei motori è per alte velocità mentre l'altro è per coppie elevate. Pertanto, è possibile ottenere un'alta velocità a coppie basse e viceversa. Inoltre, si ottiene una migliore regione operativa e una migliore efficienza energetica.
8. **Configurazione 8:** si tratta di una configurazione distribuita multi-macchina, in cui i due assi vengono alimentati separatamente. Offre prestazioni più dinamiche, un migliore comfort di guida e una maggiore flessibilità nella progettazione strutturale [25], poiché ciascuno degli assi può essere sottoposto a trazione e controllato in modo indipendente. Inoltre, è possibile ridimensionare la richiesta di potenza aggiungendo più motori al sistema e persino evolvere verso una *In-Wheel Drive* su tutte e quattro le ruote [23].

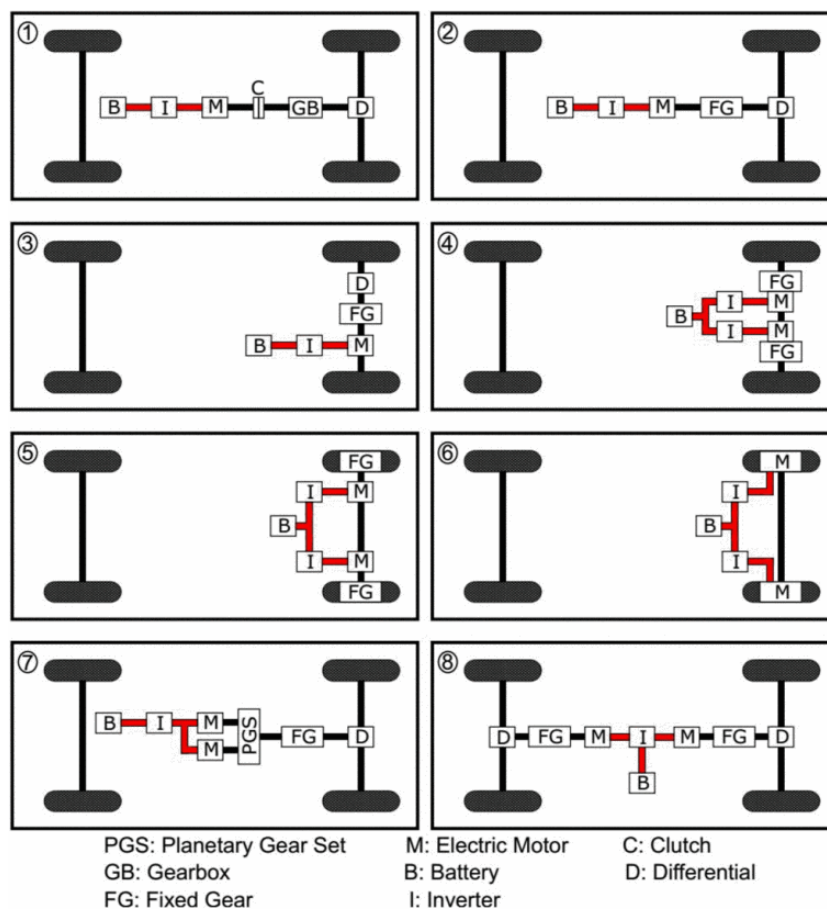


Figura 2.9: Configurazioni BEV

Sebbene la vendita della auto elettriche sia in crescita, al momento il numero di immatricolazioni non è paragonabile a quello delle auto ibride (nel 2017 le auto elettriche immatricolate sono state 1.945 contro le 66.760 immatricolazioni di auto ibride).

Di seguito alcuni modelli di auto elettriche pure (BEV): BMW i3 94Ah, Citroën C-Zero, Citroën E-Mehari, Ford Focus Electric, Hyundai IONIQ Electric, KIA Soul EV, Mercedes-Benz Classe B Electric Drive, Mitsubishi i-MiEV, Nissan e-NV200, Nissan Leaf, Peugeot iOn, Renault Kangoo Z.E., Renault Zoe, Smart ForTwo E.D., Tesla Model S, Tesla Model X, Volkswagen e-Golf, Volkswagen e-up.

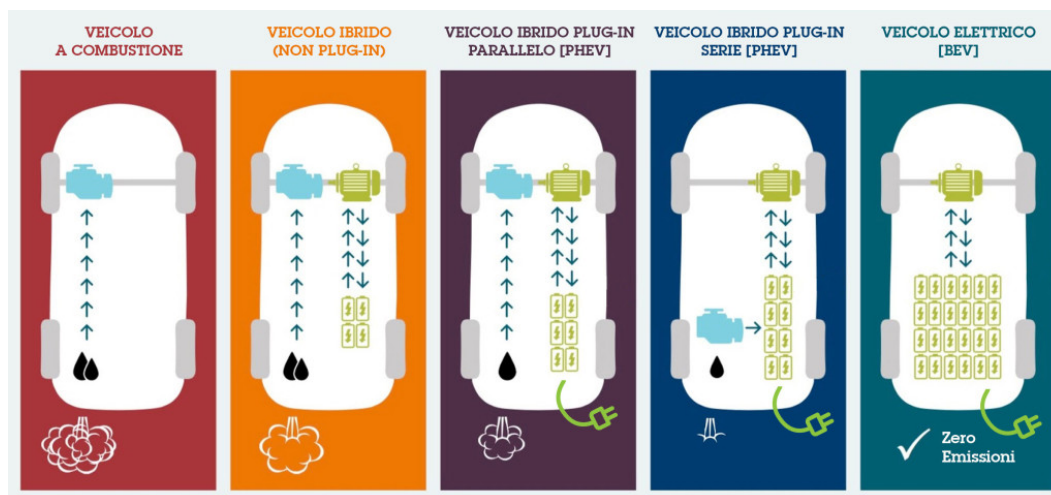


Figura 2.10: Confronto tra i veicoli convenzionali, ibridi, elettrici

2.3.1 Stato dell'arte delle batterie per applicazioni nei trasporti

Le batterie rappresentano il cuore del sistema di propulsione dei veicoli ibridi e dei veicoli elettrici e, specie per i BEV, la distanza percorribile ovvero l'autonomia del veicolo, è direttamente proporzionale alla capacità della batteria (valore espresso in Ah che indica la quantità di energia accumulata).

Di seguito si riporta una breve descrizione delle tecnologie di batterie utilizzate attualmente in ambito trasporti.

La prima e la più diffusa tipologia di batteria utilizzata nel settore dei trasporti è la **batteria al piombo acido (Pb-acid)** che rappresenta una tecnologia matura ed economica sebbene la bassa densità di energia, il peso e l'elevato impatto ambientale rappresentano aspetti negativi che ormai da anni hanno avviato un processo di ricerca verso altre tecnologie di accumulatori energetici.

Il vantaggio nell'uso della tecnologia al piombo è essenzialmente dovuto a: basso costo, larga disponibilità del piombo, semplicità, buona affidabilità e presenza di infrastrutture di servizio e di riciclaggio diffuse e ben consolidate. Di contro si hanno diversi aspetti negativi, quali una vita attesa abbastanza bassa, una densità di energia e di potenza non eccessivamente elevate (che comportano ampio ingombro superficiale) e la necessità di installare sistemi di ventilazione per l'eventuale produzione di idrogeno che si può avere ai morsetti durante la ricarica [27].

Nonostante la batteria al piombo abbia raggiunto una buona maturità sia tecnologica che commerciale sono ancora in corso attività di ricerca per migliorarne le prestazioni. Si cerca in particolare di aumentare il tempo di vita della batteria studiando nuove tipologie di elettrodi oltre che cercare di sviluppare sistemi ottimizzati di gestione (Battery Management Interface – BMI) e diagnostica per semplificare e migliorare la gestione della batteria [27].

Le **batterie a base di Nichel** come le **nichel/cadmio (Ni-Cd)** e **nichel/idruro metallico (NiMH)**, largamente diffuse fino a qualche anno fa grazie ad alcuni vantaggi rispetto alle batterie al piombo (maggiore durata di

vita, robustezza, affidabilità, migliore comportamento alle basse temperature) sono a tutt'oggi in fase di declino per i problemi ambientali legati alla tossicità dei suoi componenti (presenza del cadmio) e alla mancanza di centri di smaltimento [28,29]. L'effetto memoria della batteria a base Nichel ha dimostrato la poca adeguatezza per l'applicazione nei veicoli elettrici pertanto lo sviluppo di questa tecnologia è da considerarsi praticamente fermo.

Le **batterie ZEBRA (Na-NiCl₂)** utilizzano sale di sodio come elettrolita e raggiungono una temperatura di funzionamento estremamente elevata che va da 245 a 350°C. Presentano alta densità di energia e di potenza, particolarmente adatte per l'applicazione nei veicoli elettrici. Tuttavia, l'elevata temperatura operativa presenta problemi di gestione termica e di sicurezza [30].

L'introduzione delle **batterie al litio**, che sono una delle tecnologie più promettenti, rappresenta una svolta per i veicoli elettrici grazie ai seguenti vantaggi: alta densità di energia e di potenza, leggerezza, costo, assenza di tossicità e capacità di accettare ricariche rapide.

Le batterie al litio dominano il gruppo più recente di veicoli elettrici: Nissan Leaf, Mitsubishi i-MiEV, Tesla Model S e Chevrolet Volt (attualmente considerati i veicoli elettrici più performanti che utilizzano pacchi batterie agli ioni di litio). Tra i vari chimismi di batterie a base di litio si distinguono: batterie ioni di litio (Li-ion), batterie litio polimeri (LiPo) e batterie litio-ferro-fosfato (LiFePO₄). La batteria LiPo può essere modellata per ottimizzarne il packaging. La batteria LiFePO₄ offre un'alta densità di potenza, un ciclo di vita più lungo e una maggiore sicurezza, ma con gli svantaggi di una minore densità di energia rispetto alla batteria agli ioni di litio [31]. Tuttavia l'attuale tecnologia di batterie al litio presenta un importante limite legato al rischio di incendio ed esplosione [32]. L'attuale tecnologia delle batterie a base di litio non è completamente matura, ma sicuramente detiene il potenziale per essere la batteria ricaricabile perfetta per le future applicazioni nei veicoli elettrici.

Esistono, infine, alcune tecnologie di batterie in fase sperimentale, che offrono prestazioni superiori. Queste batterie sono quelle al **litio-zolfo (Li-S)**, **zinco-aria (Zn-air)** e al **litio-aria (Li-air)**. La batteria Li-S presenta una densità di energia relativamente alta nella categoria delle batterie a base di litio e un evidente vantaggio di basso costo dovuto all'uso di zolfo. Tuttavia, la batteria Li-S ha un alto tasso di scarica e un breve ciclo di vita [33]. Un'altra potenziale candidata per la futura batteria da impiegare nei veicoli elettrici è la batteria Zn-air. Questo tipo di batteria ha una densità di energia molto elevata, superiore alla batteria a base di litio ma presenta inconvenienti quali la bassa densità di potenza e il breve ciclo di vita. Allo stesso modo, le batterie Li-air sono ancora in fase prototipale e non sono state commercializzate. Tuttavia, l'elevata densità teorica di oltre 1700 Wh/kg consente di competere con il convenzionale motore a combustione interna [34]. L'attuale ricerca è focalizzata sullo sviluppo di questa tipologia di batteria che consentirebbe di estendere il range di autonomia dei veicoli elettrici.

La tabella 2.1 mostra il confronto tra le tecnologie di batterie disponibili per l'applicazione nei BEV e riporta le principali caratteristiche delle batterie: tensione nominale, densità di energia, potenza specifica, ciclo di vita, percentuale di auto-scarica al mese, effetto memoria, temperatura operativa e costo di produzione per kWh.

Tabella 2.1 – Confronto tra diverse tipologie di batterie per veicoli elettrici [22,34,31,33,35,36]

Battery type	Nominal Voltage (V)	Energy density (Wh/kg)	Volumetric en. density (Wh/L)	Specific power (W/kg)	Life cycle	Self discharge (% per month)	Memory effect	Operating temperature (°C)	Production cost (\$/kWh)
Pb-acid	2.0	35	100	180	1000	< 5	No	-15 to + 50	60
Ni-Cd	1.2	50-80	300	200	2000	10	Yes	-20 to +60	230-300
Ni-MH	1.2	70-95	180-220	200-300	< 20	20	Rarely	-20 to + 60	200-250
ZEBRA	2.6	90-120	160	155	> 1200	< 5	No	+245 to + 350	230-345
Li-ion	3.6	118-250	200-400	200-430	2000	< 5	No	-20 to + 60	150
LiPo	3.7	130-225	200-250	260-450	> 1200	< 5	No	-20 to + 60	150
LiFePO4	3.2	120	220	2000-4500	> 2000	< 5	No	-45 to + 70	350
Zn-air	1.65	460	1400	80-140	200	< 5	No	-10 to + 55	90-120
Li-S	2.5	350-650	350	-	300	8-15	No	-60 to + 60	100-150
Li-Air	2.9	1300-2000	1520-2000	-	100	< 5	No	-10 to + 70	-

2.3.2 Tipologie di ricarica elettrica

Come precedente scritto, i veicoli puramente elettrici (BEV) ed i veicoli ibridi plug-in (PHEV) sono caratterizzati dalla possibilità di ricaricare le batterie installate a bordo tramite un dispositivo di ricarica (caricabatteria) che si rende necessario perché la rete elettrica è in corrente alternata (AC) mentre le batterie sono in corrente continua (DC); pertanto il caricatore è progettato per rettificare il livello di alimentazione AC dalla rete al livello di alimentazione DC adatto per la ricarica della batteria. Per eseguire questa operazione, un caricatore viene solitamente realizzato come convertitore o raddrizzatore AC/DC. In alcuni casi, ad esempio la stazione di ricarica rapida, è incluso un convertitore DC/DC aggiuntivo nel caricabatteria per una migliore conversione dell'energia. I caricabatteria possono essere installati a bordo del veicolo o fuori. Il caricatore di bordo è spesso progettato in dimensioni ridotte per ridurre il carico di peso del veicolo, ha una bassa potenza e può essere usato principalmente per una ricarica lenta. D'altra parte, il caricatore off-board (colonnina di ricarica) è presente solo in luoghi dedicati per fornire un servizio di ricarica veloce.

Esistono alcuni standard internazionali consolidati per la ricarica dei veicoli elettrici:

- SAE (Society of Automotive Engineers): Lo standard di ricarica SAE è suddiviso in pochi livelli, livello 1, livello 2 e livello 3 per AC e DC. La ricarica AC viene effettuata utilizzando il caricabatteria integrato sul veicolo. La ricarica in DC viene eseguita tramite la colonnina di alimentazione esterna.
- International Electromechanical Commission (IEC): Mentre lo standard di ricarica SAE utilizza i "livelli" per classificare i valori di carica, lo standard IEC utilizza "tipi" e "modalità" per la standardizzazione. La norma IEC 61851-1 introduce quattro "modalità" di ricarica dalla rete elettrica esterna (le prime tre sono per la ricarica AC e la quarta modalità è per la ricarica DC). La norma IEC 62196-2 classifica, invece, i sistemi di connessione distinguendoli in "tipi".
- CHAdeMO: Questo standard è stato introdotto come standard di ricarica rapida DC progettato per i moderni veicoli elettrici con lo scopo di accelerare il processo di sviluppo dei veicoli elettrici e risolvere il problema dell'ansia dei conducenti di veicoli elettrici.

In Italia il "Piano Nazionale Infrastrutture per la ricarica dei veicoli alimentati ad energia Elettrica" (PNire) [37] per le stazioni di ricarica prende a riferimento la norma IEC 61851-1, che prevede un'elettronica di controllo basata su un sistema di comunicazione "universale" tra la stazione ed il veicolo attraverso un circuito PWM (Pulse Width Modulation), necessario per garantire la sicurezza del processo di ricarica, sia per le persone che per evitare danni al pacco batterie del veicolo.

Le tipologie di ricarica sono diverse e possono essere classificate come segue in base alla capacità di erogazione dell'energia:

- Normal power (Slow charging) – fino a 3,7 kW;
- Medium power(Quick charging) – da 3,7 a 22 kW;
- High power (Fast charging) – superiore a 22 kW.

La norma IEC definisce 4 *modi standard* che riflettono i principali metodi di ricarica: tre per corrente alternata (modi 1, 2 e 3) e uno per corrente continua (modo 4).

- Il **Modo 1** consiste nel collegamento diretto del veicolo elettrico alle normali prese di corrente. Non è prevista, quindi, la presenza del Control Box. E' una modalità adatta solo a bici elettriche e a scooter. Non è applicata per le auto elettriche.
- Il **Modo 2** (*ricarica sicura domestica/aziendale, lenta o veloce*). Sul cavo di alimentazione del veicolo è presente un dispositivo denominato Control Box (o sistema di sicurezza PWM) che garantisce la sicurezza delle operazioni durante la ricarica, le prese utilizzabili sono quelle domestiche o industriali fino a 32° (sia monofase che trifase – max 22 kW).
- Il **Modo 3** (*ricarica per ambienti pubblici, lenta o veloce*). E' il modo obbligatorio per gli ambienti pubblici, la ricarica deve avvenire tramite un apposito sistema di alimentazione dotato di connettori specifici, è presente il sistema di sicurezza PWM, la ricarica può essere di tipo lento (16A, 230V) oppure rapido (fino a 32A, 400V).
- Il **Modo 4** (*ricarica diretta in corrente continua Fast DC*). E' la ricarica in corrente continua fino a 200A, 400V. Con questo sistema è possibile ricaricare i veicoli in alcuni minuti, il caricabatterie è esterno al veicolo (nella colonnina). Esistono due standard: CHAdemo (Giapponese) e CCS (Europeo).

In fig. 2.11 sono raffigurati i 4 Modi appena citati.

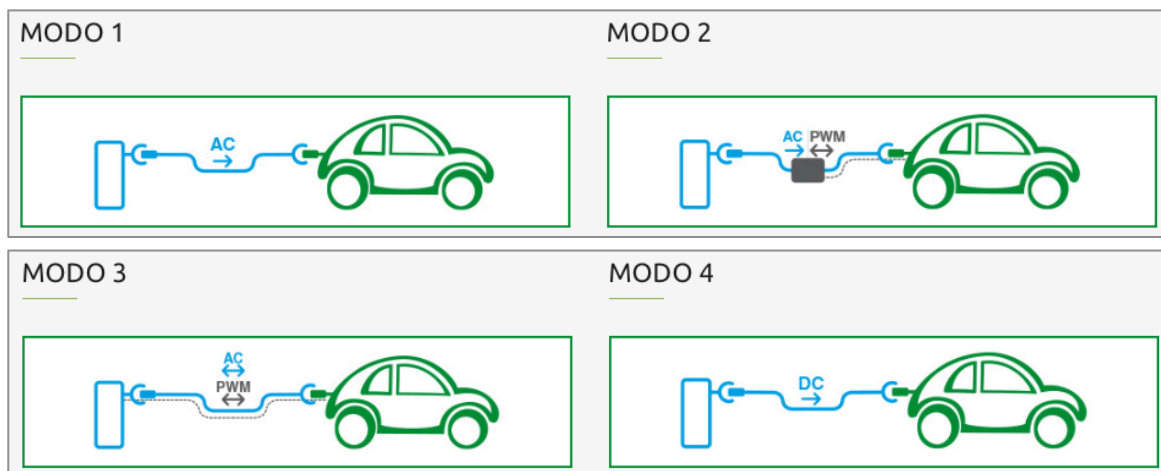


Figura 2.11: Modalità di ricarica elettrica

Per la ricarica dei veicoli elettrici in corrente alternata AC (Modo 2 e Modo 3) sono previste quattro tipologie di connettori: **Tipo 1** (si trova solo lato veicolo), **Tipo 2** (si trova sia lato veicolo sia lato colonnina), **Tipo 3A** e **Tipo 3C** (sono connettori solo lato colonnina) (fig. 2.12).

- Il connettore di **Tipo 1**, chiamato anche connettore *Yazaki* (dal nome del produttore), è ampiamente diffuso in Nord America per la ricarica dei veicoli elettrici; è adatto per la ricarica in corrente alternata monofase e presenta cinque contatti: due per l'alimentazione elettrica, uno per la messa a terra e due per i segnali di controllo.

- Il connettore di **Tipo 2** è stato progettato per correnti alternate da 16 A monofase a 250 V e per correnti alternate da 63 A trifase a 480 V e presenta 2 contatti aggiuntivi rispetto al connettore di Tipo 1.
- Il connettore di **Tipo 3A**, chiamato anche *Scame*, può erogare corrente trifase fino a 32 A ed è stato utilizzato in alcuni test per la formula E. Presenta diversi interruttori sulla presa, obbligatori in paesi europei e raggiunge una corrente di 16 A monofase AC; inoltre, presenta quattro contatti, tre di potenza e uno di controllo.
- Il connettore di **Tipo 3C**, simile al precedente, presenta due ulteriori contatti per la ricarica rapida in corrente trifase fino a 63 A.

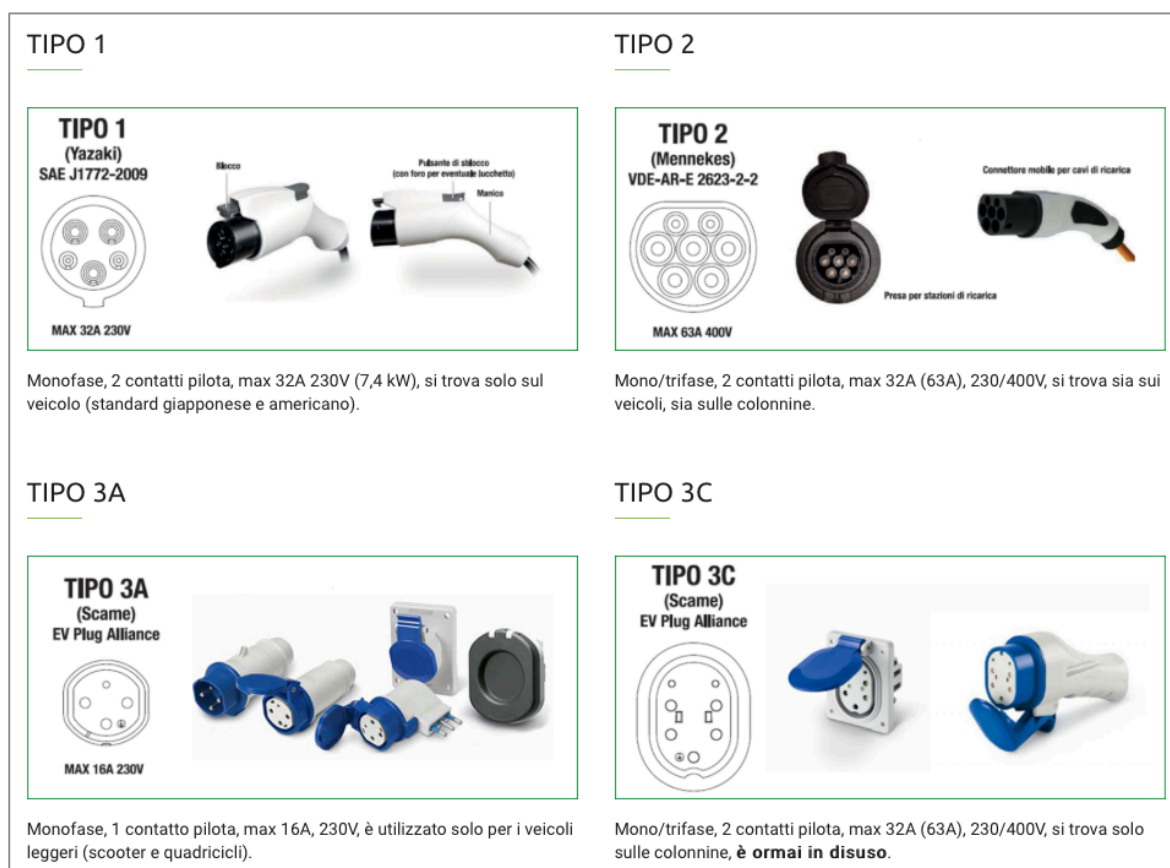


Figura 2.12: Tipologia di connettori di ricarica in corrente alternata AC

Per la ricarica dei veicoli elettrici in corrente continua DC (Modo 4) sono previsti due connettori standard: *CHAdEMO* e *CCS COMBO2* (fig. 2.13):

- Il connettore **CHAdEMO**, diffuso per lo più in Giappone e in alcuni paesi europei, utilizza il protocollo CAN-bus per la trasmissione dei segnali di controllo. Presenta 8 contatti: 2 contatti di potenza, 1 per la messa a terra e 5 per le funzioni di controllo. Lavora solo in corrente diretta con valori fino a 200 A e 600 V di tensione. Nella seconda versione di questo tipo di connettore, il **CHAdEMO 2.0**, la tensione e la corrente erogate sono state innalzate fino a valori di 1000 V e 400 A, che consentirà, in linea teorica, di ricaricare con una potenza di 400 kW.
- Il connettore **CCS COMBO2** permette la ricarica sia in AC (Tipo 2 Modo 3), sia in DC, con valori di corrente che arrivano fino a 200 A. È il connettore ideale per la ricarica rapida del veicolo, ragion per cui, si sta ampiamente diffondendo nella maggior parte del mondo, eccetto in Giappone, dove è ancora usato il connettore CHAdEMO.



Figura 2.13: Tipologia di connettori di ricarica in corrente continua DC

Nel diagramma riportato in fig. 2.14 sono sintetizzate le informazioni sopra riportate.

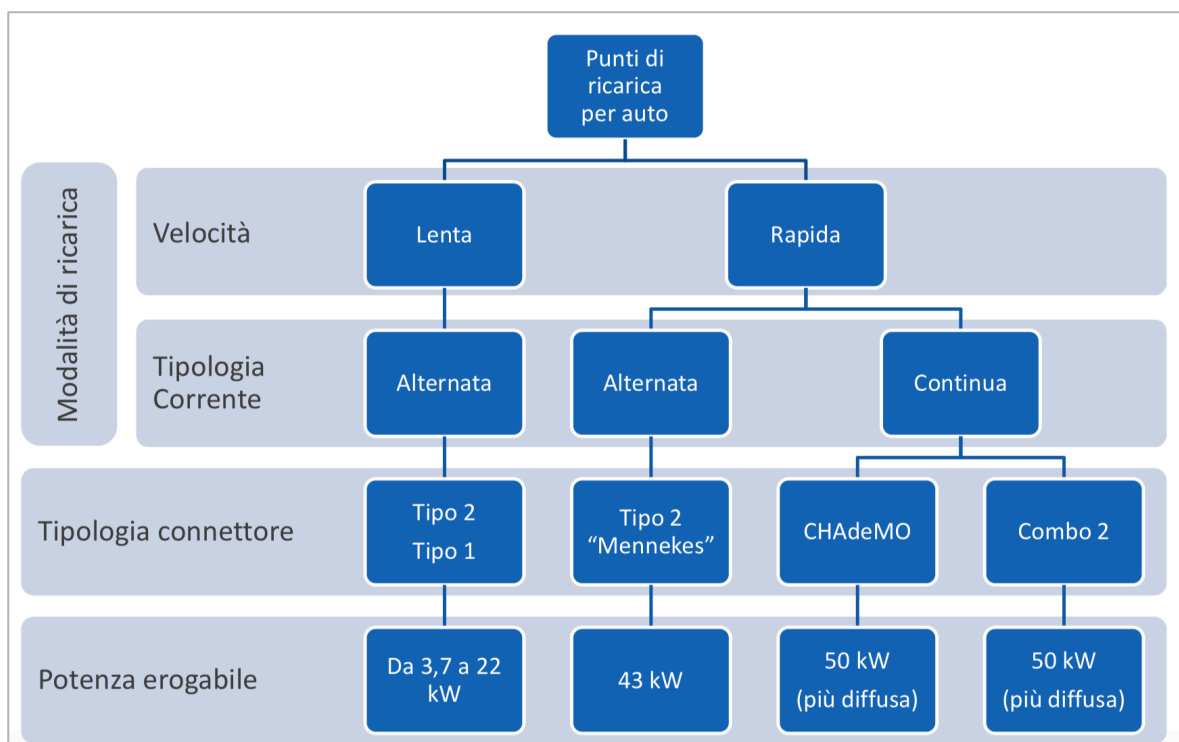


Figura 2.14: Punti di ricarica (sintesi caratteristiche tecniche)

Infine, in fig. 2.15 sono rappresentate le potenze impiegate presso le colonnine ed i relativi tempi di ricarica. I punti di ricarica da 3 kW sono economici (circa 3.000,00 €) ma richiedono 8 ore per la ricarica; vengono utilizzati in ambito domestico o in parcheggi dove l'auto deve sostare per tutta la giornata. Infrastrutture di ricarica da 50 kW sono molto costose (circa 25.000,00 € più 20.000,00 € di costi d'impianto), ma riducono i tempi di ricarica a 20 minuti. Una potenziale applicazione di queste infrastrutture può essere nelle direttrici autostradali o in zone caratterizzate da alti flussi.

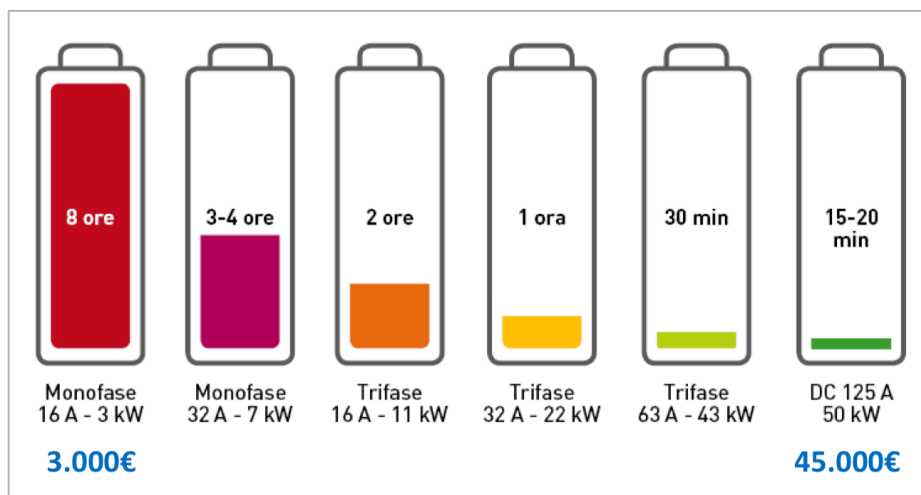


Figura 2.15: Confronto tra potenze e relativi tempi di ricarica

A titolo d'esempio, si riportano di seguito le modalità di ricarica e il tipo di connettore utilizzato di alcune delle auto elettriche più vendute: *Tesla Model S*, *Nissan Leaf* e *BMW I3* (fig. 2.16).

1. La *Tesla Model S* è dotata di un connettore di ricarica di TIPO 2. Il caricabatterie interno al veicolo accetta al massimo 16A di corrente con 400V di tensione trifase, per una potenza massima di ricarica di 11 kW. Collegando il veicolo alle apposite stazioni Tesla Supercharger è possibile usufruire della ricarica rapida, che avviene in corrente DC in circa 30 minuti, alla potenza massima di 120 kW, oppure è possibile sfruttare l'adattatore CHAdeMO che eroga una potenza massima di 50 kW. In Italia il costo della ricarica presso le stazioni Supercharger è di 0,25 €/kWh; tuttavia Tesla fornisce ai suoi clienti 400kWh gratuiti annui, che garantiscono un'autonomia di circa 1600 km.
2. La *Nissan Leaf*: mantiene lo schema giapponese per i connettori, utilizzando il TIPO 2 per la ricarica in Modo 2 e Modo 3 in corrente alternata, mentre utilizza il connettore CHAdeMO per la ricarica a 40 kW in corrente continua. Il caricatore di bordo ha una potenza massima di 7,4 kW e gestisce una corrente massima di 32 A e una tensione monofase di 230 V. Con il caricatore casalingo da 10 A servono circa 18 ore per la ricarica completa delle batteria, mentre con le colonnine pubbliche in AC da 11 o 22 kW il tempo di ricarica si riduce a circa 6 ore. In corrente continua, alla colonnina da 50 kW, la ricarica avviene a 43/45 kW, impiegando circa 45 minuti per portare la batteria ad una carica dell'80%.
3. La *BMW I3* dispone di un connettore di ricarica di Tipo 2 e di un CCS Combo2; il primo consente di effettuare ricariche in corrente alternata AC (Modo 2 e Modo 3), mentre il secondo consente la ricarica veloce in corrente continua DC (Modo 4). Il caricabatteria interno del veicolo accetta al massimo 32 A di corrente ad una tensione di 230 V monofase (7,4kW), oppure 16 A a 400 V trifase (11 kW). Il veicolo può essere ricaricato da casa o dalle colonnine pubbliche. I tempi di ricarica della batteria da casa (in corrente alternata) variano da circa 8 ore fino a circa 6 ore, a seconda che si utilizzi una normale presa Shucko oppure la BMW i WALLBOX. Alle stazioni di ricarica pubbliche, la carica può avvenire in corrente alternata AC, con tempi che variano da 6 a 3 ore a seconda che si utilizzi o meno il dispositivo di ricarica rapida, oppure in corrente continua DC, con un assorbimento di potenza pari a 50 kW e tempi di ricarica che si assestano sui 30 minuti. BMW ha siglato un accordo con Enel riguardante i piani tariffari per la ricarica presso le stazioni elettriche; sono previsti due piani: il piano FLAT, che con 30€ mensili consente di ricaricare illimitatamente il veicolo in tutto il territorio nazionale, e il piano A CONSUMO, che prevede un prezzo di 0.318 €/kWh con validità di 12 mesi.



Figura 2.16: Tesla Model S, Nissan Leaf, BMW i3

2.4 I powertrain elettrici a fuel cell

Come già visto precedentemente nel Cap. 1 i veicoli elettrici possono utilizzare anche sistemi di produzione di energia innovativi come le celle a combustibile (Fuel Cell – FC). Fondamentalmente sono due le possibili modalità di utilizzo delle FC su questi veicoli [9]:

Architettura Total FC: in questo caso la FC viene utilizzata come unica fonte di energia per l'alimentazione del motore elettrico.

Architettura ibrida: in questo caso, come accennato nel paragrafo 1.3.2 i veicoli elettrici, pur mantenendo la propulsione elettrica, possono essere chiamati "ibridi elettrici a FC" (HEFCV – Hybrid Electric Fuel Cell Vehicle) in quanto oltre alle batterie si introducono a bordo altre fonti di energia quali le celle a combustibile (FC) e/o i supercapacitori (SC). La potenza di ciascuno di questi elementi (batterie, FC e SC) determina la fonte energetica principale e definisce il livello di ibridazione del veicolo.

Come già detto in precedenza (vedi Cap. 1) la tipologia di FC usata in ambito trasporti è quella di tipo polimerico (PEFC) in quanto presenta molteplici vantaggi rispetto alle altre tipologie di FC (facile avvio, alta densità di potenza, dimensioni/ingombri relativamente piccole, struttura semplice, robustezza contro urti e vibrazioni).

In fig. 2.17 è possibile osservare come variano le configurazioni dei veicoli elettrici ibridi a FC (HEFCV) in funzione del contributo e della taglia della FC. Si passa da un livello di ibridazione minimo, in cui la FC svolge il ruolo di APU (Auxiliary Power Unit), al livello chiamato "Range extender" in cui la cella a combustibile svolge il ruolo di caricabatteria a bordo, fino a giungere al livello "Total FC" in cui la FC rappresenta la fonte di energia primaria.

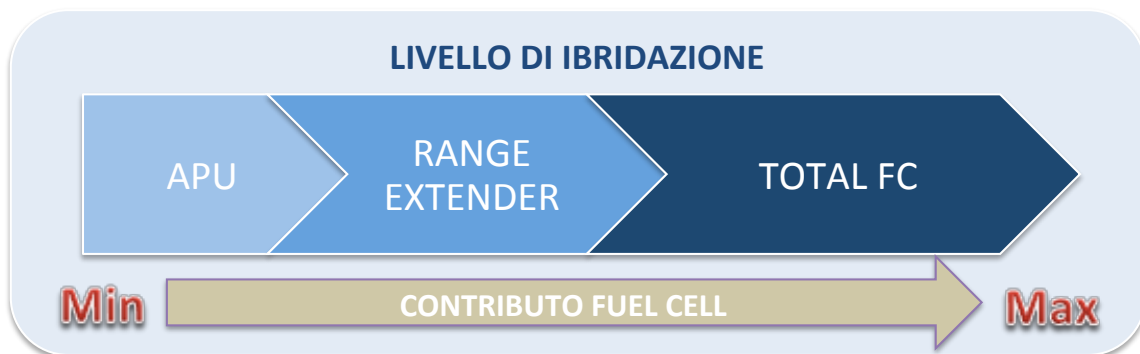


Figura 2.17: Livelli di ibridazione dei veicoli a FC

Nelle fig. 2.18 a), b) e c) sono riportate le architetture APU, Ibrida e Total FC rispettivamente:

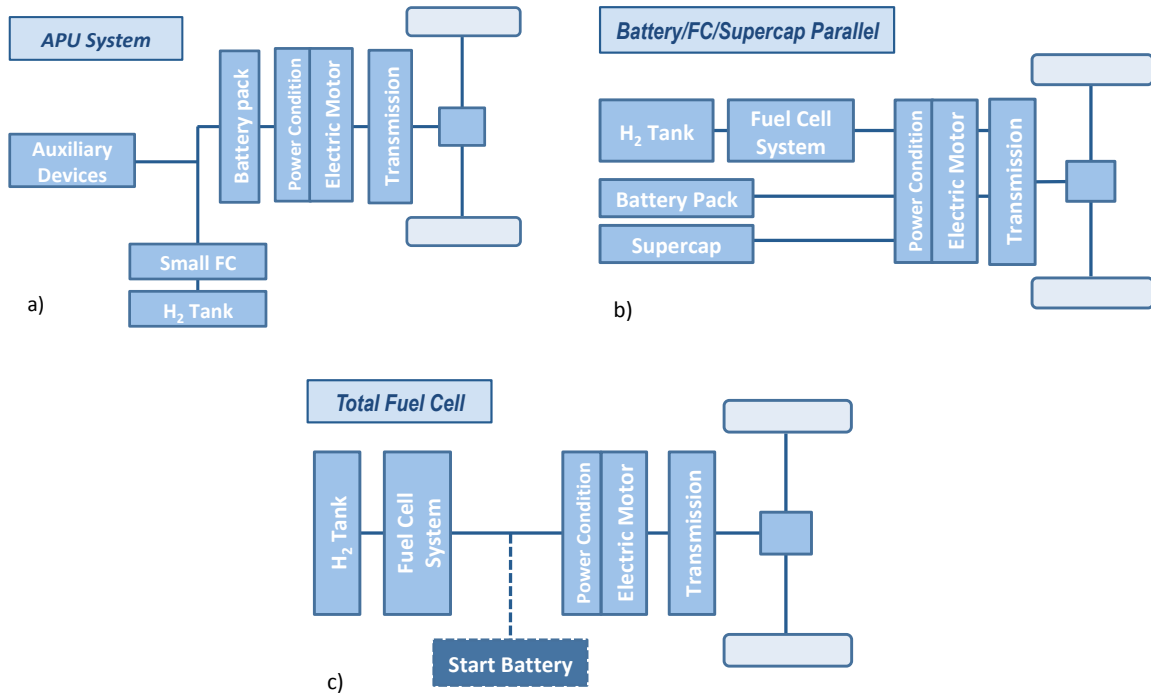


Figura 2.18: Architetture dei veicoli a FC: APU (a), Ibrida (b), Total FC (c)

Per ottenere benefici da un HEV, i flussi energetici forniti dalle diverse sorgenti di energia presenti all'interno del sistema devono essere attentamente pianificati e gestiti secondo un'adeguata strategia finalizzata ad ottimizzare l'efficienza totale e a preservare i dispositivi dallo stress che potrebbe ridurre il loro ciclo di vita.

Ovviamente tale strategia deve tener conto, oltre che degli aspetti puramente tecnici di ciascun componente, anche della missione d'uso del veicolo e conseguentemente del range di autonomia richiesto. A tale proposito può essere utile effettuare una classificazione dei veicoli in funzione del loro utilizzo e valutarne la configurazione più adeguata. Nel diagramma di fig. 2.19 è possibile notare come ad oggi i veicoli puramente elettrici (BEV) risultino essere particolarmente idonei per uso privato in città (city-car), dove statisticamente le applicazioni tipiche richiedono un range di autonomia pari a circa 60 km/giorno. Peraltro tali spostamenti sono spesso del tipo casa-lavoro-casa con periodi di sosta abbastanza lunghi da consentire la ricarica delle batterie e il ripristino dell'autonomia originaria. La tecnologia puramente elettrica, invece, non è ancora in grado di assicurare le lunghe percorrenze e gli ampi range di autonomia richiesti dai veicoli utilizzati per uso extraurbano e per uso pubblico (per es. flotte di bus urbani o di auto per servizio di car-sharing). In questi casi la tecnologia in grado di supportare le esigenze di lunghi range di autonomia è quella ibrida elettrica a FC ed in particolare la configurazione "range extender" in cui il sistema FC funge da caricabatteria a bordo consentendo di estendere l'autonomia delle batterie superando quello che è considerato il principale limite dei veicoli elettrici.

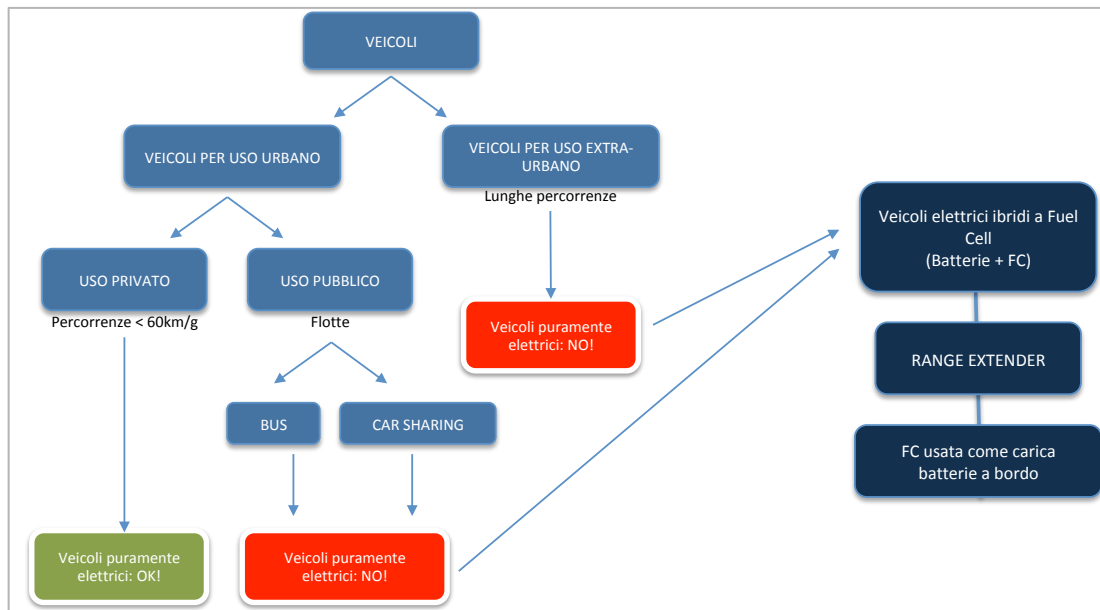


Figura 2.19: Classificazione dei veicoli in funzione dell'utilizzo

2.5 Stato dell'arte dei powertrain a FC usati a bordo dei bus

Negli ultimi 10 anni, gli autobus a FC sono stati operati su circa 8 milioni di chilometri in servizio giornaliero in diverse città europee, dimostrando che la tecnologia è operativa e flessibile.

Sebbene rispetto all'introduzione dei primi prototipi negli anni '90 il prezzo di acquisto degli autobus FC è diminuito notevolmente di circa il 75% (fig. 2.20), per consentire una commercializzazione sostenibile basata sulle economie di mercato, tutte le parti interessate devono spingere per ottenere autobus a FC migliori e meno costosi:

1. Tutte le parti interessate devono impegnarsi per aumentare rapidamente il numero totale di unità sulle strade. Questa è una condizione preliminare per il raggiungimento degli effetti di scala nonché della maturità tecnologica associata e delle riduzioni dei costi.
2. L'industria deve lavorare per ridurre ulteriormente i costi del bus a FC e dell'infrastruttura e dell'idrogeno. I futuri costi dei bus a FC dipenderanno dal percorso tecnologico seguito. In un percorso tecnologico in grado di sfruttare le sinergie con il mercato delle autovetture a FC, i costi di implementazione degli autobus a FC possono ridursi abbastanza rapidamente con l'aumento del volume delle auto a FC. In questo caso, i costi potrebbero essere alla pari con gli autobus diesel entro il prossimo decennio. Gli OEM delle infrastrutture e i fornitori di idrogeno devono adottare le misure necessarie per realizzare costi accettabili.
3. Gli operatori di autobus devono essere pronti ad attuare progetti dimostrativi su larga scala nei prossimi anni al fine di maturare ulteriormente la tecnologia, raccogliere esperienza operativa con flotte più numerose di autobus a FC e stimolare lo sviluppo del mercato.
4. Infine è necessario un quadro pubblico di supporto, con meccanismi di finanziamento a livello europeo e nazionale, finalizzato a sostenere gli operatori di autobus e i costi relativi allo sviluppo tecnologico.

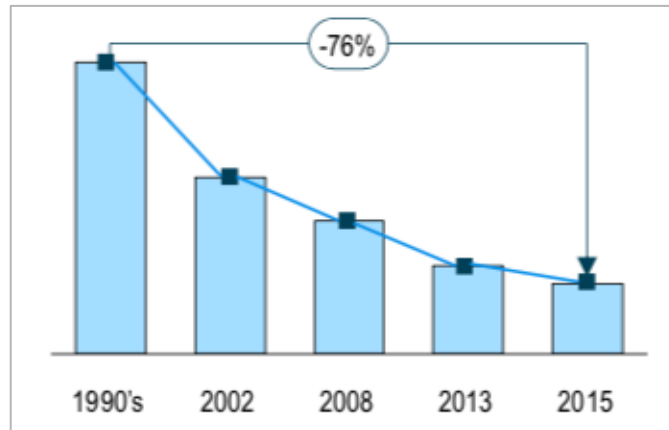


Figura 2.20: Andamento dei costi di sviluppo dei bus a FC dal 1990 al 2015 [38]

Si stima che a partire dal 2020-2022, i costi di manutenzione degli autobus a FC dovrebbero convergere verso i livelli degli autobus diesel.

Poiché i costi futuri degli autobus a FC dipendono fortemente dalle dimensioni del mercato sono stati sviluppati due scenari per tenere conto delle potenziali variazioni delle dimensioni future del mercato e della velocità con cui i costi delle celle a combustibile potranno diminuire.

Lo "scenario di nicchia" e lo "scenario di produzione su scala" ritraggono la varianza dei costi potenziali in base alle efficienze e alle economie di scala raggiunte con le diverse dimensioni del mercato ed il relativo progresso tecnologico complessivo nel quadro del percorso della tecnologia pesante. Gli scenari riflettono l'effetto che le diverse economie di scala hanno sulle curve e sui prezzi.

Affinché lo scenario di nicchia si realizzi, un numero cumulativo di 1.200-1.800 bus a FC dovrebbe essere distribuito sulle strade europee entro il 2025.

Per lo scenario di produzione di scala, è necessario un volume cumulativo totale di 8.000-10.000 bus a FC entro il 2025. Quest'ultimo rappresenta circa il 7-9% degli acquisti totali cumulativi attesi di autobus urbani in Europa nel periodo 2015-2055 (fig. 2.21).

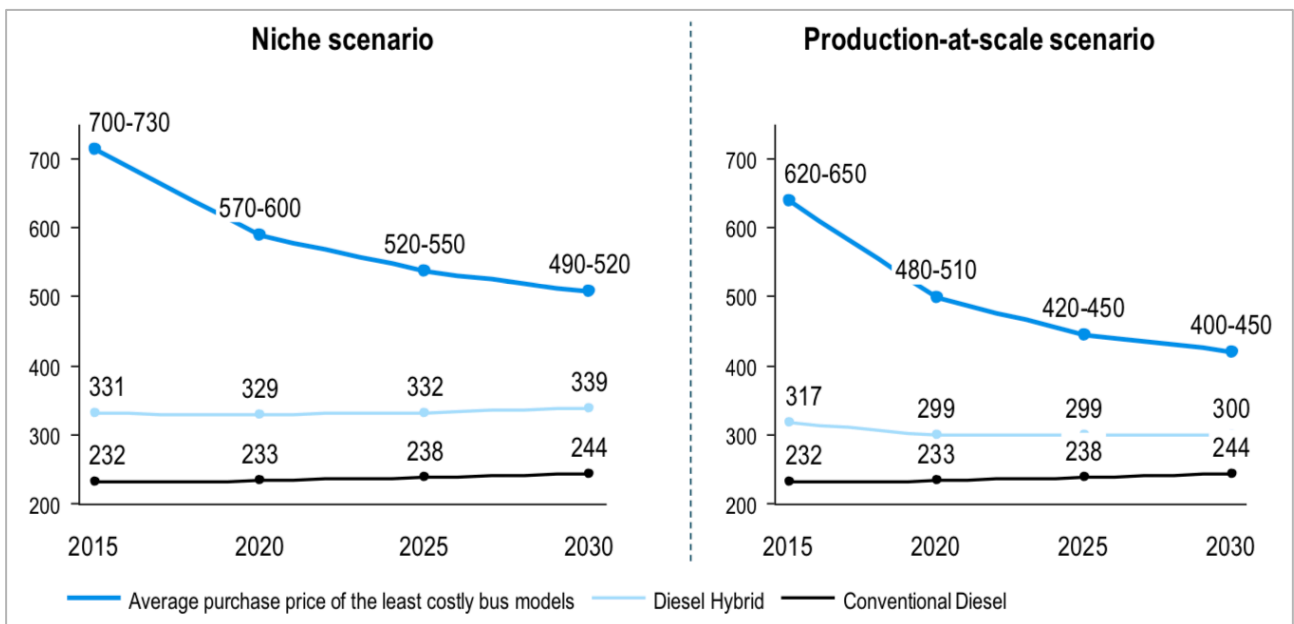


Figura 2.21: Andamento del prezzo di acquisto di un bus a FC standard nello "scenario di nicchia" e nello "scenario di produzione su scala" (i valori sono espressi in k€)

I bus a FC sono generalmente costruiti su un telaio convenzionale che viene adeguato per contenere un sistema a FC e un pacco batterie che costituiscono il cuore del propulsore. Come già visto nei precedenti paragrafi esistono diverse soluzioni tecniche per l'architettura del powertrain a FC. In alcuni casi la FC è la fonte diretta di energia per la propulsione e opera in combinazione con supercapacitori e batterie di diverse dimensioni che sono usati come storage energetico. Alcuni modelli di bus a FC utilizzano, invece, una FC di piccola taglia e un pacco batterie più grande, in questo caso si parla di architettura "range extender". Le soluzioni tecniche specifiche che verranno utilizzate incideranno sul futuro sviluppo dei costi [38].

La stima del mercato dei bus elettrici al 2020 mostra che all'interno del segmento degli autobus elettrici, quelli ibridi rappresenteranno circa il 73% del mercato. La quota di mercato dei BEB e FCEB sarà relativamente piccola con una quota dell'8% e del 19% rispettivamente (fig. 2.22) [39].

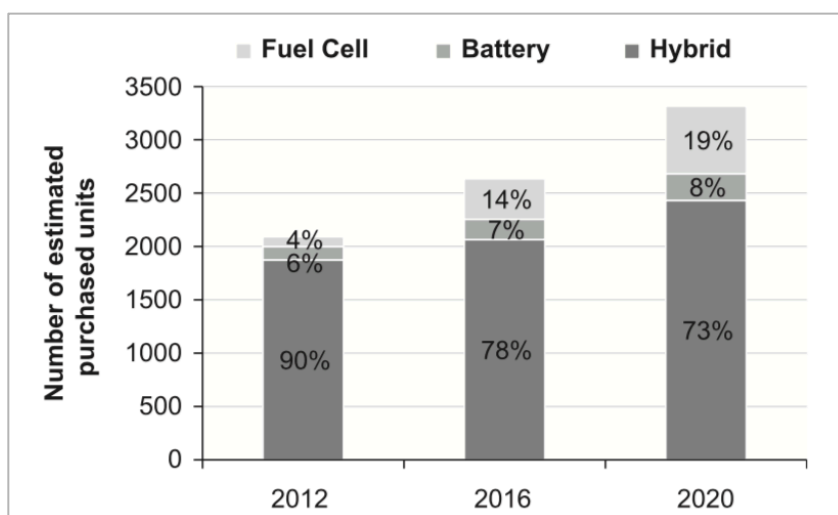


Figura 2.22: Profilo delle stime di mercato dei bus elettrici [38]

Dal punto di vista tecnico la progettazione del propulsore di un bus a FC può seguire diversi percorsi tecnologici.

- Nel percorso "heavy-duty", il sistema FC è specificamente sviluppato e realizzato per l'uso in veicoli pesanti come gli autobus urbani. Questo percorso è ben consolidato e si è dimostrato un'opzione tecnica valida attualmente applicata nei modelli di autobus a FC in corso di sperimentazione in importanti progetti dimostrativi in Europa e altrove.
- Il percorso "automotive" prevede di integrare sugli autobus a FC lo stesso tipo di FC, di sistemi e di batterie impiegate sulle autovetture, sfruttando le sinergie e le economie di scala fornite dai potenziali volumi automobilistici di FC. I primi modelli di bus FC progettati secondo questo percorso sono stati messi in servizio in Asia. Sviluppi simili sono in corso in Europa e alcuni autobus sono già operativi. La fattibilità economica di questo percorso tecnologico dipende fortemente dal futuro raggiungimento dei volumi di produzione automobilistica (circa 10.000 FC/anno) e dall'utilizzo di sinergie tecniche. Per poter beneficiare di questo percorso tecnologico, i sistemi FC e gli altri componenti utilizzati devono essere disponibili per tutti gli OEM di autobus sul mercato. [38]

Rispetto alle prime implementazioni in Europa, oltre 15 anni fa, i bus a FC hanno raggiunto uno stadio avanzato di sviluppo tecnologico. Contrariamente ai primi modelli, gli attuali bus a FC presentano

un'architettura ibrida di propulsione comprendente il sistema a FC ed un pacco batterie che consente di effettuare una migliore gestione dell'energia e la frenata rigenerativa (recupero dell'energia in frenata). In tal modo, i range di autonomia giornaliera potrebbero essere estesi da 60 a 300 km fino a 450 km. L'efficienza del consumo del combustibile è aumentata significativamente passando da un consumo di circa 25 kg di H₂/100 km a 8-9 kg di H₂/100 km di oggi. I tempi di rifornimento dell'idrogeno sono diminuiti da 25 minuti in media a meno di 10 minuti e anche la presenza delle stazioni di rifornimento è notevolmente aumentata (fig. 2.23). [38]

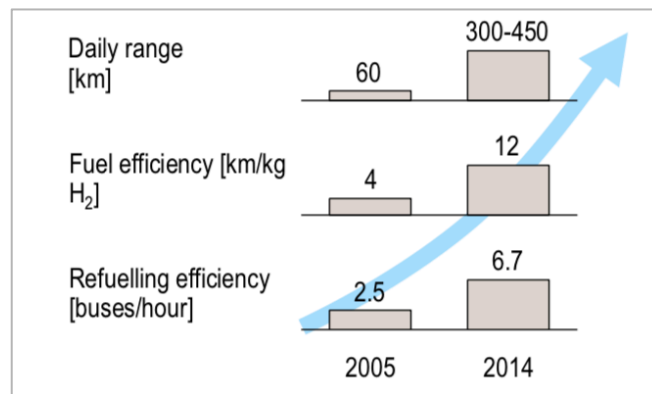


Figura 2.23: Sviluppo della tecnologia dei bus a FC [38]

2.6 Il powertrain proposto: configurazione ibrida “range extender”

In base agli studi effettuati il powertrain elettrico ibrido, a batterie e FC, individuato per un bus urbano oggetto della ricerca proposta per il presente dottorato prevede una configurazione di tipo “range extender” la cui architettura è mostrata in fig. 2.24. La differenza sostanziale di tale configurazione rispetto a quella Total FC risiede nella taglia della FC che, operando come caricabatteria a bordo veicolo, è caratterizzata da una potenza e da una taglia minori. Ovviamente la taglia e la potenza della FC e del pacco batterie saranno frutto del dimensionamento e delle strategie di gestione che verranno ottimizzati in funzione della missione d’uso del veicolo (vedi cap. 4).

I vantaggi di questa configurazione sono molteplici e non riguardano esclusivamente gli aspetti tecnici ma anche quello economico.

Innanzitutto, come già detto, la possibilità di estendere l’autonomia delle batterie consente di ottenere veicoli in grado di garantire autonomie elevate senza dover sottostare ai tempi di ricarica delle batterie che, oltre alla temporanea inoperatività del veicolo, comportano anche la necessità di sostituire il veicolo in ricarica con un altro che svolga il servizio di trasporto. Questo aspetto diventa sostanziale nel caso di gestione di flotte, in quanto si traduce nella necessità di disporre di un parco veicoli più numeroso e quindi in un maggior investimento in termini economici.

Inoltre, altri rilevanti vantaggi di questa architettura sono:

- minor tempo di ricarica necessario per la batterie in quanto la ricarica a bordo da parte del FC system fa sì che a fine servizio le batterie non si scarichino totalmente;
- costi più accessibili (rispetto alla configurazione Total FC) dovuti all’utilizzo di un FC system di taglia ridotta e quindi meno oneroso;
- minor quantità di idrogeno da stoccare a bordo e minor peso (rispetto alla configurazione Total FC) dovuti alla taglia più piccola del FC system da alimentare;
- tempi necessari per effettuare il rifornimento di idrogeno confrontabili a quelli del rifornimento dei tradizionali combustibili.

Per i motivi sopra esposti la configurazione range extender ad oggi sembra essere quella più realizzabile in termini economici rendendo il prodotto finale più competitivo rispetto ad uno in configurazione total FC con costi eccessivamente elevati ai fini dell'immissione sul mercato.

Dal punto di vista tecnico la soluzione ibrida consente di usufruire dei vantaggi di entrambe le tecnologie (batterie e FC) potendo destinare le batterie all'inseguimento del carico (più veloci e pronte a rispondere alle variazioni di potenze richiesta) e dedicando, invece, la FC alla copertura del carico fisso (evitando stress dinamici che potrebbero comprometterne il tempo di vita).

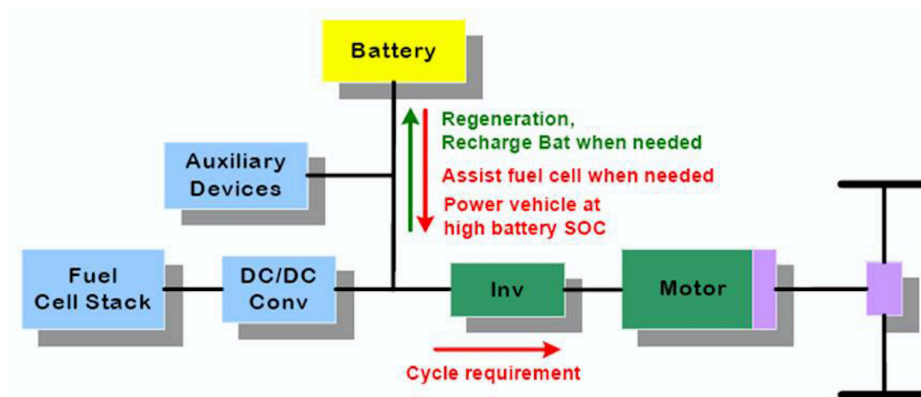


Figura 2.24: Configurazione ibrida "range extender" (batterie e FC)

Come già accennato, l'attività svolta durante il dottorato di ricerca ha avuto come oggetto di studio il powertrain di un bus urbano realizzato presso il CNR ITAE.

Nello specifico l'attività si è composta di:

- una parte di ricerca svolta in laboratorio e finalizzata alla selezione delle batterie e del FC system (oggetto del prossimo cap. 3),
- una parte dedicata alla realizzazione del powertrain a bordo del minibus (oggetto del prossimo cap. 4)
- ed infine una terza parte dedicata ai test su strada del minibus realizzato (oggetto del prossimo cap. 5).

Reference

- [1] Gautam Kalghatgi. Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? *Applied Energy* 225 (2018) 965–974
- [2] BP Energy outlook; 2017. <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2017/bp-energy-outlook-2017.pdf>
- [3] U.S. Energy Information Administration (EIA). International energy outlook; 2016. [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf)
- [4] IPCC. Chapter 8: transport IPCC WGIII fifth assessment report. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter8.pdf
- [5] World Economic Forum; 2016. <https://www.weforum.org/agenda/2016/04/the-number-of-cars-worldwide-is-set-to-double-by-2040>
- [6] Exxonmobil. Outlook for energy: a view to 2040. <http://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/outlook-for-energy/2017/2017-outlook-for-energy.pdf>
- [7] World Energy Council. Global transport scenarios 2050. WEC London. http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2012/09/wec_transport_scenarios_2050.pdf
- [8] OPEC. World oil outlook; 2013. http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/WOO_2013.pdf
- [9] D. Cabezuelo, J. Andreu, I. Kortabarria, I. Mtz. De Alegria, E. Robles. Powertrain systems of electric, hybrid and fuel-cell vehicles: state of the technology. 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)
- [10] C. Chan, A. Bouscayrol, K. Chen, "Electric hybrid and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling", *Vehicular Technology IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 2, pp. 589-598, 2010.
- [11] C. Mahmoudi, A. Flah, L. Sbita, "An overview of electric vehicle concept and power management strategies", *International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb*, pp. 1-8, 2014.
- [12] I. Sulaeman, V. Vega-Garita, N. Narayan, L. Ramirez-Elizondo, P. Bauer, "Comparison of pv- battery architectures for residential applications", *International Energy Conference*, pp. 1-7, 2016.
- [13] P. Bauer, Y. Zhou, J. Doppler, N. Stemberge, "Charging of electric vehicles and impact on the grid", *International Symposium MECHA-TRONIKA*, pp. 121-127, 2010.
- [14] M. Mahmoud, R. Garnett, M. Ferguson, P. Kanaroglou, "Electric buses: A review of alternative powertrains", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 673-684, 2016.
- [15] K. Chau, *Electric Vehicle Machines and Drives: Design Analysis and Application*, Wiley-IEEE Press, 2015.
- [16] J. Alzibar, E. Ibarra, J. Andreu, A. Matallana, I. Kortabarria, "Vehículo eléctricos e híbridos: estado de la tecnología", *Transactions of SAAEI*, 2014
- [17] L. Kumar, K. K. Gupta, S. Jain, "Architecture and configuration of electrified vehicles: A review", *International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1-6, 2013.
- [18] Bayindir KC, Gozukucuk MA, Teke A. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. *Energy Convers Manage* 2011;52:1305–13.
- [19] Hamut HS, Dincer I, Naterer GF. Analysis and optimization of hybrid electric vehicle thermal management systems. *J Power Sources* 2014;247:643–54.
- [20] Yong JY, Ramachandaramurthy VK, Tan KM, Mithulananthan N. A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015; 49: 365-385.
- [21] Chan CC. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proc IEEE* 2007;95:704–18.

- [22] Tie SF, Tan CW. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;20:82–102.
- [23] E. Wang, D. Guo, F. Yang, "System design and energetic characterization of a four-wheel-driven series-parallel hybrid electric powertrain for heavy-duty applications", *Energy Conversion and Management*, vol. 106, pp. 1264-1275, 2015.
- [24] A. Zulkifli, N. Saad, S. Mohd, A. R. A. Aziz, "Split-parallel in-wheel-motor retrofit hybrid electric vehicle", *Power Engineering and Optimization Conference*, pp. 11-16, 2012.
- [25] S. Cui, S. Han, C. Chan, "Overview of multi-machine drive systems for electric and hybrid electric vehicles", *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo*, pp. 1-6, 2014.
- [26] G. Wu, X. Zhang, Z. Dong, "Powertrain architectures of electrified vehicles: review classification and comparison", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 352, no. 2, pp. 425-448, 2015.
- [27] "RESS: sistemi di accumulo dell'energia elettrica in ambito residenziale - Valutazioni tecnico-economiche", Andrea Bregolin, Università degli Studi di Padova.
- [28] "Analisi e definizione di strategie di gestione e controllo di sistemi di accumulo elettrico per applicazioni in reti di distribuzione attive automatizzate, M. Conte, G. Graditi, M.G. Ippolito, E. Riva Sanseverino, E. Telaretti, G. Zizzo, Università degli Studi di Palermo.
- [29] Catenacci M, Verdolini E, Bosetti V, Fiorese G. Going electric: expert survey on the future of battery technologies for electric vehicles. *Energy Policy* 2013;61:403–13.
- [30] Cluzel C, Douglas C. Cost and performance of EV batteries. Final report Element Energy Limited 20 Station Road, Cambridge CB1 2JD; 2012. p. 21.
- [31] Powarider [Internet]. EV battery comparison. [cited 2014 Feb 1]. Available from: http://www.powarider.com/pdfs/EV_Battery_Comparison.pdf
- [32] Tweed K. IEEE Spectrum [Internet]. Tesla's Lithium-Ion Battery Catches Fire. [updated 2013 Oct 3; cited 2014 Feb 2]. Available from: <http://spectrum.ieee.org/energywise/green-tech/advanced-cars/teslas-lithiumion-battery-catches-fire>
- [33] Kolosnitsyn VS, Karaseva EV. Lithium-sulfur batteries: problems and solutions. *Russ J Electrochem* 2008; 44(5): 506–9.
- [34] Rahman MA, Wang X, Wen C. A review of high energy density lithium–air battery technology. *J Appl Electrochem* 2014;44(1):5–22.
- [35] Johnson L. REXresearch [Internet]. The viability of high specific energy lithium air batteries. Available from: <http://www.rexresearch.com/johnsonliairbatty/Session4-350-Johnson.pdf>
- [36] Christensen J, Albertus P, Sanchez-Carrera RS, Lohmann T, Kozinsky B, Liedtke R, et al. A critical review of Li/air batteries. *J Electrochem Soc* 2012;159(2):1–30.
- [37] Piano Nazionale Infrastrutturale per la Ricarica dei veicoli alimentati ad energia Elettrica (PNire) – Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Aggiornamento 2015 (Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 151 del 10/06/2016)
- [38] Roland Berger. Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe. A Study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (2015)
- [39] Hurst D. Thinking outside the car: using electricity for two wheel vehicles, trucks, buses, locomotive, and off-road vehicles. USA: Pike Research; 2011.

3 Attività sperimentale sui principali componenti innovativi del powertrain proposto

3.1 I componenti innovativi del powertrain proposto

I componenti innovativi del powertrain ibrido proposto per il progetto del dottorato di ricerca, definito nel precedente capitolo, sono essenzialmente rappresentati dal pacco batterie e dal sistema a celle a combustibile.

Tali componenti sono stati oggetto di ricerca al fine di individuare, tra i prodotti di mercato, quelli idonei alla progettazione del suddetto powertrain.

In questo capitolo è riportata l'attività di ricerca sperimentale, condotta presso i laboratori del CNR ITAE, indirizzata alla selezione e alla caratterizzazione dei principali componenti del powertrain.

In particolare sono state confrontate, tramite test a banco, due tipologie di batterie innovative idonee ad applicazioni nel settore dei trasporti e sono stati condotti test di caratterizzazione elettrochimica di uno short stack di tipo PEFC, selezionato tra i sistemi presenti sul mercato.

3.2 Le batterie al litio più promettenti per applicazioni automotive

I miglioramenti delle batterie stanno avendo un impatto via via crescente nel campo delle applicazioni energetiche in quanto le loro caratteristiche, sempre più efficienti, li rendono in grado di fornire diversi servizi [1]. Nelle applicazioni automobilistiche e stazionarie le batterie hanno già raggiunto una grande importanza e negli ultimi anni sono stati fatti molti sforzi per implementare e migliorare il loro uso [2,3].

Sono diverse le tecnologie studiate e proposte nel mercato globale, in particolare le batterie agli ioni di litio mostrano proprietà elettrochimiche ottimali [3] in quanto il litio è il metallo con il più basso peso atomico, con elevato potenziale standard di riduzione (-3,04 V), dimensioni ridotte e con capacità specifica molto elevata (3,86 Ah/kg) [3,4]. Queste caratteristiche lo rendono uno degli elementi più adatti per la costruzione di batterie ad alta densità di energia e ad alta potenza specifica [4]. Generalmente, la batteria al litio è caratterizzata dalla composizione metallica del catodo. I materiali più utilizzati nel catodo sono litiati di ossidi metallici come LiMnO_4 , LiCoO_2 , $\text{LiNiCo}_x\text{O}_2$ o $\text{LiMn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$. [5].

Sebbene le batterie basate sul litio siano oggetto di molti studi, spesso gli utenti finali (operatori di rete, sviluppatori di veicoli elettrici, ecc.) non hanno informazioni sufficienti sul loro comportamento quando sono soggetti a profili di carico relativi alle reali applicazioni finali. Per tale motivo è necessario valutare i chimismi attraverso protocolli di test in grado di evidenziare vantaggi e/o svantaggi. Pertanto, il confronto diretto tra due o più batterie al litio può aiutare a comprenderne il comportamento e a valutarne le prestazioni.

Le due tipologie di batterie valutate e messe a confronto sono quelle considerate più promettenti tra i chimismi al litio: batterie litio polimeri (LiPo) e batterie litio ferro fosfato (LiFePO_4) [5-8].

Le batterie LiPo e LiFePO_4 sono studiate sia per applicazioni automobilistiche che stazionarie [9,10] e soprattutto per le applicazioni automobilistiche sono direttamente in concorrenza [9,11] a causa delle loro caratteristiche prestazionali e per la facilità di integrazione negli spazi e nei volumi generalmente molto contenuti a bordo dei veicoli.

Sebbene in letteratura siano presenti diversi articoli sullo studio o sullo sviluppo del singolo chimismo, non è presente un confronto diretto finalizzato ad evidenziare i vantaggi/svantaggi in relazione alla specifica applicazione automotive.

Di seguito è riportata una campagna di test eseguita su batterie commerciali di tipo LiPo e LiFePO₄ con l'obiettivo di ottenere le potenzialità di applicazione in ambito automotive.

3.2.1 Batterie basate su tecnologia Litio-Polimeri (LiPo)

Le batterie LiPo sono classificate in base alla tipologia di trattamento dell'elettrolito: polimero cristallino, polimero secco, polimero plastificato e polimero drogato con solvente [12]. L'elettrolita polimerico cristallino è caratterizzato da bassa conduttività [12, 13]; l'elettrolita polimerico a secco è composto da un materiale non cristallino contenente sale disciolto; il polimero plastificato contiene additivi organici e la conduttività è superiore a quella del polimero secco a causa della maggiore libertà di movimento molecolare [13] e il polimero drogato con solvente può avere una struttura a fase singola o doppia a seconda del livello di drogaggio [15,14]. Uno dei trattamenti più utilizzati per l'elettrolita polimerico è il polimero plastificato [15] in quanto i vantaggi, rispetto al classico design della batteria agli ioni di litio, sono molteplici:

- l'elettrolito [16,17] è meno reattivo con il litio e non si possono verificare perdite di liquidi, il che aumenta la sicurezza;
- non è necessario alcun tipo di contenitore metallico per cui la batteria è più leggera e modellabile [17];
- possibilità di lavorare ad alta temperatura (> 60 ° C).

A differenza delle batterie agli ioni di litio, che sono contenute in contenitori metallici rigidi, le celle polimeriche sono fabbricate in una struttura flessibile, spesso fogli piegati [17,18] (laminato polimerico), pertanto possono essere adattati a tutte le forme richieste. In particolare le celle con elettrolita polimerico in forma di gel sono generalmente considerate più sicure in quanto l'elettrolito è meno reattivo rispetto a quello liquido e sono meno soggette al rischio di perdite. Inoltre, queste celle hanno un basso tasso di autoscarica (5% al mese) [19] e non usano materiali tossici o nocivi. Le batterie LiPo sono caratterizzate da un'alta densità di energia (fino a 155Wh/kg) [19] e un alto valore di C-Rate (nelle ultime batterie prodotte anche fino a 8 ÷ 15C). È stata riscontrata una grande differenza tra i cicli di vita dichiarati dai produttori (oltre 4500 cicli) e i cicli di vita (meno di 1500) [20-22] presenti in letteratura. Tuttavia, queste batterie non hanno ancora raggiunto costi competitivi (prezzo finale 1.300 ÷ 1.800 €/kWh). In passato alcune celle hanno mostrato un gonfiore durante l'utilizzo che ha compromesso la struttura meccanica; le ragioni di questo fenomeno sono sotto investigazione anche se sembrerebbero dovute al funzionamento in condizioni rigide o all'alta temperatura del posto in cui è posizionato il sistema di stoccaggio oppure al superamento della tensione di cut-off in carica (> 4,25 V) e in scarica (< 3 V) [23, 24].

3.2.2 Batterie basate su tecnologia Litio Ferro Fosfato (LiFePO₄)

La tecnologia delle batterie litio ferro fosfato sta crescendo molto rapidamente nel mercato dello stoccaggio di energia in quanto mostrano stabilità in condizioni di sovraccarico o cortocircuito e possono resistere a temperature elevate [25] e le celle sono caratterizzate da una distribuzione uniforme della temperatura con un piccolo gradiente tra le regioni interne e quelle superficiali [26]. Come per le batterie LiPo, anche in questo caso per le LiFePO₄ i cicli di vita dichiarati dal produttore (fino a 3500) sono molto alti rispetto ai valori riscontrati in letteratura (meno di 1500) [27-30].

Le principali caratteristiche di questa tecnologia sono: sicurezza in condizioni di critiche grazie alla loro elevata stabilità termica, buon valore della densità di energia (fino a 110 Wh/kg) [28] e alto valore di C-Rate (fino a 25 ÷ 30) [29]. Le batterie LiFePO₄ hanno, inoltre, una buona stabilità ciclica [31] ed un costo competitivo (400 ÷ 500 €/kWh).

La fig. 3.1 mostra le caratteristiche principali delle due tecnologie studiate. I dati sui costi sono stati valutati attraverso una ricerca di mercato che considera diversi produttori di batterie e si riferiscono alle singole celle.

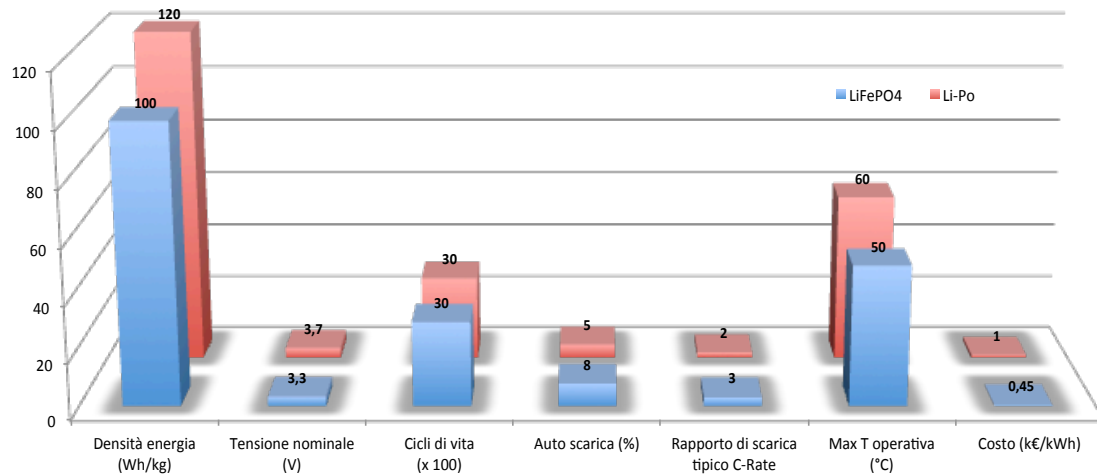


Figura 3.1: Principali caratteristiche delle batterie LiPo e LiFePO₄

3.3 Test a banco delle due tipologie di batterie

Come già detto sono state studiate e confrontate le due tecnologie di batterie al litio individuate nei precedenti paragrafi: litio ferro fosfato (LiFePO₄) e litio polimeri (LiPo).

Le specifiche tecniche delle due celle testate sono mostrate nella tabella 3.1.

Tabella 3.1 – Principali caratteristiche delle due tecnologie LiPo e LiFePO₄

	LiFePO ₄	LiPo
Tensione nominale di cella [V]	3,2	3,7
Capacità nominale [Ah]	40	40
Voltaggio massimo [V]	3,65	4,2
Tensione di cut-off [V]	2,5	2,7
Massima corrente continua in scarica [A]	120 (3C)	200 (5C)
Corrente di picco [A]	400 (10C)	400 (10C)
Densità di energia [Wh/kg]	100	120
Numero cicli di vita (carica/scarica)	> 3000	> 3000
Temperatura operativa [°C]	-20/55	-20/60
Efficienza energetica di carica/scarica	≥ 95%	95%
Costi [€/kWh]	800-1.500	400-500

L'apparecchiatura impiegata per le prove di laboratorio è stata scelta in relazione alla tipologia dei test e alle specifiche della batteria. La stazione di prova è stata realizzata con un ciclatore *Bitrode* in grado di alimentare e dissipare la scarica di 1000 A con una tensione nominale di 20 V. Le misure della corrente e della tensione di cella sono state eseguite tramite un morsetto di corrente e un trasformatore di tensione interno al ciclatore. La stazione di prova è stata collegata in parallelo a ciascun terminale di cella e i test sono stati controllati attraverso un software opportunamente configurato (MTS PRO SW). Ogni cella è stata preliminarmente inserita in camera climatica (*Angelantoni mod. 600L*) all'interno della quale la temperatura è stata monitorata tramite una termo-resistenza Pt100. La misurazione dell'umidità è stata

effettuata attraverso un sistema psicrometrico composto da un bulbo secco e un bulbo umido e la gestione della temperatura nella camera climatica è stata controllata tramite il software WinKratos.

3.3.1 Test di caratterizzazione

Al fine di evidenziare le caratteristiche di ciascuna tecnologia e le principali differenze nel comportamento elettrico e termico nelle specifiche applicazioni finali delle celle, sono stati effettuati numerosi test. Dopo un'ispezione preliminare della condizione delle celle e l'impostazione dei parametri di test, le celle LiFePO₄ e LiPo sono state sottoposte a una procedura di condizionamento in cui ciascuna cella è stata caricata e scaricata a corrente ottimale (C/2), al fine di stabilizzare la capacità e avere un riferimento unico per tutti i test [20]. Per le due tecnologie in osservazione [32] sono state eseguite prove di scarica a differenti C-rate e test di carica CC/CV (corrente costante/tensione costante). Inoltre, sono stati eseguiti test di tensione a circuito aperto e calcolo della resistenza interna.

Il confronto fra i due chimismi è stato eseguito attraverso prove ad alte prestazioni riferite ad applicazioni finali in ambito automotive, per l'utilizzo sui BEVs, prendendo a riferimento la IEC 62660-1 [33].

Sono stati assemblati due pacchi batteria (ciascuno realizzato rispettivamente con tre celle LiPo e quattro celle LiFePO₄ collegate in serie) con tensione nominale di 12 V. Inoltre, per evidenziare la differenza nella necessità di prevedere un sistema di gestione della batteria (Battery Management System - BMS) e l'effetto del BMS sul comportamento del pacco batteria, le batterie sono state scaricate con e senza un BMS.

Le efficienze amperometriche ed energetiche sono state registrate e tracciate sia durante i test in OCV (Open Circuit Voltage) sia nelle condizioni IEC 62660-1 [33].

3.3.2 Test di carica/scarica

Durante una scarica ad alto C-rate, la velocità del processo elettrochimico non consente di scaricare la capacità totale immagazzinata in una batteria [33], questo fenomeno provoca una riduzione di energia e dell'efficienza amperometrica. Per analizzare le prestazioni delle batterie in diverse condizioni di carico sono stati eseguiti test di carica/scarica a diversi valori di C-rate, quindi le celle sono state sottoposte a cicli di carico con correnti di carica costanti a C-rate ottimale di C/2 (20 A) fino a raggiungere la corrente di interruzione (cut-off current) di 0,2 A [34, 35-37]. Successivamente, le celle sono state sottoposte a test di scarica a differenti valori di C-rate compresi nel range da C/2 (20 A) a 3C (120 A) per quanto riguarda le LiFePO₄ e da C/2 (20 A) a 5C (200 A) per le LiPo che sono i valori di corrente massima consentita dichiarata dai produttori. Le scariche sono state eseguite a corrente costante fino alla tensione nominale di interruzione. La misurazione della temperatura sulle superfici delle celle è stata registrata e tracciata insieme l'andamento della tensione.

Nelle figg. 3.2, 3.3 e 3.4 sono riportate le curve di scarica delle celle LiFePO₄ a differenti C-rate (da C/2 a 3C). Si può notare che dopo una caduta di tensione iniziale all'OCV di 0,15 V la curva di tensione presenta un trend piatto (molto più evidente per scariche lente) ed è caratterizzato da piccole e rapide variazioni attorno al valore di tensione rilevato durante la porzione lineare della curva (fig. 3.2). Questa proprietà dell'andamento della tensione è molto importante specie per applicazioni in cui una tensione costante. In fig. 3.3 è riportato l'andamento delle temperature corrispondente alle varie curve di scarica da cui si nota che a C/2 la temperatura massima è 28,4°C mentre a 3C si raggiungono quasi 32°C. Infine fig. 3.4 è riportata la variazione della capacità dovuta alla scarica da C/2 a 3C e si nota una riduzione del 2,5%.

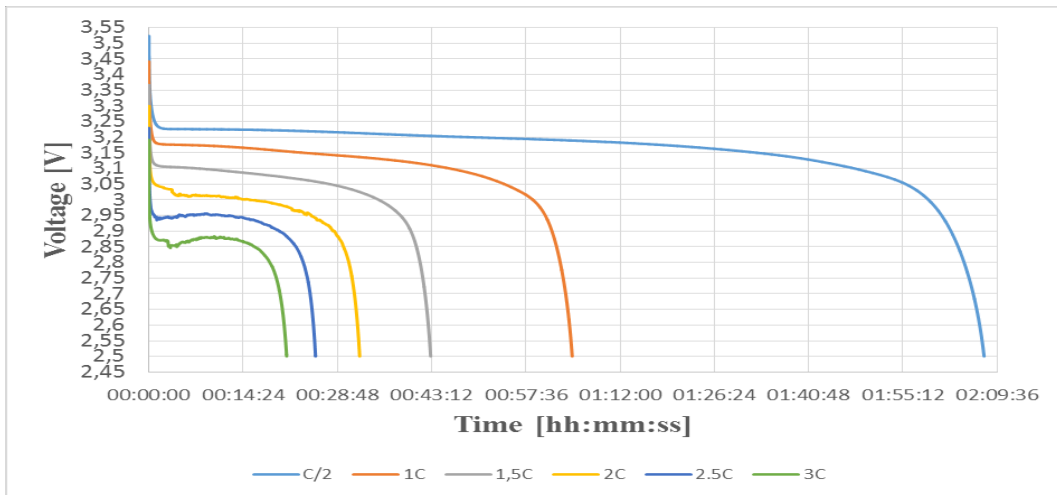


Figura 3.2: Test di scarica delle celle LiFePO₄: curve di tensione

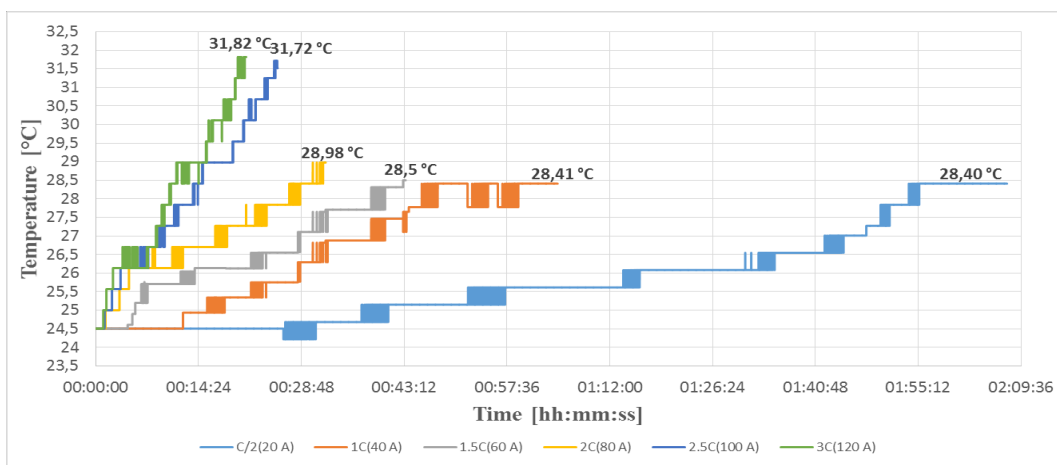


Figura 3.3: Test di scarica delle celle LiFePO₄: andamento della temperatura

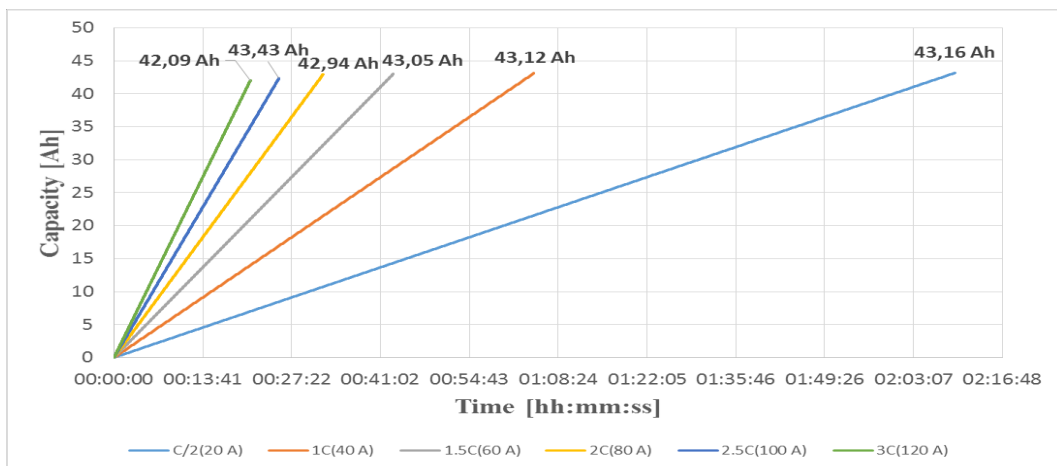


Figura 3.4: Test di scarica delle celle LiFePO₄: variazione della capacità

Nelle figg. 3.5, 3.6 e 3.7 sono riportate, invece, le curve relative ai test di scarica delle celle LiPo a differenti C-rate (da C/2 a 5C). L'andamento della tensione (fig. 3.5) in questo caso è caratterizzato un trend molto più ripido con una caduta di tensione, tra la tensione di avviamento a circuito aperto (OCV) e l'ultima caduta di tensione, pari a 0,8 V. L'andamento della temperatura (fig. 3.6) mostra che a C/2 la temperatura massima raggiunta è 28,8°C, a 3C (per confronto con le LiFePO₄) è 37,5°C (contro i 32°C) e a 5C raggiunge i 45°C, quindi si nota una tendenza a scaldarsi di più. Infine in fig. 3.7 è riportata la variazione della capacità

dovuta alla scarica da C/2 a 3C (per confronto con le LiFePO4) che è pari all'8,79% e da 3C a 5C che è pari allo 0,19%.

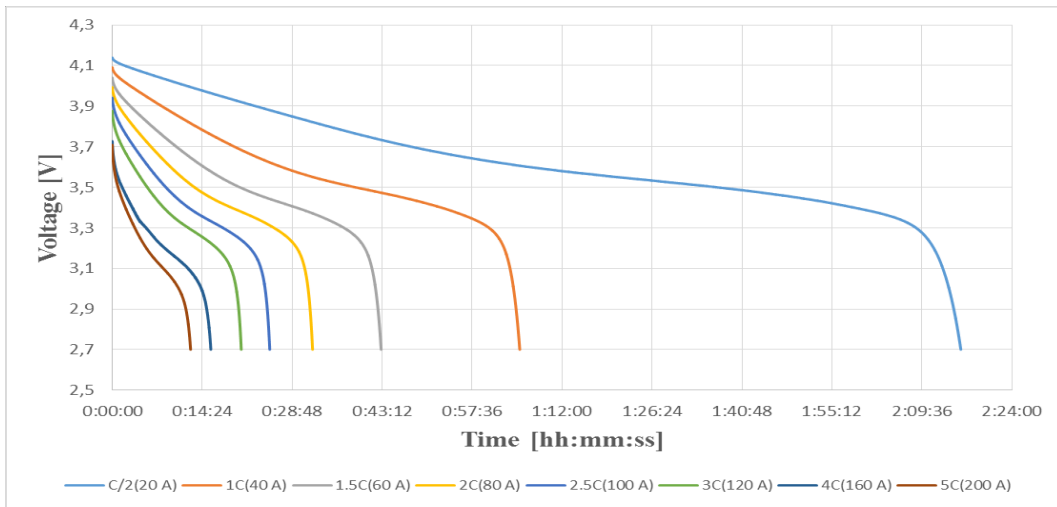


Figura 3.5: Test di scarica delle celle LiPo: curve di tensione

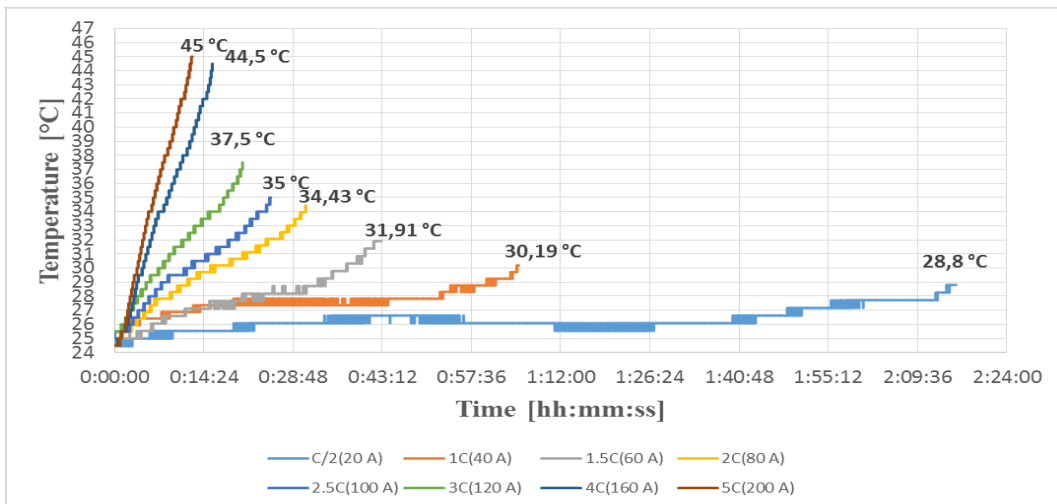


Figura 3.6: Test di scarica delle celle LiPo: andamento della temperatura

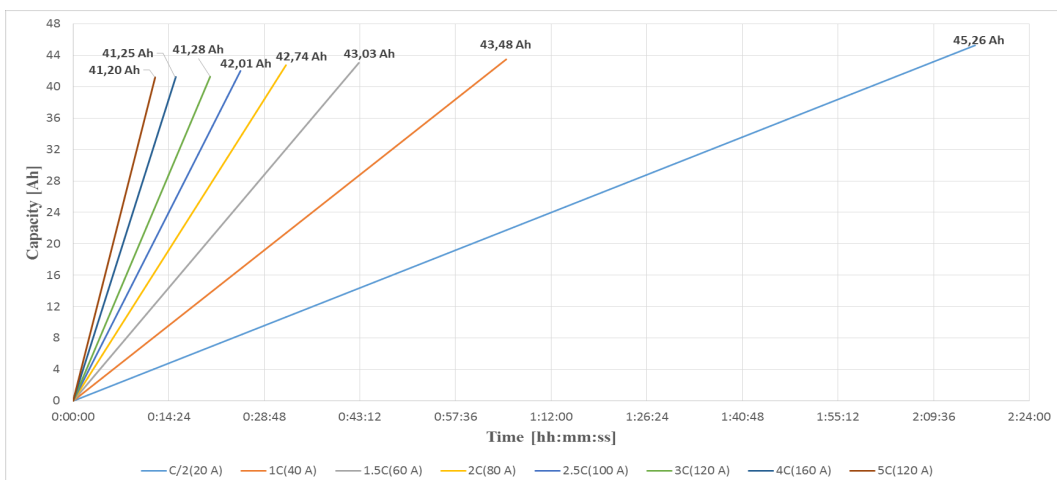


Figura 3.7: Test di scarica delle celle LiPo: variazione della capacità

La batteria LiPo è stata scaricata con valori di corrente fino a 160 A (4C-rate) e 200A (5C-rate), raggiungendo rispettivamente una capacità di 41,25 Ah e 41,20 Ah; come è mostrato nella tabella 3.2, la variazione tra la capacità di scarica a C/2 e la capacità di scarica a 3C è pari all'8,79%. La riduzione della capacità scaricata, in un intervallo di scarica 4C-5C, è molto piccola e pari allo 0,19%. La riduzione della capacità nell'intervallo C/2-3C è inferiore per le celle LiFePO₄, ma la chimica delle celle LiPo consente una scarica con corrente più elevata (5C) con una riduzione minima della capacità di scarica (0,19%). Per tutte le batterie, è stata verificata la progressiva riduzione della capacità aumentando il C-rate di scarica.

Tabella 3.2 – Capacità di scarica a differenti C-rate

	C/2	1C	1.5C	2C	2.5C	3C	4C	5C
LiPo	45,26	43,48	43,08	42,74	42,01	41,28	41,25	41,20
LiFePO₄	43,16	43,12	43,05	42,94	42,43	42,09	//	//

Uno dei maggiori limiti alla diffusione di molte tecnologie di batteria è il rapporto tra tempo di ricarica e tipologia di utilizzo operativo. In questo contesto, è importante caricare la batteria con la corrente massima, al fine di ridurre il tempo di ricarica senza ridurre la sua vita utile [38]. Molte organizzazioni elencano i requisiti di certificazione per la ricarica rapida ma, in realtà, non esiste una definizione standard di ricarica rapida [39].

Anche i test di carica sono stati eseguiti a diversi C-rate (figg. 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11) al fine di analizzare il comportamento e le prestazioni delle batterie nel range 0 - 100% SOC. Le batterie sono state sottoposte a una corrente di carica costante (C/2, 1C, 1.5C, 2C) fino alla tensione massima. Successivamente, è stata eseguita una carica a tensione costante fino a raggiungere la corrente di interruzione (cut-off current). Prima di ogni test, ciascuna batteria è stata completamente scaricata alla corrente costante di C/2 (20 A) fino alla tensione nominale di interruzione.

La cella LiFePO₄ è caratterizzata da stabilità termica con un graduale aumento della temperatura fino al raggiungimento del valore finale. La cella LiPo è caratterizzata da temperature massime molto simili alle temperature massime raggiunte dalla cella LiFePO₄. Durante la fase di carica a corrente costante si nota una progressiva riduzione della temperatura della cella LiPo con un rapido recupero delle condizioni termiche iniziali (fig. 3.11). La temperatura diminuisce in media con una velocità di 0,15 °C/min. In pratica, dal confronto dell'andamento dei profili di temperatura delle due celle si nota che le batterie LiFePO₄ tendono a raffreddarsi più lentamente rispetto alle LiPo (ovvero hanno una inerzia termica maggiore per cui trattengono il calore) e il profilo si mantiene piatto dopo il raggiungimento della temperatura massima. Le LiPo, invece, mostrano un rilascio di temperatura molto più veloce. Questa riduzione della temperatura è un vantaggio soprattutto per le applicazioni con profilo di carico dinamico caratterizzato da elevati valori di corrente di carica e scarica e fasi di riposo. Ad esempio, in un veicolo elettrico dopo molti cicli di carica, la temperatura della cella può raggiungere il limite massimo. In questo caso, il sistema di gestione delle celle non consente di scaricare l'energia necessaria durante un'accelerazione o di caricare l'energia iniettata durante una frenata rigenerativa. La rapida riduzione della temperatura delle celle LiPo riduce il rischio di disservizio e consente di limitare la possibilità di surriscaldamento.

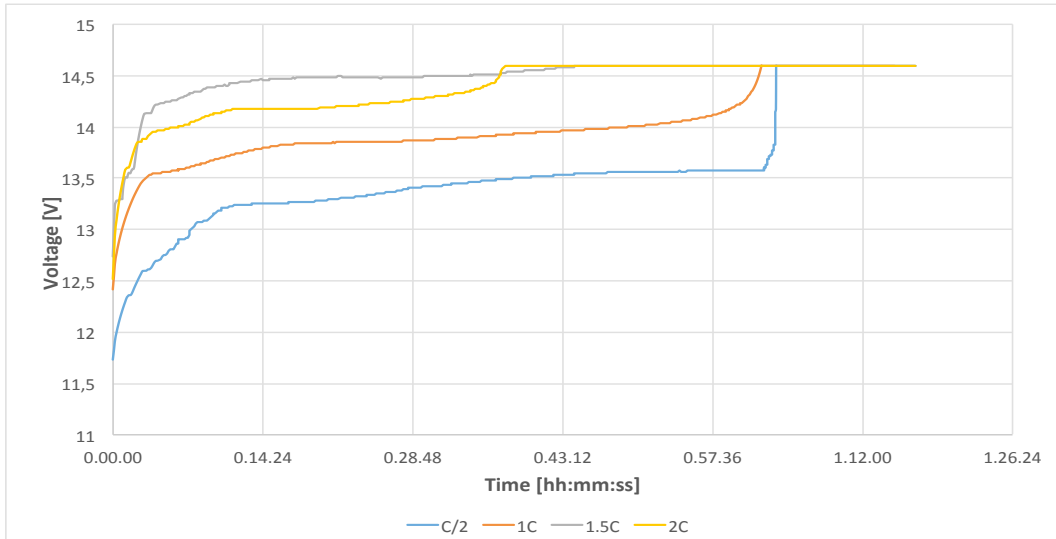


Figura 3.8: Test di carica delle celle LiFePO₄: tensione

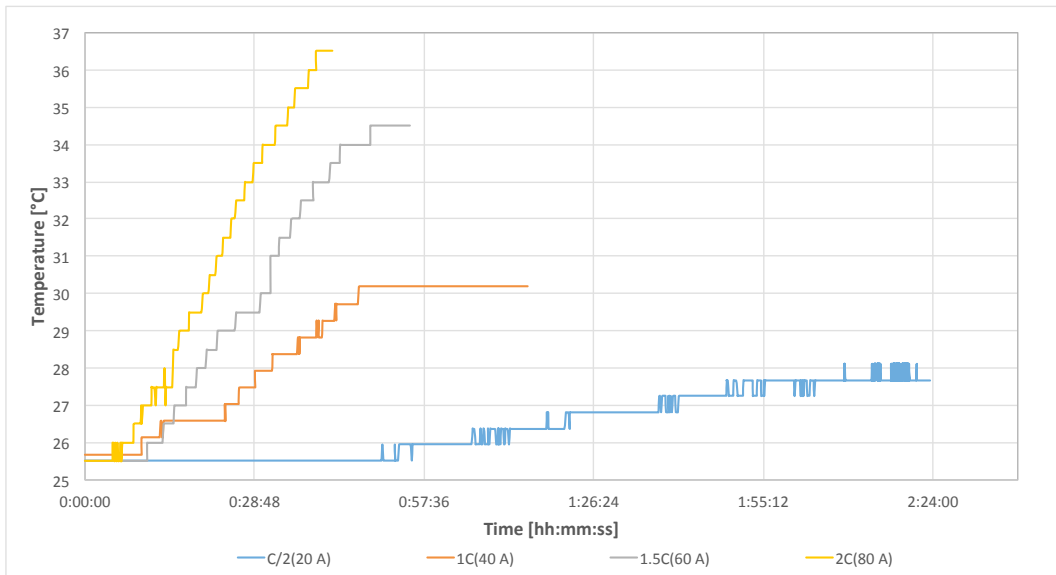


Figura 3.9: Test di carica delle celle LiFePO₄: andamento temperatura

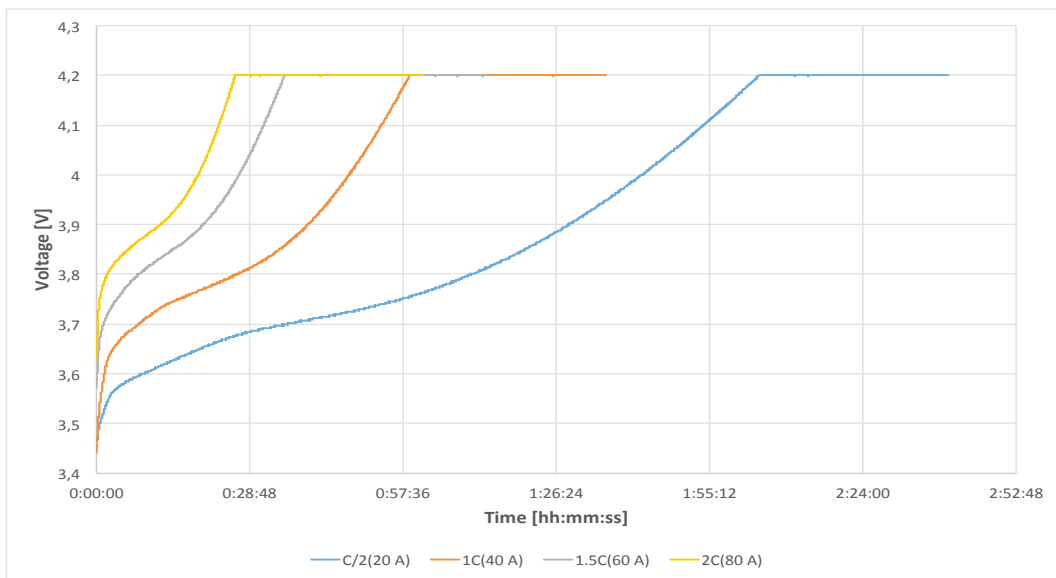


Figura 3.10: Test di carica delle celle LiPo: tensione

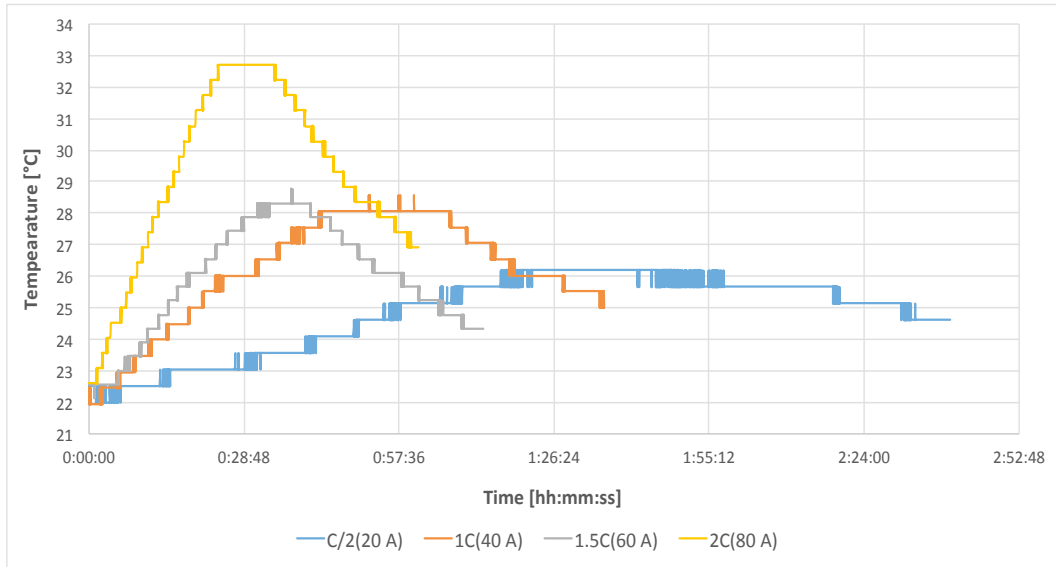


Figura 3.11: Test di carica delle celle LiPo: temperatura

3.3.3 Efficienza energetica ed amperometrica

Il confronto tra le batterie LiPo e LiFePO₄ è stato effettuato anche a livello di efficienze di cella considerando un intervallo di C-rate carica/scarica pari a C/2-2C. Le efficienze amperometriche sono state valutate (tabella 3.3), in conformità con lo standard IEC, come rapporto percentuale tra capacità di scarica e capacità di carica allo stesso C-rate [33]. L'efficienza energetica è stata calcolata come rapporto tra l'energia in fase di scarica e l'energia in fase di carica allo stesso C-rate [33].

Per la cella LiFePO₄, rispetto al valore massimo raggiunto a 1C, è stata verificata una riduzione di efficienza amperometrica dell'1% a 1,5C e 2C. L'efficienza energetica massima delle LiFePO₄ si è ottenuta a C/2 (93,18%) e si nota una riduzione del 12% a 2C. Per la cella di LiPo, l'efficienza amperometrica è pari al 100% solo a C/2 e vi è una riduzione del 3,5% a 2C. L'efficienza energetica massima delle LiPo si è verificata a C/2 e c'è una riduzione del 9,3% a 2C. La cella di LiPo mostra un comportamento migliore ad alto C-rate, in quanto presenta un'efficienza energetica superiore alle LiFePO₄ a 1,5C e 2C.

Le perdite di energia sono attribuite al sovrapotenziale $|U-U_{OCV}|$, dove U_{OCV} è la tensione teorica della batteria e U è il valore di tensione che tiene conto delle perdite ohmiche e delle perdite dovute alla cinetica della reazione [40].

L'efficienza energetica può essere scritta come il prodotto tra l'efficienza faradica (coulomb efficiency) e dell'efficienza di voltaggio (voltage efficiency) [41]:

$$\eta_W = \eta_C \times \eta_V$$

dove η_C è l'efficienza faradica e η_V è l'efficienza di voltaggio.

L'efficienza faradica è influenzata principalmente da tre fattori: temperatura, corrente e stato di carica.

L'efficienza di tensione η_V può essere scritta come [40-42]:

$$\eta_V = \frac{V_B - R_i I_d}{V_B - R_i I_c}$$

dove V_B è la tensione di "riposo" della batteria misurata alcune ore dopo la carica o la scarica (detta "rest voltage"), R_i è la resistenza interna, I_d è la corrente di scarica e I_c è la corrente di carica.

Pertanto, poiché l'efficienza energetica è influenzata dalla tensione di "riposo" (più alta nel caso delle LiPo) e dalla resistenza interna (inferiore nel caso delle LiPo), si riscontra una efficienza energetica maggiore per le LiPo rispetto alle LiFePO₄.

Tabella 3.3 – Efficienze energetiche ed amperometriche

	C/2	1C	1.5C	2C
LiPo				
Energy efficiency [%]	95,59	89,80	86,65	86,26
Amperometric efficiency [%]	100	97,81	96,80	96,56
LiFePO₄				
Energy efficiency [%]	93,18	89,388	84,528	80,678
Amperometric efficiency [%]	100	100	98,768	98,24

3.3.4 Effetto del BMS sul comportamento del pacco batterie

Le batterie al litio, per il bilanciamento della tensione delle celle, necessitano della presenza di un BMS (Battery Management System) che consente di distribuire la corrente tra le celle ed evitare stress che potrebbero ridurre la vita utile della batteria [43].

Al fine di testare e analizzare il comportamento della batteria senza un BMS sono stati assemblati due pacchi batterie, uno con una tensione nominale di 12,8 V/40 Ah (4 celle LiFePO₄ collegate in serie) e uno è con una tensione nominale di 11,1 V/40 Ah (3 celle di LiPo collegate in serie).

Ogni batteria è stata monitorata con la stessa tipologia di CMU (Control Management Unit) per consentire anche l'equalizzazione della tensione di ciascuna cella [44] e un'interfaccia CAN è stata utilizzata per la comunicazione tra CMU e BMS.

I test hanno dimostrato che l'effetto del BMS è molto più basso per la cella di LiPo. In effetti, l'andamento della tensione è quasi lo stesso con e senza BMS con una differenza di tensione nella parte lineare pari allo 0,32%. Alla fine del test, la riduzione della capacità di scarica è stata dello 0,33% che rappresenta un risultato molto importante perché un eventuale malfunzionamento del BMS, per la tecnologia LiPo, comporta una bassa riduzione delle prestazioni della cella e uno squilibrio più basso tra le tensioni di cella.

3.3.5 Conclusioni sui test delle batterie

Dai test eseguiti la cella LiPo mostra un rapido recupero delle condizioni termiche di partenza. Questa proprietà è un grande vantaggio soprattutto per le applicazioni caratterizzate da numerose fasi di riposo tra le fasi di carica e quelle di scarica.

I test di scarica, nell'intervallo C/2 - 3C, hanno mostrato una riduzione della capacità del 2% per la tecnologia LiFePO₄ e una riduzione dell'8,79% per la tecnologia LiPo.

Le celle LiPo consentono elevate correnti di scarica fino a 200 A (velocità 5C) rispetto alle LiFePO₄ (3C) e la differenza percentuale tra la capacità di scarica a 5C e la capacità di scarica a 3C è pari allo 0,19%; inoltre le efficienze della batteria LiPo sono superiori al 96% e superiori all'efficienza energetica della batteria LiFePO₄.

La resistenza interna della cella LiPo è mediamente più bassa e quasi costante durante le scariche mentre la resistenza interna della LiFePO₄ è fortemente variabile. Questo fenomeno è dovuto al cambiamento delle condizioni dell'elettrolito liquido in condizioni operative e con variazioni di temperatura.

Un malfunzionamento del BMS determina un effetto inferiore sulla tecnologia LiPo; infatti, in assenza di un BMS, è stata verificata una bassa riduzione delle prestazioni di cella e uno squilibrio più basso tra le tensioni di cella.

Per quanto concerne i test sulla tensione si è evidenziato un andamento quasi lineare della tensione di cella della tecnologia LiFePO₄, che rappresenta un grande vantaggio per tutte le applicazioni che richiedono una tensione di alimentazione costante. Viceversa, il più ampio intervallo di tensione per la tecnologia LiPo consente una maggiore capacità specialmente nel caso di correnti di carica superiori a 2C. Ciò è molto

importante soprattutto nelle applicazioni automotive in cui una maggiore capacità può consentire una ricarica rapida e la frenata rigenerativa, ovviamente nel rispetto delle condizioni di sicurezza. Pertanto, considerando i diversi aspetti valutati, la tecnologia LiPo è risultata essere più idonea per l'applicazione specifica in ambito automotive.

3.4 Test a banco di short stack di tipo PEFC

Come già detto in precedenza gli elementi innovativi del powertrain proposto sono rappresentati dalle fonti di energia utilizzate per la trazione del minibus: sistema di accumulo dell'energia (batterie) e sistema a celle a combustibile.

Il dimensionamento di ciascun componente è subordinato alla missione d'uso del veicolo ed in particolare per la valutazione della taglia del fuel cell system in una configurazione "range extender" (scelta per il powertrain proposto) si fa riferimento all'incremento di autonomia che si vuole conferire al veicolo rispetto alla configurazione puramente elettrica (solo batterie), ottimizzando il rapporto tra aspetto tecnico ed aspetto economico [45, 46].

Il sistema a celle a combustibile di tipo PEFC individuato, attraverso indagine di mercato, per la trazione del minibus, è basato su tecnologia Andromeda® [47] sviluppato dalla Nuvera Fuel Cells Europe e ha una potenza nominale di 20 kW. Come descritto nel precedente capitolo, la taglia è stata scelta sulla base di una gestione delle fonti energetiche in cui il sistema a FC lavora a punto fisso nell'intervallo 10-14 kW (a potenza costante) al fine di evitare l'inseguimento del carico (load following), lasciato in gestione alle batterie, e salvaguardare quindi il tempo di vita della cella a combustibile.

In fig. 3.12 è rappresentata l'intera architettura del sistema a celle a combustibile composto da altri sottosistemi, come i circuiti di alimentazione dell'aria e dell'idrogeno e il sistema di raffreddamento. La fig. 3.13 mostra invece il sistema.

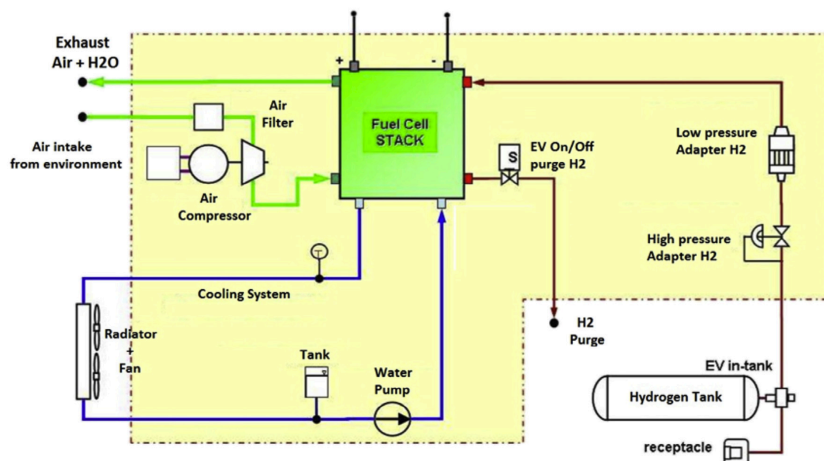


Figura 3.12: Architettura del fuel cell system



Figura 3.13: Sistema a FC Andromeda®

Al fine di ridurre al minimo i costi, i test di caratterizzazione, effettuati anche in questo caso presso i laboratori del CNR ITAE, sono stati eseguiti su uno short-stack di tipo Andromeda® da 2 kW del tutto equivalente a quello individuato precedentemente ma avente potenza nettamente inferiore (short-stack).

Questa procedura, di prassi per l'esecuzione di questa tipologia di test, consente di investigare il comportamento e le performance dello stack riducendo il rischio di eventuali danni ed i costi.

Lo short-stack Andromeda è costituito da MEA (Membrane Electrode Assembly) che utilizzano una membrana perfluorosulfonica acida, sviluppata per applicazioni ad alta temperatura PEFC. I MEA sono costituiti da diversi strati di catalizzatori a base di platino con elevata resistenza alla degradazione causata dall'alta temperatura di funzionamento. Il contenuto di platino nei MEA è di circa 0,4-0,6 mg cm⁻². La superficie attiva di ogni cella è di 360 cm² e ciascuna cella attiva è inserita tra due celle di raffreddamento. I MEA sono assemblati in uno short-stack di 6 celle collegate in serie e il loro comportamento elettrochimico è stato studiato in diverse condizioni operative conformi ad applicazioni automotive.

I test elettrochimici sono stati condotti usando una stazione di prova realizzata presso il CNR ITAE per stack di tipo PEFC. La stazione di prova è costituita da un circuito idraulico principalmente costituito da misuratori di portata massica, umidificatori di gas, preriscaldatori, condensatori d'acqua e valvole di ritorno.

Per controllare la temperatura durante i test di polarizzazione sono stati usati un termo-criostato e un fluido termostatico (di raffreddamento) in grado di mantenere la temperatura dello stack all'incirca costante passando attraverso le celle di raffreddamento. La temperatura reale dello stack è stata misurata per mezzo di una termocoppia posizionata dentro lo stack vicino la presa del fluido di raffreddamento.

Le polarizzazioni elettrochimiche sono state condotte usando un carico elettronico H&H 5600. La tensione complessiva dello stack e le tensioni delle singole celle sono state misurate con voltmetri digitali. Tutti gli strumenti della stazione di prova sono stati interfacciati tra loro e controllati tramite un software in ambiente Labview® e delle schede di interfaccia PXI della National Instruments.

3.4.1 Test di caratterizzazione

Condizioni short-stack da 6 celle:

- Compressione dello stack: 15 kg / cm² (superficie attiva);
- Superficie dell'elettrodo: 360 cm²;
- Dimensioni della membrana rivestita di catalizzatore: 150 mm x 240 mm;
- Dimensioni esterne della membrana: 197 mm x 263,5 mm;
- Range di spessore della GDL (gas Diffusion Layer): 0,2÷0,4 mm, che porta ad uno spessore a sandwich nella zona catalizzata di 0,5÷0,9 mm (assumendo uno spessore del CCM di 0,1 mm);
- Spessore nominale del MEA nella regione della membrana protetta dalla sotto guarnizione (superficie non attiva): 0.1 mm

Le misure elettrochimiche sono state condotte secondo un protocollo di caratterizzazione definito comprensivo di una polarizzazione di riferimento a temperatura convenzionale (80 ° C) in un intervallo di corrente 0 - 360 A e di altri test di polarizzazione a diversa temperatura, pressione e umidità relativa.

Condizioni di polarizzazione di riferimento galvanostatica (a corrente I costante):

- Temperatura di stack: 80°C;
- Umidificazione: 100% R.H. e 50% R.H. rispettivamente ai lati anodo e catodo; (umidificatore anodico a 80 ° C; umidificatore catodico a 64 ° C);
- Pressione: 1,5 bar;
- Coefficiente di stechiometria dell'anodo (rapporto H₂/H_{2 stoch}): 1,5 per I ≥ 36 A; flusso costante a bassa corrente;

- Coefficiente di stechiometria del catodo (rapporto $A_{ria}/A_{ria_{stech}}$): 2 per per $I \geq 36$ A; flusso costante a bassa corrente;
- Acquisizione dati ogni 5 minuti o dopo aver raggiunto lo stato di fermo, escluso l'OCV (massimo 2 minuti);
- Step di corrente: 0A, 9A, 18A, 36A, 54A, 72A, 108A ... 504A (0 mA / cm², 25 mA / cm², 50 mA / cm², 100 mA / cm², 150 mA / cm², 200 mA / cm², 300 mA / cm² ... 1400 mA / cm²) con carico elettronico H & H o Dynalog;
- Tensione di taglio di cella: 0,4 V.

Durante i test sono state registrate le tensioni e le temperature di ciascuna cella. Di seguito sono riportati i risultati più significativi.

La fig. 3.14 mostra prestazioni adeguate dello short-stack sia a bassa temperatura (30°C) che a temperatura più alta (80°C).

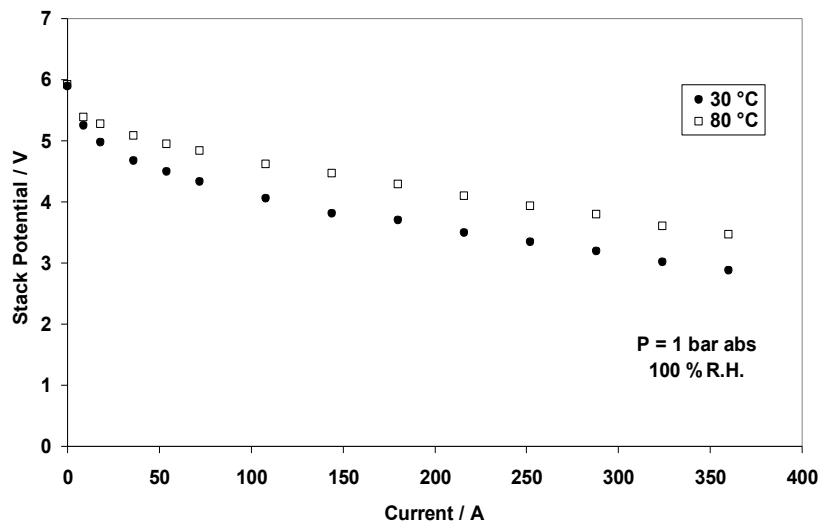


Figura 3.14: Curve di polarizzazione a due differenti temperature (30°C e 80°C)

Un piccolo aumento delle prestazioni è registrato a 80 °C quando la pressione viene aumentata da 1 a 1,5 bar con un valore di RH del 100% (fig. 3.15).

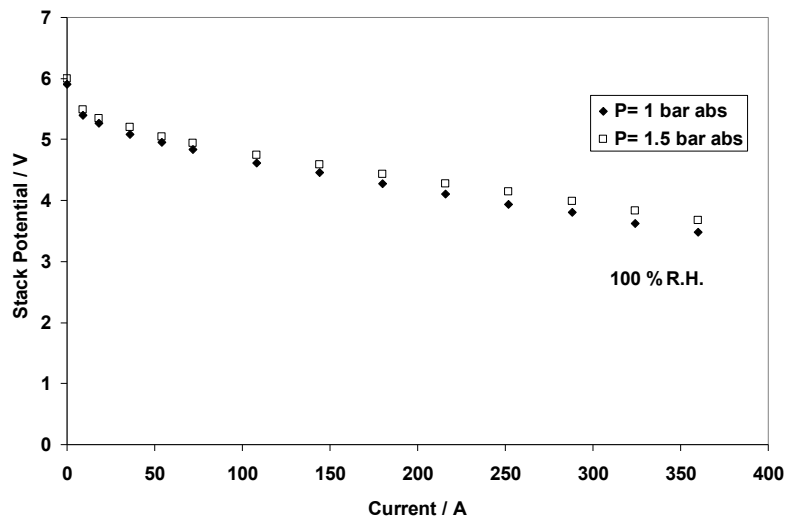


Figura 3.15: Curve di polarizzazione a 80°C e a differenti pressioni (1 bar e 1,5 bar)

Un ulteriore incremento delle prestazioni a densità di corrente elevate è stato ottenuto a 80 °C ed a 1.5 bar diminuendo la temperatura dell'umidificatore da 80°C a 64°C, corrispondente ad una riduzione dell'umidità relativa al catodo dal 100% al 50% (fig. 3.16). L'aumento del picco di densità di potenza appare correlato a un effetto inferiore dell'allagamento del catodo con un'umidità relativa pari al 50%. Le densità di potenza registrate in queste condizioni sono nell'intervallo 600-700 mW cm⁻² con una tensione media di cella pari a 0,6-0,65 V. Questi risultati appaiono adeguati, in termini di prestazioni e di efficienza elettrica, per le applicazioni automotive.

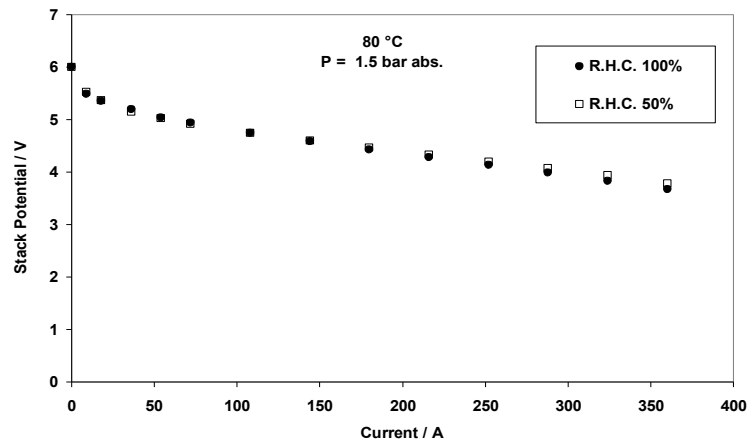


Figura 3.16: Curve di polarizzazione a differenti valori di umidità relativa (RH: 100% e RH: 50%)

La fig. 3.17 mostra una distribuzione delle tensioni di cella sufficientemente omogenea e ciò significa che le proprietà di trasporto di massa e il design dello stack sono appropriati.

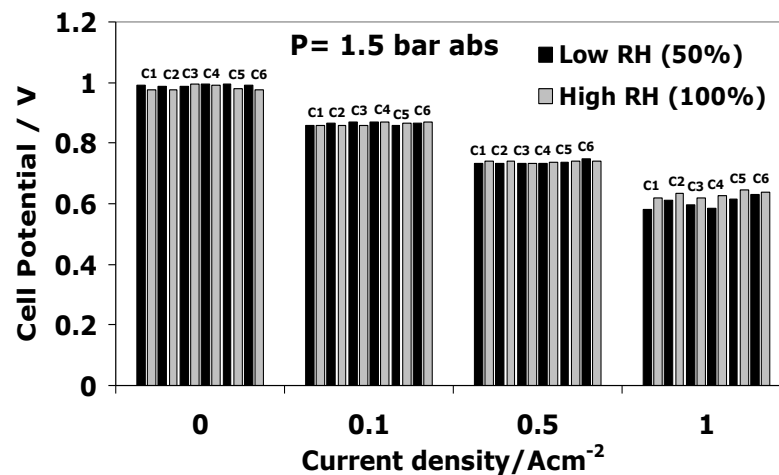


Figura 3.17: Distribuzione delle tensioni di cella (T: 80°C, p: 1,5 bar, RH: 50% e 100%)

Le figg. 3.18 e 3.19 mostrano una distribuzione di tensioni e di densità di potenza di ciascuna cella in funzione della corrente a 80°C ed a 1.5 bar. Si è osservato che tutte le celle mostrano lo stesso comportamento con una piccola differenza ad elevata densità di corrente per la cella collocata al centro dello stack.

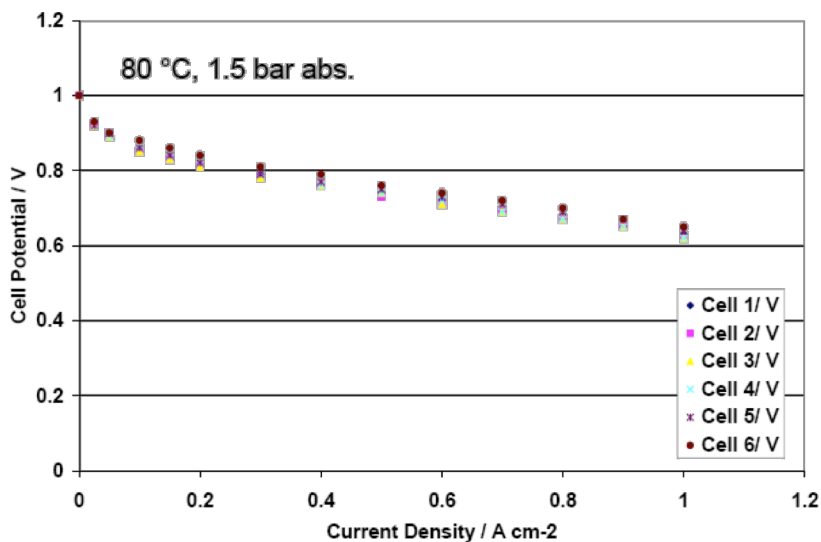


Figura 3.18: Curva tensione di cella-densità di corrente a 80 °C e 1,5 bar

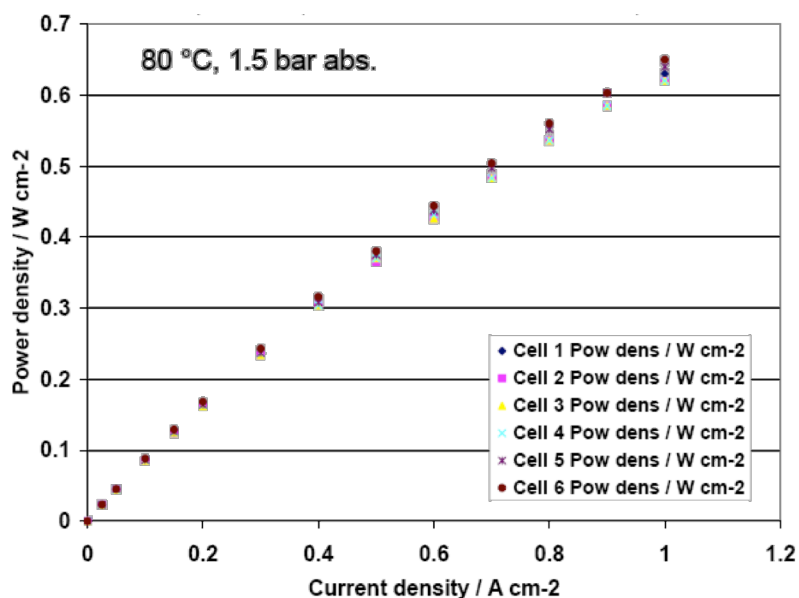


Figura 3.19: Curva densità di potenza di cella-densità di corrente a 80 °C e 1,5 bar

Le curve di polarizzazione e di densità di potenza sono state tracciate come funzioni della temperatura da 50°C a 110°C. Si nota come al di sopra degli 80°C le prestazioni della cella diminuiscono all'aumentare della temperatura, a causa dell'aumento di resistenza causato dalla disidratazione delle membrane (figg. 3.20 e 3.21).

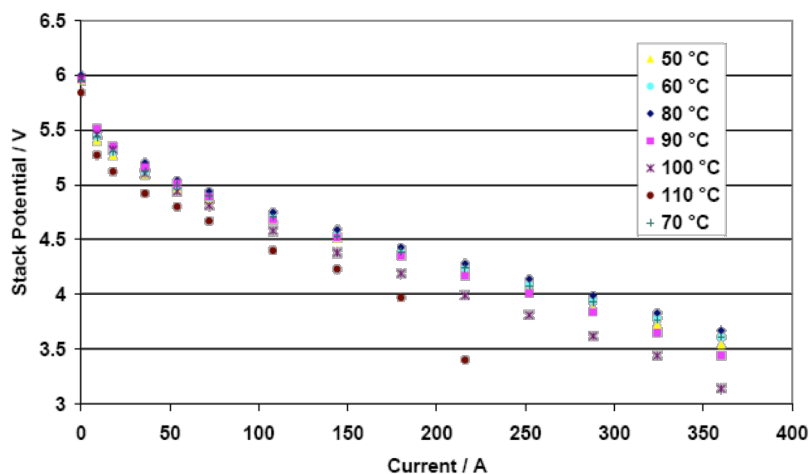


Figura 3.20: Curve tensione-corrente a varie temperature

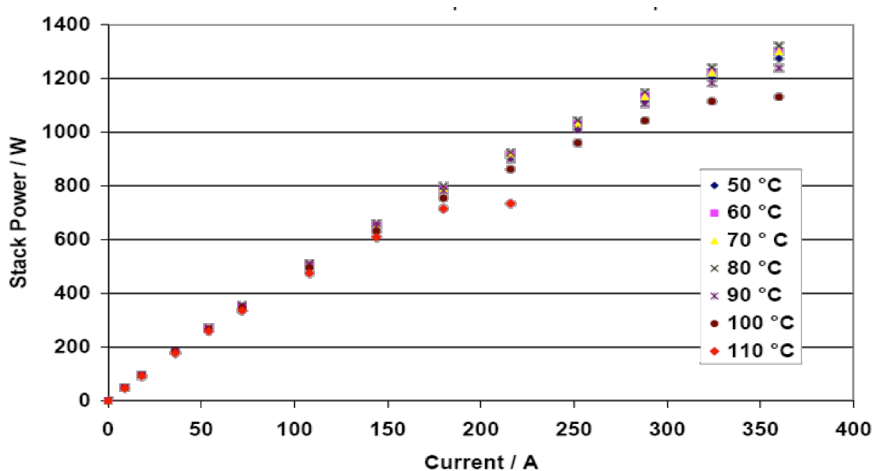


Figura 3.21: Curve potenza-corrente a varie temperature

3.4.2 Conclusioni sui test di uno short stack di tipo PEFC

I test di caratterizzazione hanno mostrato buone prestazioni di short-stack permettendo di confermare la scelta del sistema a celle a combustibile da 20 kW Andromeda® del quale si riportano di seguito i principali parametri dichiarati dal costruttore.

Lo stack di fornitura Nuvera è costituito da 128 celle con tensione in uscita di 110-75 V @ 35-325 A per una potenza elettrica totale nominale di 21 kW @ 250 A, con caratteristiche riportate in tabella 3.4:

Tabella 3.4 – Caratteristica dello stack Nuvera Andromeda® con potenza nominale 20kW

Corrente [A]	Tensione [V]	Potenza [kW]
36	108,8	4
72	102,4	7
108	97,28	11
144	93,44	13
180	89,6	16
216	87,04	19
252	84,48	21
288	80,64	23
324	76,6	25

La curva di polarizzazione dichiarata dalla casa madre per l'intero stack costituito da 128 celle è riportata in fig. 3.22.

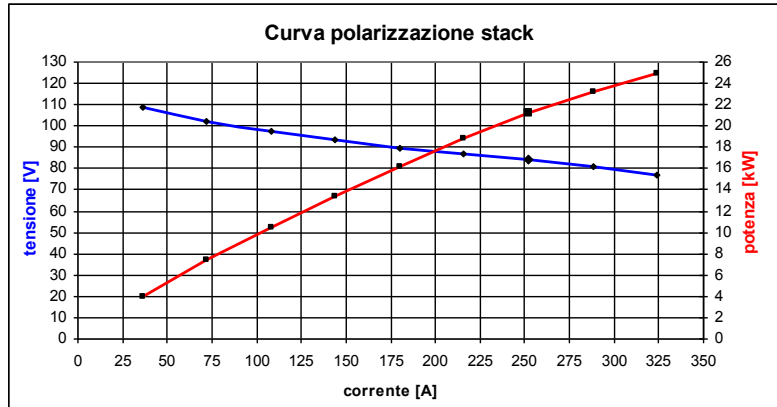


Figura 3.22: Curva di polarizzazione stack da 20 kW (128 celle)

Per completezza sono riportate le cadute di pressione sia dal lato dell'anodo sia dal lato del catodo e le cadute di pressione sul circuito di raffreddamento dello stack da 128 celle in funzione della corrente erogata (tabella 3.5 e fig. 3.23).

Tabella 3.5 – Cadute di pressione in funzione della corrente dello stack da 20 kW (128 celle)

Corrente [A]	ΔP anodo [mbar]	ΔP catodo [mbar]	ΔP acqua [mbar]
36	7	30	44
72	14	32	44
108	21	55	44
144	28	75	44
180	35	115	75
216	42	156	126
252	49	200	176
288	56	250	236
324	60	350	300

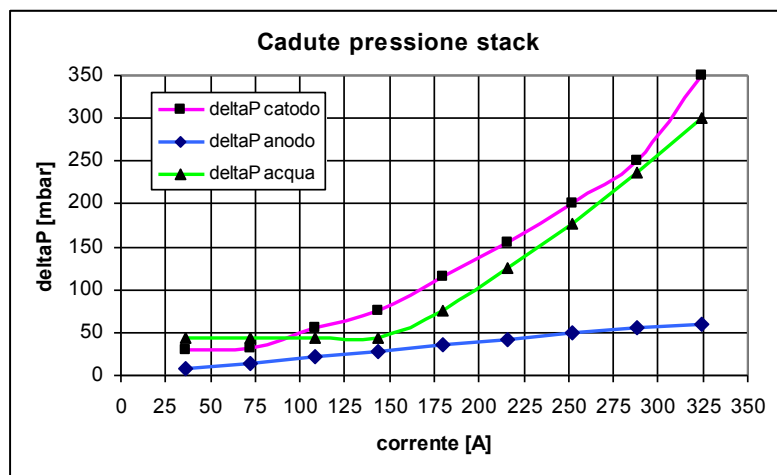


Figura 3.23: Cadute di pressione lato anodo, catodo e circuito di raffreddamento

Reference

- [1] Geoffrey P. Hammond, Tom Hazeldine, Indicative energy technology assessment of advanced rechargeable batteries, *Appl. Energy* 138 (2015) 559–571.
- [2] FY, 2014. Annual Progress Report – Energy Storage R&D, March 2015 .
- [3] Xianxia Yuan, Hansan Liu, JiuJun Zhang, Lithium ion Batteries-Advanced Materials and technologies. December 14, 2011 by CRC Press, ISBN 97 81439841280. Series: Green Chemistry and Chemical Engineering
- [4] Broahead, B. Scrosati, Proceedings of the symposium on lithium polymer batteries, *J. Electrochem. Soc.* (1997).
- [5] A. Marongiu, A. Damiano, Experimental Analysis of Lithium Iron Phosphate Battery Performances, *IEEE*, 2010 (97 8-1-4244-6 392-3).
- [6] Ye Yang, Hui Li, Performance Analysis of LiFePO₄ Battery Energy Storage for Utility-scale PV System, *IEEE*, 2014 (978-1-4799-5776-7/14).
- [7] Aditya Nadkarni, Investigation Of Lithium-ion Battery Cycling in a Gridtied Rooftop Pv System Through Accelerated Testing, *IEEE* (2013) (978-1-4673- 4896 -6 /13).
- [8] Matteo Galeotti, Lucio Cina, Corrado Giammanco, Stefano Cordiner, Aldo Di Carlo, Performance analysis and SOH (state of health) evaluation of lithium polymer batteries through electrochemical impedance spectroscopy, *Energy* 89 (2015) 678–686.
- [9] Julia Drillkens, Benedikt Lunz, Jens Muennix, Susanne Rothgang, Julia Kowal, Dirk Uwe Sauer, A review of current automotive battery technology and future prospects, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D, J. Automobile Eng.* 227 (5) (2016) 761–776.
- [10] Boucar Diouf, Ramchandra Pode, Potential of lithium-ion batteries in renewable energy, *Renewable Energy* 7 6 (2015) 37 5 –380.
- [11] Powertrain 2020 – The Li-Ion Battery Value Chain – Trends and Implications, Ronald Berger Strategy Consultants, 2011 August.
- [12] C.A.C. Sequeira, D.M.F. Santos, Introduction to Polymer Electrolyte Materials, Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [13] A. Pawlicka, J.P. Donoso, Polymer Electrolytes Based on Natural Polymers, Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [14] F. Alloin, C. Iojoiu, Composite Polymer Electrolytes for Electrochemical Devices, Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [15] J.S. Syzdek, Ceramic Polymer Electrolytes, Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [16] J.Y. Song, Y.Y. Wang, C.C. Wan, Review of gel-type polymer electrolytes for lithium-ion batteries, *J. Power Sour.* 77 (1999) 183–197.
- [17] Kazuo Murata, Shuichi Izuchi, Youetsu Yoshihisa, An overview of the research and development of solid polymer electrolyte batteries, *Electrochim. Acta* 45 (2000) 1501–1508.
- [18] Peter kurzweil, Lithium Battery Energy Storage: State of the Art Including Lithium–air and Lithium–sulfur Systems Electrochemistry Laboratory, University of Applied Sciences, Amberg, Germany, 2016.
- [19] Teja Maruvada, Lalit Patidar, Meet Patel, Thermal Characterization of Lithium Polymer Battery Module for Electric Vehicle Application. *Applied Mechanics and Materials (Volume 5 7 5) Chapter 4: Technologies of Power Systems, Energy and Thermal Engineering, Its Applications* Edited by: Shoujun Wang Pages 620-623 10.4028/www.scientific.net/AMM.575.620.
- [20] Geoffrey P. Hammond, Tom Hazeldine, Indicative energy technology assessment of advanced rechargeable batteries, *Appl. Energy* 138 (2015) 559–571.

- [21] B.G. Kim, F.P. Tredeau, Z.M. Salameh, Realistic Electric Vehicle Load Test for Lithium Polymer Batteries, IEEE, 2008.
- [22] B.G. Kim, F.P. Tredeau, Z.M. Salameh, Performance evaluation of lithium polymer batteries for use in electric vehicles, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), September 3–5 , Harbin, China, 2008.
- [23] Gennady Y. Gor, John Cannarella, Collen Z. Leng, Aleksey Vishnyakov, Craig B. Arnold, Swelling and softening of lithium-ion battery separators in electrolyte solvents, J. Power Sources 294 (2015) 167 –172.
- [24] Ningxin Zhang, Huaqiong Tang, Dissecting anode swelling in commercial lithium-ion batteries, J. Power Sour. 218 (2012) 52–55 .
- [25] Martin Brand, Simon Gläser, Jan Geder, Stefan Menacher, Sebastian Obpacher, Andreas Jossen, Daniel Quinger, Electrical Safety of Commercial Li-ion Cells Based on Nmc and Nca Technology Compared to LFP Technology, EVS27, Barcelona, Spain, 2013 November 17 –20.
- [26] Odile Capron, Ahmadou Samba, Noshin Omar, Peter Van Den Bossche, Joeri Van Mierlo, Thermal behaviour investigation of a large and high power lithium iron phosphate cylindrical cell, Energies 8 (2015) 10017 –10042.
- [27] Mike Yang, Lithium iron phosphate battery for cloud data storage system and telecom uninterruptible power system, Advanced Infocomm Technology (ICAT), 2013 6 th International Conference On, Hsinchu (2016) 228–229.
- [28] Lithium-ion battery overview, Technical Notes Lighting Global IFC, (2012) (Issue 10).
- [29] Ana-Irina Stan, Maciej Swierczynski, Daniel-Ioan Stroe, Remus Teodorescu, Søren Juhl Andreassen, A comparative study of lithium ion to lead acid batteries for use in UPS applications, Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2014 IEEE 36 th International, Vancouver (2016) 1–8.
- [30] Liubin Song, Xinhai Li, Zhixing Wang, Huajun Guo, Zhogliang Xiao, Feng Zhang, Sanju Peng, Thermal behaviors study of LiFePO₄ cell by electrochemical- calorimetric method, Electrochim. Acta 90 (2013) 461–467 .
- [31] Christian M. Julien, Karim Zaghib, Alain Mauger, Henri Groult, Enhanced electrochemical properties of LiFePO₄ as positive electrode of Li-Ion batteries for HEV application, Adv. Chem. Eng. Sci. 2 (2012) 321–329.
- [32] O. Veneri, F. Migliardini, C. Capasso, P. Corbo, Dynamic behaviour of Li batteries in hydrogen fuel cell power trains, J. Power Sour. 196 (2011) 9081–9086 .
- [33] IEC 62660-1 International Standard, Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles "Part 1: performance testing.
- [34] IEC 62485-2 International Standard, Safety requirements for secondary batteries and battery installations "Part 2: Stationary batteries.
- [35] IEC 6 1427 -2 International standard, Secondary cells and batteries for renewable energy storage- general requirements and methods of test " Part 2: on-grid applications.
- [36] IEC 6 26 6 0-1 International Standard, Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles "Part 1: performance testing.
- [37] EUCAR Traction Battery Working Group Specification of test procedures for Hybrid Electric Vehicle Traction Batteries.
- [38] Andrew Burke, Marshall Miller, Hengbing Zhao, Fast Charging Tests (up to 6 C) of Lithium Titanate Cells and Modules: Electrical and Thermal Response Research Report 2012 "UCD-ITS-RR-12-07 .
- [39] Charles Botsford, Adam Szczepanek, Fast charging vs. slow charging: pros and cons for the new age of electric vehicles, EVS24 Stavanger, Norway, May 13–16 , 2009.

- [40] Jianqiang Kang, Fuwu Yan, Pei Zhang, Changqing Du, Comparison of comprehensive properties of Ni-MH (nickel-metal hydride) and Li-ion (lithium-ion) batteries in terms of energy efficiency, *Energy* 70 (2014) 618–625.
- [41] Rengui Lu, Aochi Yang, Yufeng Xue, Lichao Xu, Chunbo Zhu, Analysis of the key factors affecting the energy efficiency of batteries in electric vehicle, *World Electr. Veh. J.* 4 (2010) 9–13.
- [42] Kaiyuan Li, King Jet Tseng, Energy efficiency of lithium-ion battery used as energy storage devices in micro-grid, *IECON2015 -Yokohama*, November 9–12, 2015.
- [43] Andrea Vezzini, *Lithium-Ion Battery Management: Gianfranco Pistoia (Ed. 2014), Lithium ion batteries Advances and Applications*, 2014 345 –360.
- [44] Joaquín Klee Barillas, Jiahao Li, Clemens Gunther, Michael A. Danzer, A comparative study and validation of state estimation algorithms for Li-ion batteries in battery management systems, *Appl. Energ.* 15 5 (2015) 455 –462.
- [45] Kumar Lalit, Jain Shailendra. Electric propulsion system for electric vehicular technology: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;29:924-40.
- [46] Sergi F., Andaloro L., Napoli G., Randazzo N., Antonucci V. Development and realization of a hydrogen range extender hybrid city bus. *J Power Sources* 2014;250:286-95.
- [47] <https://www.nuvera.com>

4 Descrizione di un caso studio reale

4.1 Caso studio: descrizione di un minibus elettrico ibrido e delle infrastrutture di ricarica e di rifornimento di idrogeno realizzati dal CNR ITAE

Oggetto del presente capitolo è la descrizione di un reale caso studio relativo alla realizzazione di un minibus ibrido elettrico a FC sviluppato presso il CNR ITAE di Messina. In particolare, l'attività ha riguardato oltre che lo sviluppo del veicolo anche lo sviluppo delle infrastrutture di supporto finalizzate a garantire la ricarica elettrica delle batterie ed il rifornimento di idrogeno.

I principali target prefissati per lo sviluppo del minibus a emissioni zero per applicazioni urbane e suburbane con architettura HEFCV sono:

- Mantenere bassi costi di investimento attraverso l'utilizzo di un FCS di piccole dimensioni;
- Ridurre al minimo il tempo e la frequenza per la ricarica delle batterie attraverso il rifornimento di idrogeno;
- Garantire un'autonomia superiore a 200 km;
- Garantire una strategia di gestione energetica versatile.

Per raggiungere questi obiettivi, è stata scelta una configurazione powertrain range extender, con batterie e FCS che funzionano in modo sinergico [1,2,3,4,5]. L'architettura elettrica è stata implementata a bordo di un minibus ibrido di classe B per applicazioni urbane e suburbane.

Con riferimento alle infrastrutture di supporto alla mobilità è stata dimensionata e realizzata una piattaforma energetica che, attraverso una micro smart grid, impiega energia proveniente da fonti rinnovabili per alimentare le stazioni di ricarica elettrica e di rifornimento di idrogeno. Obiettivo di tale piattaforma è l'autosostentamento energetico, ovvero la capacità di non gravare (o gravare il meno possibile) sulla rete elettrica nazionale.

4.1.1 Descrizione del minibus elettrico ibrido

Partendo da un minibus commerciale Iveco Daily, le attività di riconfigurazione hanno permesso di ottenere il minibus in configurazione ibrida (fig. 4.1) con le caratteristiche elencate in tabella 4.1.



Figura 4.1: HEFC Bus

Tabella 4.1 – Caratteristiche tecniche del minibus ibrido elettrico a FC

CARATTERISTICHE TECNICHE DEL MINIBUS IBRIDO ELETTRICO A FC			
Piattaforma	Iveco Daily	Batterie	LiPo
Categoria	M3 (trasporto persone)	Energia	70 kWh
Lunghezza	7348 mm	Potenza	Nominale: 30 kW
Larghezza	1996 mm		Picco: 120 kW
Altezza	3100 mm	Fuel Cell System	PEFC
Massa a terra	5600 kg	Potenza	20 kW
Posti a sedere	16+1, classe B	H₂ Storage	296 l@350 bar
Trazione	Trifase asincrono AC con inverter IGBT	Range	HEFCV: ≈ 220 km EV: ≈ 100 km
Potenza del motore elettrico	Nominale: 40 kW Picco: 80 kW (@ 2950 rpm)	Consumo	0,65-0,85 kWh/km

4.1.1.1 Valutazione energetica e dimensionamento dei principali sottosistemi

Al fine di rispettare gli obiettivi prefissati e ottenere i benefici dell'ibridazione, è stata effettuata un'adeguata valutazione energetica per determinare le dimensioni del sottosistema riportato nella tabella 4.1. In particolare, si è scelto che la principale fonte di energia fosse rappresentata dal pacco batterie in grado di fornire, da solo, la potenza di trazione richiesta dal motore in qualsiasi condizione. Sono stati scelti i motori MesDea AC Induction (tipo: 220-330) con potenza nominale di 40 kW (potenza massima di 80 kW) e il modulo inverter di trazione MesDea (tipo: 600 W) (figure 4.2 e 4.3, tabella 4.2). Il motore elettrico è accoppiato ad un adattatore di velocità. Seguendo l'esperienza di progetti simili, prendendo in considerazione la massa stimata del veicolo e analizzando la letteratura recente, nella fase di progettazione preliminare, il consumo di minibus è stato stimato nell'intervallo tra 0,5 e 0,9 kWh/km [5-7].

Partendo da questa considerazione, e considerato un Depth of Discharge (DoD) dell'80%, è stato dimensionato e sviluppato un Battery Energy System (BES) con potenza nominale di 30 kW (potenza di picco: 120 kW) ed energia di 70 kWh (fig. 4.4). Le batterie scelte per il sistema di accumulo, come evidenziato in tab. 4.1 sono le LiPo, selezionate sulla base dei test effettuati in laboratorio e descritti nel precedente capitolo 3.

Il FCS è stato dimensionato tenendo conto del duplice ruolo da svolgere a bordo veicolo: 1) contribuire alla trazione e 2) caricare le batterie quando la potenza richiesta dal motore è inferiore al suo set-point (fornendo potenza in specifiche condizioni di guida). Anche nel caso del FCS la scelta è stata frutto di una indagine di mercato e dei test eseguiti in laboratorio e riportati nel capitolo 3. Come precedentemente detto, infatti, l'indagine di mercato ha condotto alla selezione del modulo Andromeda® della Nuvera Fuel Cells ed i test su short stack della stessa tipologia hanno consentito di confermare e convalidare la selezione.

Allo scopo di ottenere un range di autonomia superiore a 200 km, è stato considerato un sistema di stoccaggio costituito da due bombole DyneCell (Dynetek w150) contenenti ciascuno 3,58 kg di idrogeno compresso a 350 bar (fig. 4.5). Il sistema di stoccaggio di idrogeno è diviso in tre differenti sezioni caratterizzate da diversi livelli di pressione: alta pressione (350 bar), media pressione (5 bar), bassa pressione (0,5 bar). La linea ad alta pressione connette le bombole a 350 bar con la linea a media pressione attraverso un regolatore di pressione settato a 5 bar, la linea a media pressione è connessa a quella bassa pressione attraverso un altro regolatore di pressione settato a 0,5 bar (fig. 4.5).

Tenendo conto del potere calorifico inferiore dell'idrogeno (LHV-Lower Heating Value) (densità di energia pari a 33,3 kWh/kg), l'energia da esso derivante, immagazzinata nelle bombole, è stata stimata pari a 238,43 kWh. Infine considerando che l'efficienza energetica del FCS è compresa nel range 46 ÷ 52%, l'energia derivante dal FCS effettivamente disponibile è stata stimata essere all'incirca pari a 110 kWh.

Seguendo la considerazione di cui sopra è stato implementato un FCS basato sullo stack Nuvera Andromeda, con potenza nominale di 20 kW (fig. 4.6).



Figura 4.2: Motore asincrono (40 kW) accoppiato con adattatore di velocità, a banco e installato sul bus

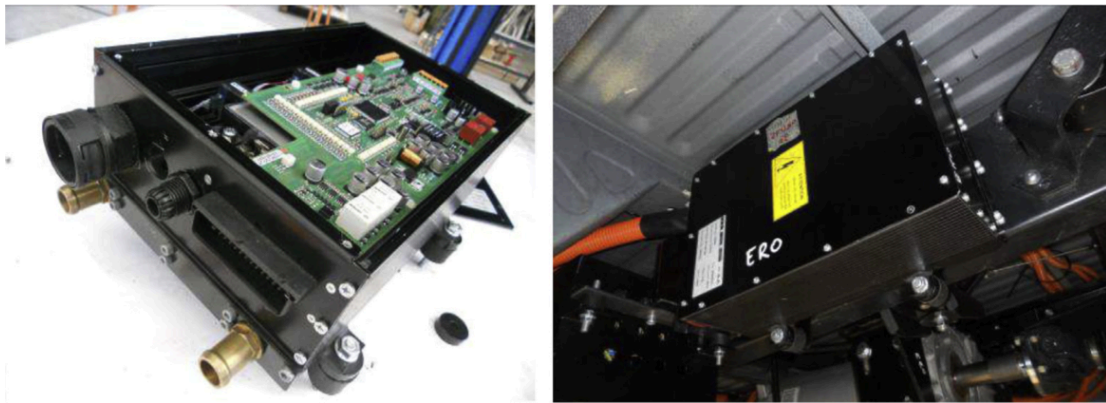


Figura 4.3: Modulo inverter di trazione, a banco e installato sul bus

Tabella 4.2 – Caratteristiche tecniche del motore e dell’inverter

Motore	Inverter
Potenza nominale (kW): 40	Uscita corrente nominale (A): 236
Coppia nominale (Nm): 130	Uscita corrente max (Arms): 400
Peso (kg): 79,5	Tensione di input (V): 80-400
Velocità nominale (rpm): 2850	Frequenza di commutazione (kHz): 3-9
Raffreddamento: acqua	Raffreddamento: Glicole 50%, Acqua 50%
	Modulazione: PWM



Figura 4.4: Battery Energy System - BES (potenza nominale: 30 kW, energia: 70 kWh)

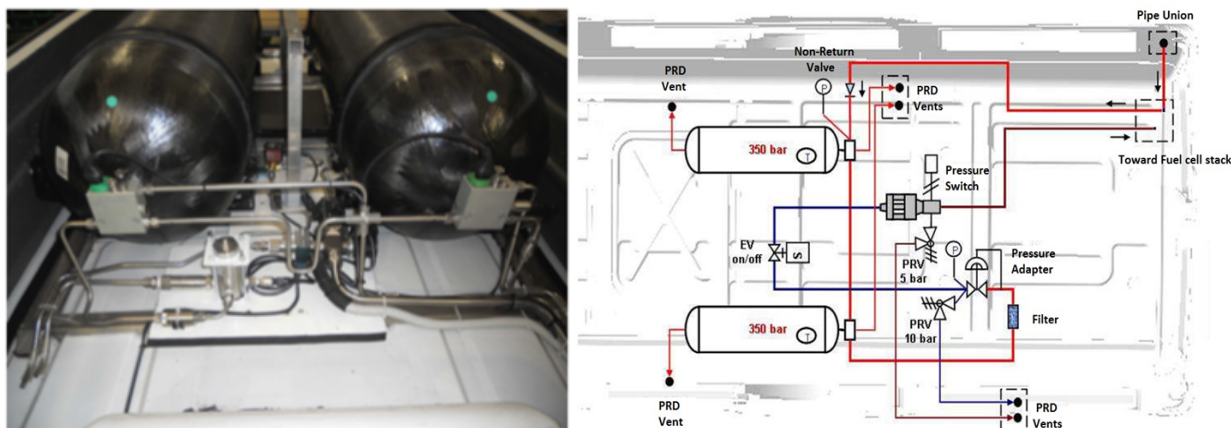


Figura 4.5: Sistema di storage idrogeno a bordo veicolo e pipeline

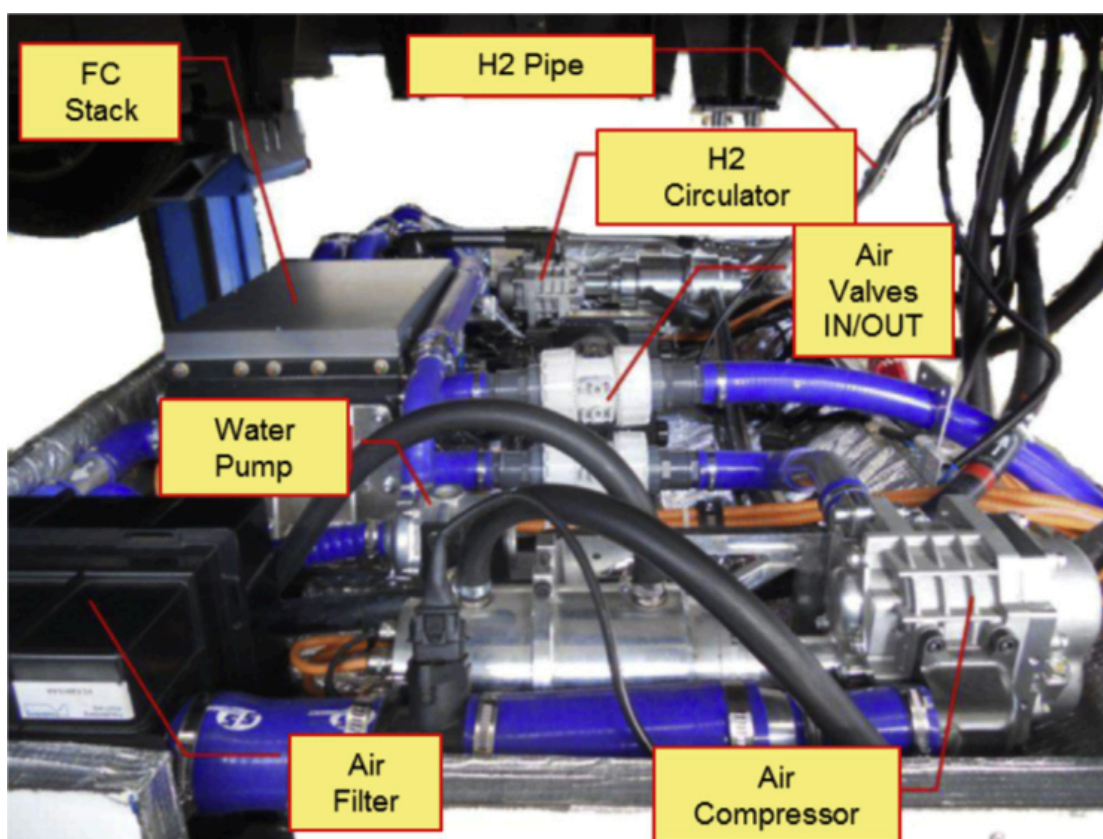


Figura 4.6: Fuel Cell System (potenza nominale: 20 kW)

4.1.1.2 Architettura del powertrain

Nella soluzione proposta il FCS è collegato in parallelo al BES tramite un convertitore step-up DC/DC che porta la tensione di uscita (nel range 70÷120 V) ai valori di tensione (nell'intervallo 280÷400 V) e regola la potenza di uscita del FCS in base alla strategia di gestione energetica.

Il motore (trifase AC asincrono) è collegato alle batterie tramite un inverter IGBT.

Una batteria di servizio da 12 V è collegata alla linea di bassa tensione da due convertitori DC/DC step-down (funzionanti alternativamente ma con la stessa funzione e con tensione d'ingresso nell'intervallo 100÷400 V) necessari per alimentare il sistema di controllo del FCS, il BMS del pacco batterie, l'HMI (Human

Machine Interface) e altri dispositivi ausiliari. L'inverter e i compressori del FCS, il climatizzatore e il riscaldatore elettrico (dispositivi ausiliari di potenza) sono collegati alla linea di alta tensione. Un diagramma a blocchi schematico è riportato in fig. 4.7.

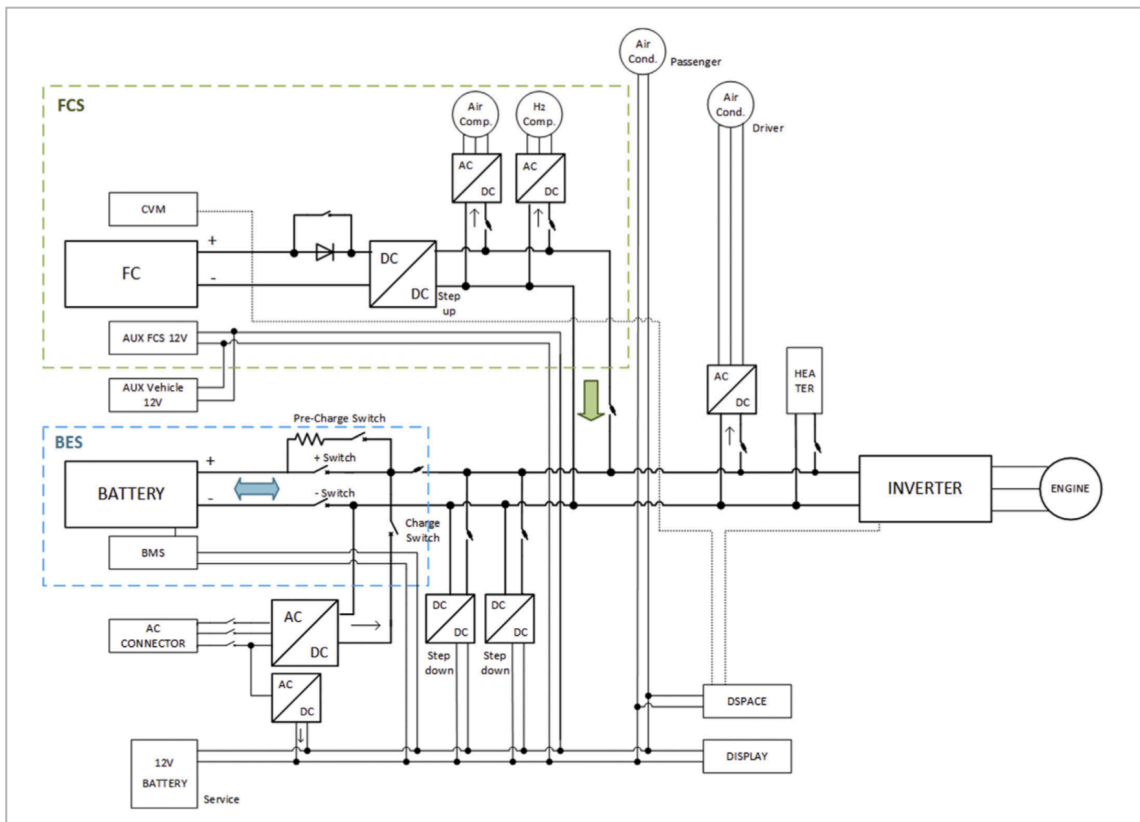


Figura 4.7: Diagramma a blocchi del sistema elettrico del powertrain

Il BES (tensione nominale di 355,2 V) è collegato sia al sistema di trazione che a quello ausiliario attraverso due contattori posizionati su entrambi i poli. Quando il veicolo è spento, questa linea non presenterà tensione. Il pacco batterie, collocato sotto il veicolo, è composto da 16 moduli LiPo da 22,2 V ciascuno. Ogni modulo è composto da 6 celle con una tensione nominale di 3,7 V e 200 Ah, collegate in serie.

Nelle figure 4.8 e 4.9 sono mostrate la fase di installazione del BES e l'area inferiore del veicolo che ospita il BES, l'inverter e il motore elettrico.



Figura 4.8: Installazione pacco batterie (BES)

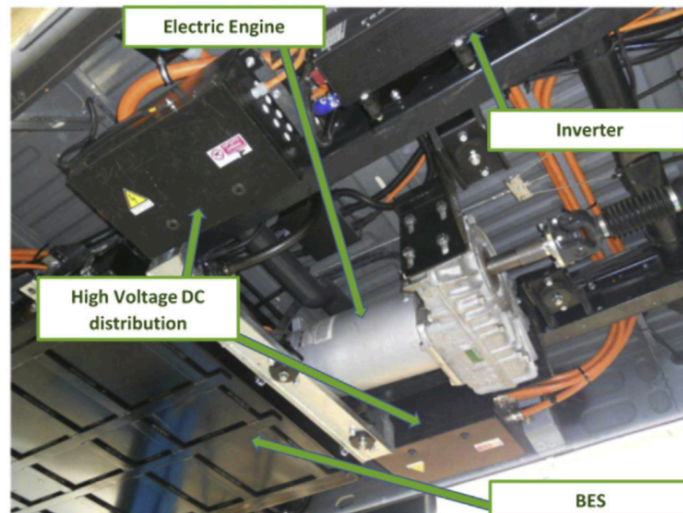


Figura 4.9: Posizione del BES, inverter e motore elettrico

In fig. 4.10 è mostrato il posizionamento del FCS che è installato nella parte posteriore del Minibus. Al fine di preservare il sistema da alte correnti di input anomale che potrebbero derivare dal malfunzionamento del convertitore DC/DC, un diodo di potenza è stato posto all'ingresso di quest'ultimo. Poiché il diodo tende a riscaldarsi per grandi correnti e causa perdite di potenza, è stato aggiunto in parallelo un interruttore che bypassa il diodo per correnti ≥ 70 A.



Figura 4.10: Posizione e installazione del FCS

La linea 12 V alimenta le ventole dei sistemi di raffreddamento, tutti gli attuatori che gestiscono l'acqua, l'aria e l'idrogeno (elettrovalvole on/off, pompe a bassa pressione, sensori, alimentazione della centralina, ecc.) e tutte le unità ausiliarie standard del veicolo. La batteria da 12 V (di servizio) e il convertitore step-down DC/DC principale si trovano nel vecchio vano motore. Infine, un'ulteriore linea (5 V), alimentata direttamente dall'unità di controllo DSpace, serve tutti i sensori che richiedono un'alimentazione stabilizzata.

4.1.1.3 Strategia di gestione dei flussi energetici: modalità di ricarica delle batterie, modalità di funzionamento del veicolo

Come già detto in precedenza, un powertrain elettrico ibrido comporta la presenza contemporanea di diversi flussi di potenze che devono essere attentamente pianificati e regolati secondo una strategia energetica appropriata.

In questo caso, al fine di preservare il FCS da continue variazioni di carico, che potrebbero ridurne la durata, si è imposto che il sistema funzioni continuamente a potenza costante ogni volta che le condizioni al contorno lo consentono [8]. Più precisamente:

- se il motore richiede una potenza superiore alla potenza del FCS, entrambe le sorgenti energetiche (FCS e batterie) contribuiscono alla trazione
- se il motore richiede una potenza inferiore a quella che il FCS è in grado di fornire (in caso di basso carico / decelerazione / frenata / fermata del bus), quest'ultimo funziona come un caricabatterie (fig. 4.11).

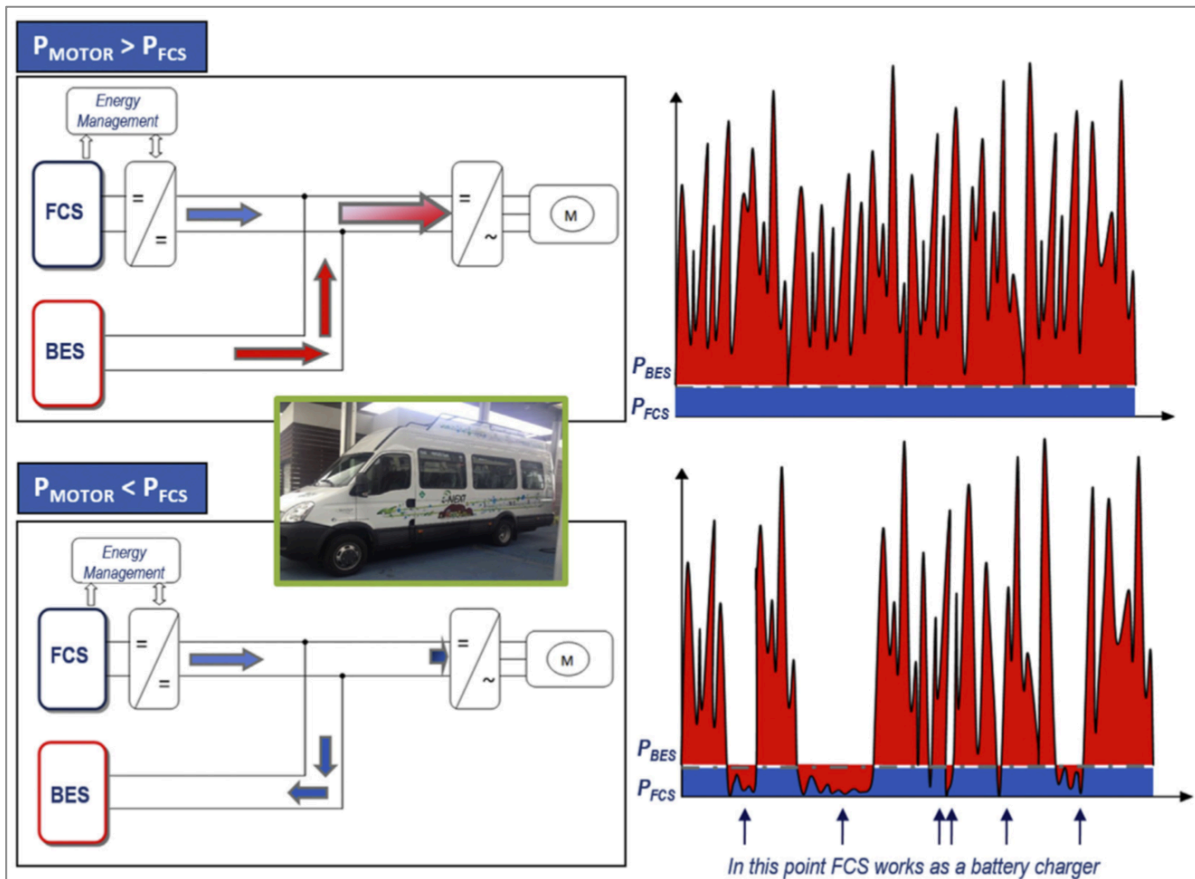


Figura 4.11: Rappresentazione dei flussi energetici del FC e delle batterie

Di particolare importanza è la gestione dello stato di carica della batteria (SOC) che regola la logica di avvio del FCS. Nello specifico se le batterie sono totalmente cariche con il SOC pari al 100% il veicolo si avvia automaticamente in modalità elettrica (Battery Electric Mode - BEM). In questo caso il motore elettrico è alimentato solo dalle batterie che sono state opportunamente dimensionate per fornire l'energia necessaria alla trazione.

Il FCS viene attivato quando il SOC scende al di sotto di una determinata soglia detta "bassa" e viene disattivato non appena il SOC supera una determinata soglia detta "alta".

Una caratteristica particolarmente importante è rappresentata dalla possibilità di modificare entrambe le suddette soglie (di attivazione e disattivazione del FCS in funzione del SOC della batteria) ed il valore della corrente di uscita del FCS attraverso un'interfaccia utente dedicata (HMI).

Tenendo conto che è possibile far funzionare il veicolo anche solo in BEM (modalità elettrica) la scelta di queste variabili dipende principalmente dal percorso pianificato per il veicolo con riferimento al sistema

urbano in cui viene utilizzato (raggio di utilizzo, pendenza della strada, disponibilità di infrastrutture di ricarica).

In fig. 4.12 viene mostrata la logica di intervento del FCS, in cui la soglia bassa è fissata al 60% di SOC e la soglia alta all'80% di SOC. La linea blu scuro migliora le implicazioni delle soglie di attivazione e disattivazione, ma una buona gestione dell'energia deve tendere a minimizzare il numero di avviamenti e spegnimenti del FCS. Se il FCS è attivo, la fase di mantenimento della carica è attiva anche quando il SOC della batteria è inferiore alla soglia di attivazione, quindi in queste situazioni la strategia energetica prevede di utilizzare l'energia fornita dal FCS per effettuare delle cariche di sostegno delle batterie al fine di rallentare il processo di scarica.

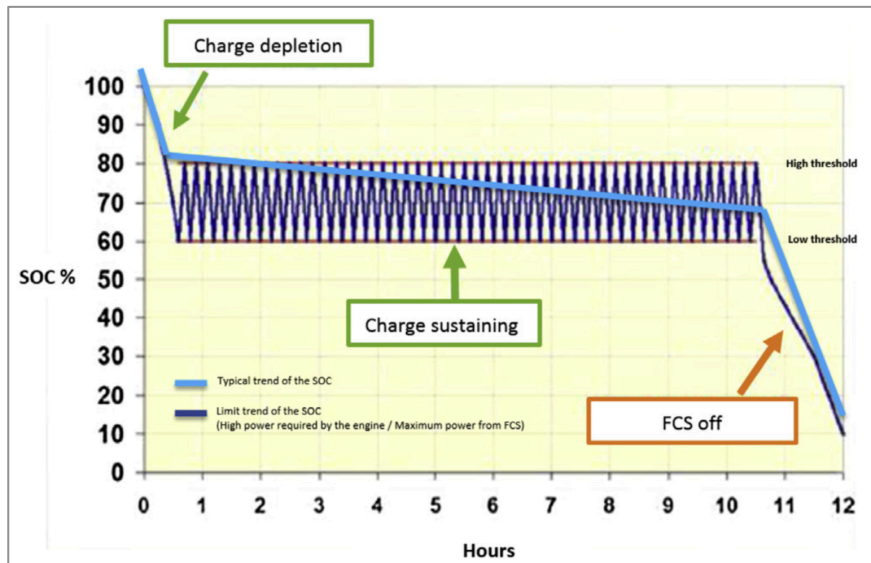


Figura 4.12: Logica di attivazione e disattivazione del FCS

4.2 Descrizione dell'infrastruttura di ricarica elettrica e di rifornimento di idrogeno: piattaforma energetica a supporto della mobilità

Come accennato all'inizio del capitolo, la piattaforma energetica realizzata a supporto della mobilità si basa sull'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili (FER). Esiste, infatti, molta incertezza sul reale potenziale di riduzione delle emissioni di gas serra legato all'elettrificazione dei trasporti. Molti studi hanno dimostrato che i reali benefici delle emissioni di gas serra di un veicolo elettrico possono variare in modo sostanziale e dipendono in modo critico principalmente dalla fonte di elettricità che viene utilizzata per alimentare il veicolo [9,10]. Pertanto nel caso specifico, al fine di evitare la delocalizzazione delle emissioni inquinanti derivate dall'utilizzo di un veicolo ibrido elettrico, la piattaforma energetica è stata progettata per far sì che l'energia elettrica necessaria per la ricarica delle batterie e per la produzione di idrogeno sia interamente prodotta tramite impianto fotovoltaico. Per il dimensionamento energetico è stata ipotizzata una missione d'uso giornaliera del minibus, che ovviamente corrisponde ad una determinata autonomia e quindi a uno specifico storage di idrogeno a bordo e ad una specifica capacità delle batterie.

4.2.1 Infrastruttura di ricarica elettrica (colonnina di ricarica)

La colonnina di ricarica (fig. 4.13) per veicoli elettrici selezionata per essere integrata nella microrete presenta le seguenti caratteristiche:

- Stazione di ricarica multi-standard in DC per la ricarica veloce configurabile con una, due o tre uscite da 20 kW. La sua struttura flessibile e multiprotocollo è compatibile con:
 - funzionalità in DC: CCS Combo2 e/o CHAdeMO
 - funzionalità in AC in base alle esigenze
- Prese con cavo e connettore in dotazione (Normative ISO/IEC14443A/B, ISO/IEC15693):
 - 1x20kW Combo2, 50-500VDC max. 50A;
 - 1x20kW CHAdeMO 1.0, 50A DC;
 - 1x20kW AC trifase, 32A AC.
- Ricarica simultanea in AC e DC
- Contatore AC per misurare l'energia erogata
- Monitoraggio remoto dell'operatività e assistenza
- Schermo touchscreen 8"
- Visualizzazione grafica dell'avanzamento di ricarica
- Autorizzazione RFID
- Autorizzazione tramite codice PIN
- Ethernet e modem 3G supportati
- Interfacciamento tramite protocollo OCPP.

Come si evince dalle caratteristiche tecniche la colonnina di ricarica elettrica rapida multi-standard (CCS, CHAdeMO e veloce CA) è in grado di caricare veicoli AC e DC con potenza massima di 20 kW. In realtà il caricabatterie elettrico installato a bordo del bus ha una potenza massima di 7,5 kW ed è in grado di ricaricare le batterie con una corrente massima pari a 27A. Quando l'alimentazione dalla rete elettrica è abilitata, i contattori del pacco batteria si chiudono e inizia il processo di carica. Durante tale fase di carica, il FCS e l'inverter sono disabilitati. Per una ricarica completa è necessario un tempo pari a circa 7,5 h (56 kW h, 80% DoD).



Figura 4.13: Colonnina di ricarica elettrica

4.2.2 Infrastruttura di rifornimento di idrogeno

L'infrastruttura di rifornimento di idrogeno (fig. 4.14) è stata dimensionata per consentire un rifornimento giornaliero del minibus elettrico ibrido alimentato a batterie e FC con stoccaggio in bombole da 150 litri a 350 bar. L'impianto è stato realizzato in configurazione modulare in previsione di un potenziale raddoppio della capacità produttiva e si avvale di tre sezioni principali (fig. 4.15):

- Sezione 1: elettrolizzatore alcalino in cui viene prodotto idrogeno tramite processo elettrolitico,
- Sezione 2: nella quale avviene la compressione dell'idrogeno ed infine
- Sezione 3: in cui l'idrogeno viene stoccato e distribuito tramite una colonnina erogatrice a servizio dei veicoli.

La produzione, la compressione e il rifornimento (ivi compresi tutti i relativi parametri operativi) sono gestiti tramite logica automatica dal Quadro di controllo. In caso di mancata disponibilità delle Sezioni 1 e/o Sezione 2, l'erogazione dell'idrogeno è garantita (fatto salvo l'indisponibilità di alimentazione elettrica), attraverso una apposita area di alloggiamento di pacchi bombole di idrogeno compresso presso (unità di back-up).

La ricarica dell'idrogeno avviene in due fasi: nella prima fase l'idrogeno viene trasferito dalla sezione di stoccaggio (170 bar) alle bombole installate sul bus finché le pressioni si bilanciano. La seconda fase consiste in una compressione di rabbocco (fino a 350 bar) attraverso un compressore ausiliario. Poiché il compressore è raffreddato a liquido, la temperatura del gas durante questa fase viene tenuta sotto controllo (a circa 45 °C).



Figura 4.14: Infrastruttura di rifornimento di idrogeno

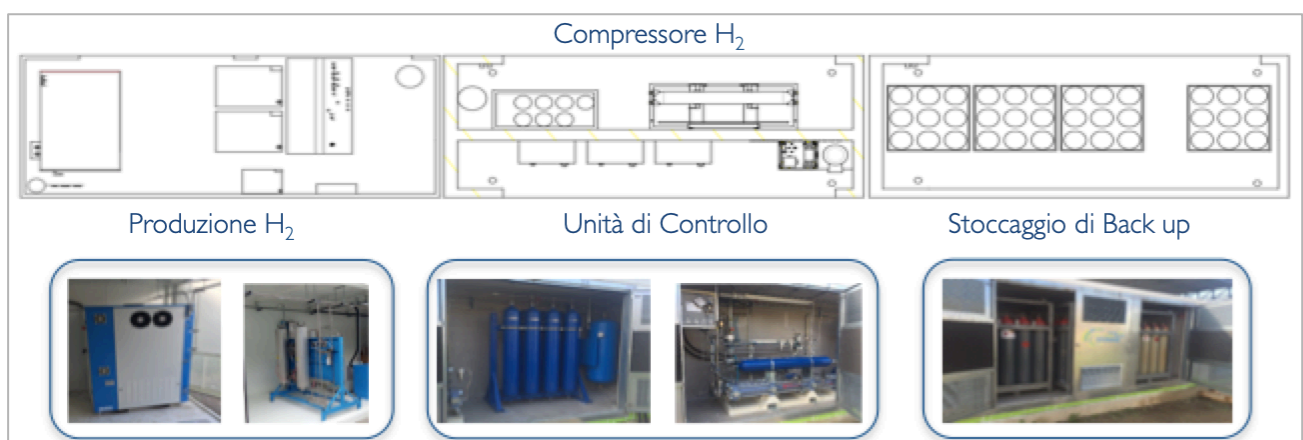


Figura 4.15: Sezioni 1, 2 e 3 dell'impianto idrogeno

Nella tabella 4.3 sono riportate le principali caratteristiche tecniche dell'impianto.

Tabella 4.3 – Caratteristiche tecniche dell'impianto idrogeno

Caratteristiche tecniche Impianto H ₂	
Produzione H ₂	6,6 Nm ³ /h @ 9 bar
Purezza H ₂	99,995% con ppm O ₂ < 5 ppm
Compressione H ₂	360 bar
Pressione max H ₂	350 bar
Tempo di rifornimento	30 min [300 l @ 350 bar]
Consumi dell'impianto	Produzione: 30,5 kW
	Compressione: 6,5 kW
	Ausiliari: 3 kW

4.2.3 Infrastrutture a supporto della mobilità: impianto fotovoltaico e sistema di accumulo in batterie

Gli impianti descritti nei due precedenti paragrafi (4.2.1 e 4.2.2) costituiscono, all'interno della microrete, i cosiddetti utilizzatori in quanto necessitano di energia elettrica per ricaricare le batterie dei veicoli e per produrre, comprimere e rifornire idrogeno. Per far sì che tale energia non venga richiesta alla rete ma provenga da fonti energetiche rinnovabili è stato opportunamente dimensionato e realizzato un impianto fotovoltaico da 100 kW (fig. 4.16). Questo consente di rendere realmente sostenibile la mobilità elettrica ottenendo un bilancio energetico nullo tra produzione e domanda. Inoltre, per bilanciare l'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico e per garantire l'autosufficienza energetica dell'intero sistema anche in condizioni meteo poco favorevoli ai fini della produzione solare, è stato realizzato un sistema di accumulo di energia elettrochimico (ESS-Energy Storage System) da 300 kWh (potenza nominale di 100 kW), costituito da 16 batterie ad alta temperatura di cloruro di nichel (fig. 4.17). L'ESS è collegato alla microrete tramite un inverter bidirezionale da 100 kW mentre il trasformatore da 400 V/20 kV collega la microrete alla rete principale. Nelle tabelle 4.4 e 4.5 sono riportate le caratteristiche tecniche dell'impianto fotovoltaico e dell'ESS. L'impianto ha una capacità produttiva di idrogeno nominale di 6,6 kgH₂/giorno a 360 bar, in grado di assicurare un rabbocco completo giornaliero del veicolo.

Infine in fig. 4.18 è rappresentato il layout della piattaforma energetica composta da:

- Produzione di energia: Impianto PV;
- Storage energetico: ESS;
- Utilizzatori: Colonnina di ricarica elettrica e Impianto di produzione, compressione e rifornimento di idrogeno).



Figura 4.16: Impianto fotovoltaico da 100 kW



Figura 4.17: Energy Storage System e batteria FIAMM SoNickST523

Tabella 4.4 – Caratteristiche tecniche dell’Impianto fotovoltaico

Caratteristiche tecniche Impianto PV	
Inverter	4 x 25 kW
Stringhe per inverter	5 (22 moduli)
Esposizione	Est - vestt
Potenza di picco	100 kWp
Stima produzione	150 MWh/anno

Tabella 4.5 – Caratteristiche tecniche del sistema di storage energetico

Caratteristiche tecniche ESS	
Tipo batterie	Fiamm SoNickST523 (NaNiCl ₂)
N° di batterie	16
Esposizione	Est - vestt
Potenza	100 kWp
Energia (80% DoD)	300 kWh

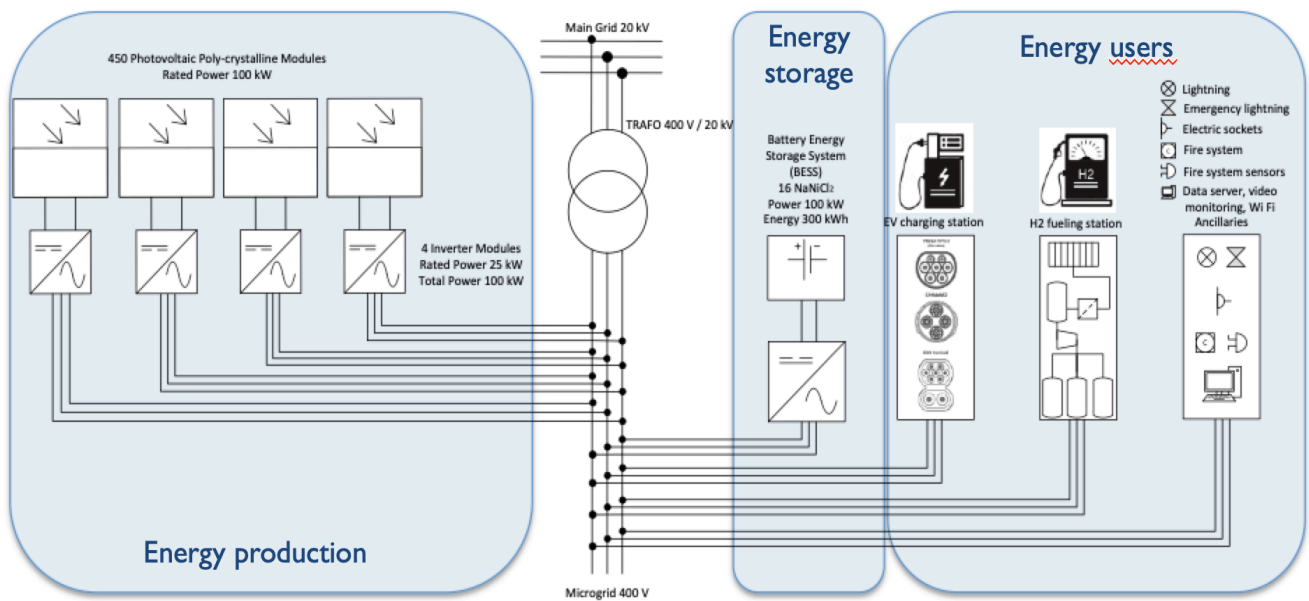


Figura 4.18: Layout della piattaforma energetica a supporto della mobilità

Reference

- [1] Andreasen S, Ashworth L, Sahlin S, Jensen H-CB, Kær SK. Test of hybrid power system for electrical vehicles using a lithium-ion battery pack and a reformed methanol fuel cell range extender. *Int J Hydrogen Energy* 22 January 2014; 39 (4):1856-63.
- [2] Duigou AL, Smatti A. On the comparison and the complementarity of batteries and fuel cells for electric driving. *Int J Hydrogen Energy* 22 October 2014;39(31):17873-83.
- [3] Hwang Jenn-Jiang, Hu Jia-Sheng, Lin Chih-Hong. Design of a range extension strategy for power decentralized fuel cell/ battery electric vehicles. *Int J Hydrogen Energy* 2015;40(35):11704-12.
- [4] Ettahir K, Boulon L, Agbossou K. Optimization-based energy management strategy for a fuel cell/battery hybrid power system. *Appl Energy* 2016;163:142-53.
- [5] Sergi F, Andaloro L, Napoli G, Randazzo N, Antonucci V. Development and realization of a hydrogen range extender hybrid city bus. *J Power Sources* 2014;250:286-95.
- [6] Andaloro L, Napoli G, Sergi F, Dispenza G, Antonucci V. Design of a hybrid electric fuel cell power train for an urban bus. *Int J Hydrogen Energy* 18 June 2013;38(18):7725-32.
- [7] CIVITAS, 2MOVE2, Cerny Jiri, Jarolin Zdenek, Heich Hermann. New forms of sustainable urban transport and mobility, development of e-mobility and the introduction of e-minibuses in Brno. 7 March 2016. Internal Deliverable No.: DI 5.02.02.
- [8] Xu Liangfei, Mueller Clemens David, Li Jianqiu, Ouyang Minggao, Hu Zunyan. Multi-objective component sizing based on optimal energy management strategy of fuel cell electric vehicles. *Appl Energy* 2015;157:664-74.
- [9] Doucette RT, Mc Culloch MD. Modelling the CO2 emissions from battery electric vehicles given the power generation mixes of different countries. *Energy Policy* 2011;39:803-11.
- [10] Hawkins TR, Singh B, Majeau-Bettez G, Stromman AH. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Ind Ecol* 2012;17(1):53-64.

5 Test su strada del minibus elettrico ibrido realizzato presso il CNR ITAE

Il presente capitolo è strutturato in tre parti. La prima parte analizzerà i test su strada effettuati nell'ambito del programma di servizi realizzato presso il Comune di Capo d'Orlando.

La seconda parte del capitolo tratterà i test su strada effettuati per verificare le condizioni limite, ovvero valutare l'autonomia massima del veicolo, in modalità puramente elettrica (cioè con la sola presenza delle batterie).

Infine, la terza parte tratterà test analoghi ai precedenti utilizzando il veicolo in modalità ibrida (batterie e cella a combustibile) per verificare l'autonomia massima del veicolo in questa modalità operativa.

5.1 Test su strada effettuati durante la visita di luoghi identificati nel programma *“Conoscere il territorio..... Capo d'Orlando ed oltre...”*

La fase di sperimentazione del powertrain elettrico ibrido a batterie e FC è stata condotta direttamente a bordo del minibus sul quale è stato installato.

Il minibus è stato impiegato presso il Comune di Capo d'Orlando (ME) per svolgere servizi di trasporto dei cittadini. Tramite il progetto cofinanziato dall'Unione Europea (PO FESR 2007/2013 Fondo Europeo di sviluppo regionale asse VI – Linea intervento 6.2.2.3) *Banca del tempo* è stata avviata l'iniziativa *“Conoscere il territorio..... Capo d'Orlando ed oltre...”* rivolta a tutti i cittadini al fine di promuovere attività socializzanti e conoscenza del territorio nebroideo valorizzando la rete dei servizi territoriali.

L'iniziativa promossa ha consentito al CNR ITAE di acquisire dati tecnico-scientifici relativi ai sistemi e sottosistemi installati a bordo del minibus al fine di valutarne l'affidabilità, l'autonomia e le logiche di gestione e controllo.

Pertanto con l'obiettivo di valutare le prestazioni del veicolo, sono state pianificate undici trasferte nell'area della catena montuosa dei Nebrodi (fig. 5.1), durante le quali sono stati eseguiti test su strada basati su cicli di guida reali che prevedevano la partenza dal Comune di Capo d'Orlando e l'arrivo, di volta in volta, in uno dei paesi siti nei dintorni (andata e ritorno).

Durante ciascun percorso sono stati acquisiti tutti i parametri operativi del bus (tab. 5.1). Le misure sono state eseguite collegando un PC al CAN bus del veicolo utilizzando il software PCAN Explorer® per la raccolta dei dati. Per ciascuna trasferta sono stati acquisiti tutti i parametri operativi riportati in tab. 5.1, ma sono stati riportati solo quelli principali (tab. 5.2): SOC (iniziale e finale), pressione dell'idrogeno all'interno delle bombole (iniziale e finale) e pendenza massima riscontrata lungo la distanza. Come già detto, la partenza di ciascun test coincide con l'area di parcheggio del bus sita nel comune di Capo d'Orlando [1].

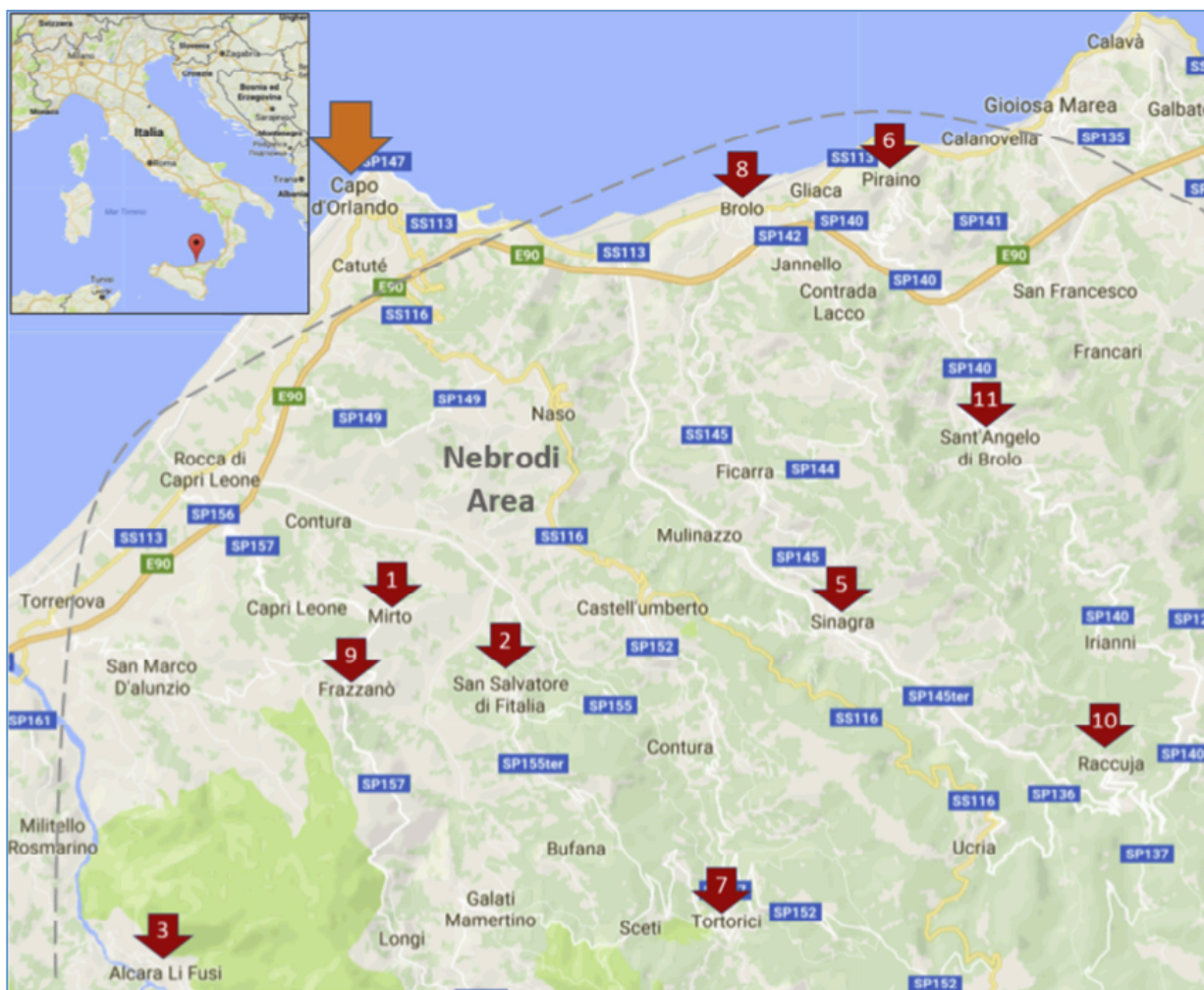


Figura 5.1: Destinazioni delle trasferte oggetto di test su strada

Tabella 5.1 – Variabili monitorate

Dati veicolo	
Batterie di trazione	Veicolo
Tensione [V]	Giri Motore [rpm]
Corrente [A]	Velocità [km/h]
Potenza [kW]	Coppia [Nm]
SOC [%]	Temperatura Motore [°C]
Batteria di servizio	Autonomia [Km]
Tensione [V]	Sistema Fuel Cell
Corrente di ricarica [A]	Temperatura Stack [°C]
Bombole di idrogeno	Tensione [V]
Pressione [bar]	Corrente [A]
Temperatura [°C]	Livello di attivazione SOC [%]
Concentrazione Idrogeno	Status
	Sistema Fuel Cell
	Modalità solo elettrica

Tabella 5.2 – Principali variabili registrate durante le trasferte

N.	Destinazione	Modalità Veicolo; Soglie FCS	Distanza percorsa [km]	Velocità media [km/h]	SOC (Start) [%]	SOC (End) [%]	Pressione H ₂ (Start) [bar]	Pressione H ₂ (End) [bar]	Pendenza max [%]
1	Mirto	H; 75%-85%	43,3	20,8	89	74	312,5	225,5	8,3
2	S. Salvatore di Fitalia	H; 75%-85%	47,8	22,2	95	72	318	264	9,3
3	Alcara Li Fusi	H; 75%-85%	44,1	20,3	99	69	318	246	8,5
4	Longi	H; 75%-85%	61,1	20,7	91	60	286,5	225	12
5	Sinagra	H; 75%-85%	41,4	20,5	100	72	225	183	10
6	Piraino	H; 70%-80%	42,2	21,0	100	67	178	160	8
7	Tortorici	H; 70%-80%	36,4	20,0	100	71	159	133,5	8
8	Brolo	E; NC-NC	29,0	18,0	100	74	135	135	6
9	Frazzanò	H; 70%-80%	34,6	19,6	99	64	130	60	10
10	Raccuia	H; 70%-80%	62,0	18,5	99	55	60	20	8
11	Sant'Angelo di Brolo	H; 70%-80%	47,8	20,5	78	27	135	82,5	8

La distanza media percorsa per ogni viaggio è pari a 44,5 km con un consumo medio di circa 0,8 kWh/km, calcolato sulla base degli interi percorsi effettuati su strade di montagna con una pendenza media dell'8,8%. In pianura il consumo registrato era inferiore a 0,7 kWh/km.

In questa prima fase, per non sovraccaricare il FCS e prolungarne il tempo di vita, è stata impostata una potenza di 12 kW per tutti i test sebbene la potenza nominale del FCS è pari a 20 kW. In queste condizioni (con una corrente di 120 A) il consumo stimato di idrogeno è stato di circa 0,2 g/s.

Di seguito si riporta l'analisi solo di alcune trasferte esemplificative in quanto caratterizzate da differenti impostazioni del minibus:

- Trasferta n. 1 (Mirto): caratterizzata da soglie di attivazione e disattivazione del FCS rispettivamente pari a 75% e 85%;
- Trasferta n. 7 (Tortorici): caratterizzata da soglie di attivazione e disattivazione del FCS rispettivamente pari a 70% e 80%;
- Trasferta n. 8 (Brolo): caratterizzata da un utilizzo del minibus in modalità puramente elettrica (senza intervento del FCS)
- Trasferta n. 11 (Sant'Angelo di Brolo): caratterizzata da una variazione di potenza del FCS e dallo switch manuale dalla modalità ibrida a quella elettrica.

Trasferta n. 1 (Mirto):

Nel caso della trasferta n. 1 il percorso è mostrato in fig. 5.2 e l'andamento delle principali variabili è riportato in fig. 5.3. Il percorso, con destinazione Mirto, è stato diviso in sezioni che tengono conto delle fermate intermedie (tab. 5.3).

Il Minibus è partito dall'area di parcheggio con un SOC pari all'89% e una pressione di idrogeno pari a 312,5 bar. La prima fermata è stata fatta per far salire tutti i passeggeri (16 persone), e durante tale tratta il minibus ha consumato circa il 3% del SOC (Sezione B). Poiché le soglie di attivazione e disattivazione del FCS sono state fissate rispettivamente al 75% e all'85%, durante le sezioni A e B il FCS non è intervenuto rimanendo inattivo. Il FCS è intervenuto, invece, durante la Sezione C quando il SOC ha raggiunto il 75%. Con una potenza di 12 kW (120 A, 100 V), il FCS ha contribuito alla trazione durante la marcia del veicolo e ha ricaricato le batterie durante la sosta presso il paese di Rocca di Caprileone incrementando il SOC del 3% (Sezione D). Successivamente, durante il tratto da Rocca di Caprileone a Mirto, il SOC è diminuito del 3% (Sezione E). Giunto a destinazione (Mirto) il veicolo è rimasto parcheggiato ma con il FCS acceso (Sezioni F e G). In questa fase il FCS ha ricaricato le batterie, portando il SOC dal 66% all'85% (sezione F), valore in

corrispondenza del quale il FCS si disattiva (soglia di disattivazione). Il SOC si è mantenuto costante per il restante intervallo di tempo in cui il bus è rimasto parcheggiato (Sezione G). Nella sezione H, relativa al viaggio di ritorno da Mirto all'area di parcheggio di Capo d'Orlando, il SOC è sceso dall'85% al 79%. In questa tratta, è possibile notare l'importante contributo fornito dal sistema di frenata rigenerativa che si attiva durante la discesa del veicolo. L'energia utilizzata per compiere il viaggio di ritorno (Sezione H) corrisponde a circa il 6% del SOC. Per fare lo stesso percorso durante la salita (Sezione C + Sezione E) è stato utilizzato circa il 23% del SOC e in parte del percorso è stato utilizzato anche il FCS. La potenza istantanea recuperata ha raggiunto, in questa fase, un picco di 18,6 kW (corrente di carica 52,1 A@357,5 V). Dopo una breve sosta per far scendere i passeggeri (Sezione I), il Minibus si è diretto verso l'area di parcheggio (Sezione L). In quest'ultimo tratto il SOC ha raggiunto la soglia di attivazione del FCS per cui si è registrato anche in questo caso l'intervento del FCS, seppur molto breve. Durante l'intera trasferta n. 1 il valore massimo di corrente è stato pari a 298,9 A, corrispondente a 6696 giri/min. La tensione delle batterie era compresa nell'intervallo 320 ÷ 365 V. Considerando che il FCS ha lavorato a punto fisso per 2 ore e 53 minuti, il suo contributo energetico è stato circa 35 kWh, consentendo di risparmiare circa il 50% del SOC rispetto allo stesso Minibus funzionante in modalità puramente elettrica. In questo caso il veicolo, rientrando con un SOC pari al 74%, non necessita di ricarica elettrica (tempo di ricarica di circa 4 ore e 40 minuti per recuperare l'energia utilizzata) e sarebbe in grado di eseguire un'altra missione simile [1].

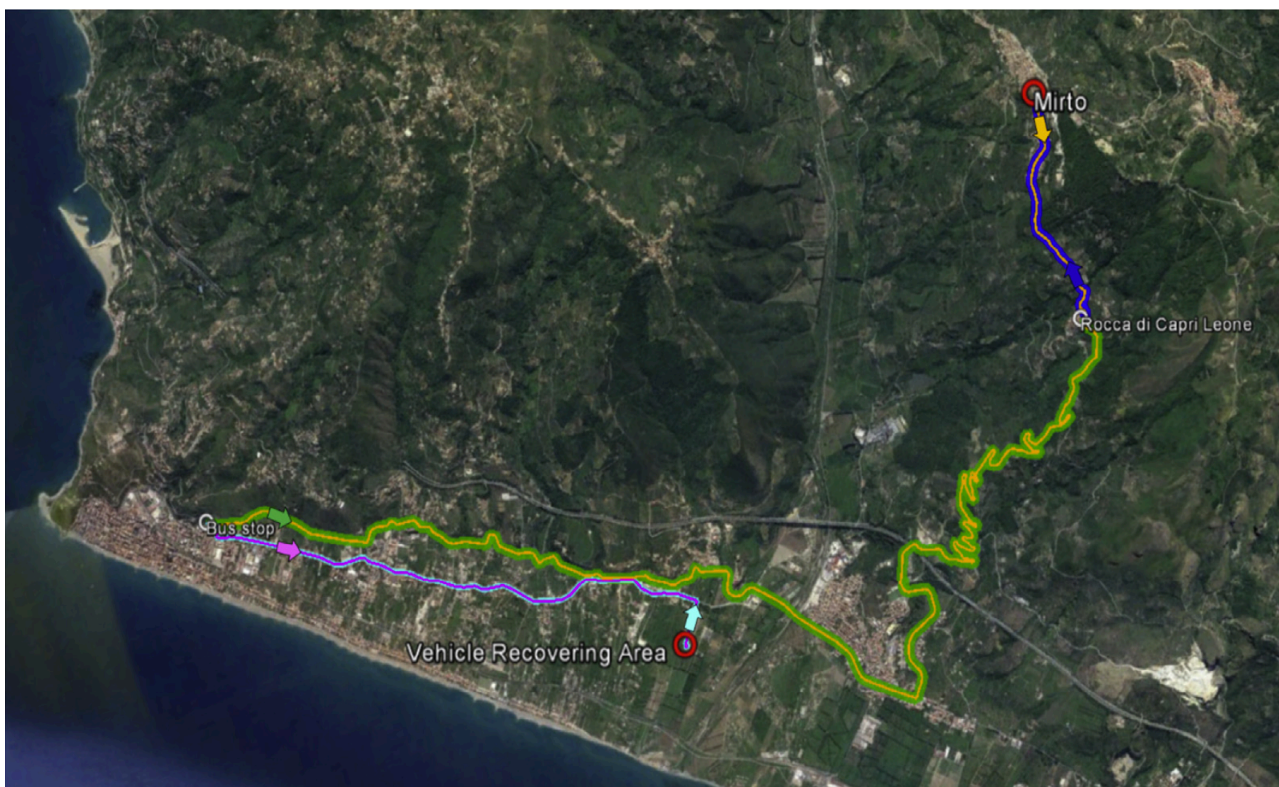


Figura 5.2: Percorso n. 1 (Destinazione: Mirto)



Figura 5.3: Percorso n. 1 (Mirto): Velocità del motore e principali variabili del FC system e delle batterie

Tabella 5.3 – Principali variabili del percorso n. 1 (Mirto) suddiviso in sezioni

Sezioni (Percorso n. 1)	SOC (Start) [%]	SOC (End) [%]	Pressione H ₂ (Start) [bar]	Pressione H ₂ (End) [bar]
A	89	86	312,5	312,5
B	86	86	312,5	312,5
C	86	66	312,5	307
D	66	69	307	295
E	69	66	295	289
F	66	85	289	227
G	85	85	227	227
H	85	79	227	227
I	79	79	227	227
L	79	74	227	225,5

I percorsi da 2 a 5, riportati nella tab. 5.2, a meno della destinazione, sono molto simili al primo in quanto le soglie di attivazione e disattivazione del FCS sono state mantenute uguali alle impostazioni fissate per il percorso n. 1 (75% e 85%). I vari percorsi effettuati con queste impostazioni sono stati utilizzati per testare e validare le caratteristiche dei sottosistemi del powertrain, la strategia energetica, la logica di gestione implementata, il consumo medio di carburante e il comportamento del veicolo lungo diverse pendenze. Nei percorsi 6, 7, 9 e 10 le soglie di attivazione e disattivazione del FCS sono state modificate per analizzare il comportamento delle batterie e del FCS in punti di lavoro più bassi, in particolare sono state portate a 70% (attivazione) e 80% (disattivazione). Tra questi percorsi si riporta quello n. 7 (destinazione Tortorici).

Trasferta n. 7 (Tortorici):

Il percorso della trasferta n. 7 (destinazione Tortorici) è mostrato in fig. 5.4 e l'andamento delle principali variabili è riportato in fig. 5.5. Anche in questo caso il percorso è stato diviso in sezioni che tengono conto delle fermate intermedie (tab. 5.4).

Il Minibus è partito dall'area di parcheggio con un SOC pari al 100% e una pressione di idrogeno pari a 159 bar. La prima fermata è stata fatta per far salire una parte dei passeggeri (Sezioni A + B) e dopo circa 5-6 min è stata fatta un'altra fermata per far salire la rimanente parte dei passeggeri (Sezioni C + D). Durante tale tratta il minibus ha consumato circa il 2% del SOC raggiungendo il valore del 96%. Successivamente il bus ha intrapreso il viaggio per Tortorici (Sezione E) durante il quale il SOC è sceso al 72% (24% in meno). Poiché le soglie di attivazione e disattivazione del FCS sono state fissate rispettivamente al 70% e all'80%, durante le sezioni A, B, C, D ed E il FCS non è intervenuto rimanendo inattivo. Giunto a destinazione, il veicolo è rimasto parcheggiato ma, essendo il SOC vicino alla soglia di attivazione del FCS, è stato deciso di lasciare il motore acceso per verificare la corretta attivazione del FCS una volta raggiunta la relativa soglia (Sezione F). In questa fase il FCS si è acceso non appena il SOC ha raggiunto il valore del 70% ed ha ricaricato le batterie portando il SOC all'80%, valore in corrispondenza del quale il FCS si disattiva. Il SOC si è mantenuto costante per il restante intervallo di tempo in cui il bus è rimasto parcheggiato ed è nuovamente sceso al 74% nella sezione G, relativa al viaggio di ritorno da Tortorici all'area di parcheggio di Capo d'Orlando. Dalla curva del SOC nella Sezione G è possibile osservare l'apporto energetico della frenata rigenerativa che si attiva durante la discesa del veicolo e contribuisce a piccoli incrementi del SOC. Dopo la sosta per far scendere i passeggeri (Sezione H), il Minibus si è diretto verso l'area di parcheggio (Sezione I), perdendo un ulteriore 3% di SOC (valore finale 71%). In questa trasferta n. 7 il FCS ha lavorato a punto fisso (12 kW) per circa 53 minuti per cui il suo contributo energetico è stato pari a 11 kWh circa, consentendo di risparmiare circa il 16% del SOC rispetto allo stesso Minibus funzionante in modalità puramente elettrica. Anche in questo caso il veicolo non necessita di ricarica elettrica e potrebbe eseguire un altro viaggio simile.



Figura 5.4: Percorso n. 7 (Destinazione: Tortorici)



Figura 5.5: Percorso n. 7 (Tortorici): Velocità del motore e principali variabili del FC system e delle batterie

Tabella 5.4 – Principali variabili del percorso n. 7 (Tortorici) suddiviso in sezioni

Sezioni (Percorso n. 7)	SOC (Start) [%]	SOC (End) [%]	Pressione H ₂ (Start) [bar]	Pressione H ₂ (End) [bar]
A	100	98	159	159
B	98	98	159	159
C	98	97	159	159
D	97	96	159	159
E	96	72	159	159
F	72	78	159	133,5
G	78	74	133,5	133,5
H	74	74	133,5	133,5
I	74	71	133,5	133,5

Trasferta n. 8 (Brolo):

Il percorso n. 8 (destinazione Brolo) è stato effettuato in modalità puramente elettrica (fig. 5.6), scegliendo appositamente di non far intervenire il FCS e valutare quindi le performance del minibus in questa modalità operativa. L'andamento delle principali variabili è riportato in fig. 5.7 e, come per i precedenti percorsi, anche in questo caso sono state distinte diverse sezioni che tengono conto delle fermate intermedie (tab. 5.5).

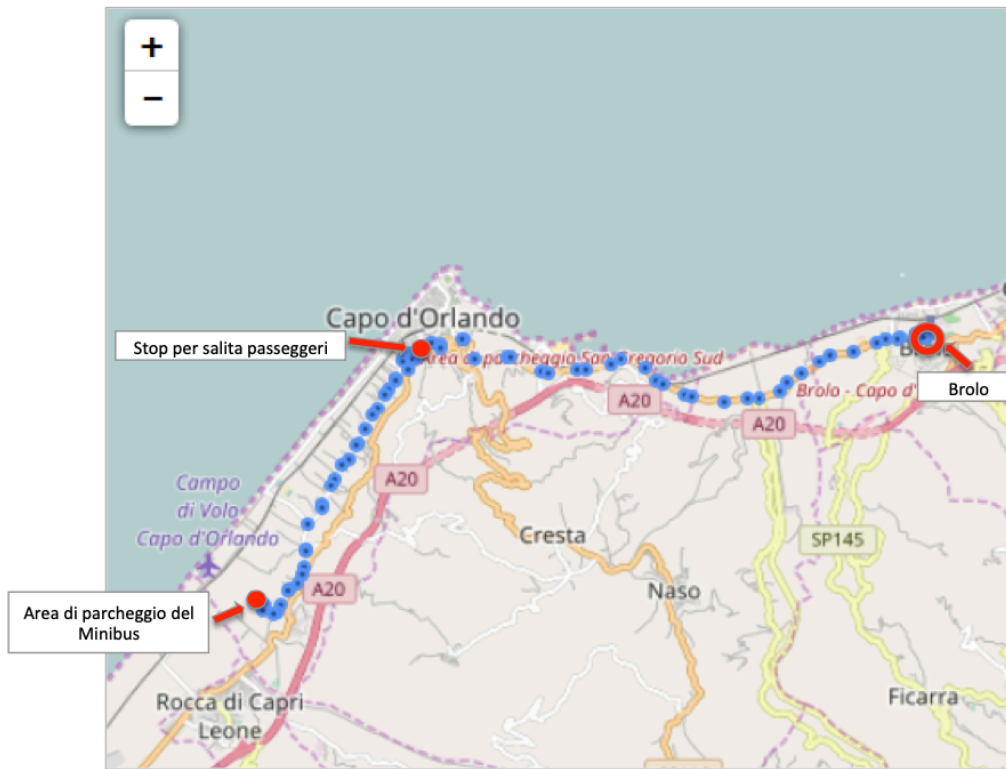


Figura 5.6: Percorso n. 8 (Destinazione: Brolo)

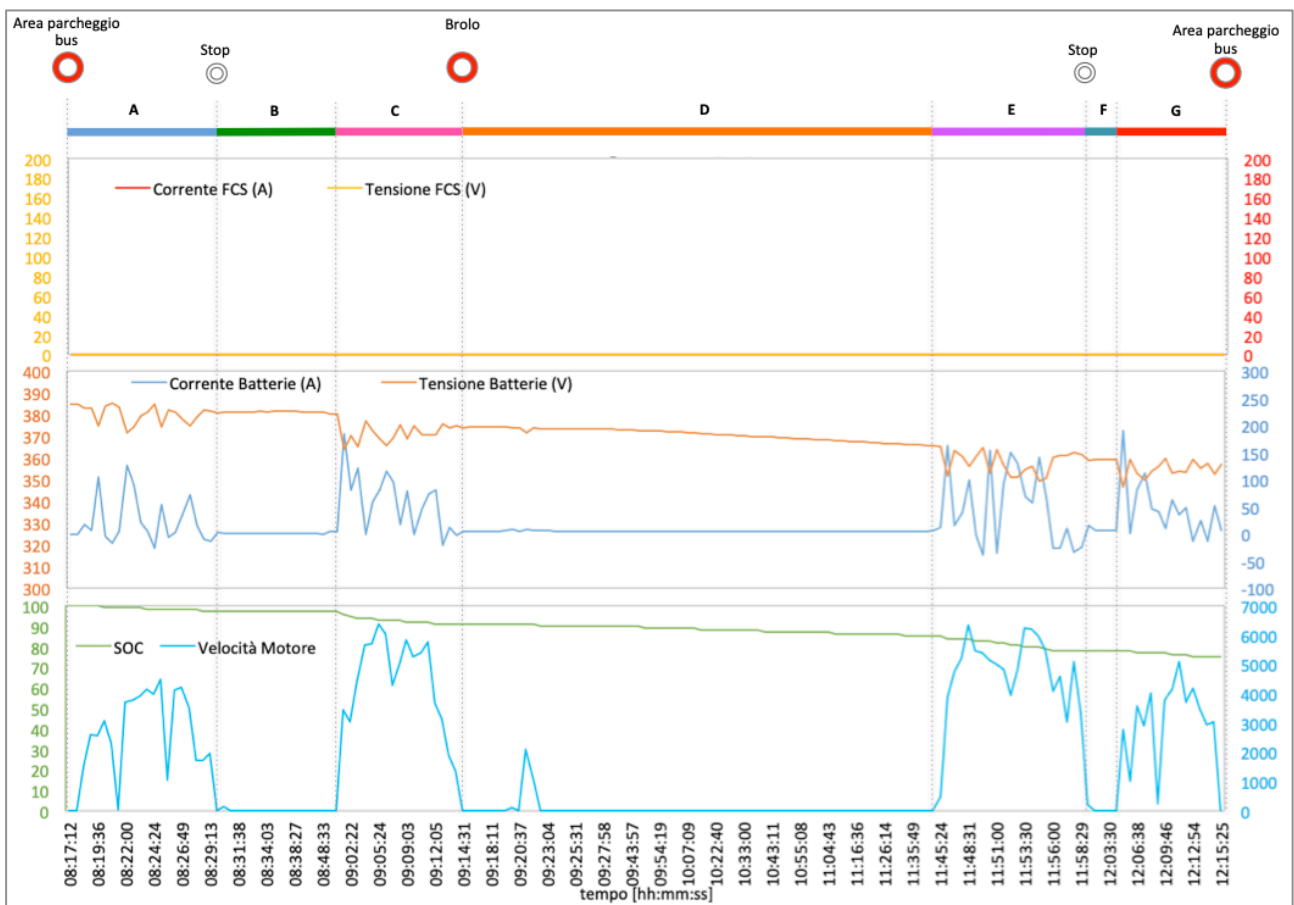


Figura 5.7: Percorso n. 8 (Brolo): Velocità del motore e principali variabili del FC system e delle batterie

Tabella 5.5 – Principali variabili del percorso n. 8 (Brolo) suddiviso in sezioni

Sezioni (Percorso n. 8)	SOC (Start) [%]	SOC (End) [%]	Pressione H ₂ (Start) [bar]	Pressione H ₂ (End) [bar]
A	100	97	135	135
B	97	97	135	135
C	97	91	135	135
D	91	85	135	135
E	85	78	135	135
F	78	78	135	135
G	78	74	135	135

Il Minibus è partito dall'area di parcheggio con un valore di SOC pari al 100% e una pressione di idrogeno all'interno dei serbatoi pari a 135 bar, che di fatto non si è mai modificata visto il mancato intervento del FCS durante tutto il tragitto. La prima fermata è stata fatta per far salire i passeggeri (Sezioni A + B), successivamente il bus ha intrapreso il viaggio per Brolo (Sezione C) durante il quale il SOC è sceso al 91%. Giunto a destinazione, il veicolo è rimasto parcheggiato per tutta la durata della visita (circa 2,5 h). Durante questa fase è possibile notare che il SOC è sceso progressivamente del 6% (Sezione D) pur essendo il veicolo fermo. Tale riduzione del SOC è dovuto al funzionamento dell'aria condizionata dell'autista che, essendo rimasto a bordo del bus, l'ha mantenuta accesa (data la giornata particolarmente calda). Durante il viaggio di ritorno da Brolo (Sezione E) il SOC è sceso di un altro 7% (fino al 78%); da notare come in questo caso, non essendo state incontrate significative pendenze durante il percorso (vedi tab. 5.2), non è stato registrato alcun contributo relativo alla frenata rigenerativa. Dopo la sosta per far scendere i passeggeri (Sezione F), il Minibus si è diretto verso l'area di parcheggio (Sezione G), perdendo un ulteriore 4% di SOC (valore finale 74%). La trasferta n. 8, essendo tra le più corte (in totale andata e ritorno 29 km), è caratterizzato da un SOC residuo delle batterie di trazione abbastanza alto che consentirebbe al veicolo di compiere lo stesso tragitto altre 2 volte.

Trasferta n. 11 (Sant'Angelo di Brolo):

Il percorso n. 11 (destinazione Sant'Angelo di Brolo) è stato effettuato con lo scopo di verificare diverse potenze di funzionamento del FCS e di osservare il comportamento dei sistemi e dei sottosistemi switchando manualmente la modalità operativa del veicolo da ibrida ad elettrica.

Il percorso e le principali variabili operative sono riportate rispettivamente nelle figure 5.8 e 5.9. La tab. 5.6 riporta, invece, le sezioni in cui è stato suddiviso il percorso.

Il Minibus è partito, come sempre, dall'area di parcheggio con un SOC iniziale pari al 78% e una pressione di idrogeno pari a 135 bar. La prima sosta è stata fatta per far salire i passeggeri (Sezioni A + B) e dopo circa 10-15 min è stato intrapreso il viaggio per Sant'Angelo di Brolo (Sezione C), durante il quale il SOC è sceso al 57% comportando l'attivazione del FCS (in corrispondenza della soglia di attivazione pari al 70%). Dopo circa 15 min di funzionamento del FCS, per verificare la risposta alla variazione delle impostazioni, è stato deciso di abbassare la potenza erogata dal FCS da 12 kW costanti a 10 kW e successivamente è stato imposto lo shutdown del FCS convertendo manualmente la modalità operativa del veicolo da ibrida ad elettrica. L'energia fornita dal FCS durante il suo funzionamento (circa 5 kWh) non è stata, ovviamente, sufficiente a far crescere il valore del SOC ma ha contribuito a risparmiare circa il 6,6% di SOC.

Durante la sosta per la visita a Sant'Angelo di Brolo (Sezione D), il veicolo è stato spento, per cui il SOC si è mantenuto costante al 57% finché non è stata ripresa la marcia per il rientro a Capo d'Orlando (in modalità elettrica), durante la quale (Sezione E) il SOC è sceso al 43%. E' possibile osservare piccoli incrementi del SOC (in corrispondenza di valori negativi della corrente delle batterie) dovuti al recupero energetico

durante le frenate rigenerative. Dopo la sosta per far scendere i passeggeri (Sezione F), il Minibus si è diretto verso l'area di parcheggio (Sezione G), concludendo il viaggio con un SOC residuo del 40%.

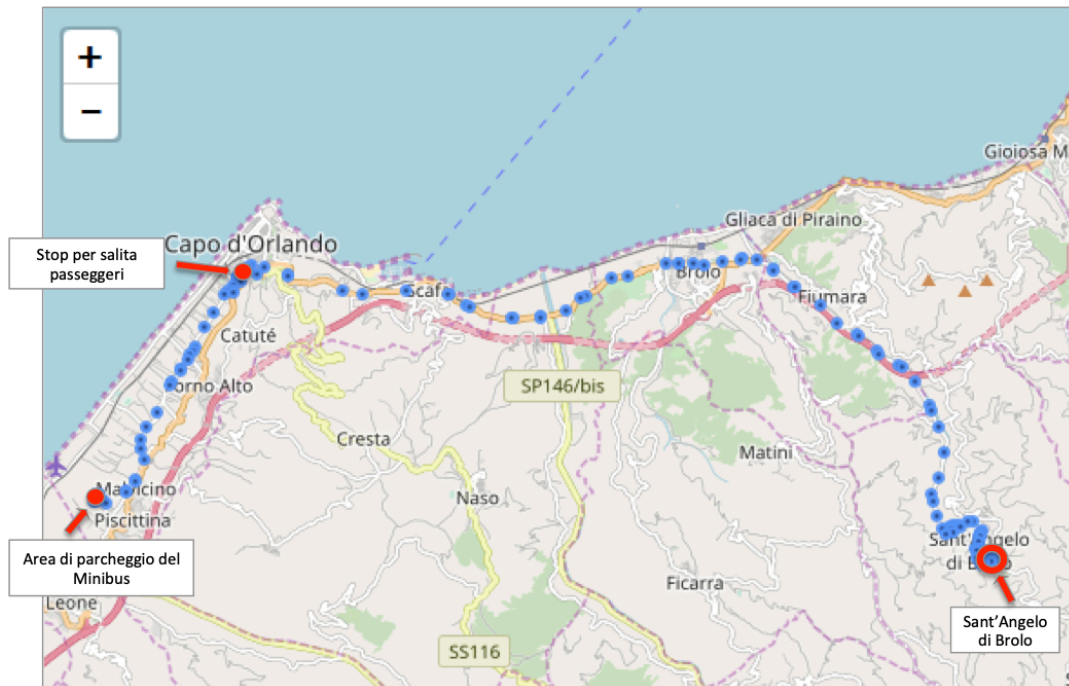


Figura 5.8: Percorso n. 11 (Destinazione: Sant'Angelo di Brolo)



Figura 5.9: Percorso n. 11 (Sant'Angelo di Brolo): Velocità del motore e principali variabili del FC system e delle batterie

Durante la trasferta n. 11 è stata prestata particolare attenzione al funzionamento del FCS. Quest'ultimo ha lavorato a punto fisso, prima a 12 kW e poi a 10 kW, mostrando una pronta risposta sia alle variazioni di potenza che allo spegnimento imposto dall'esterno e non dovuto alle condizioni operative (lo shutdown è previsto nei seguenti casi: raggiungimento della soglia di SOC relativa alla disattivazione del FCS, bassa pressione dell'idrogeno all'interno dei serbatoi, oppure guasto/malfunzionamento di qualche componente).

Tabella 5.6 – Principali variabili del percorso n. 11 (Sant'Angelo di Brolo) suddiviso in sezioni

Sezioni (Percorso n. 11)	SOC (Start) [%]	SOC (End) [%]	Pressione H ₂ (Start) [bar]	Pressione H ₂ (End) [bar]
A	78	75	135	135
B	75	74	135	135
C	74	57	135	123
D	57	57	123	93
E	57	43	93	88,5
F	43	42	88,5	85,5
G	42	40	85,5	82,5

5.2 Test su strada finalizzati al raggiungimento delle condizioni limite, in modalità puramente elettrica e in modalità ibrida

A valle dei test sopra riportati sono stati effettuati dei test finalizzati alla verifica dell'autonomia del minibus sia nella modalità elettrica (BE) sia nella modalità ibrida (FCHE). A tal fine sono stati condotti diversi test drive in percorsi urbani, con le seguenti condizioni di partenza:

- in modalità elettrica BE: 100% di SOC
- in modalità ibrida FCHE: 100% di SOC e serbatoi di idrogeno pieni.

Con l'obiettivo di confrontare l'autonomia del minibus nelle due diverse modalità di lavoro sono state mantenute le stesse condizioni al contorno, di conseguenza entrambi i test sono stati eseguiti utilizzando uguale percorso urbano (ripetuto diverse volte) interno al Comune di Capo d'Orlando (fig. 5.10).

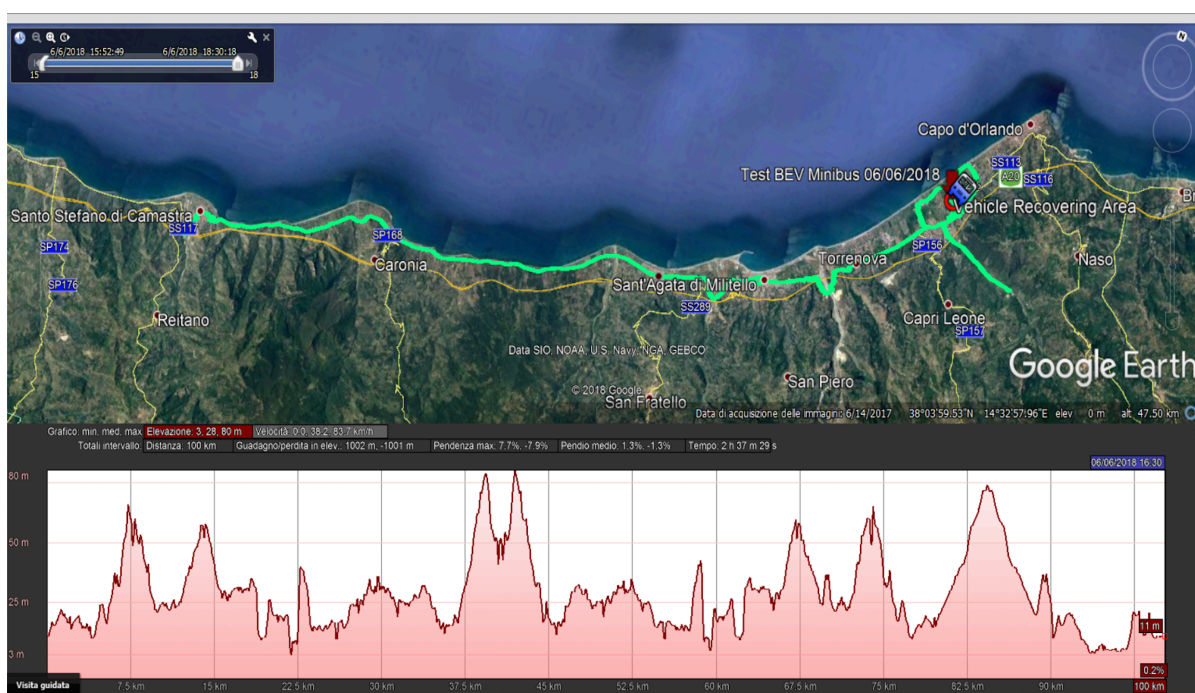


Figura 5.10: Percorso urbano all'interno del Comune di Capo d'Orlando comprensivo di grafico relativo all'altitudine

5.2.1 Test in modalità puramente elettrica (BE Mode)

Il test in modalità elettrica è stato realizzando con le seguenti condizioni di partenza: SOC iniziale delle batterie pari al 100%, corrispondente a un valore energetico effettivamente disponibile pari a 59,5 kWh (considerando un DoD dell'85%).

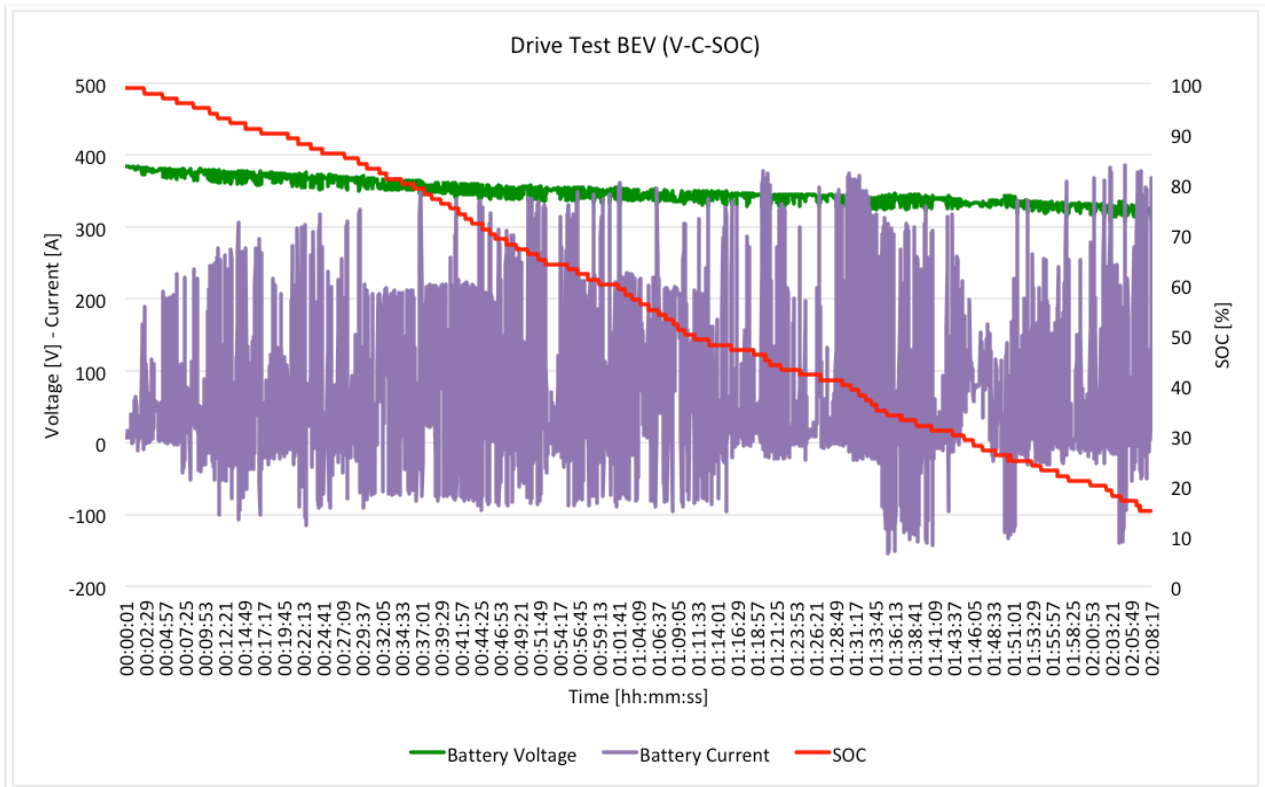


Figura 5.11: Parametri operativi del sistema di trazione (batterie: corrente, tensione e SOC)

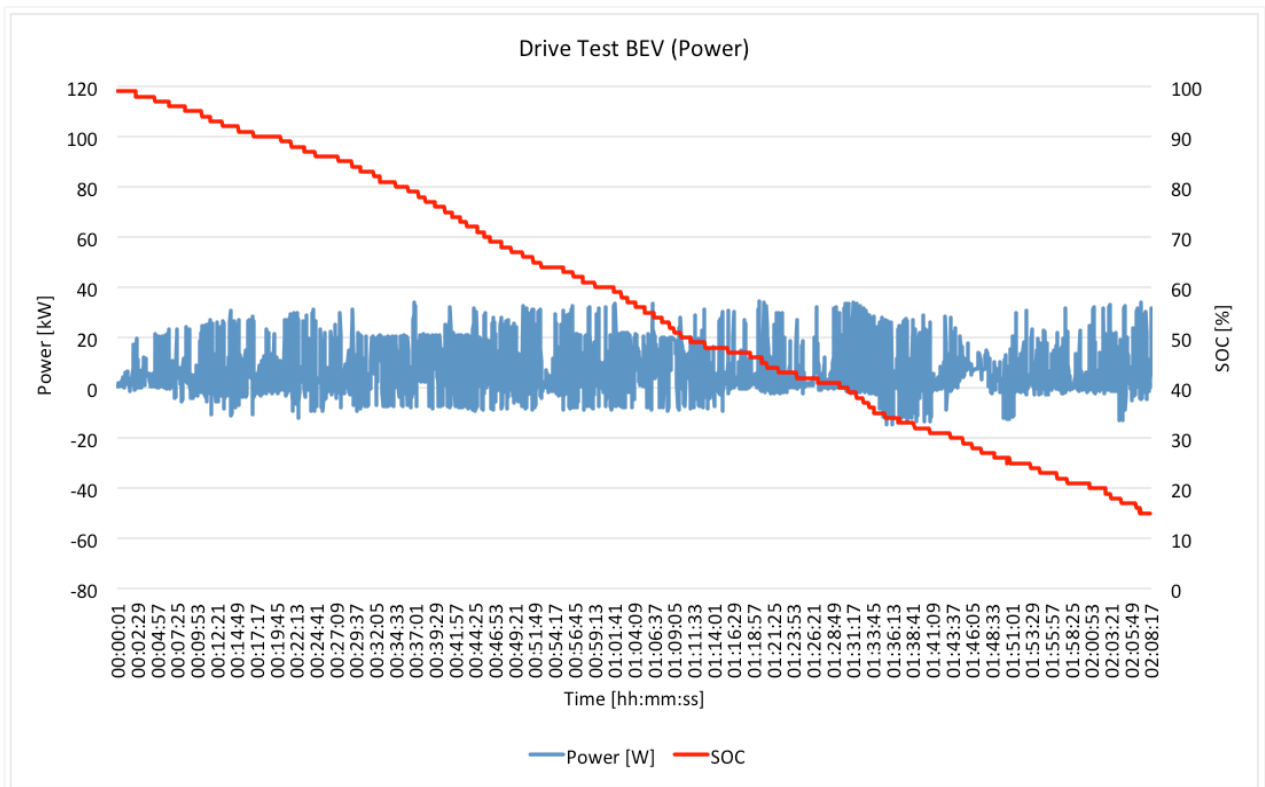


Figura 5.12: Potenza del sistema di trazione e SOC in modalità elettrica

Il percorso riportato in fig. 5.10 è stato effettuato diverse volte fino al raggiungimento del valore limite del SOC (circa 15%) corrispondente ad un'autonomia in termini di km pari a zero (ovvero coincidenti ad un DoD – Depth of Discharge – dell'80-85%).

In fig. 5.11 sono riportati la tensione, la corrente ed il SOC delle batterie durante l'intero percorso, durato poco più di 2 ore (si noti che l'asse delle ascisse rappresentato nei grafici che seguono si riferisce alla durata del test, pertanto non si riferisce agli orari di inizio e fine test). In fig. 5.12 sono riportate la potenza e il SOC. Quest'ultimo raggiunge il valore minimo del 15% dopo aver percorso circa 100 km con una velocità media di 46,8 km/h. Il consumo energetico delle batterie è pari a 59,5 kWh che comporta un consumo medio di 0,595 kWh/km (tab. 5.7).

Tabella 5.7 – Principali variabili del test in modalità elettrica

Modalità Elettrica (BE)	
Distanza totale	100 km
Tempo	2h 8 min
Velocità media	46,8 km/h
Consumo medio	0,595 kWh/km
SOC Finale	15%
Consumo energetico delle batterie	59,5 kWh

5.2.2 Test in modalità ibrida (FCHE Mode)

Analogamente al precedente test, nel caso di modalità ibrida le condizioni di partenza sono: SOC al 100% e serbatoi di accumulo di idrogeno pieni, corrispondenti rispettivamente a un valore energetico effettivo pari a 59,5 kWh e 115 kWh (valore energetico totale 174,5 kWh).

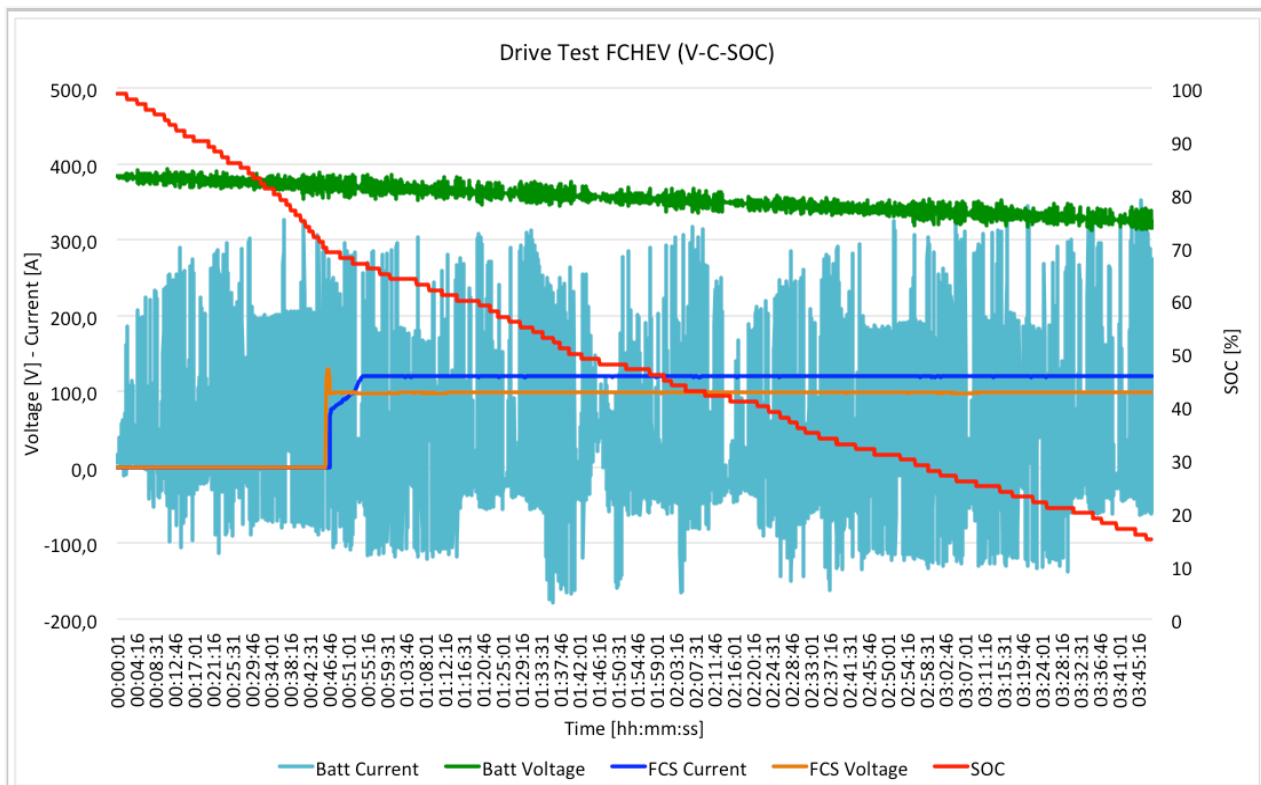


Figura 5.13: Parametri operativi del sistema di trazione (batterie: corrente, tensione e SOC; FCS: corrente, tensione)

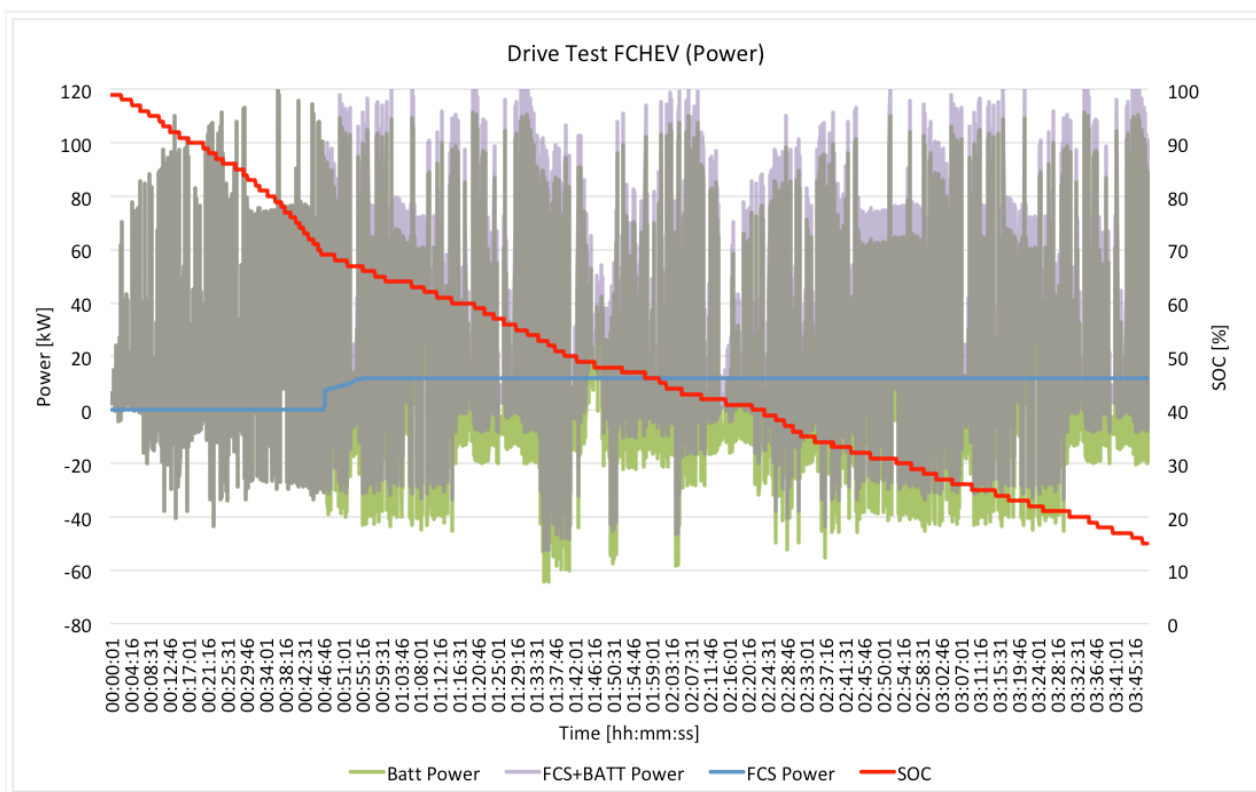


Figura 5.14: Potenza del sistema di trazione e SOC in modalità ibrida

La fig. 5.13 mostra i parametri operativi delle batterie (tensione, corrente e SOC) e del FCS (tensione e corrente). È possibile osservare che l'intervento del FCS avviene in corrispondenza del raggiungimento della soglia di attivazione, fissata al 70% del SOC. Durante tale test lo stato di carica delle batterie non raggiunge mai la soglia di disattivazione pertanto il FCS rimane attivo per tutta la durata del test che viene concluso quando il SOC raggiunge il valore del 15%.

La potenza fornita dal FCS è costante pari a 12 kW, mentre l'apporto di potenza delle batterie segue l'andamento del carico (load following) (fig. 5.14). L'apporto energetico del FCS (che ha lavorato a punto fisso per circa 3 ore) è stato di 36 kWh, con un risparmio del SOC di circa il 51%. Il contributo del FCS è visibile anche dalla variazione di pendenza della curva del SOC che cambia in maniera evidente, diventando meno ripida, in corrispondenza dell'attivazione del FCS dopo circa 45 minuti dall'inizio del test.

La durata totale del test in modalità ibrida è stata di poco meno di 4 ore e anche in questo caso il tragitto riportato in fig. 5.10 è stato percorso diverse volte con una velocità media di 46,69 km/h raggiungendo una distanza totale di 158 km. Il consumo energetico è pari a 59,5 kWh per le batterie (coincidente con il consumo del test precedente visto il raggiungimento dello stesso stato di carica finale) e a 35,45 kWh per il FCS (consumo energetico totale 94,95 kWh). Pertanto il consumo medio è pari a 0,6 kWh/km (tab. 5.8).

Tabella 5.8 – Principali variabili del test in modalità ibrida

Modalità Ibrida (FCHE)	
Distanza totale	158 km
Tempo	3h 48 min
Velocità media	46,69 km/h
Consumo medio	0,60 kWh/km
SOC Finale	15%
Consumo energetico di idrogeno*	35,45 kWh
Consumo energetico delle batterie	59,5 kWh
* Il contenuto energetico residuo nei serbatoi di idrogeno è circa 80 kWh	

5.3 Conclusioni

I test descritti nel paragrafo 5.1 hanno consentito di analizzare e valutare il funzionamento del veicolo in diverse condizioni operative. E' stato possibile osservare il corretto funzionamento dei sottosistemi e dei componenti oltre che la pronta risposta alle variazioni operative imposte dall'esterno.

Tali test, grazie ai percorsi eseguiti caratterizzati anche da diverse pendenze, hanno dato modo di valutare il contributo energetico relativo alla frenata rigenerativa, consentendo di quantificare il recupero energetico in termini di SOC delle batterie.

Il numero di trasferte, effettuate con cadenze settimanali, ha dato l'opportunità di verificare anche l'affidabilità del veicolo e dei sottosistemi che lo compongono.

E' stata, inoltre, testata la strategia di intervento del FCS in funzione della variabile SOC con differenti soglie di attivazione e disattivazione, che possono essere variate attraverso un'interfaccia utente dedicata in grado di garantire versatilità e semplicità d'intervento sulla strategia di gestione energetica.

Infine, con riferimento ai valori finali del SOC e della pressione di idrogeno nei serbatoi, è possibile affermare che il veicolo è in grado di affrontare percorsi nettamente più lunghi, ed eventualmente anche più ripidi, rispetto a quelli effettuati.

I test riportati nel paragrafo 5.2, eseguiti principalmente per convalidare le stime teoriche sull'autonomia del veicolo sia in modalità elettrica che in modalità ibrida, hanno consentito di dimostrare un incremento dell'autonomia in modalità ibrida di circa il 58% rispetto alla modalità puramente elettrica. Inoltre, il contenuto energetico residuo relativo all'idrogeno rimanente nei serbatoi pari a circa 80 kWh (test in modalità ibrida) evidenzia i margini di miglioramento dell'utilizzo dell'energia complessiva a bordo del minibus attraverso differenti strategie di gestione dei flussi energetici eventualmente identificate per specifici percorsi o missioni d'uso e, quindi, ottimizzate ad hoc.

Reference

- [1] G. Napoli, S. Micari, G. Dispenza, S. Di Novo, V. Antonucci, L. Andaloro. Development of a fuel cell hybrid electric powertrain: A real case study on a Minibus application. Int J Hydrogen Energy 42 2017; 28034-28047.

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi di Dottorato, relativo allo sviluppo, realizzazione e test di un powertrain di un minibus elettrico ibrido alimentato da batterie e celle a combustibile, ha consentito di approfondire lo stato dell'arte della tecnologia cella a combustibile di tipo PEFC evidenziandone le principali criticità.

Particolare attenzione è stata posta alle applicazioni di tale tecnologia nel campo dei trasporti e nello specifico al settore dei bus a FC. In tale contesto è possibile osservare come gli autobus elettrici a celle a combustibile (Fuel Cell Electric Bus - FCEB) stanno diventando, sia a livello europeo che mondiale, uno dei principali strumenti di dimostrazione pubblica e di sviluppo nel settore dei trasporti delle PEFC, testimoniato anche dai numerosi programmi di finanziamento, provenienti sia dai governi che dal settore privato. Dal punto di vista tecnico, rispetto ad altri veicoli alimentati a celle a combustibile, gli autobus avendo minori vincoli di peso e dimensioni, offrono l'opportunità di un'installazione a bordo più flessibile sia per il sistema a FC che per il sistema di stoccaggio dell'idrogeno; inoltre anche i requisiti di infrastruttura dell'idrogeno risultano meno complessi visto che le linee degli autobus sono di solito ben definite.

Entrando più dettagliatamente nell'ambito tecnico dei veicoli a FC sono state valutate le possibili configurazioni in funzione della taglia e del ruolo svolto dalla FC e quindi del livello di ibridazione che si vuole conferire al veicolo. Tra le due possibili configurazioni (Total FC e Ibrida) il powertrain proposto per lo studio e l'installazione a bordo del minibus è di tipo "*range extender*", ovvero un'architettura ibrida in cui il sistema a FC lavora come carica-batterie installato a bordo al fine di incrementare/estendere l'autonomia del veicolo puramente elettrico (solo a batterie).

Dal punto di vista tecnico il contributo sinergico della FC e delle batterie consente di beneficiare degli aspetti positivi di entrambe le tecnologie compensandone, al contempo, le criticità. Dal punto di vista puramente economico la configurazione *range extender* rappresenta una soluzione meno onerosa rispetto alla configurazione total FC, grazie all'impiego di un sistema a FC di taglia più piccola, che conferisce al prodotto finale un valore aggiunto ai fini della competitività sul mercato.

La fase sperimentale del lavoro di tesi è stata suddivisa in tre parti principali, a partire dai test in laboratorio di caratterizzazione di batterie e FC, alla installazione dei componenti a bordo del veicolo fino ai test on field.

Attraverso i test in laboratorio è stato possibile selezionare, tra le due tipologie di batterie valutate (LiPo e LiFePO₄) quella basata sulla chimica LiPo. Quest'ultima è risultata più idonea all'applicazione automotive grazie alle alte efficienze e ad una maggiore capacità, favorevole alla ricarica rapida e alla frenata rigenerativa. La scelta dello stack di tipo Andromeda® da 20 kW è stata effettuata sulla base di test di caratterizzazione eseguiti su uno short-stack da 2 kW (del tutto equivalente a quello da 20 kW) attraverso i quali sono state ottenute buone prestazioni adeguate all'utilizzo automotive.

Il dimensionamento e l'installazione dei componenti e dei sistemi a bordo del minibus, sviluppato presso il CNR ITAE, hanno rappresentato la seconda parte della fase sperimentale.

Infine i test su strada, presso il territorio di Capo d'Orlando, hanno consentito di validare il corretto funzionamento del veicolo, dei sottosistemi e della strategia di gestione energetica.

I risultati raggiunti dimostrano che la configurazione *range extender* consente di incrementare l'autonomia del veicolo di circa il 60% rispetto alla configurazione solo elettrica. Tuttavia, tenuto conto degli ampi margini di ottimizzazione dell'utilizzo dell'idrogeno stoccato a bordo, sono attualmente in corso valutazioni e test ulteriori finalizzati ad implementare strategie energetiche specifiche in funzione del tipo di percorso e di missione d'uso da far compiere al veicolo. Attraverso questo processo di ottimizzazione saranno implementate differenti impostazioni energetiche predisposte per affrontare diverse tipologie di percorso

(per es. pianeggiante, ripido, urbano, extraurbano, ecc.). Tramite l'interfaccia tra il veicolo e l'utente sarà possibile selezionare il percorso più simile a quello da affrontare.