Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica
Anno Accademico 2021/2022
Sessione di Laurea Dicembre 2022

Applicabilità di sistemi fuel cell per l'elettrificazione di veicoli agri-construction

Tesi di Laurea Magistrale

Relatori:
prof. Aurelio Somà
prof. Francesco Mocera
dott. Valerio Martini

Candidato:
Vincenzo Patrissi

Indice

Introduzione…….... 2

1 Elettrificazione di non-road mobile machinery……... 4

1.1 Panoramica generale…….. 4

1.2 Normative sulle emissioni di inquinanti……11

2 Applicazione di sistemi fuel cell a veicoli da lavoro……... 14

2.1 Funzionamento fuel cell……14

2.2 Specifiche di sistema e controllo…….. 18

2.3 Stato dell'arte di veicoli a fuel cell……24

2.3.1 Produzione dell'idrogeno…….. 24

2.3.2 Esempi di veicoli a fuel cell…….. 26

3 Modello di veicolo…….. 28

3.1 Descrizione del caso di studio…….. 28

3.2 Modello numerico…… 32

3.2.1 Modello Fuel Cell…….. 32

3.2.2 Modello Diesel…….. 41

4 Risultati e commenti…….. 43

Conclusioni…… 48

Bibliografia…… 50

Introduzione

Al giorno d'oggi, le tematiche ambientali sono di estremo interesse nell'ambito delle politiche energetiche. Date le condizioni precarie del nostro pianeta, diventano sempre più urgenti le misure da adottare per contrastare il cambiamento climatico. Un contributo significativo alle emissioni di gas clima-alteranti è dato dal settore dei trasporti: attualmente, esso incide per circa il 25 % sulle emissioni totali di anidride carbonica CO_2 [1], la sostanza principale responsabile dell'effetto serra che provoca l'aumento delle temperature globali. Gli sforzi per cercare di ridurre il riscaldamento globale sono seguiti di pari passo dai tentativi di migliorare la qualità dell'aria su scala locale, soprattutto nei grandi agglomerati urbani. L'utilizzo di combustibili fossili come vettori energetici causa l'emissione di sostanze chimiche che contribuiscono in maniera determinante all'inquinamento atmosferico. Il settore dei trasporti influisce oggigiorno per circa il 50% sulla domanda di petrolio a livello mondiale, e le cifre sono destinate a crescere nei prossimi decenni [1]. La guerra tra Russia e Ucraina sta provocando inoltre una crisi energetica internazionale, con il conseguente aumento dei costi dei carburanti [2].

Uno dei percorsi che si possono intraprendere per risolvere le problematiche descritte è quello di sperimentare tecnologie che non facciano ricorso alla combustione. Negli ultimi anni, sono sempre più presenti sul mercato veicoli elettrici, sui quali si sta concentrando gran parte della ricerca per sviluppare soluzioni *green*. All'interno di questo contesto, la maggioranza delle sorgenti di energia che vengono adoperate per la trazione è rappresentata dalle batterie. Come alternativa ad esse, recentemente si sta cercando di implementare sistemi con celle a combustibile, o *fuel cell*, dei dispositivi elettrochimici nei quali l'idrogeno è utilizzato come fluido operativo per generare corrente elettrica. Il seguente lavoro di tesi mira ad approfondire questa tematica, focalizzandosi sull'applicazione di questo tipo di tecnologia a una delle molteplici categorie di mezzi di trasporto, quella delle macchine mobili non stradali.

Lo scopo dell'elaborato consiste nel valutare l'applicabilità di sistemi fuel cell a veicoli da lavoro. Dapprima verrà fornita una panoramica sul processo di elettrificazione dei veicoli per applicazioni non stradali. Successivamente verranno descritte le caratteristiche delle celle a combustibile, specificandone le modalità di integrazione a bordo veicolo e delineando uno scenario sul loro utilizzo nel settore dei trasporti.

Si passerà dunque alla presentazione del caso di studio. Nello specifico, è stato approfondito il funzionamento di un sollevatore telescopico, un mezzo di lavoro ampiamente diffuso nell'ambito agri-construction. I vari componenti del powertrain e del braccio articolato sono stati modellati mediante il software MATLAB/Simulink. Sono state effettuate simulazioni numeriche per analizzare le prestazioni su un ciclo di lavoro opportunamente definito. È stata esaminata la risposta della cella e stimato il consumo di idrogeno sul tragitto indicato. Infine, verranno commentati i risultati e confrontati con le performance di un veicolo equivalente con motorizzazione Diesel, nell'ottica di una valutazione sui possibili vantaggi per un impiego in campo industriale.

1. Elettrificazione di non-road mobile machinery

1.1 Panoramica generale

I veicoli da lavoro, secondo la definizione fornita dall'UE [3], sono inseriti nella categoria delle *non-road mobile machinery* (NRMM), ovvero delle macchine mobili non stradali. Al suo interno si possono distinguere le seguenti tipologie:

- Attrezzature per selvicoltura e giardinaggio (es. tagliaerba, motoseghe).
- Macchine da costruzione e movimento terra (es. escavatori, caricatori, bulldozer).
- Mezzi per movimentazione merci (es. carrelli elevatori, sollevatori telescopici).
- Macchinari destinati all'agricoltura (es. mietitrici, trebbiatrici).
- Locomotive, vagoni ferroviari e vascelli per la navigazione in acque interne.

Meritevoli di attenzione sono i macchinari riservati ad applicazioni agricole e costruttive: essi rappresentano un'ampia porzione del mercato dei veicoli non-road e stanno diventando di fondamentale importanza nel contesto industriale, in quanto iniziano a costituire una fonte non trascurabile di inquinamento. Questa tipologia di veicoli è stata storicamente equipaggiata con motori Diesel, che garantiscono un elevato grado di affidabilità ed efficienza. Per controllare le emissioni prodotte da questa famiglia di motori, la soluzione principale è stata quella di investire su sistemi di trattamento dei gas di scarico, che permettono di abbattere le concentrazioni di sostanze inquinanti prima che vengano sprigionate nell'ambiente. Con le sempre più stringenti imposizioni, diventa però sempre più complicato per i costruttori produrre macchinari di questo tipo conformi alle normative, a causa delle sfide tecniche da affrontare per poter contenere i costi e le dimensioni dei sistemi coinvolti nell'aftertreatment. Di conseguenza, per adempiere ai canoni legislativi, molti fabbricanti si stanno recentemente orientando verso l'utilizzo di tecnologie alternative ai più tradizionali combustibili fossili, virando ad esempio su motorizzazioni elettriche o ibride che permettono di azzerare o comunque abbassare notevolmente i livelli di emissioni.

Tra le varie configurazioni utilizzate per l'elettrificazione del powertrain, le architetture che risultano essere le più comuni sono: veicoli a batteria, ibrido serie, ibrido parallelo, ibridi complessi.

Veicoli a batteria

Nelle architetture puramente elettriche, la propulsione è gestita completamente da motogeneratori elettrici. I sistemi di stoccaggio di energia di bordo più diffusi risultano essere le batterie. In *figura 1* è rappresentato il layout di un veicolo elettrico a batteria:

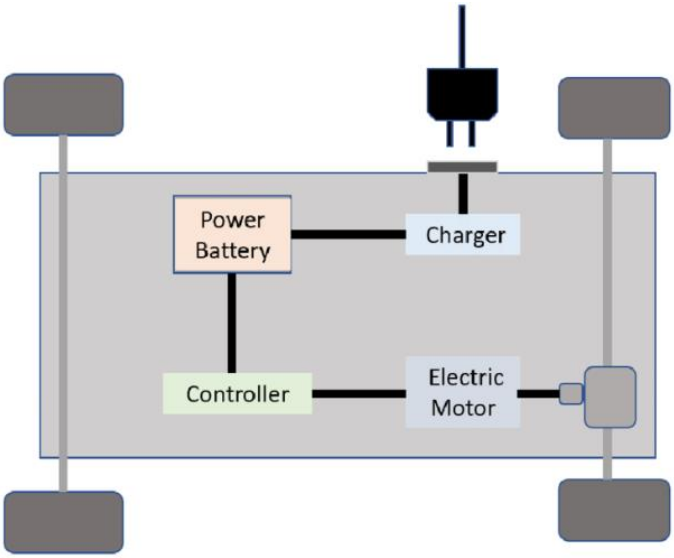


Figura 1. Veicolo a batteria. [4]

Non essendo presente l'ICE, le batterie devono riuscire a soddisfare la richiesta di potenza autonomamente. A parità di condizioni (peso, aerodinamica, ecc.) rispetto a un veicolo equivalente con motore a combustione interna, in una vettura elettrica si riesce a stoccare meno energia a bordo. È necessario dunque installare sorgenti di energia più pesanti e costose per poter garantire un'autonomia adeguata. La relativamente limitata penetrazione nel mercato odierno è dovuta anche a problemi infrastrutturali che concernono la ricarica delle batterie. Tra le altre tecnologie studiate per produrre energia elettrica a bordo veicolo si rilevano applicazioni con supercondensatori o fuel cell, spesso in combinazione con le batterie o in sostituzione delle stesse. Di interesse per le finalità della tesi risultano le soluzioni che sfruttano le celle a combustibile: il loro funzionamento verrà presentato in modo dettagliato nel prossimo capitolo. In *figura 2* si possono evincere le caratteristiche delle varie sorgenti di energia elettrica in relazione al proprio peso: sebbene rappresentino un'alternativa pulita rispetto ai motori a combustione, risultano evidenti gli svantaggi in termini di potenza ed energia specifica. Sono necessari quindi sforzi maggiori da parte dei costruttori di veicoli elettrici per poter ovviare agli svantaggi tecnici e riuscire a garantire prestazioni simili ai veicoli tradizionali.

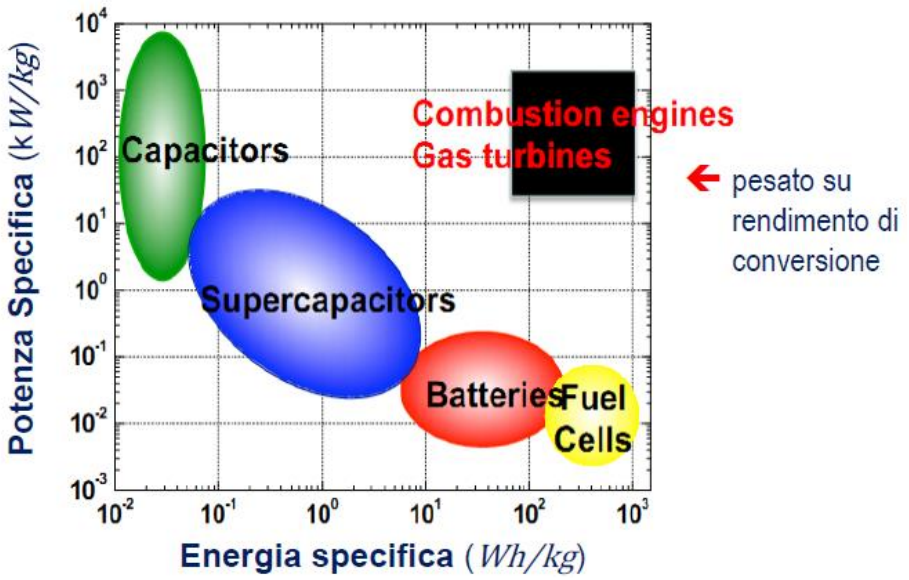


Figura 2. Sorgenti di energia elettrica nei trasporti. [5]

Una soluzione che costituisce un compromesso è rappresentata dai veicoli ibridi. Convenzionalmente, i motori a combustione interna sono sovradimensionati rispetto alla potenza media richiesta, in modo da avere una riserva di potenza per i picchi di carico. Così facendo tuttavia, il motore lavora in punti a bassa efficienza e di conseguenza con alti consumi di combustibile. Nelle vetture ibride, l'aggiunta di una sorgente di potenza elettrica permette di far operare il motore termico a carichi più bassi, consentendo quindi un aumento dei rendimenti e una diminuzione dei consumi. Di seguito si riportano le varie tipologie di architetture ibride.

Ibrido serie

L'ibrido serie consiste nel collegamento del propulsore termico con un generatore elettrico, in modo da svincolarlo dalla trasmissione. Il pacco batterie fornisce energia ad un'altra macchina elettrica, collegata a sua volta meccanicamente alle ruote. La somma delle potenze è elettrica: in questa maniera, il motore termico funge da ausiliario per la trazione in caso di carichi alti o ricarica le batterie in caso di carichi bassi. La sua funzione varia a seconda del fattore di ibridizzazione (*fig.3*), dato da:

$$HF = \frac{P_{ICE}}{P_{em}}$$

dove P_{ICE} è la potenza del motore termico e P_{em} è la potenza del motore elettrico. Si spazia da un veicolo puramente elettrico con HF = 0, quando la potenza termica è nulla, a un veicolo con trasmissione elettrica con HF = 1, quando la potenza elettrica eguaglia quella termica.

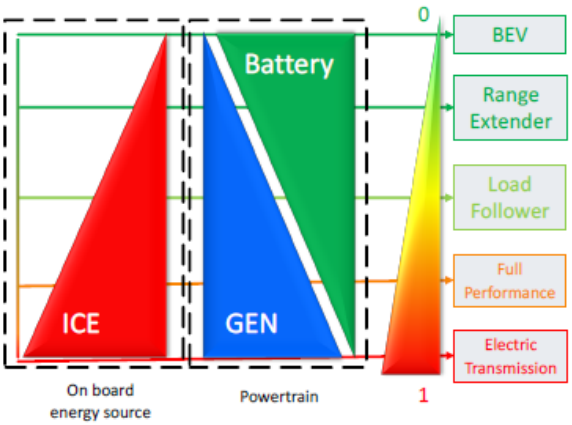


Figura 3. Grado di ibridizzazione serie. [6]

Le soluzioni più interessanti si trovano a gradi di ibridizzazione intermedi, come ad esempio quella di *range extender*, una modalità di trazione elettrica assistita termicamente: l'ICE fornisce una potenza media e aumenta l'autonomia del veicolo, ricaricando le batterie; esso viene fatto lavorare in una zona ottimale (*OOL*: *optimal operating line*) su un punto fisso della mappa di carico del motore, in modo tale da sfruttare la massima efficienza e poter risparmiare carburante. Un'altra possibilità è quella di una soluzione *load follower*, dove il motore termico è maggiormente impegnato e segue la storia di carico. Lo schema di un ibrido serie è riportato in *figura 4*.

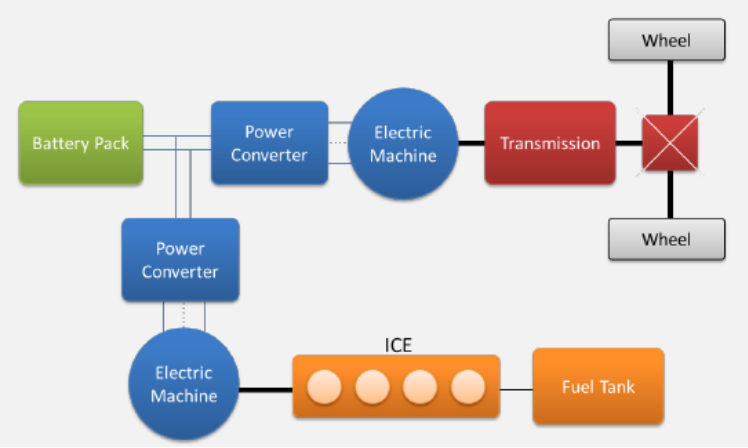


Figura 4. Ibrido serie. [1]

Ibrido parallelo

L'ibrido parallelo consiste in una somma di potenze meccaniche: entrambe le sorgenti sono collegate meccanicamente alle ruote. La macchina elettrica può funzionare sia da motore, per contribuire alla trazione, che da generatore, per poter ricaricare le batterie.

La configurazione parallelo permette di ridimensionare la taglia del motore termico (*downsizing*) oppure di allungare il rapporto di trasmissione finale (*downspeeding*): si riescono così a ottenere motori più efficienti e meno inquinanti, senza compromettere le performance complessive. Il fattore di ibridizzazione in questo caso è dato da (*fig.5*):

$$HF = \frac{P_{em}}{P_{ICE} + P_{em}}$$

dove un valore di HF = 0 corrisponde al funzionamento in modalità puramente termica, mentre un HF = 1 corrisponde al funzionamento in modalità totalmente elettrica.

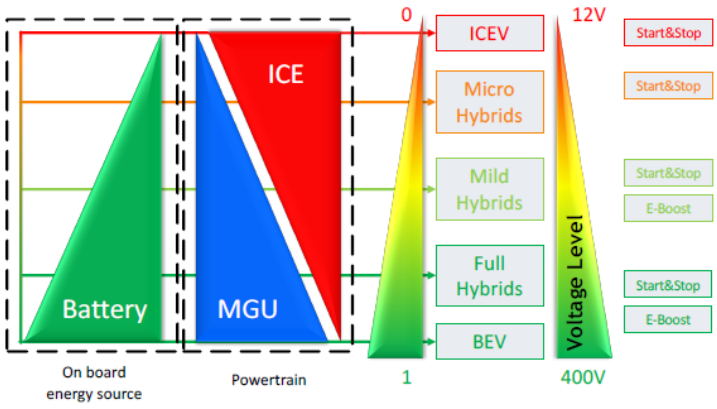


Figura 5. Grado di ibridizzazione parallelo. [6]

Le configurazioni intermedie vanno da sistemi con basse tensioni in gioco, dove il motore elettrico interviene in minima parte per aiutare il termico, ad esempio in condizioni di *start&stop*, fino ad arrivare a veicoli elettrificati ad alta tensione, dove sono abilitate un numero superiore di operazioni in modalità elettrica, dalla frenata rigenerativa all'*e-boost*. In *figura 6* è illustrato lo schema di un ibrido parallelo.

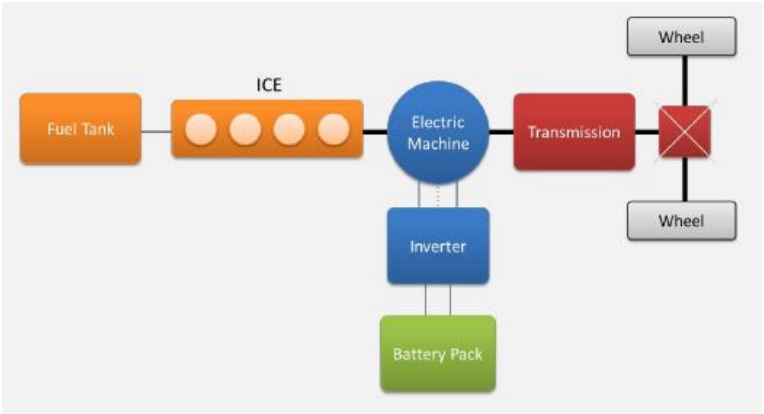


Figura 6. Ibrido parallelo. [1]

Ibridi complessi

Gli ibridi complessi consistono in una combinazione degli ibridi di base descritti in precedenza. È possibile realizzare un ibrido serie-parallelo (*fig.7*), dove, attraverso una o più frizioni, si può scollegare o collegare il motore termico con le ruote in modo da operare in modalità rispettivamente serie o parallelo.

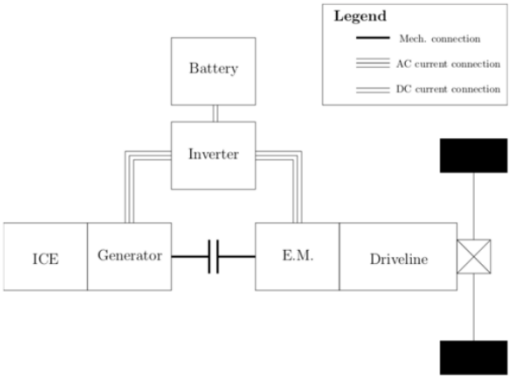


Figura 7. Ibrido serie-parallelo. [6]

Un'altra tipologia di ibrido complesso è costituita dal power split, con il quale è possibile operare in modalità mista serie e parallelo contemporaneamente. La casa automobilistica Toyota, precursore dell'elettrificazione negli autoveicoli, nello sviluppo della Prius ha brevettato un meccanismo che prevede i collegamenti delle macchine tramite un rotismo epicicloidale (*fig.8*). Connettendo il generatore elettrico al solare, l'ICE al planetario e il motore elettrico alla corona, è possibile gestire la potenza tra serie e parallelo regolando le velocità di rotazione dei componenti: dato il rapporto di trasmissione degli ingranaggi, che imposta la separazione della coppia, e fissata una delle tre velocità, le altre due possono essere variate a piacimento e ottimizzate in base alle condizioni operative.

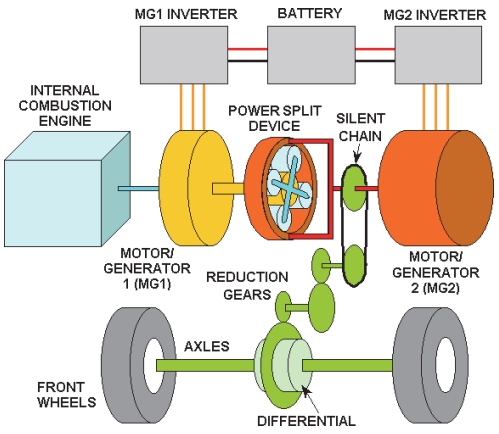


Figura 8. Ibrido power split. [5?]

Nei veicoli industriali, oltre ai collegamenti elettrici e meccanici, è presente una parte idraulica destinata alla gestione dei carichi di lavoro. Per ovviare a questa differenza con i veicoli ibridi stradali, Somà et.al. [7] hanno proposto una nuova definizione del fattore di ibridizzazione, specifico per veicoli da lavoro, dato da:

$$HF = \frac{1}{2}(HF_{drive} + HF_{load})$$

dove si ha che il grado di ibridizzazione complessivo è dato dalla media tra il fattore di trazione e il fattore di carico. La scelta ipotizzata è giustificata dal fatto che le potenze di esercizio della parte elettromeccanica e di quella idraulica sono comparabili tra di loro. Tra le varie tipologie di veicoli da lavoro ibridi disponibili in commercio, l'architettura serie-parallelo risulta essere la più comune. In *figura 9* ne è riportato un esempio:

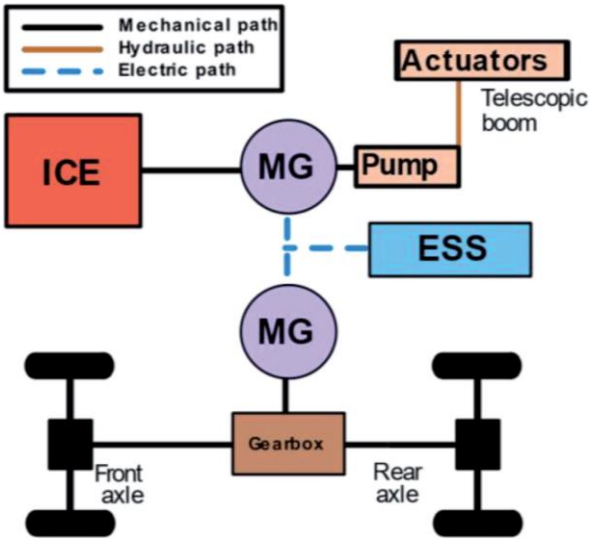


Figura 9. Veicolo da lavoro ibrido serie-parallelo. [8]

La configurazione serie viene attuata nelle fasi di marcia del veicolo, a causa delle basse velocità in gioco, mentre quella parallelo interviene in caso di movimentazione del carico per fornire una potenza maggiore.

1.2 Normative sulle emissioni di inquinanti

In base al meccanismo di combustione degli idrocarburi coinvolti nel ciclo Diesel, caratteristico dei motori ad accensione per compressione, si creano le condizioni ideali per la produzione di inquinanti primari come gli ossidi di azoto NO_x, gli idrocarburi incombusti HC, il monossido di carbonio CO, e il particolato: essi impattano negativamente sulla qualità dell'aria e sono notoriamente nocivi alla salute umana [1]. Le reazioni tra inquinanti primari generano in aggiunta inquinanti secondari come lo smog fotochimico, le piogge acide e l'ozono al suolo, fenomeni che recano danni ingenti all'ecosistema. In *figura 10* sono rappresentati i principali inquinanti primari e le loro fonti.

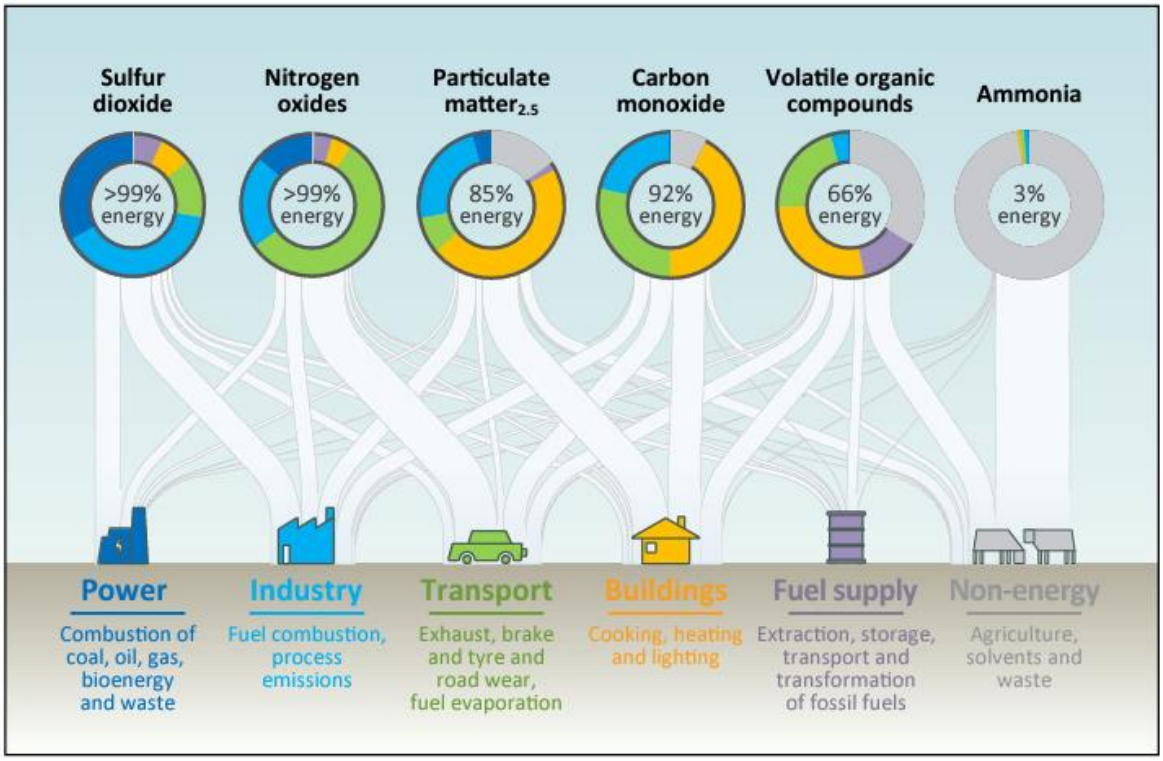


Figura 10. Principali inquinanti primari e relative fonti di emissioni. [1]

Come si può notare, il settore dei trasporti rappresenta una fonte significativa di inquinamento. È stato dunque necessario attuare politiche per il contenimento delle emissioni. Seguendo la rotta già tracciata dal trasporto su strada, il primo tentativo di regolamentare le emissioni prodotte da veicoli non-road ha avuto origine a livello europeo con la ***Direttiva 97/68/EC***, *"concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative ai provvedimenti da adottare contro l'emissione di inquinanti gassosi e particolato inquinante prodotti dai motori a combustione interna destinati all'installazione su macchine mobili non stradali"*, approvata in data 16 dicembre 1997 [9].

Essa è stata poi susseguita da ulteriori emendamenti, che hanno plasmato il contesto legislativo nel corso degli anni fino ad arrivare allo scenario odierno. La normativa attuale di riferimento è il ***Regolamento UE 2016/1628***, *"relativo alle prescrizioni in materia di limiti di emissione di inquinanti gassosi e particolato inquinante e di omologazione per i motori a combustione interna destinati alle macchine mobili non stradali"*, approvato in data 14 settembre 2016 [10]. Al suo interno, viene definita una quinta fase di riferimento per i costruttori, denominata *Stage V*, contenente limiti più stringenti rispetto alle precedenti. Viene aumentato inoltre anche il parco di veicoli coinvolti, che sono classificati in base alla loro taglia, e inseriti i limiti sul numero di particolato.

Sono specificate due date di scadenza, a partire dalle quali diventa obbligatoria l'applicazione del regolamento:

- *1° gennaio 2018*, per quanto riguarda l'omologazione dei motori da parte dell'UE;
- *1° gennaio 2019*, per quanto riguarda l'immissione sul mercato dei motori.

Di seguito si riportano i limiti di emissione dei gas di scarico stabiliti dalla normativa per la categoria dei *non-road engines* (NRE), (*fig.11)*:

Emission stage	Engine sub-category	Power range	Ignition type	CO	HC	NO_x	PM mass	PN	A
		kW		g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	#/kWh	
Stage V	NRE-v-1 NRE-c-1	0 < P < 8	CI	8,00	($HC + NO_x \leq 7,50$)		0,40 (1)	—	1,10
Stage V	NRE-v-2 NRE-c-2	8 ≤ P < 19	CI	6,60	($HC + NO_x \leq 7,50$)		0,40	—	1,10
Stage V	NRE-v-3 NRE-c-3	19 ≤ P < 37	CI	5,00	($HC + NO_x \leq 4,70$)		0,015	1×10^{12}	1,10
Stage V	NRE-v-4 NRE-c-4	37 ≤ P < 56	CI	5,00	($HC + NO_x \leq 4,70$)		0,015	1×10^{12}	1,10
Stage V	NRE-v-5 NRE-c-5	56 ≤ P < 130	all	5,00	0,19	0,40	0,015	1×10^{12}	1,10
Stage V	NRE-v-6 NRE-c-6	130 ≤ P ≤ 560	all	3,50	0,19	0,40	0,015	1×10^{12}	1,10
Stage V	NRE-v-7 NRE-c-7	P > 560	all	3,50	0,19	3,50	0,045	—	6,00

(1) 0,60 for hand-startable, air-cooled direct injection engines.

Figura 11: Limiti di emissione per motori non stradali (UE). [10]

I valori sono da riferirsi misurati su dei cicli guida prestabiliti: lo standard di riferimento è rappresentato dall'**ISO 8178**, utilizzato per certificare le emissioni in campo internazionale [11]. Esso include il ciclo denominato *Non-road steady cycle* (NRSC), un ciclo stazionario a 8-modi sul quale vengono testati i motori: le emissioni sono espresse in g/kWh. Esso è affiancato da un ciclo addizionale chiamato *Non-road transient cycle* (NRTC), che serve a valutare le emissioni durante i transitori.

I limiti sui valori di emissioni imposti dalla comunità europea sono paragonabili a quelli contenuti nell'ultima versione della normativa statunitense, il *Tier 4*, emessa dall'US Environmental Protection Agency (*fig.12)* [12].

	Rated Power (kW)	Tier	Model Year	NMHC (g/kW-hr)	NMHC + NOx (g/kW-hr)	NOx (g/kW-hr)	PM (g/kW-hr)	CO (g/kW-hr)	Smoke [a] (Percentage)	Useful Life (hours /years) [b]	Warranty Period (hours /years) [b]
Federal	kW < 8	1	2000-2004	-	10.5	-	1.0	8.0	20/15/50	3,000/5	1,500/2
		2	2005-2007	-	7.5	-	0.80	8.0			
		4	2008+	-	7.5	-	0.40 [c]	8.0			
	8 ≤ kW < 19	1	2000-2004	-	9.5	-	0.80	6.6		3,000/5	1,500/2
		2	2005-2007	-	7.5	-	0.80	6.6			
		4	2008+	-	7.5	-	0.40	6.6			
	19 ≤ kW < 37	1	1999-2003	-	9.5	-	0.80	5.5		5,000/7 [d]	3,000/5 [e]
		2	2004-2007	-	7.5	-	0.60	5.5			
		4	2008-2012	-	7.5	-	0.30	5.5			
			2013+	-	4.7	-	0.03	5.5			
	37 ≤ kW < 56	1	1998-2003	-	-	9.2	-	-		8,000/10	3,000/5
		2	2004-2007	-	7.5	-	0.40	5.0			
		3 [f]	2008-2011	-	4.7	-	0.40	5.0			
		4 (Option 1) [g]	2008-2012	-	4.7	-	0.30	5.0			
		4 (Option 2) [g]	2012	-	4.7	-	0.03	5.0			
		4	2013+	-	4.7	-	0.03	5.0			
	56 ≤ kW < 75	1	1998-2003	-	-	9.2	-	-			
		2	2004-2007	-	7.5	-	0.40	5.0			
		3	2008-2011	-	4.7	-	0.40	5.0			
		4	2012-2013 [h]	-	4.7	-	0.02	5.0			
			2014+ [i]	0.19	-	0.40	0.02	5.0			
	75 ≤ kW < 130	1	1997-2002	-	-	9.2	-	-			
		2	2003-2006	-	6.6	-	0.30	5.0			
		3	2007-2011	-	4.0	-	0.30	5.0			
		4	2012-2013 [h]	-	4.0	-	0.02	5.0			
			2014+	0.19	-	0.40	0.02	5.0			

Figura 12: Limiti di emissione per motori non stradali (USA). [12]

2. Applicazione di sistemi fuel cell a veicoli da lavoro

2.1 Funzionamento fuel cell

Le celle a combustibile, o *fuel cell*, sono dei dispositivi atti a convertire energia chimica in energia elettrica. Questo avviene tramite reazioni di ossidoriduzione tra due reagenti, idrogeno e ossigeno, che si combinano per generare elettricità. Tra le molteplici tipologie costruttive, le fuel cell a membrana a scambio protonico (PEM) sono le più utilizzate per la trazione elettrica. All'interno della cella sono presenti due elettrodi, sui quali avvengono le reazioni: l'anodo e il catodo. Essi sono separati da una membrana, costituita da un elettrolita polimerico che permette solamente il passaggio di cariche positive.

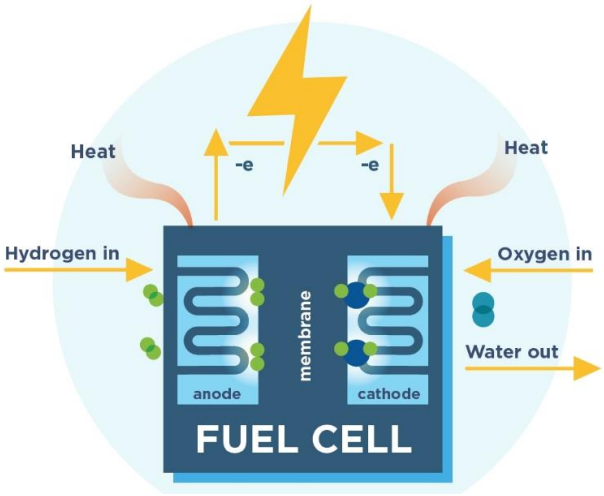


Figura 13. Funzionamento fuel cell. [13]

All'anodo avviene la reazione di ossidazione, dove l'idrogeno molecolare si scinde in due ioni positivi, perdendo due elettroni:

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$

Gli elettroni vengono fatti passare in un circuito esterno, mentre i protoni transitano attraverso la membrana fino ad arrivare al catodo. Qui si ricombinano e avviene la reazione di riduzione dell'ossigeno:

$$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$$

Grazie al flusso di elettroni nel circuito esterno è possibile produrre corrente continua e alimentare un carico elettrico.

La reazione complessiva del sistema è data da:

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$$

Gli unici prodotti di scarto del processo sono il calore, emesso in quanto la reazione è esotermica, e l'acqua: la tecnologia risulta essere dunque pulita poiché non produce inquinanti.

Il funzionamento della cella è determinato dalla curva di polarizzazione (*fig 14*): essa descrive la cinetica delle reazioni e mette in relazione le perdite di tensione in funzione della densità di corrente estratta.

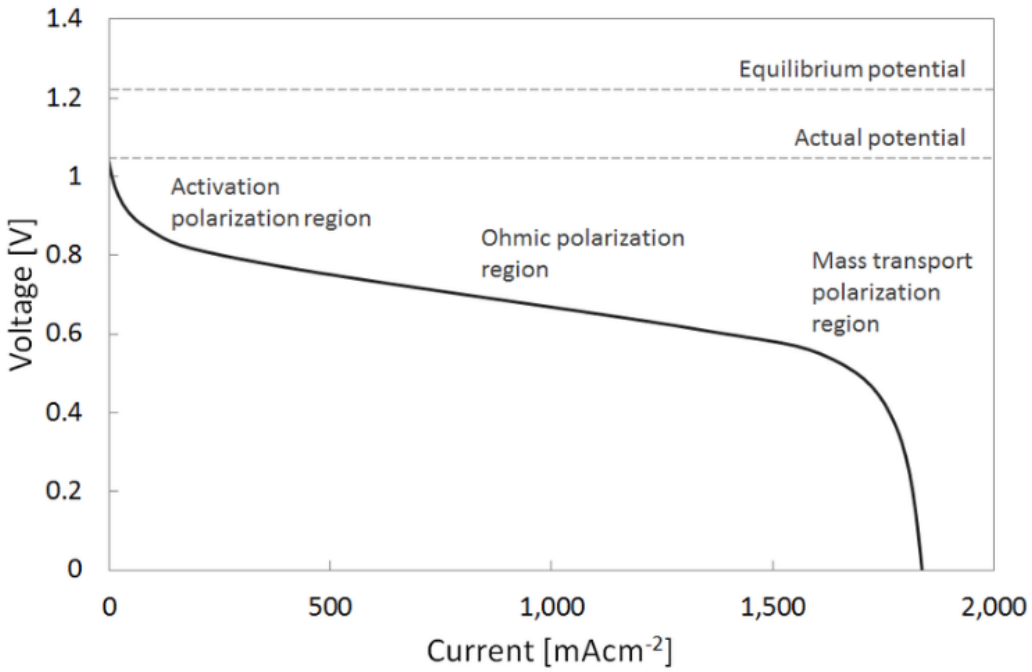


Figura 14. Curva di polarizzazione. [14]

La curva si può suddividere in tre regioni principali:

1. *Activation region*: è la zona delle perdite dovute all'energia di attivazione necessaria a innescare le reazioni chimiche agli elettrodi, dove le velocità di reazione sono ancora basse.
2. *Ohmic region*: in questa regione le perdite predominanti sono date dalla resistenza interna dei conduttori, secondo la legge di Ohm ($V=R \cdot I$).
3. *Mass transport region*: nell'ultima parte della curva, le perdite maggiori sono dovute alla scarsa diffusione dei reagenti; si raggiunge un limite di densità di corrente oltre il quale la fuel cell consuma di più di quanto fornito all'alimentazione.

Associata alla curva di polarizzazione troviamo la curva di efficienza (*fig.15*), la quale completa la determinazione dei punti di funzionamento della cella. La regione delle perdite ohmiche risulta essere quella a efficienza maggiore: di conseguenza, nelle zone estreme della curva non si opera a causa delle scarse efficienze, in particolare nell'ultima parte dove, sebbene la potenza estraibile sia teoricamente maggiore, la cella smetterebbe di funzionare subendo danni irreversibili.

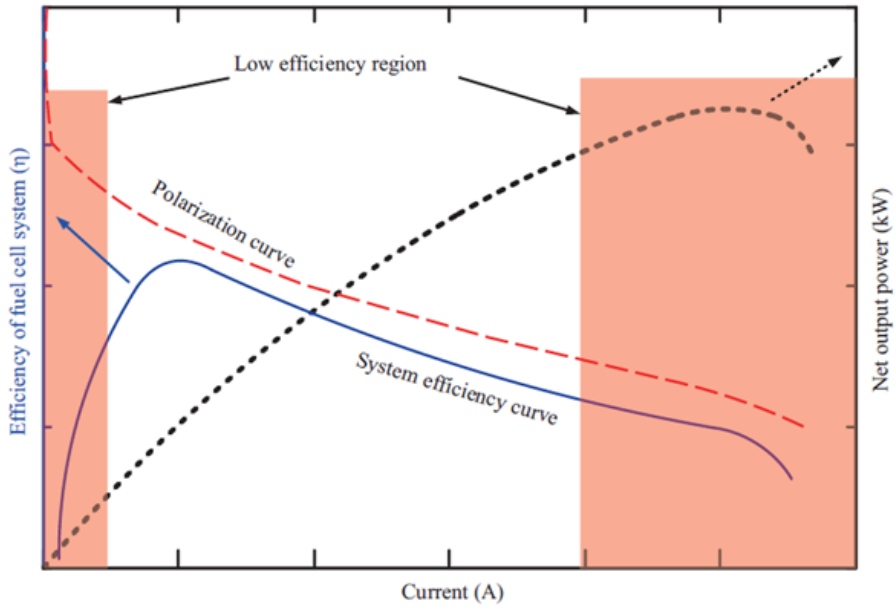


Figura 15. Curva di efficienza fuel cell. [15]

Come si evince dalla curva di polarizzazione, la massima differenza di potenziale a circuito aperto (*Open Circuit Voltage, OCV*) raggiungibile all'interno di una singola cella è dell'ordine di ~1 V, valore molto basso rispetto alle tensioni di esercizio delle vetture elettriche. Per poter quindi raggiungere un voltaggio adeguato alle applicazioni di interesse, è necessario collegare più celle in serie, così da ottenere uno stack (*fig.16*).

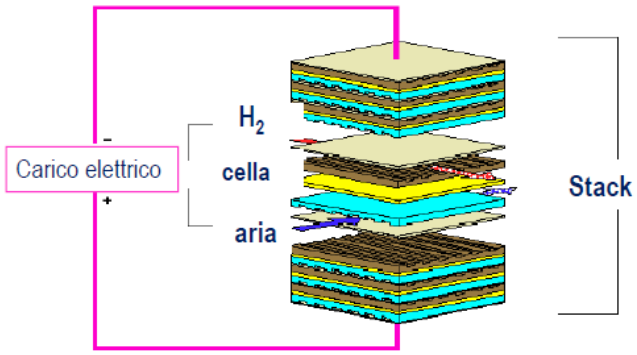


Figura 16. Fuel cell stack. [5]

Per quanto riguarda l'assemblaggio dello stack, ogni cella è composta da due piastre bipolari (*Bipolar Plates, BP*) che contengono l'insieme degli elettrodi con la membrana, come mostrato in *figura 17*. Sugli elettrodi si possono distinguere due strati: il *Gas Diffusion Layer (GDL)* e l'*Activation Layer (AL)*. Il *GDL* è fabbricato in fibra di carbonio e serve a garantire la diffusione dei reagenti verso l'elettrolita. L'*AL* è dove avvengono le reazioni di ossidoriduzione ed è formato da un materiale poroso in cui sono presenti catalizzatori al platino Pt, inseriti per accelerare le velocità di reazione. La membrana è invece realizzata in Nafion, un polimero costituito da Teflon (politetrafluoroetilene) solfonato: al fine di consentire alti gradi di conduttività protonica nell'elettrolita, i reagenti devono essere opportunamente umidificati prima di entrare nelle celle.

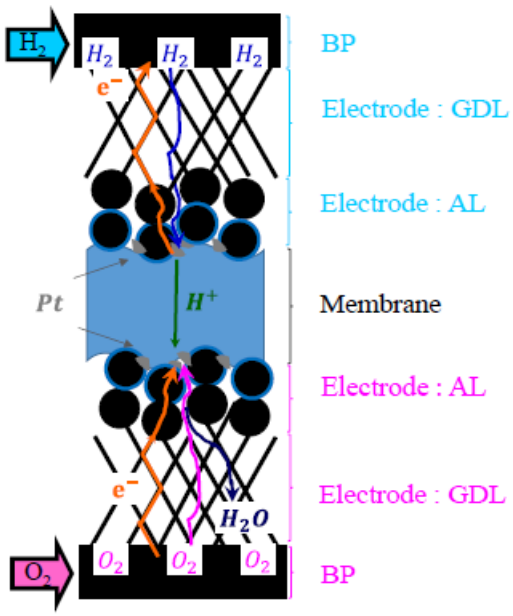


Figura 17. Sezione di una cella. [16]

Le piastre bipolari hanno la funzione di assicurare l'alimentazione dei reagenti ed evacuare l'acqua di scarto delle reazioni. Essendo di materiale metallico, solitamente acciaio, esse permettono anche la conduzione degli elettroni verso il collettore e consentono il collegamento elettrico in serie delle celle.

2.2 Specifiche di sistema e controllo

In applicazioni per veicoli, lo stack è integrato a bordo insieme a sottosistemi ausiliari che ne controllano il corretto funzionamento. In *figura 18* è riportato un esempio di un sistema fuel cell:

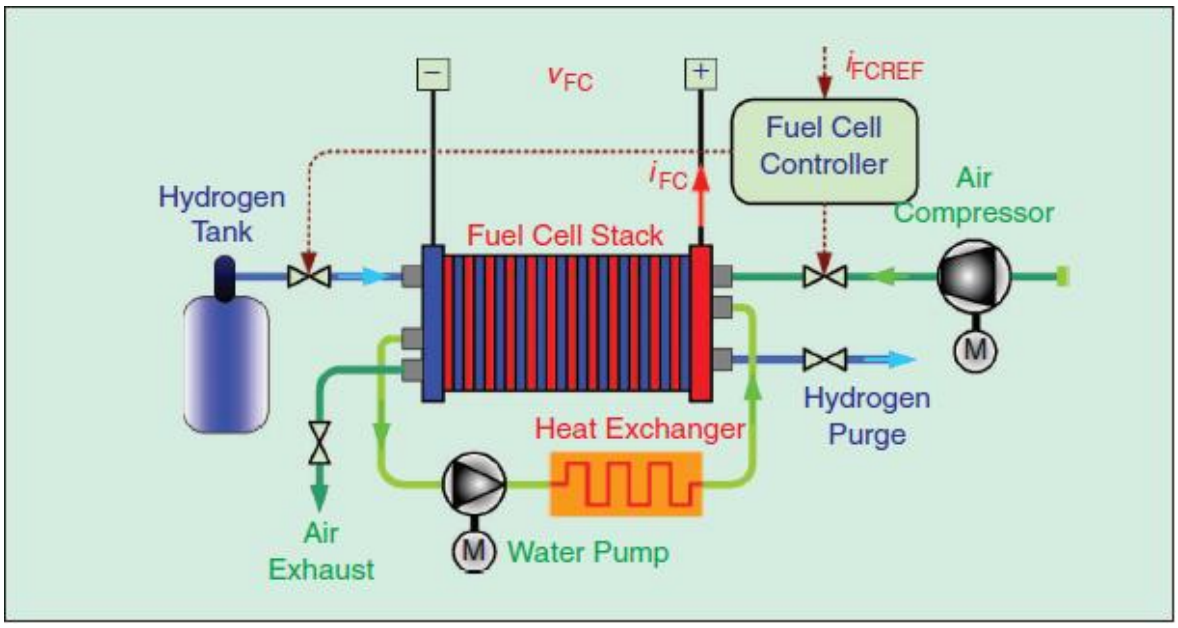


Figura 18. Sistema fuel cell. [17]

Si possono distinguere quattro sottosistemi principali:

1. Alimentazione dell'aria

L'ossigeno necessario per la reazione di riduzione viene estratto direttamente dall'aria ambiente: non sono dunque necessari serbatoi per lo stoccaggio. L'alimentazione avviene tramite un compressore che preleva aria dall'esterno e la manda al catodo della cella. È necessario, tuttavia, dapprima un filtraggio per evitare l'avvelenamento da carbonio del catalizzatore, il quale ne è suscettibile a minime quantità che sono presenti, ad esempio, nel monossido di carbonio e negli idrocarburi incombusti contenuti nell'aria ambiente [5].

2. Alimentazione dell'idrogeno

A differenza dell'ossigeno, non è possibile prelevare l'idrogeno direttamente dall' aria ambiente: è richiesto quindi un sistema di stoccaggio. A causa della bassa densità dell'idrogeno gassoso a pressione atmosferica, sono necessari serbatoi ad alta pressione che ne permettano un immagazzinamento in quantità maggiori.

I serbatoi di ultima generazione, grazie alla loro forma cilindrica con teste sferiche, riescono a sostenere pressioni fino a 700 bar (*fig.19*): ne consegue una maggiore densità volumetrica, adatta per contenere gli ingombri nel veicolo e garantire range di percorrenza adeguati [18].

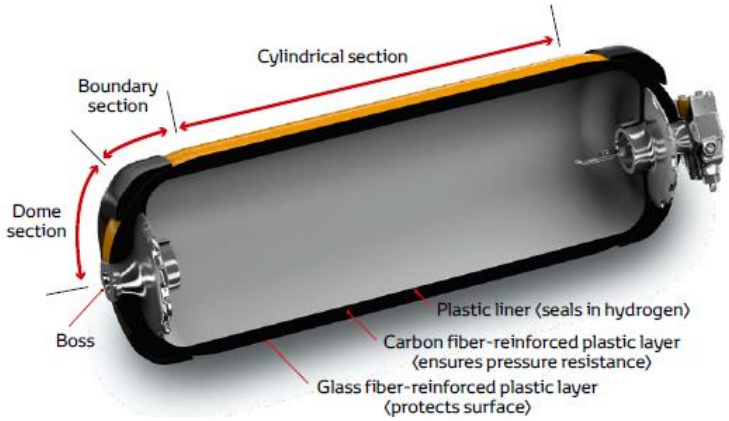


Figura 19. Serbatoio. [19]

Prendendo come esempio l'autovettura a fuel cell Mirai prodotta dalla Toyota, si riesce a raggiungere una quantità di idrogeno stoccato pari a 5.0 kg, a fronte di un volume di 122 L suddiviso in due serbatoi che garantiscono un'autonomia di circa 650 km [19]. I serbatoi contenenti idrogeno allo stato liquido, ottenibile tramite tecniche criogeniche, vengono invece utilizzati esclusivamente per applicazioni con motori a combustione interna, in quanto è necessario un raffreddamento a bassissime temperature (fino a -253 ° C) che non sono compatibili con il funzionamento delle fuel cell.

Per quanto riguarda la gestione del flusso di idrogeno inviato dal sistema, sono possibili diverse configurazioni costruttive dell'anodo. Tra le più utilizzate attualmente troviamo l'HCA (*Hydrogen circulation anode*). In questa configurazione, la mandata dell'anodo è di norma bloccata: l'idrogeno in eccesso viene ricircolato tramite una pompa, in modo da stabilizzare le pressioni parziali dei gas coinvolti nelle reazioni ed evitare densità di corrente non omogenee agli elettrodi. Sono previste inoltre purghe periodiche atte a evitare la diluizione dell'idrogeno, che si presenta in caso di migrazione dell'azoto dal catodo all'anodo [20]. L'alimentazione è fornita a pressione atmosferica o leggermente superiore, fino a 3 bar, tramite una valvola regolatrice che riduce la pressione dal serbatoio e invia una portata in base alla richiesta di potenza, e quindi di corrente. La linea è controllata per garantire una differenza di pressione nulla tra anodo e catodo, in modo da salvaguardare l'integrità strutturale della membrana polimerica: ne consegue che, sebbene la sovralimentazione possa migliorare le prestazioni in termini di potenza specifica, il bisogno

di aumentare la compressione dell'aria determina un'efficienza minore del sistema, a causa dell'elevata potenza richiesta dal compressore [21].

3. Sistema di controllo della temperatura

Questo sistema è necessario per smaltire il calore prodotto dalle reazioni chimiche. Tipicamente, le fuel cell PEM lavorano in un range di temperatura di 60-90 °C: temperature maggiori di quella ambiente accelerano la cinetica delle reazioni, ma valori troppo elevati rischiano di seccare la membrana e compromettere il funzionamento del sistema [22]. Il controllo della temperatura avviene tramite raffreddamento a liquido, che può essere acqua o un fluido refrigerante. La dissipazione del calore è consentita tramite il passaggio del liquido refrigerante attraverso dei canali, inseriti a contatto tra due piastre bipolari adiacenti: essi sono sagomati in modo tale da consentire uno scambio termico efficiente ed evitare perdite di pressione, ma allo stesso tempo garantire una distribuzione omogenea dei gas agli elettrodi e limitare le perdite Joule nelle piastre (*fig.20*) [16].

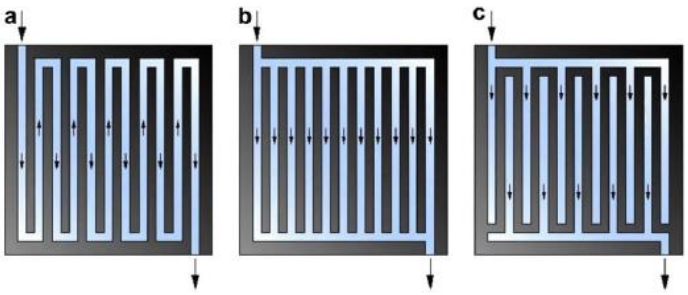


Figura 20. Configurazioni dei canali: serpentina (a), parallelo (b), interconnessi (c) [16]

In aggiunta, le soluzioni possibili per l'umidificazione dei reagenti vanno dalla presenza di umidificatori esterni, fino all'auto-umidificazione interna nelle celle [23].

4. Collegamento del carico elettrico

Nei veicoli a fuel cell, il collegamento del carico elettrico è effettuabile attraverso differenti configurazioni, che presentano vantaggi e svantaggi a seconda del campo di applicazione. In particolare, è utile approfondire le modalità di integrazione del carico nei veicoli ibridi a fuel cell (FCHEV), ovvero quelli che presentano un'ibridizzazione con una o più sorgenti di energia ausiliarie, come le batterie o i supercondensatori. Nel caso di studio esaminato, la scelta è ricaduta sull'ibridizzazione mediante un pacco batterie, che rappresenta la tipologia più comune di veicolo ibrido a fuel cell. In questa topologia, la fuel cell funge da fonte primaria di energia e fornisce una potenza media, mentre la batteria provvede ai picchi di

potenza e abilita la funzione di frenata rigenerativa. In questo modo, gestendo i transitori attraverso la batteria, si riesce a raggiungere un'efficienza maggiore del sistema rispetto a un veicolo elettrico puro a fuel cell ed è possibile estendere la vita utile delle celle. Le connessioni delle sorgenti di energia realizzabili attraverso questa modalità di ibridizzazione sono differenti: di seguito viene presentata una classificazione topologica in base al collegamento [24].

Collegamento diretto delle sorgenti di energia

È la topologia più semplice attuabile: la fuel cell e la batteria sono collegate direttamente al bus DC (*fig.21*). I vantaggi di questa connessione sono i bassi costi e l'occupazione di spazi ridotti: tuttavia, a causa delle diverse tensioni di esercizio dei componenti, la tensione sentita dal bus DC può presentare fluttuazioni che provocano l'instabilità della potenza emessa e ne rendono difficile il controllo. È necessaria, inoltre, la presenza di diodi che impediscono il passaggio di corrente verso la fuel cell.

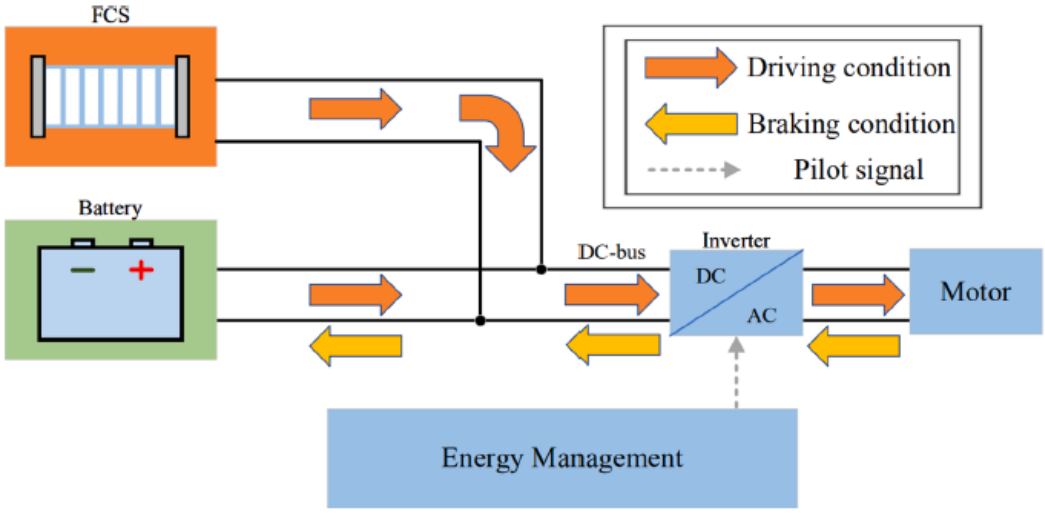


Figura 21. Collegamento diretto fuel cell e batteria. [24]

Collegamento diretto della fuel cell

In questa configurazione, la fuel cell è collegata direttamente al bus DC, mentre la batteria è collegata tramite un convertitore elettronico di potenza DC/DC, bidirezionale in corrente, che ha la funzione di stabilizzare il voltaggio sulla linea (*fig.22*). Così facendo, si riesce a ottimizzare l'efficienza e le dimensioni del pacco batterie, potendo scegliere un dispositivo con tensione minore.

Gli svantaggi risiedono nel collegamento diretto della fuel cell: la tensione sul bus DC è di conseguenza determinata dal valore di tensione dello stack, e le prestazioni del sistema risultano scarse in condizioni di variazioni improvvise della richiesta di potenza.

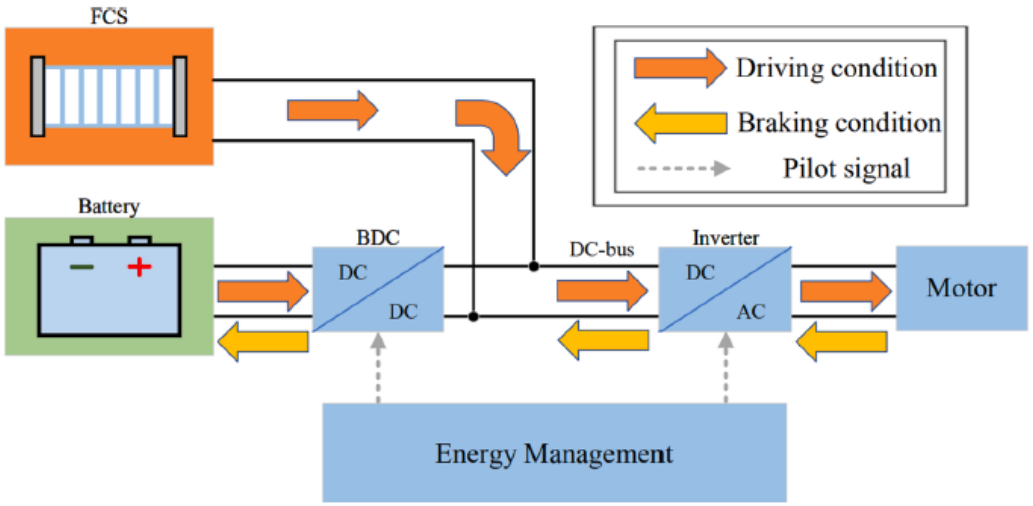


Figura 22. Collegamento diretto fuel cell [24]

Collegamento diretto della batteria

In questo caso la batteria presenta una connessione diretta, mentre la fuel cell è collegata al bus tramite un convertitore DC/DC, unidirezionale in corrente (*fig.23*). Attraverso questo tipo di collegamento, è possibile migliorare le prestazioni della fuel cell e allungarne la durata, a discapito però della necessità di una batteria più performante che riesca a garantire elevate capacità per la gestione duratura dei picchi di potenza.

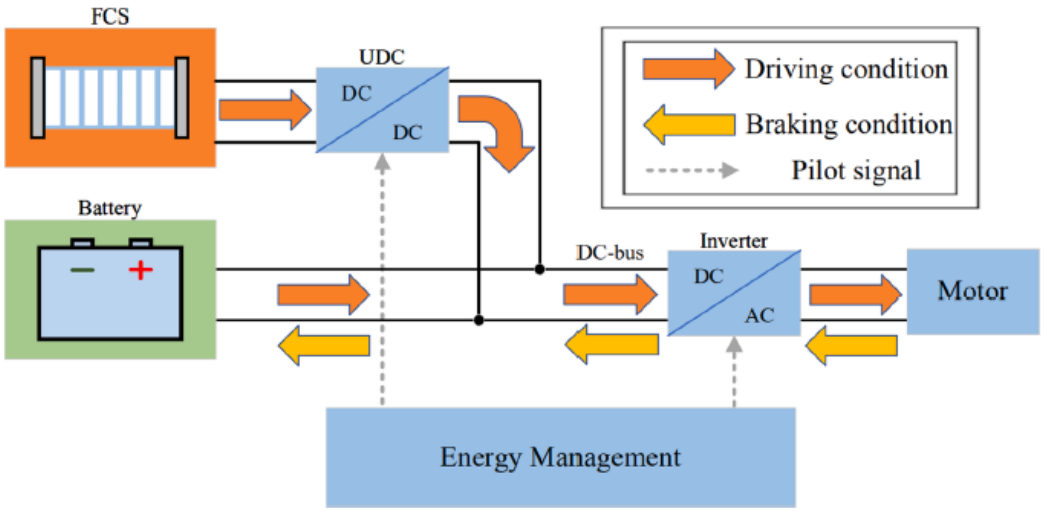


Figura 23. Collegamento diretto batteria [24]

Collegamento indiretto delle sorgenti di energia

È la topologia di collegamento ideale, con la quale si riescono a gestire in maniera indipendente le prestazioni delle sorgenti di energia e a ottimizzarne le dimensioni. Entrambe le sorgenti di energia sono collegate al bus DC mediante i relativi convertitori (*fig.24*): la loro presenza permette una tensione stabile al bus DC, e quindi un controllo preciso della ripartizione di potenza.

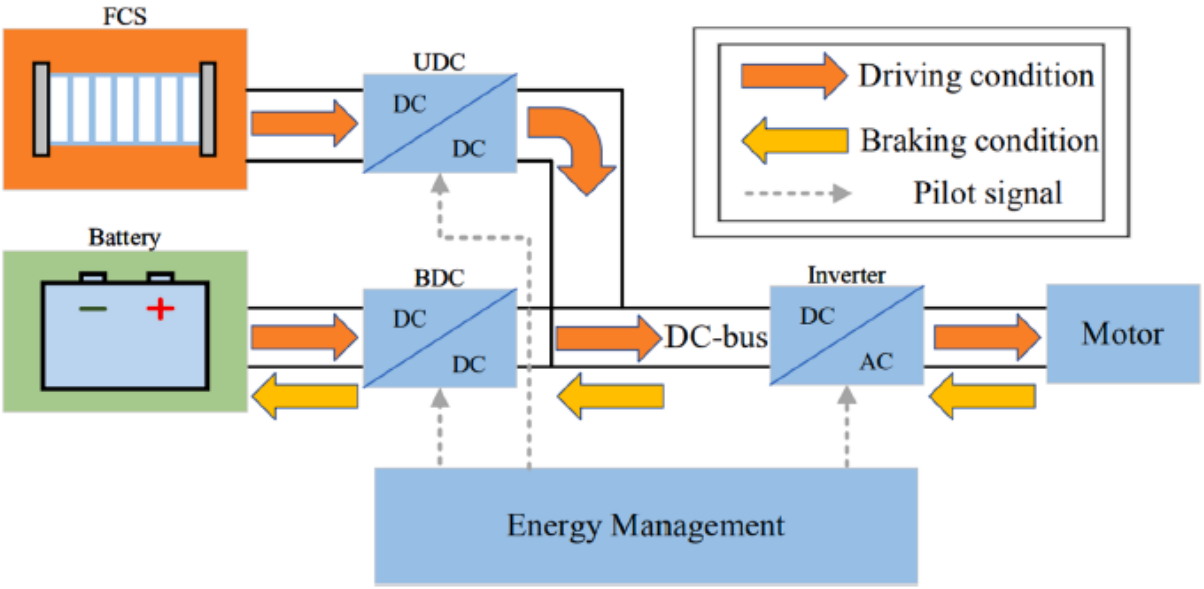


Figura 24. Collegamento indiretto fuel cell e batteria. [24]

Gli svantaggi di questa configurazione sono gli alti costi e la richiesta di ampi spazi per l'inserzione dei convertitori: la topologia è generalmente sfruttata per applicazioni ad alta richiesta di potenza. È questo il caso del veicolo considerato nel presente lavoro di tesi: le sue caratteristiche tecniche e operative permettono l'utilizzo dei convertitori, grazie alle grandi dimensioni a disposizione e alle elevate potenze in gioco.

2.3 Stato dell'arte di veicoli a fuel cell

2.3.1 Produzione dell'idrogeno

Nel settore dei trasporti, non sono molti i veicoli elettrici a fuel cell in commercio. Gli svantaggi dell'utilizzo dell'idrogeno derivano dal fatto che non è un gas disponibile allo stato libero sulla superficie terrestre: è necessario dunque produrlo a partire da altre fonti energetiche. In *figura 25* sono riportati i principali metodi di produzione dell'idrogeno a partire dalle relative fonti.

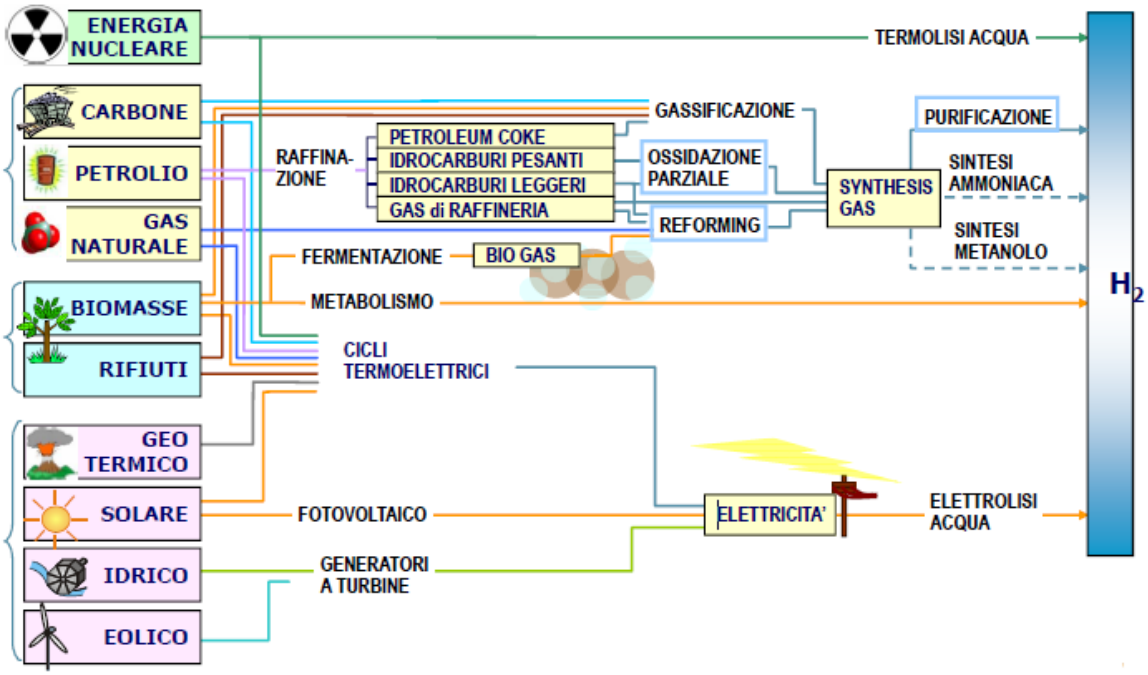


Figura 25. Metodi di produzione dell'idrogeno. [5]

Come si evince dalla figura, è possibile produrre idrogeno molecolare a partire da fonti fossili o da fonti rinnovabili. Allo stato attuale, la quasi totalità delle fonti di produzione è rappresentata dai combustibili fossili. Tra di loro, il gas naturale costituisce la fonte maggioritaria, seguita dal petrolio e dal carbone (*fig.26*) [25]. Circa la metà dell'idrogeno prodotto deriva quindi dal metano CH_4: la conversione è effettuata attraverso un processo di *reforming* a partire dal vapore acqueo, secondo le reazioni:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

Il metano viene dapprima trasformato in gas sintetico, che contiene idrogeno e monossido di carbonio. Quest'ultimo viene convertito in anidride carbonica, che viene infine eliminata tramite sistemi di assorbimento per incrementare la purezza dell'idrogeno.

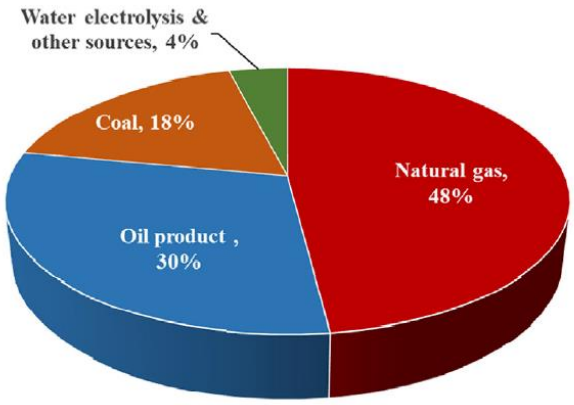


Figura 26. Fonti di produzione dell'idrogeno. [25]

È evidente dunque che, sebbene le reazioni coinvolte nel funzionamento di una fuel cell non emettano inquinanti, l'utilizzo di fonti fossili per la produzione dell'idrogeno comporta un impatto ambientale significativo in relazione al ciclo vita del prodotto. È necessario quindi un cambiamento verso una produzione mediante fonti rinnovabili e pulite. Tra i metodi alternativi, i più diffusi risultano essere la produzione da biomasse, da energia nucleare o tramite elettrolisi dell'acqua. Quest'ultima opzione rappresenta il metodo più interessante nell'ottica di abbattimento delle emissioni; l'acqua viene scissa in idrogeno e ossigeno tramite la reazione:

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$$

Data la necessità di energia elettrica per la conversione, l'elettrolisi rappresenta un'alternativa pulita solo se abbinata a elettricità prodotta da fonti rinnovabili. Inoltre, la doppia conversione da elettricità-idrogeno a idrogeno-elettricità per l'utilizzo nelle fuel cell presenta bassi rendimenti, non risultando ancora conveniente rispetto a tecnologie più consolidate e mature, come ad esempio le batterie. I metodi green rappresentano ancora una fetta troppo sottile della produzione di idrogeno: sono fondamentali, dunque, investimenti per poterne aumentare la percentuale rispetto agli altri metodi attualmente utilizzati.

2.3.2 Esempi di veicoli a fuel cell

Tra i veicoli a fuel cell presenti sul mercato, la diffusione non è omogenea per ogni categoria. In ambito automotive, gli esemplari più all'avanguardia disponibili provengono dalle case automobilistiche asiatiche Toyota, Hyundai e Honda, che rispettivamente producono le autovetture Mirai, Nexo e Clarity. Nella Mirai, la topologia di collegamento della fuel cell utilizzata è quella di connessione indiretta delle sorgenti di energia [26]. Al contrario, la Nexo utilizza una configurazione con connessione diretta della fuel cell [27], mentre la Clarity presenta un collegamento diretto della batteria [28].

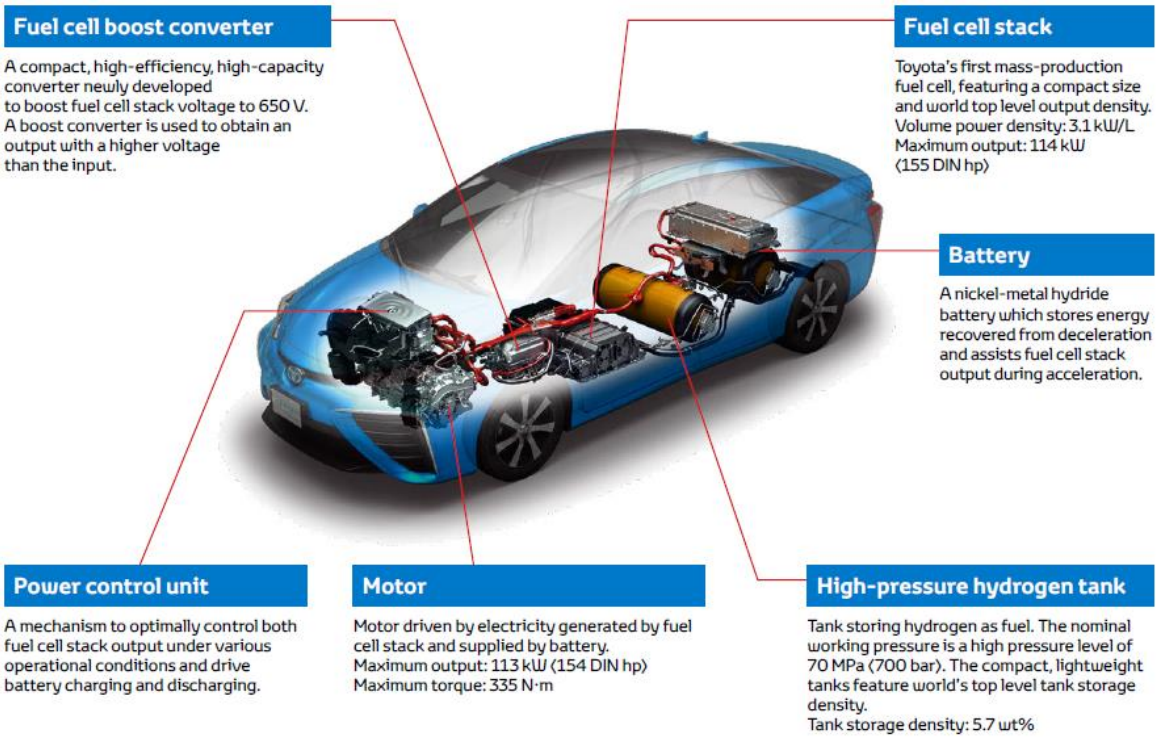


Figura 27. Powertain Toyota Mirai. [19]

Per quanto riguarda la categoria delle NRMM, si riscontrano esempi variegati a seconda della tipologia di veicolo. In ambito construction, i pionieri dell'elettrificazione mediante fuel cell sono la JCB e la Hyundai – Construction Equipment. In riferimento agli escavatori, la JCB ha sviluppato un prototipo alimentato da celle a combustibile [29], mentre la Hyundai – CE ne ha in programma la produzione in serie nell'immediato futuro [30].

Figura 28. Escavatore a fuel cell JCB. [29]

Nel settore della movimentazione merci, sono già disponibili sul mercato carrelli elevatori a fuel cell, con l'azienda Linde leader nella produzione [31]. In ambito agricolo, contrariamente, i tentativi di sviluppare veicoli a fuel cell da parte delle case costruttrici risultano ancora blandi. Un tentativo è stato fatto dalla New Holland, con il prototipo di trattore agricolo NH2 [32].

Figura 29. Trattore agricolo New Holland NH2. [32]

Tra i produttori di sistemi fuel cell per applicazioni non-road, diverse aziende commercializzano sistemi ad alta potenza adatti ai veicoli da lavoro. Gli esempi più rilevanti provengono dalle aziende Ballard, Cummins, Nuvera e PowerCell, che producono fuel cell con taglie superiori ai 100 kW, adatte per la propulsione di macchinari pesanti [33,34,35,36].

3. Modello di veicolo

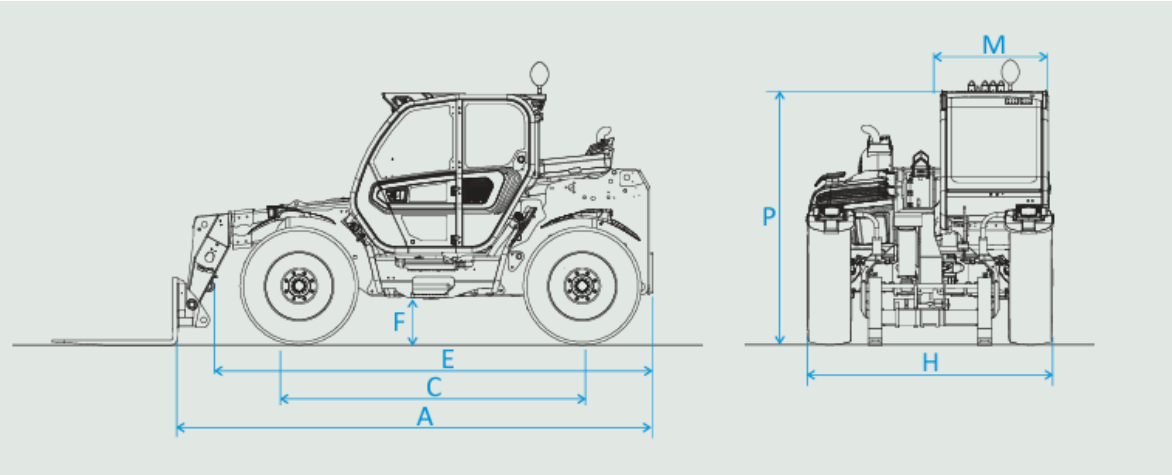
3.1 Descrizione del caso di studio

Il veicolo preso in considerazione appartiene alla famiglia dei sollevatori telescopici a media capacità della Merlo, azienda leader nella produzione di macchinari da lavoro: si tratta nello specifico del *Turbofarmer TF42.7-145* (*fig.30*). Grazie alla loro versatilità e praticità, queste macchine trovano applicazione in molti settori, dall'industria alla logistica, dall'agricoltura alle costruzioni, e sono adatte al sollevamento di pesi gravosi e alla loro movimentazione ad altezze notevoli.

Figura 30. Turbofarmer TF 42.7-145. [37]

Equipaggiato con un motore Diesel da 105 kW, il veicolo possiede una capacità di carico che raggiunge i 4200 kg. La trasmissione idrostatica e le quattro ruote motrici permettono prestazioni elevate con alti valori di coppia alle ruote. La velocità massima di 40 km/h e la precisione dei movimenti del braccio telescopico garantiscono facilità di esecuzione dei lavori con ridotti spazi di manovra, con una conseguente aumentata produttività.

Di seguito in *tabella 31* si riportano le caratteristiche tecniche del veicolo:



Dimensioni	A	C	E	F	H	M	P	R	S
mm	4730	2810	4104	460	2310	1010	2530	3985	4800

Prestazioni	*Massa totale a vuoto (kg)*	*Massima portata (kg)*	*Altezza massima di sollevamento (m)*	*Massimo sbraccio (m)*
	7800	4200	7	3.8

Powertrain	*Motore*	*Cilindrata (cm^3) / cilindri*	*Potenza (kW)*	*Sistemi di aftertreatment*	*Trasmissione*	*Velocità massima (km/h)*
	Deutz TCD 3.6	3600/4	105	Stage V DOC + SCR + DPF	Idrostatica	40

Idraulica	*Pompa idraulica*	*Portata (l/min)*	*Pressione (bar)*
	Load Sensing + Flow Sharing	150	250

Tabella 31. Caratteristiche tecniche TF 42.7-145. [37]

L’alzata massima del braccio può arrivare fino a 7 m, con uno sbraccio massimo di 3.8 m. Le capacità di carico in relazione ai profili di alzata e sbraccio sono riportate in *figura 32*.

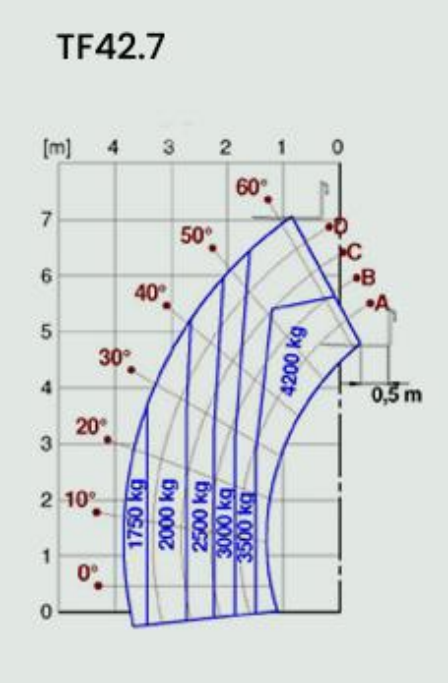


Figura 32. Profili di alzata e sbraccio. [37]

In *figura 33* è riportato uno schema a blocchi del powertrain convenzionale:

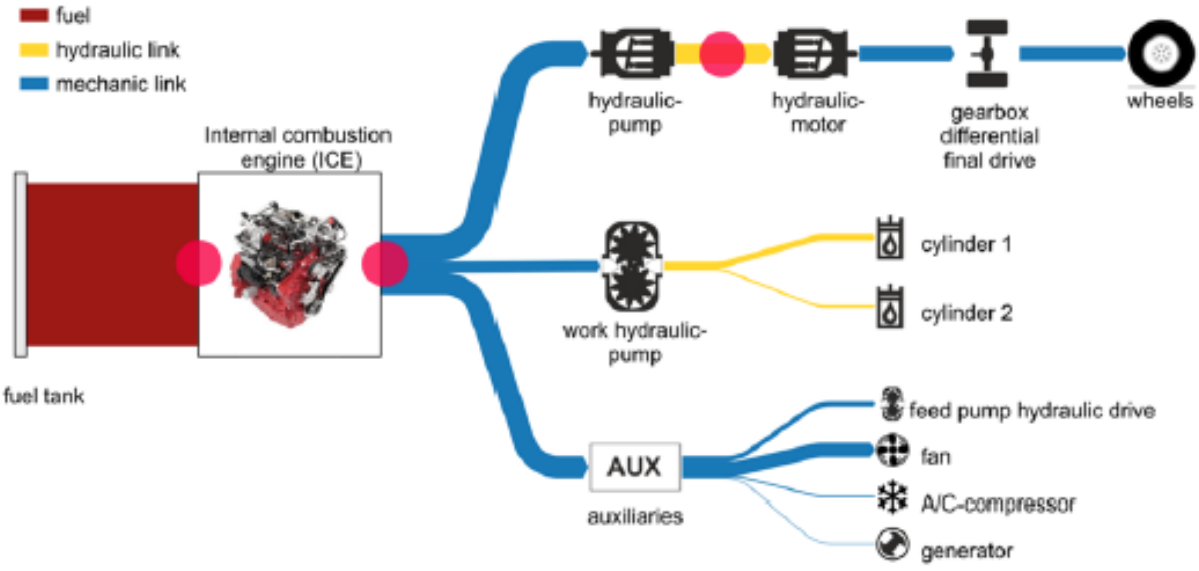


Figura 33. Powertrain convenzionale. [38]

Nel caso di studio di interesse, è stata sostituita l'architettura convenzionale e rimpiazzata da una ibrida elettrica, con alimentazione a fuel cell coadiuvata da un pacco batterie. La modellazione dei componenti è stata effettuata mediante il software MATLAB Simulink [39]. Nel paragrafo successivo è riportato il modello numerico del powertrain, suddiviso nei vari sottosistemi.

Per quanto riguarda la missione del veicolo, è stato scelto un profilo tipico di ciclo di lavoro, costituito dalle varie fasi corrispondenti alle funzioni che il veicolo deve adempiere per la conduzione del carico (*fig.34*). Si possono distinguere una prima fase di avvicinamento, seguita dalla fase di carico e dalla movimentazione dello stesso lungo il tragitto, per arrivare infine alla fase di scarico e al trasferimento senza carico, e poter quindi ricominciare il ciclo. Durante il ciclo di lavoro, il veicolo raggiunge velocità massime di 15 km/h. Per quanto riguarda la fase di movimentazione, per poter rilasciare il carico ad un'altezza maggiore, il braccio si alza fino a un angolo di circa 40° e fuoriesce di 1 m rispetto alla posizione di partenza.

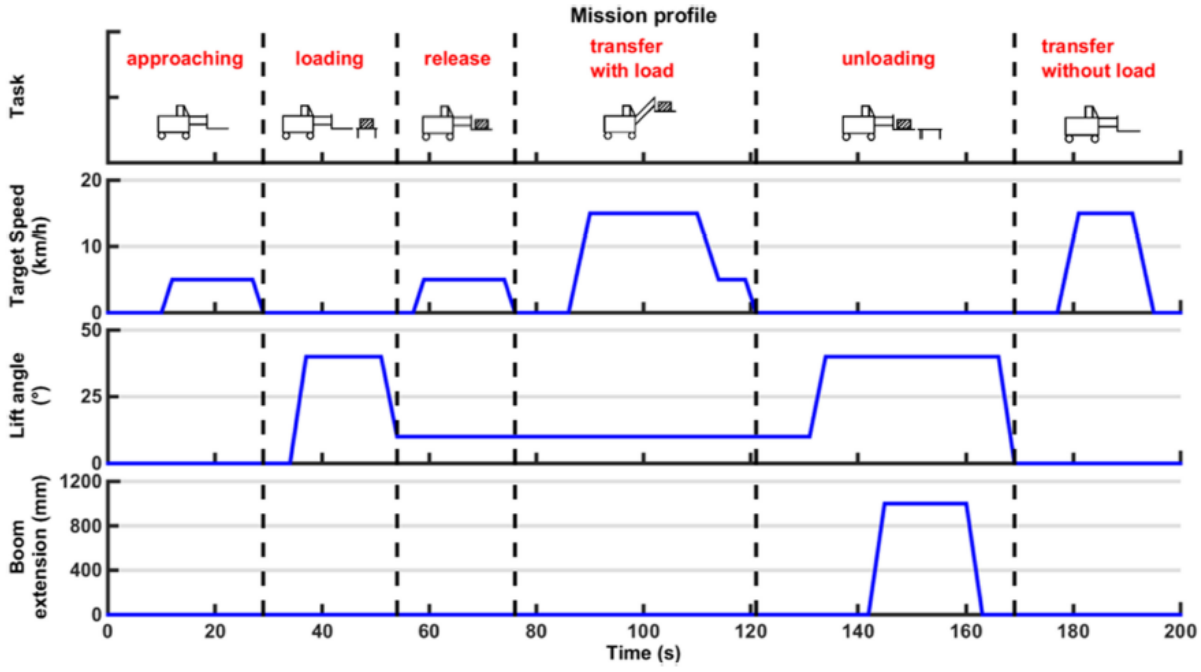


Figura 34. Profilo di missione del veicolo sul ciclo di lavoro. [40]

3.1 Modello numerico

Vengono proposti due modelli di veicolo. Oltre a quello a fuel cell, è stato implementato anche un modello di powertrain convenzionale con motorizzazione Diesel, al fine di poter paragonare le prestazioni delle due architetture lungo la missione del veicolo. Le caratteristiche dei componenti a valle del motore sono le stesse per entrambi i modelli: le differenze si riscontrano solamente a livello delle sorgenti di energia, elettriche nel caso del modello a fuel cell e termica nel caso del modello Diesel.

3.1.1 Modello powertrain elettrico

I blocchi, che simulano le equazioni fisiche dei componenti, sono stati modellati con l'applicativo Simscape del software Simulink (*fig.35*).

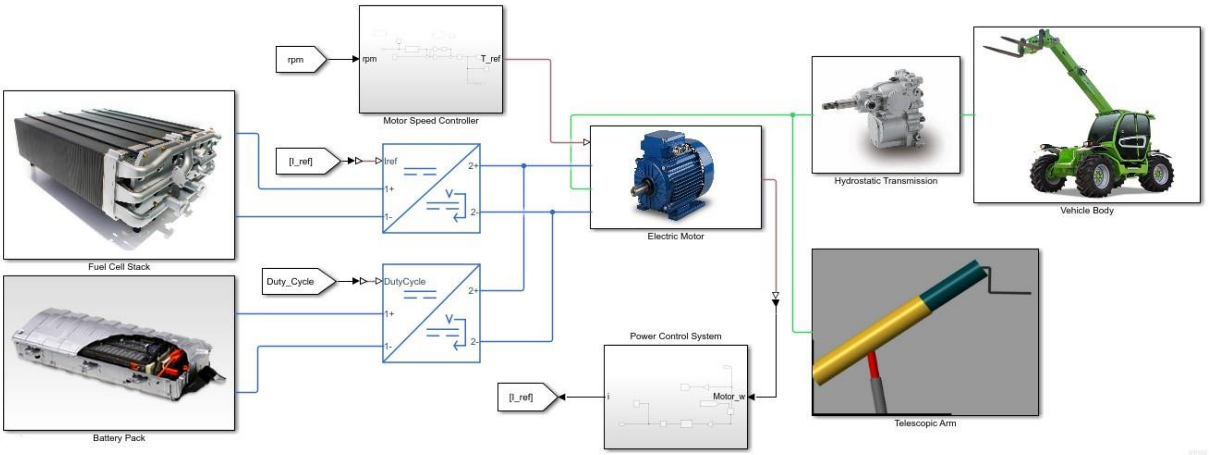


Figura 35. Modello powertrain elettrico.

Di seguito vengono descritti i vari sottosistemi presenti all'interno del modello:

Fuel cell

La fuel cell scelta per questa tipologia di applicazione è stata modellata con un blocco predefinito chiamato "Fuel Cell Stack" [41]. Essa fornisce una potenza nominale di 50 kW grazie a uno stack di 900 celle. La pressione di alimentazione dell'idrogeno è di 1.5 bar, con una temperatura operativa delle celle di 65 °C.

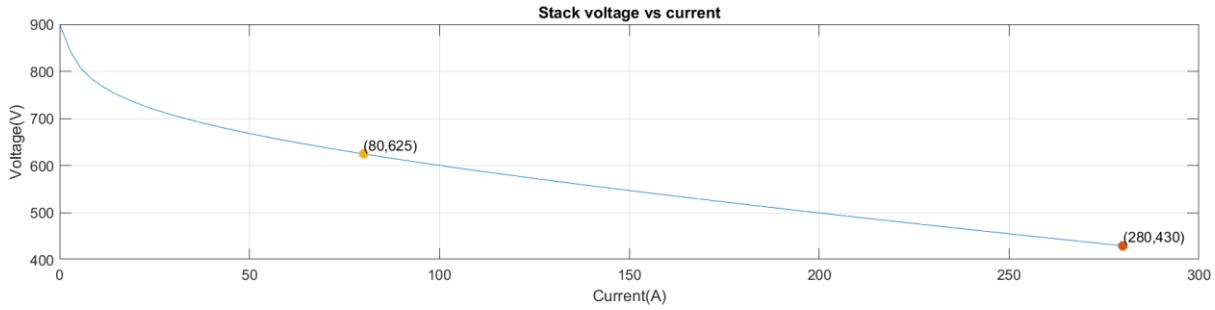


Figura 36. Curva di polarizzazione stack.

Nel punto nominale di funzionamento, la corrente prodotta risulta essere di 80 A, a fronte di una tensione di 625 V. Il punto operativo estremo della curva al quale corrisponde la massima portata di idrogeno è rappresentato da una richiesta di corrente di 280 A, con una tensione di 430 V. La potenza massima di esercizio risulta essere quindi di 120.4 kW.

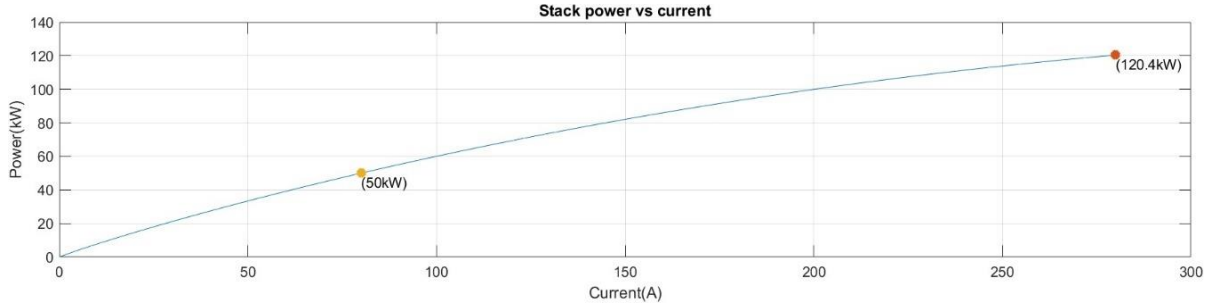


Figura 37. Curva di potenza.

Per valutare il flusso di idrogeno, viene utilizzata una relazione che tiene conto anche del ricircolo del gas all'anodo. La portata di idrogeno è data dalla formula:

$$\dot{q}_{H_2} = \frac{N\ i\ MM_{H_2}}{2\ F}$$

dove:

- $\dot{q}_{H_2}$ è la portata massica di idrogeno, in [g/s];
- N = 900 è il numero di celle;
- i è la corrente richiesta, in [A];
- MM_{H2} = 2,016 è la massa molare dell'idrogeno, in [g/mol];
- F = 96458 è il numero di Faraday, in [s/A· mol].

I consumi in grammi di idrogeno sulla missione del veicolo si ottengono quindi attraverso l'integrale rispetto al tempo della portata massica:

$$q_{H_2} = \int_{t1}^{t2} \dot{q}_{H_2}\, dt$$

dove t_1 e t_2 sono rispettivamente i tempi di inizio e di fine del ciclo di lavoro.

Per quanto riguarda il collegamento elettrico con il carico, a valle della fuel cell è presente un convertitore elettronico di potenza unidirezionale in corrente, di tipo *boost*, il cui ruolo è quello di innalzare la tensione per adeguarla al bus DC e impedire il passaggio inverso della corrente verso lo stack, in modo da evitare picchi dannosi alle celle. La tensione richiesta dal bus DC è di 640 V, valore tipico di applicazioni per veicoli.

Batteria

La taglia della batteria selezionata, inserita per assistere la fuel cell durante le operazioni di lavoro, è di 15 kWh, con una tensione nominale di 300 V e una capacità di 50 Ah.

Per valutare lo stato di carica della batteria (*State of Charge, SOC*), è stata utilizzata la seguente relazione:

$$SOC = 1 - \frac{C_{used}}{C_{nom}}$$

dove C_{nom} è la capacità nominale della batteria e C_{used} è il valore di capacità utilizzata, espresso da:

$$C_{used} = \int_{t1}^{t2} i_{batt}\, dt$$

ovvero dall'integrale rispetto al tempo della corrente fornita dalla batteria.

Il collegamento con il bus DC è realizzato mediante l'inserzione di un convertitore elettronico DC/DC di tipo *buck-boost*, il quale regola i livelli di tensione in base al carico. Il convertitore è bidirezionale in corrente e permette quindi sia la modalità di trazione elettrica, in configurazione *boost* (innalzatore di tensione), sia la frenata rigenerativa in configurazione *buck* (abbassatore di tensione), dove avviene il recupero dell'energia cinetica in fase di frenata del veicolo, in modo da poter ricaricare la batteria.

Il controllo è effettuato attraverso l'impostazione del *duty-cycle D*, che rappresenta la frazione di tensione regolata attraverso la commutazione del convertitore, in base alla relazione:

$$V_{out} = \frac{D \cdot V_{in}}{1 - D}$$

dove V_{out} e V_{in} sono le tensioni rispettivamente in uscita dal e in ingresso al convertitore.

Sistema di controllo della potenza

La potenza emessa dalla fuel cell viene regolata tramite il convertitore elettronico *boost*. Esso riceve in input il segnale di riferimento di corrente proveniente dal controllore e gestisce quindi la quantità di idrogeno da estrarre dallo stack. La scelta del controllore per la ripartizione delle potenze tra fuel cell e batteria è ricaduta su un sistema che utilizza una strategia *Master & Slave*, in modo da ottenere un'architettura *load levelling* dove la fuel cell fornisce un valore medio di potenza, mentre la batteria agisce da buffer ed è incaricata di gestirne la componente variabile assorbendo i picchi di corrente (*fig.38*).

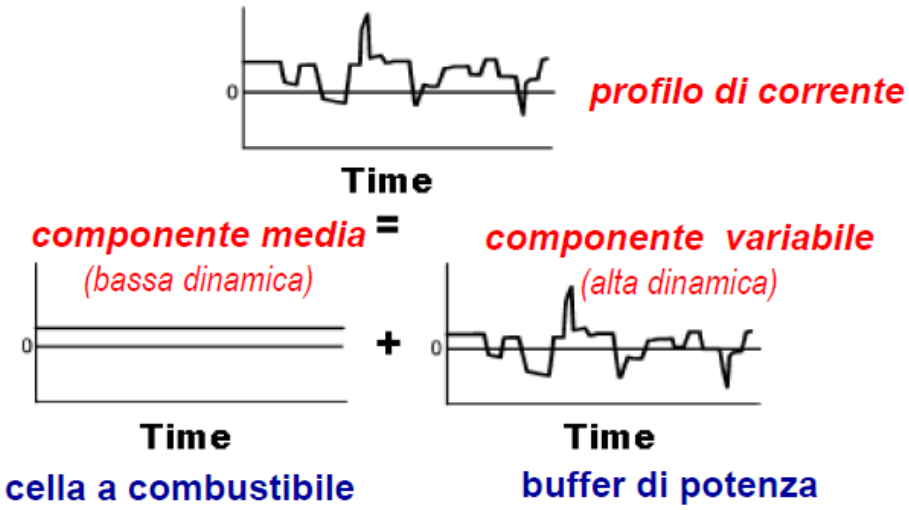


Figura 38. Strategia di controllo della potenza. [5]

La scelta è dettata dalla necessità di una bassa dinamica di adduzione dei gas agli elettrodi, in modo da stressare in modo minore le celle e preservare la durata dei componenti, ed è consentita grazie alla capacità della batteria di rispondere con un'alta dinamica alla richiesta di potenza.

La logica di controllo del sistema è stata elaborata con un blocco contenente una semplice *look-up table*, nella quale il valore di corrente di riferimento è tarato in base alla potenza del motore elettrico: alla potenza massima richiesta dal motore si fa corrispondere la corrente nominale della fuel cell. Il segnale è stato poi filtrato e attenuato attraverso una funzione di trasferimento per poterne livellare i picchi.

$$i_0 = i_{nom} \frac{P_{motor}}{P_{nom}}$$

$$\frac{i_{ref}}{i_0} = \frac{1}{2s + 1}$$

Motore elettrico

Il motore elettrico è stato modellato attraverso il blocco "Motor & Drive", che contiene l'intero azionamento elettrico. Il motore eroga una potenza massima di 105 kW alla velocità di 2000 rpm, a cui corrisponde una coppia di 502 Nm. In *figura 39* sono riportate delle tipiche curve di coppia e potenza di un motore elettrico:

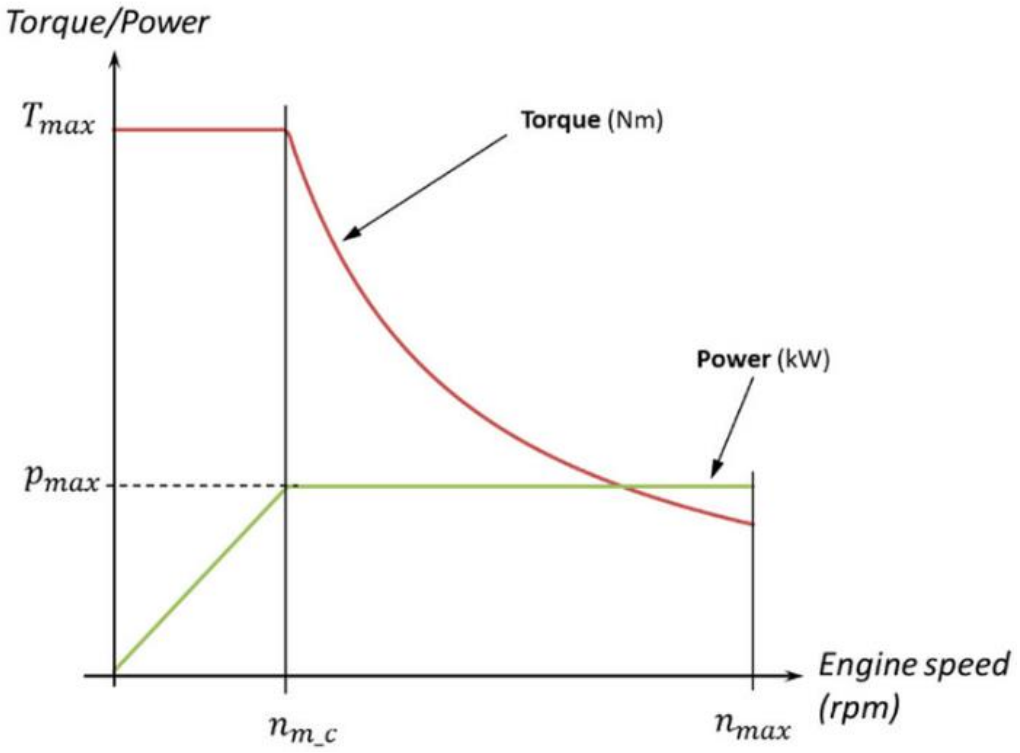


Figura 39. Curve di coppia e potenza di un motore elettrico. [42]

Il motore è controllato in velocità attraverso un regolatore PI, proporzionale-integrativo (*fig.40*): il blocco riceve in ingresso la velocità del motore e fornisce in uscita il segnale di riferimento di coppia. Si è scelto di far girare il motore a una velocità costante di 2000 rpm, poiché la richiesta di coppia alle ruote viene regolata dalla trasmissione idrostatica.

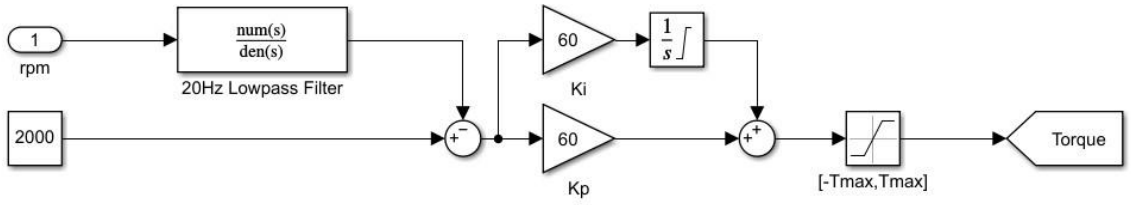


Figura 40. Controllo PI.

Trasmissione idrostatica

Il modello di trasmissione idrostatica utilizza la configurazione con una pompa a cilindrata variabile collegata a un motore idraulico a cilindrata fissa. La cilindrata massima della pompa deve essere uguale a quella del motore: è stato scelto un valore di riferimento di 100 cm^3/giro. La pompa (P) viene azionata dal motore elettrico (C) (*fig.41*): essa comprime il fluido proveniente dal serbatoio (S) e lo invia al motore (M), il quale sfrutta la differenza di pressione per alimentare l'utilizzatore (U), costituito in questo caso dalle ruote del veicolo. Nel circuito è interposta una valvola limitatrice di pressione (V) che scarica l'olio verso il serbatoio in caso di pressioni di mandata eccessive che potrebbero danneggiare il circuito.

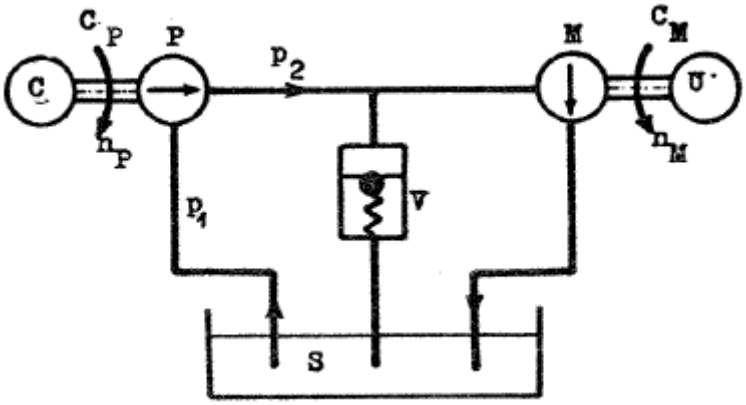


Figura 41. Trasmissione idrostatica. [43]

A valle della trasmissione, è presente un rapporto di trasmissione fisso che moltiplica la velocità di rotazione dell'albero alle ruote:

$$i = \frac{\omega_{shaft}}{\omega_{wheels}} = \frac{z_2}{z_1} = 28.6$$

dove z_2 e z_1 sono il numero di denti rispettivamente della ruota condotta e conduttrice dell'ingranaggio.

Dinamica longitudinale

L'avanzamento del veicolo è simulato con il blocco "Vehicle Body", che utilizza le seguenti equazioni della dinamica longitudinale:

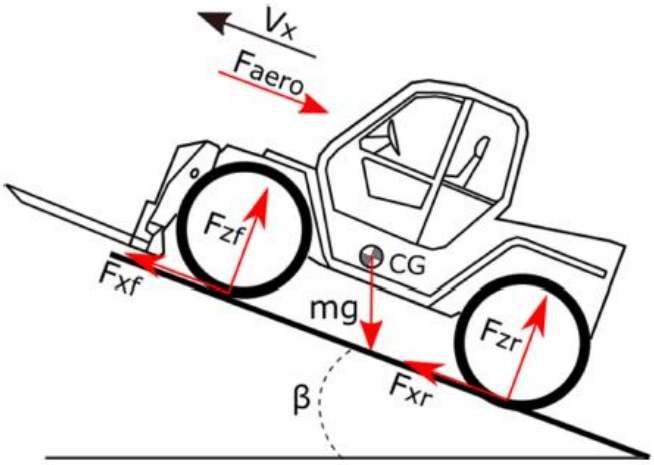


Figura 42. Modello di dinamica longitudinale. [40]

$$m\dot{v}_x = 2\left(F_{xf} + F_{xr}\right) - F_{aero} - mg \cdot \sin\beta$$

$$F_{zf} = \frac{-h(F_{aero} + mg \cdot \sin\beta) + b \cdot mg \cdot \cos\beta}{2(a+b)}$$

$$F_{zr} = \frac{+h(F_{aero} + mg \cdot \sin\beta) + a \cdot mg \cdot \cos\beta}{2(a+b)}$$

dove:

- a e b rappresentano la distanza del baricentro dagli assali rispettivamente anteriore e posteriore, mentre h l'altezza dello stesso dal terreno;
- m è la massa del veicolo, g l'accelerazione di gravità;
- β è la pendenza della strada;
- v_x è la velocità longitudinale del veicolo;
- F_{xf} e F_{xr} sono le forze di attrito in direzione longitudinale che gli pneumatici esercitano sul terreno;
- F_{zf} e F_{zr} sono le forze normali di contatto tra ruote e terreno;
- F_{aero} è la forza di resistenza aerodinamica, data da $F_{aero} = 0.5\rho C_D A v_x$.

L'area frontale del veicolo A è di 5 m^2, con un coefficiente di resistenza C_D pari a 0.8 e densità dell'aria ρ di 1.18 kg/m^3. Le ruote presentano pneumatici 400/70 da 24'' pollici: il raggio di rotolamento risulta essere quindi di circa 0,575 m.

Braccio telescopico

Il modello del braccio telescopico è composto dalla parte strutturale e dalla parte idraulica. La parte strutturale è stata modellata tramite Simscape Multibody (*fig.43*), ed è formata da:

- due attuatori idraulici, rappresentati da due cilindri a doppio effetto aventi il ruolo di comandare i movimenti di alzata e sfilo del braccio;

- due scatolari, inseriti uno all'interno dell'altro, che costituiscono la struttura del braccio;

- una forca, situata all'estremità del braccio, che permette il sollevamento del carico.

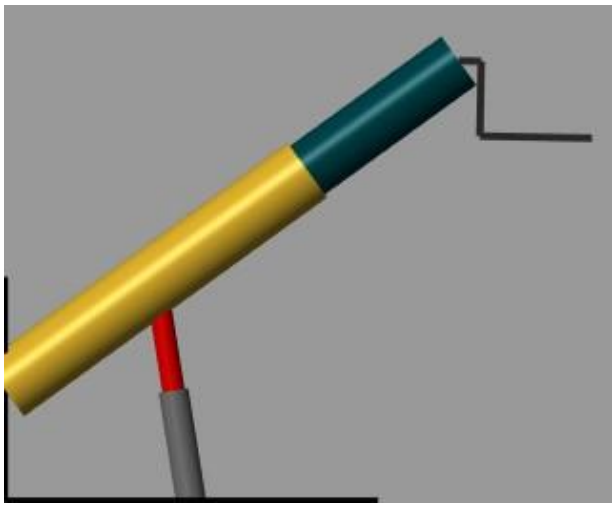


Figura 43. Braccio telescopico.

Relativamente alla parte idraulica, i cilindri sono azionati da una pompa a cilindrata variabile, di valore massimo di 100 cm^3/giro e regolata in base alla richiesta di portata di olio. Due valvole 4/3 a quattro vie e tre posizioni comandano l'invio del flusso alle camere dei cilindri, abilitando le corse di fuoriuscita e rientro dei pistoni.

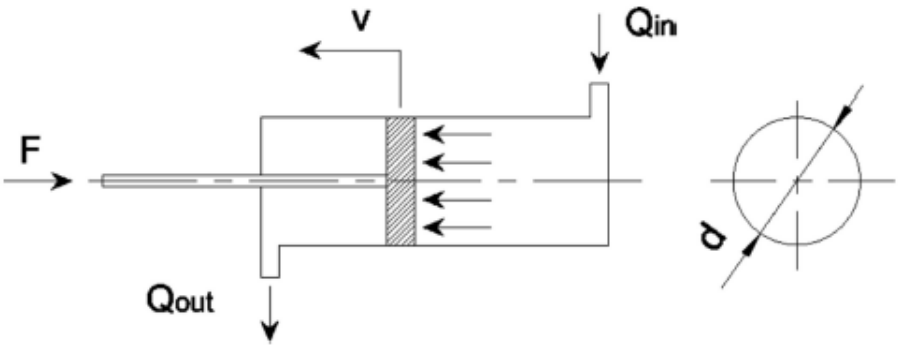


Figura 44. Modello di attuatore idraulico. [40]

Impostati i profili di alzata e sbraccio richiesti, le forze che agiscono sul sistema sono calcolate automaticamente dalla parte Multibody e inviate ai cilindri, che elaborano i segnali e determinano la potenza idraulica del sistema:

$$P_{hydr} = F \cdot v = p(Q_{out} - Q_{in})$$

dove:

- F la forza esercitata sul pistone;
- v la velocità del pistone;
- p è la pressione nel cilindro;
- Q_{out} e Q_{in} sono le portate rispettivamente in uscita dalla camera anteriore e in entrata alla camera posteriore del cilindro.

3.1.2 Modello powertrain convenzionale

Il modello di powertrain convenzionale mantiene le stesse caratteristiche meccaniche e idrauliche del modello precedente. Il motore elettrico viene sostituito con un motore termico Diesel, in grado di fornire valori equivalenti di coppia (*fig.45*).

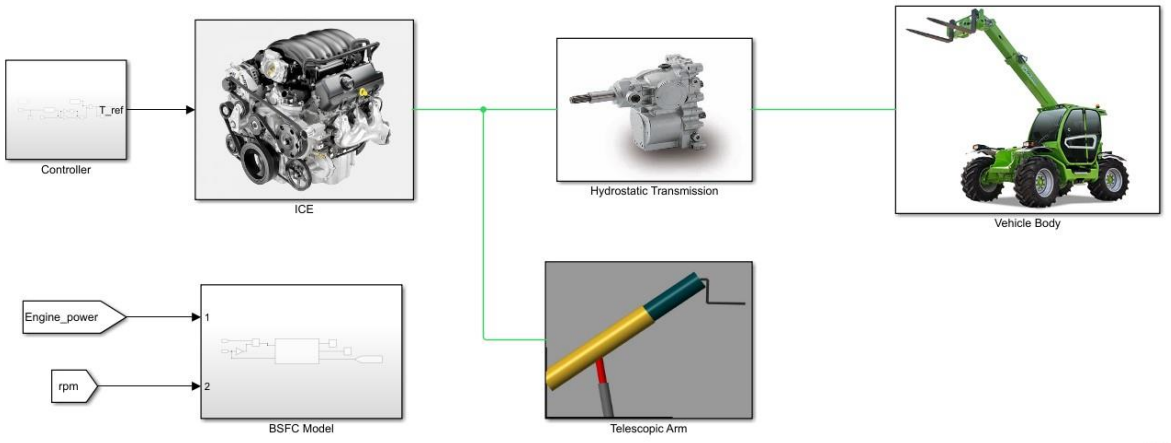


Figura 45. Modello powertrain convenzionale.

Motore a combustione interna

Il veicolo convenzionale è equipaggiato con un motore Diesel da 105 kW della Deutz, il TCD 3.6 HP, che eroga una coppia massima di 550 Nm alla velocità di 1600 rpm. Nelle *figure 46* e *47* sono riportate le curve di potenza e coppia del motore, evidenziate in grigio:

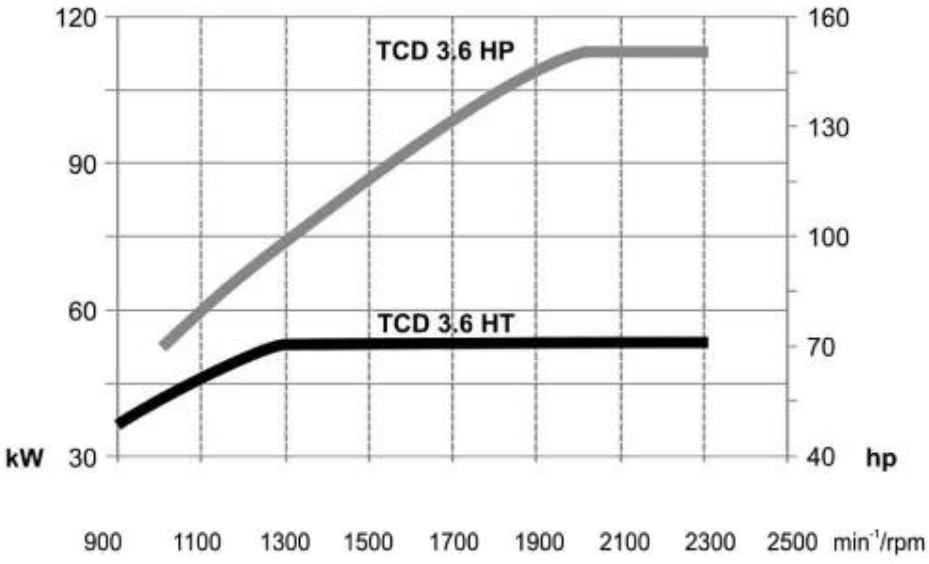


Figura 46. Curva di potenza Deutz TCD 3.6 HP. [44]

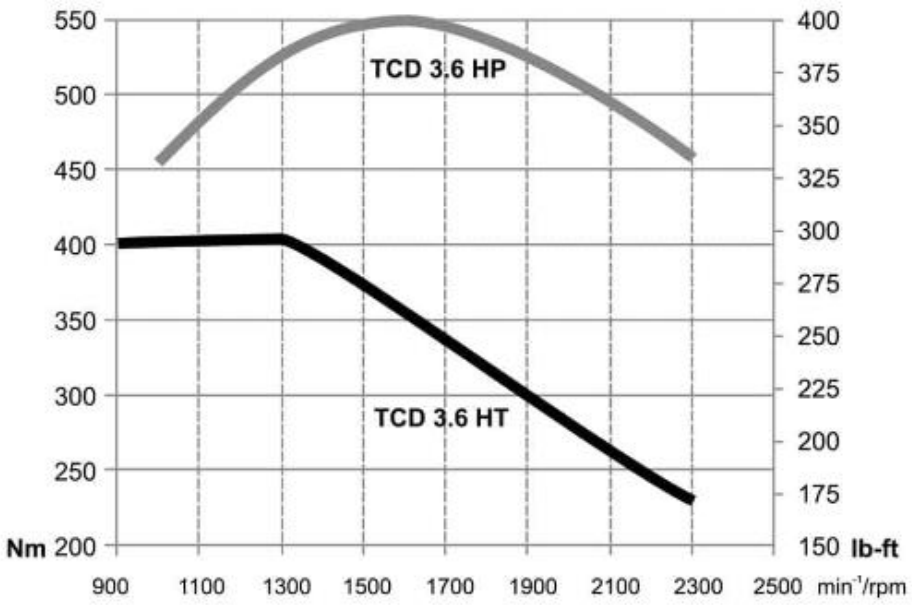


Figura 47. Curva di coppia Deutz TCD 3.6 HP. [44]

Il motore è stato modellato con il blocco "Generic Engine", contente una versione semplificata di motore termico. Esso riceve in input la curva di coppia ed è controllato tramite la variazione del segnale di richiesta di coppia inviata al pedale dell'acceleratore.

Controllo di coppia

Per la regolazione della coppia del motore, è stato utilizzato anche in questo caso un controllo in velocità PI, proporzionale-integrativo, equivalente a quello impiegato per il controllo del motore elettrico.

Modello consumi di combustibile

I consumi di combustibile sono valutati tramite un modello empirico che calcola il *bsfc* (*brake specific fuel consumption*), un valore che misura l'efficienza di conversione energetica del motore. Esso è dato dal rapporto tra il tasso di consumo di combustibile *r* e la potenza prodotta *P*:

$$bsfc = \frac{r}{P}$$

Il motore in questione presenta un *bsfc* minimo di 210 g/kWh.

4. Risultati e commenti

Modello Fuel Cell

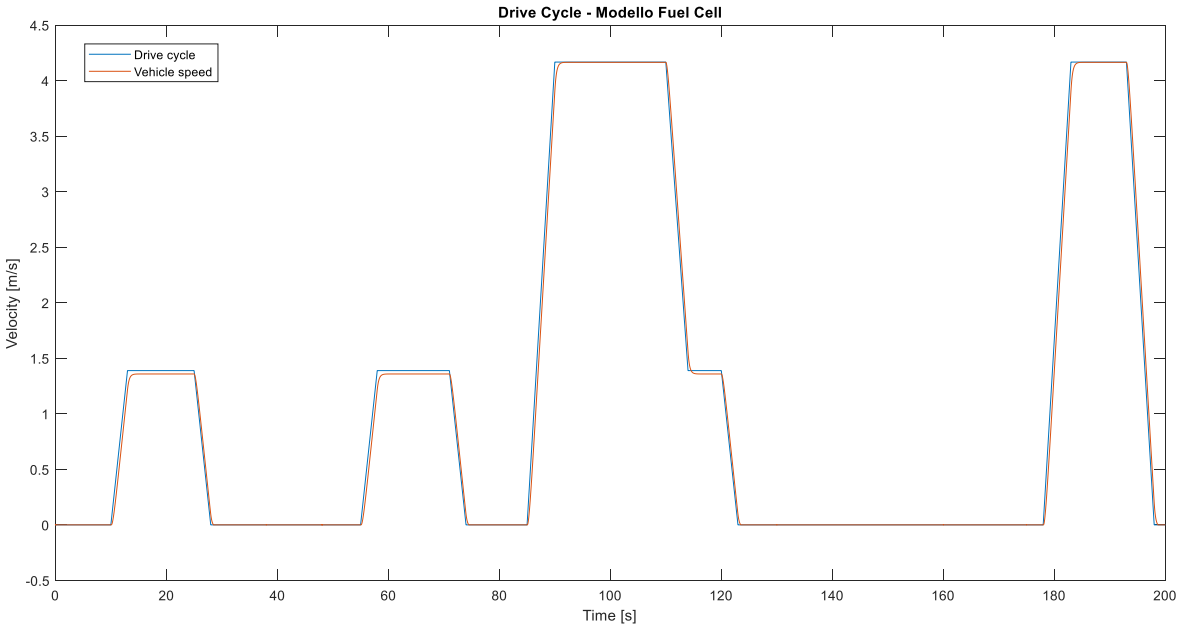


Figura 48. Ciclo guida – Modello Fuel Cell.

Dalla *figura 48* si può notare come il veicolo riesca a raggiungere i target di velocità impostati nel ciclo guida di riferimento. In *figura 49* è diagrammata la potenza emessa dalle due sorgenti di energia durante l'intero ciclo di lavoro.

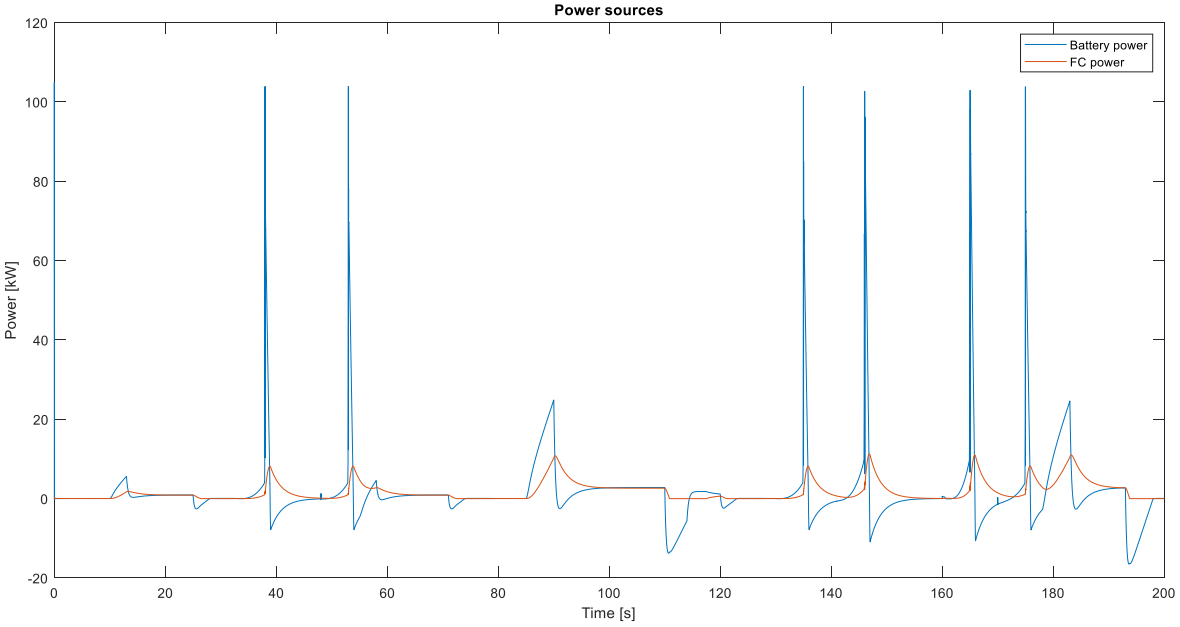


Figura 49. Sorgenti di potenza.

Come evidenziato dal grafico, la simulazione rispecchia l'andamento che ci si aspettava in seguito all'utilizzo della strategia di controllo *Master & Slave*: la fuel cell eroga un valore medio e livellato di potenza durante la missione del veicolo, mentre la batteria fornisce un output variabile e provvede alla gestione dei picchi nei transitori. In *figura 50* è illustrato lo stato di carica della batteria.

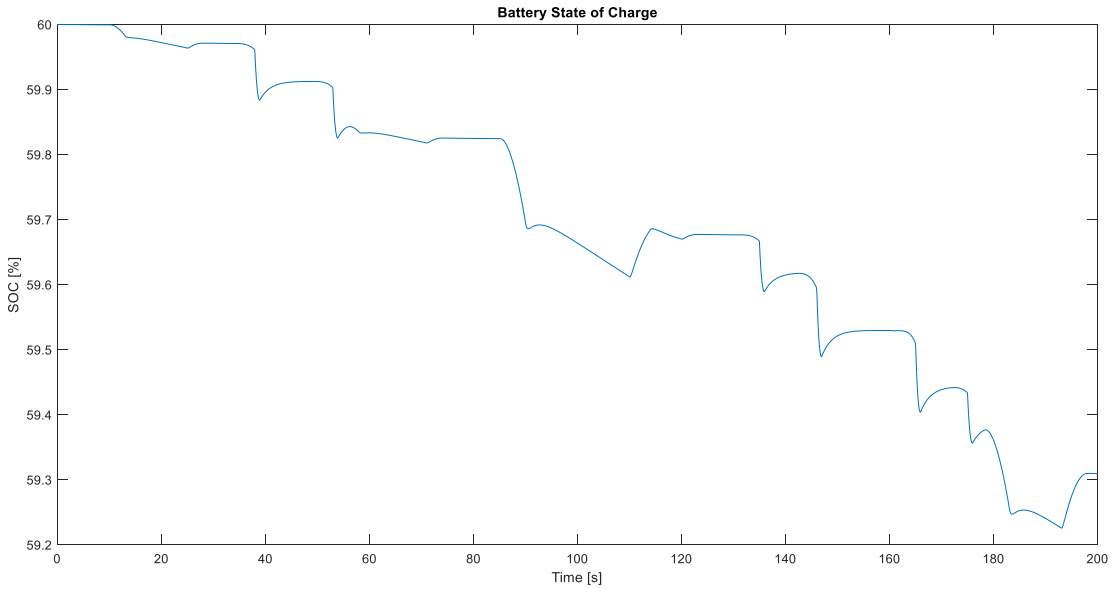


Figura 50. Stato di carica della batteria.

A partire da uno stato di carica del 60 %, la batteria si scarica di un 0.7 % circa, a fronte di un utilizzo complessivo di poco superiore ai 3 min. In *figura 51* è riportato invece il consumo di idrogeno all'interno dello stack.

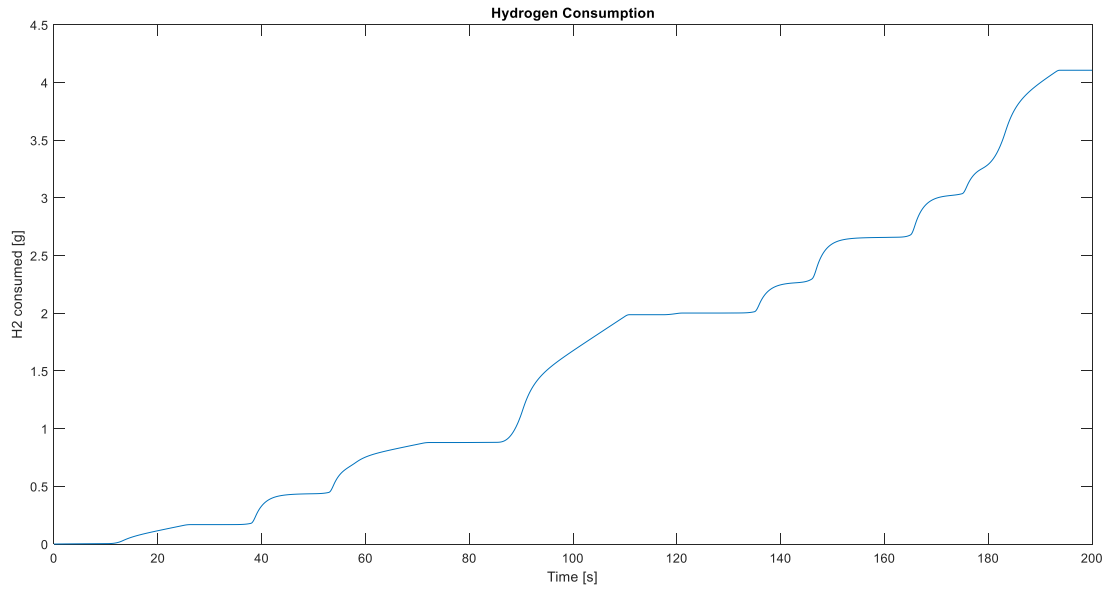


Figura 51. Consumo di idrogeno.

La quantità di idrogeno consumato durante il ciclo risulta essere di circa 4.1 grammi.

Modello Diesel

Per quanto riguarda il modello Diesel, anche in questo caso il veicolo segue fedelmente l'andamento del ciclo guida prefissato (*fig.52*).

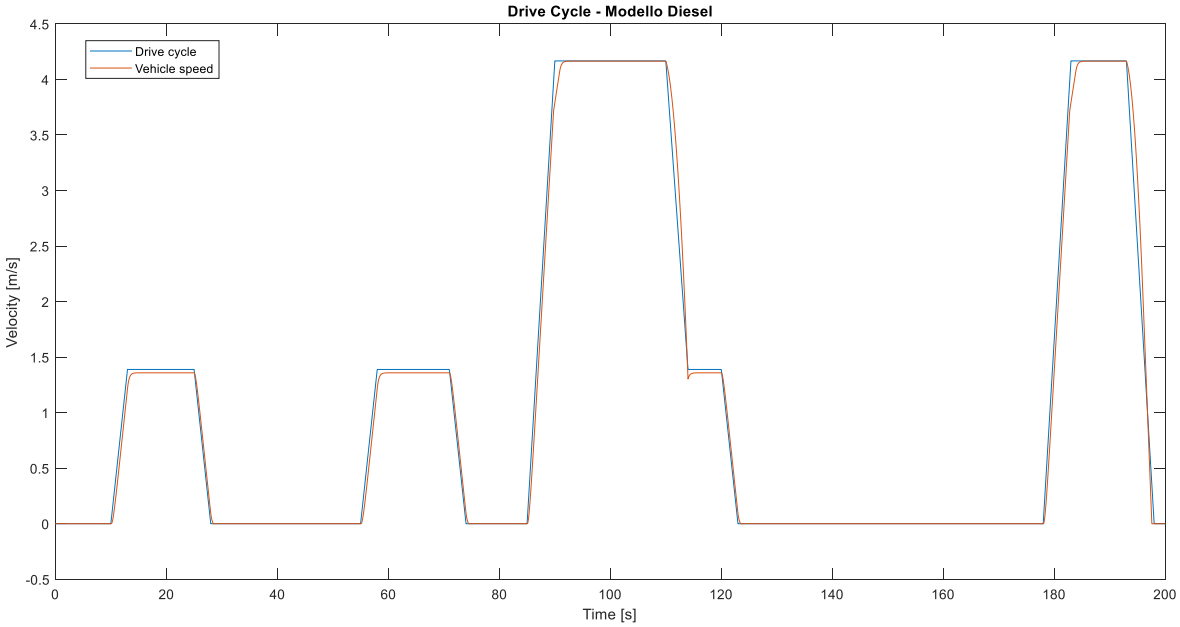


Figura 52. Ciclo guida – Modello Diesel.

In *figura 53* è diagrammata la potenza fornita dal motore termico.

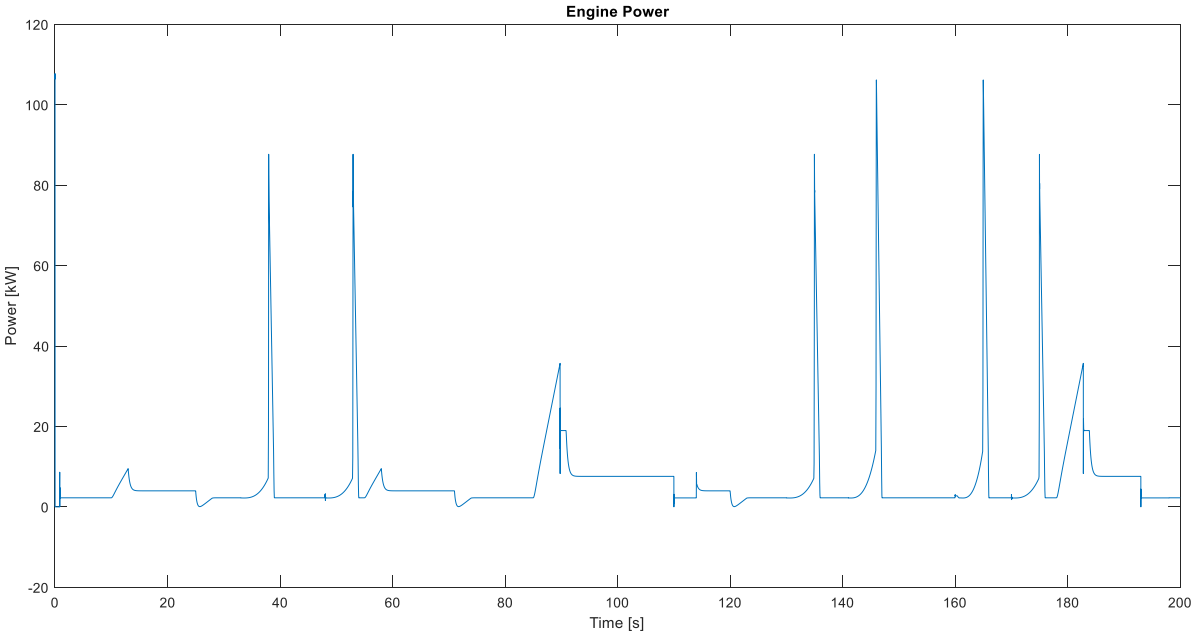


Figura 53. Potenza ICE.

Come si evince dal grafico, la potenza emessa ha un andamento simile a quella del modello a fuel cell, con picchi analoghi in corrispondenza dei punti di lavoro che richiedono una maggiore richiesta di coppia al motore.

I consumi di combustibile valutati dal modello sono evidenziati nel grafico di figura 54.

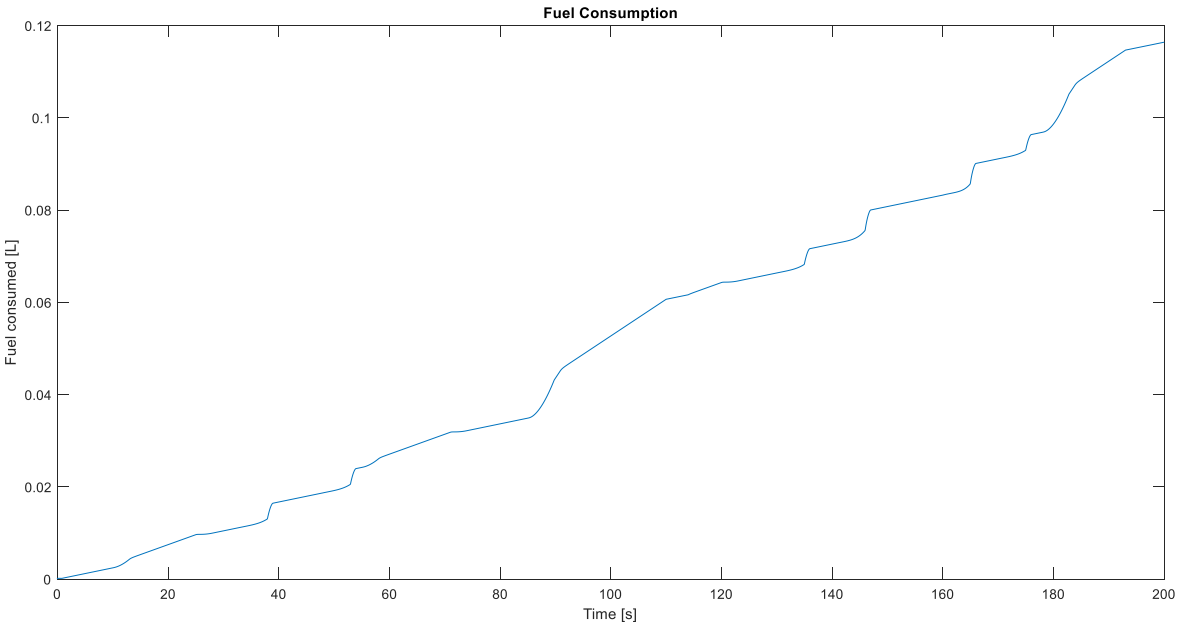


Figura 54. Consumi di combustibile.

Come si può notare, durante la missione la quantità di gasolio consumato è di poco inferiore ai 0.12 litri.

Dai grafici proposti si può notare quindi che entrambi i modelli presentano risultati simili, e le prestazioni risultano soddisfacenti sia nei compiti di trazione che nelle fasi di lavoro.

Confronto tra le due architetture

I valori ricavati dalle simulazioni vanno interpretati per poter analizzare vantaggi e svantaggi delle due architetture esaminate. Al fine di valutare i contributi alle emissioni di CO_2 di entrambe le soluzioni modellistiche, non ci si può limitare solamente al confronto delle prestazioni durante la missione del veicolo, che sarebbero totalmente a favore dell'architettura a fuel cell, data la produzione nulla di inquinanti. Per quanto detto nei capitoli precedenti, risulta necessario passare da un'analisi *tank to wheel* ("dal serbatoio alle ruote") a un'analisi *well to wheel* ("dal pozzo alle ruote"), che considera le emissioni relative sia alla produzione del combustibile utilizzato per l'alimentazione sia alle modalità di utilizzazione nel veicolo.

Per quanto riguarda il modello a fuel cell, risulta evidente l'assenza di emissioni prodotte durante il ciclo di lavoro. Le emissioni a monte dell'utilizzo nel veicolo sono da valutare invece in base alle modalità di produzione dell'idrogeno. Relativamente invece al modello Diesel, i valori di emissioni sono collegati principalmente alla combustione del gasolio all'interno del motore, oltre che alla sua produzione derivata dal petrolio greggio.

A livello quantitativo, le emissioni sono state valutate in kg di CO_2 equivalente prodotta a seguito dell'impiego dei combustibili presi in considerazione. I valori per i calcoli effettuati sono stati ricavati dalla *tabella 55*, in cui sono illustrati i coefficienti moltiplicativi *well to wheel* di CO_2 equivalente emessa in base alle differenti fonti di energia disponibili per la trazione [45]:

Gasoline - WtW	e_{wtw}	2.83	kg CO_2 – eq./L
Diesel - WtW	e_{wtw}	3.18	kg CO_2 – eq./L
LPG - WtW	e_{wtw}	2.00	kg CO_2 – eq./L
CNG - WtW	e_{wtw}	2.68	kg CO_2 – eq./kg
CBG - WtW	e_{wtw}	0.749	kg CO_2 – eq./kg
H_2 - WtW	e_{wtw}	9.13	kg CO_2 – eq./kg
Conventional electricity - WtW	e_{wtw}	0.401	kg CO_2 – eq./kWh
Renewable electricity - WtW	e_{wtw}	0.036	kg CO_2 – eq./kWh

Tabella 55. Coefficienti well to wheel per CO_2 equivalente. [45]

A partire dai consumi di idrogeno e gasolio associati al ciclo di lavoro del veicolo, è possibile confrontare dunque le emissioni prodotte:

$$E_{H_2} = e_{wtw,H_2} \cdot C_{H_2} = 9.13 \frac{kg\ CO_2 - eq.}{kg} \cdot 4.1 \cdot 10^{-3}\ kg = 0.0375\ kg\ CO_2 - eq.$$

$$E_{Diesel} = e_{wtw,Diesel} \cdot C_{Diesel} = 3.18 \frac{kg\ CO_2 - eq.}{L} \cdot 0.116\ L = 0.37\ kg\ CO_2 - eq.$$

Il valore del coefficiente $e_{wtw,H2}$ è associato alla produzione di idrogeno mediante la tecnica al giorno d'oggi più diffusa, ovvero tramite *reforming* del metano.

Dall'analisi *well to wheel* effettuata si può notare come, a parità di condizioni, le quantità di CO_2 equivalente emessa siano di un ordine di grandezza superiore nel caso del modello Diesel rispetto al modello a fuel cell: risultano quindi evidenti i vantaggi in termini di efficienza energetica dell'alimentazione a idrogeno, grazie alla quale è possibile abbassare notevolmente i livelli di emissioni di gas serra.

Conclusioni

Nell'elaborato è stato presentato un caso di studio concernente l'utilizzo di sistemi fuel cell come sorgenti di energia in veicoli da lavoro. Si è discusso delle cause che hanno portato allo sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche e all'elettrificazione dei powertrain, con un focus particolare riguardo alla categoria delle macchine mobili non stradali. Dopo aver descritto le funzionalità delle celle a combustibile e illustrato le differenti topologie di integrazione a bordo veicolo, si è passati a simulare una missione tipica per veicoli diffusi in ambito agri-construction. A seguito della modellazione numerica dei componenti si è giunti alla presentazione dei risultati, che hanno evidenziato l'applicabilità dei sistemi fuel cell a questo tipo di macchinari. Il modello proposto presenta prestazioni idonee in termini di potenza necessaria alla movimentazione dei carichi, e segue senza particolari problemi il ciclo di lavoro di riferimento; le performance ricalcano inoltre quelle del veicolo convenzionale alimentato a gasolio presente sul mercato, con valori complessivi di efficienza equivalenti.

In seguito al confronto a livello di emissioni di CO_2 secondo un'analisi *well to wheel*, il prototipo a fuel cell ha mostrato evidenti vantaggi in termini di consumi di combustibile con conseguenti minori emissioni di gas climalteranti. Risultano inoltre chiari i vantaggi di questa tecnologia relativamente all'incremento della qualità dell'aria, data la totale assenza di produzione di inquinanti primari. Sebbene siano ancora presenti delle carenze nell'elettrificazione di veicoli attraverso sistemi a fuel cell, lo scenario che si delinea risulta promettente. Una delle cause di scarsa appetibilità è data dalla necessità di produzione dell'idrogeno, che al giorno d'oggi è effettuata per la maggior parte con tecniche di trasformazione di combustibili fossili. Le emissioni associate ai metodi di produzione dell'idrogeno possono essere ulteriormente abbattute tramite elettrolisi dell'acqua: la tecnologia presenta ampi margini di sviluppo e fornisce i risultati migliori in caso di utilizzo di elettricità prodotta a partire da fonti rinnovabili, rappresentando lo scenario ideale per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione ed emissioni zero nel futuro prossimo. Svantaggi addizionali sono dati dai costi ancora eccessivi e dalle dimensioni che possono essere proibitive dei componenti presenti all'interno dei sistemi a fuel cell. Nel modello esaminato, è possibile sfruttare al massimo i vantaggi della tecnologia, date le caratteristiche operative e la disponibilità di ampi spazi del veicolo.

Il modello di veicolo proposto può costituire quindi una valida alternativa nel contesto dell'elettrificazione dei veicoli: sono fondamentali, tuttavia, investimenti per poter aumentare la competitività delle fuel cell rispetto alle altre sorgenti di energia impiegate. In conclusione, sono realizzabili indagini aggiuntive, come ad esempio analisi del ciclo di vita o di costi-benefici, al fine di vagliare in maniera più dettagliata l'impatto ambientale e poter delineare uno scenario di applicazione in ottica di una possibile produzione su scala industriale.

Bibliografia

[1] E. Spessa, corso di *Controllo delle emissioni di inquinanti*, 2019

[2] International Energy Agency, *"World Energy Outlook"*, 2022.

[3] European Commission, https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/automotive-industry/environmental-protection/non-road-mobile-machinery_en

[4] X. Sun, Z. Li, X. Wang, C. Li, "*Technology Development of Electric Vehicles: A Review"*, 2020

[5] S. Vaschetto, corso di *Trazione elettrica*, 2020

[6] F. Millo, L. Rolando, corso di *Propulsori termici*, 2019

[7] A. Somà, F. Mocera, F. Bruzzese, E. Viglietti, *"Hybridization factor and performance of hybrid electric telehandler vehicle"*, 2016

[8] F. Mocera, A. Somà, *"A review of hybrid electric architectures in construction, handling and agriculture machines"*, 2021

[9] European Commission, *Directive 97/68/EC*

[10] European Parliament, *Regulation EU 2016/1628*

[11] ISO 8178, "*Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement"*, 2021

[12] US EPA, "*Nonroad compression-ignition engines: exhaust emission standards"*, 2016

[13] Fuel Cell & Hydrogen Energy Association, https://www.fchea.org/fuelcells

[14] F. Valle, *"Electrocatalyst degradation in high temperature PEM fuel cells"*, 2015

[15] J. Gao, M. Li, Y. Hu, H. Chen, Y. Ma, *"Challenges and developments of automotive fuel cell hybrid power system and control"*, 2019

[16] O. Bethoux. *"Hydrogen fuel cell road vehicles: state of the art and perspectives"*, 2020

[17] P. Thounthong, B. Davat, S. Raël, P. Sethakul, *"Fuel cell high-power applications: an overview of power converters for a clean energy conversion technology"*, 2009

[18] M. J. Veenstra, B. Hobein, *"On-Board Physical Based 70 MPa Hydrogen Storage Systems"*, 2011

[19] Toyota Mirai, *https://www.smartcirculair.com/wp-content/uploads/2020/06/Toyota-Mirai-FCV_Posters_LR.pdf*

[20] G. Wang, Y. Yu, H. Liu, C. Gong, S. Wen, X. Wang, Z. Tu, *"Progress on design and development of polymer electrolyte membrane fuel cell systems for vehicle applications: a review"*, 2018

[21] *https://www.stssensors.com/blog/2020/07/01/accurate-pressure-measurement-plays-a-vital-role-in-the-early-days-of-automotive-fuel-cells/*

[22] *https://www.fuelcellstore.com/blog-section/fuel-cell-operating-conditions*

[23] Y. Chang, Y. Qin, Y. Yin, J. Zhang, X. Li, *"Humidification strategy for polymer electrolyte membrane fuel cells – A review"*, 2018

[24] X. Zhao, L. Wang, Y. Zhou, B. Pan, R. Wang, L. Wang, X. Yan, *"Energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles: classification, comparison, and outlook"*, 2022

[25] M. Ji, J. Wang, *"Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators"*, 2021

[26] H. Yumiya, M. Kizaki, H. Asai, *"Toyota Fuel Cell System (TFCS)"*, 2015

[27] J. Sery, P. Luduc, *"Fuel cell behavior and energy balance on board a Hyundai Nexo"*, 2022

[28] S. Tanaka, K. Nagumo, M. Yamamoto, H. Chiba, K. Yoshida, R. Okano, *"Fuel cell system for Honda CLARITY fuel cell"*, 2020

[29] JCB, *https://www.jcb.com/en-gb/news/2020/07/jcb-leads-the-way-with-first-hydrogen-fuelled-excavator*

[30] Hyundai–CE, *https://www.hyundai-ce.eu/en/news/2020-03-pr-hyundai-hydrogen-fuel-excavators*

[31]Linde, *https://www.linde-mh.com/en/About-us/Innovations-from-Linde/Fuel-Cells.html*

[32] New Holland, *https://it.wikipedia.org/wiki/New_Holland_NH%C2%B2*

[33] Ballard, *https://blog.ballard.com/decarbonizing-mining-and-construction*

[34] Cummins, *https://www.cummins.com/new-power/applications/off-highway*

[35] Nuvera, *https://www.nuvera.com/blog/streamlining-the-journey-to-fuel-cell-vehicle-electronification*

[36] PowerCell, *https://powercellgroup.com/segments/off-road/*

[37] Merlo, brochure "*Telescopici media capacità"*, *https://www.merlo.com/ITA/Apps/WebObjects/Merlo.woa/wa/viewFile?id=51188&lang=eng*

[38] J. M. Ratzinger, S. Buchberger, H. Eichlseder, *"Electrified powertrains for wheel-driven non-road mobile machinery"*, 2020

[39] MathWorks, *https://it.mathworks.com/*

[40] F. Mocera, E. Vergori, A. Somà, *"Battery performance analysis for working vehicle applications"*, 2019

[41] S. Njoya M., O. Tremblay, *"A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles"*, 2009

[42] P. Luque, D. A. Mantaras, A. Maradona, J. R. Garcia, L. Sanchez, L. Castejon, H. Malon, *"Multi-objective evolutionary design of an electric vehicle chassis"*, 2020

[43] A. E. Catania, *"Trasmissioni idrauliche"*, corso di *Macchine*, 2018

[44] Deutz, *https://www.deutzsupport.com/product-details/tcd-3-6/*

[45] J. Buberger, A. Kersten, M. Kuder, R. Eckerle, T. Weyh, T. Thiringer, *"Total CO_2-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars"*, 2022