

 <b>REGIONE PIEMONTE</b>   <p>Programma Operativo Regionale "Competitività regionale e occupazione" F.E.S.R. 2014/2020</p> <p>Bando "Poli di Innovazione - Linea B. Agevolazioni per progetti di ricerca industriale e sviluppo sperimentale, riservate alle imprese mai associate ai Poli"</p> <p>(Codice bando: I.1b.1.2_bando_poli_progetti_Linea_b)</p>
	<p><b>Progetto SAVER</b></p> <p><b>Solar Assisted Vehicle Electrification Retrofit</b></p>

<b>REPORT TECNICO - WP 1</b> <b>Deliverable D.1.1.1</b> <b>TITOLO:</b> Analisi Fattibilità Panda BEVintage	
Responsabile Report: Stefano Carabelli – Politecnico di Torino	
Contributors: Carlo Cavagnero – Italtecnica S.r.l.	
Revisione: 23/04/2018	
<b>Durata M1-M4</b>	
23/04/2018 - Torino	Allegati: A1, A2, A3

## Indice generale

Analisi di contesto.....	2
Descrizione del veicolo.....	4
Rilevamento pesi e volumi.....	6
Rilevamento scocca posteriore.....	7
Analisi cinematica.....	9
Requisiti energia.....	13
Requisiti coppia e potenza.....	13
Impostazione del sistema di trazione e accumulo.....	16
Pacco batteria.....	17
Motopropulsore elettrico.....	24
Impostazione del sistema solare.....	27
Analisi della dinamica longitudinale.....	29
Accelerazione massima.....	30
Ciclo NEDC.....	31
Ciclo WLTP.....	33
Confronto consumi.....	35
Conclusioni.....	36

## Analisi di contesto

La proposta progettuale SAVER (Solar Assisted Vehicle Electrification Retrofit) trae spunto dalla norma recentemente introdotta dal Ministro dei Trasporti e delle Infrastrutture concernente il “Regolamento recante sistema di riqualificazione elettrica destinato ad equipaggiare autovetture M e N1” (GU n.7 del 11-1-2016, Vigente al 26-1-2016) che, in estrema sintesi, permette di convertire veicoli esistenti e circolanti in vetture elettriche mediante la sostituzione del sistema di trazione senza il preventivo nulla osta del produttore originario del veicolo. In altri termini si è aperta la strada già percorsa in altri paesi europei di consentire a soggetti terzi di operare nel settore delle trasformazioni di veicoli circolanti senza richiedere il parere vincolante del produttore del veicolo. Malgrado la disponibilità della normativa di riferimento, ad oggi l’offerta di prodotti per la trasformazione risulta ancora assai limitata per non dire in pratica inesistente.

Il progetto SAVER prevede lo sviluppo di un sistema di trazione elettrica articolato nelle seguenti componenti<sup>1</sup>:

- motopropulsore elettrico completo di riduttore/differenziale (eventualmente mutuato in parte dal veicolo originale),
- pacco batteria e suo sistema di ricarica,
- unità di gestione e controllo completa delle interfacce verso i comandi utente (acceleratore, freno, selettore marcia e accensione),
- pannelli solari con relativo regolatore di tensione.

Il sistema descritto sarà disponibile sotto forma di “sistema di riqualificazione elettrica” facilmente adattabile per l’installazione su diversi “tipologie di veicolo” della stessa “famiglia di veicoli” commercialmente identificata come segmento A.

In particolare, il progetto SAVER si indirizza ad un insieme di veicoli ancora ampiamente diffusi anche se non di recentissima produzione, come ad esempio i seguenti:

- Fiat Panda prima serie (1980-2002) e seconda serie (2003-2012),
- Renault Twingo prima serie (1993-2012),
- Daimler Smart prima serie (1998-2007) e seconda serie (2007-2015).

La scelta di questa particolare categoria di veicoli è motivata non solo da motivi tecnici ma anche dal loro spiccato carattere “iconografico” insieme al richiamo “vintage” e soprattutto dalla loro ancora attuale vocazione per il trasporto locale, sia nelle grandi città che nei piccoli paesi.

Dal punto di vista tecnico i veicoli citati sono veicoli leggeri, robusti e spartani che si prestano perfettamente alla trasformazione in veicolo elettrico a vocazione urbana ovvero con prestazioni non estreme:

---

<sup>1</sup> Con specifico riferimento alle definizioni riportate all’art. 2 del Regolamento GU n.7 del 11-1-2016.

- velocità massima 80-90 km/h,
- percorrenza massima di 80-100 km al giorno,
- tempo di ricarica (notturno) di 3-4 ore.

Rispetto alla versioni elettriche realizzate nel passato per gli stessi modelli, grazie alle tecnologie attuali (in particolare per quanto riguarda il pacco batterie) è possibile conservare la disponibilità di quattro posti passeggero o di un ampio volume di carico. Per contro la ancora notevole diffusione permette di garantire un'ampia disponibilità di ricambi per le parti non elettriche ma utili al ricondizionamento generale del veicolo in fase di trasformazione.

Il “kit di trasformazione” del progetto SAVER prevede inoltre un insieme di optional quali l'integrazione di pannelli solari flessibili sul tetto, l'interfacciabilità locale e remota con dispositivi quali tablet e smartphones, il ricondizionamento degli interni con diverse soluzioni di tessuti.

Il cuore del kit e principale obiettivo ingegneristico del progetto SAVER è l'unità di controllo che integri le interfacce di guida e d'uso del guidatore con le diverse componenti del sistema di trazione e di accumulo e definisca le strategia di controllo per ottimizzare i consumi e il comfort di marcia in ambito urbano, ad esempio:

- mappature frenata rigenerativa,
- profili di accelerazione 0-50 km/h,
- modalità “one-pedal drive.

L'apertura e l'adattabilità della centralina di controllo fornisce inoltre la necessaria flessibilità per adattare il kit ai diversi modelli di veicolo da trasformare senza richiedere la riprogettazione delle componenti di base.

Da ultimo ma non da meno, la trasformazione di un veicolo esistente e di ampia diffusione permette di abbattere significativamente i costi di acquisto e di manutenzione di un veicolo elettrico: dagli attuali 25-35 kEuro a meno della metà. Con questo obiettivo, l'analisi di fattibilità del progetto SAVER si completa con una verifica preliminare dei potenziali fornitori delle diverse tecnologie che andranno a comporre il kit di trasformazione.

## Descrizione del veicolo

Il veicolo prescelto per lo studio e la realizzazione del prototipo del progetto SAVER è una Fiat Panda prima serie (modello 141) prodotta dal 1980 al 2003 (vedi Figura 1).



Figura 1: Fiat Panda prima serie (1980-2003).

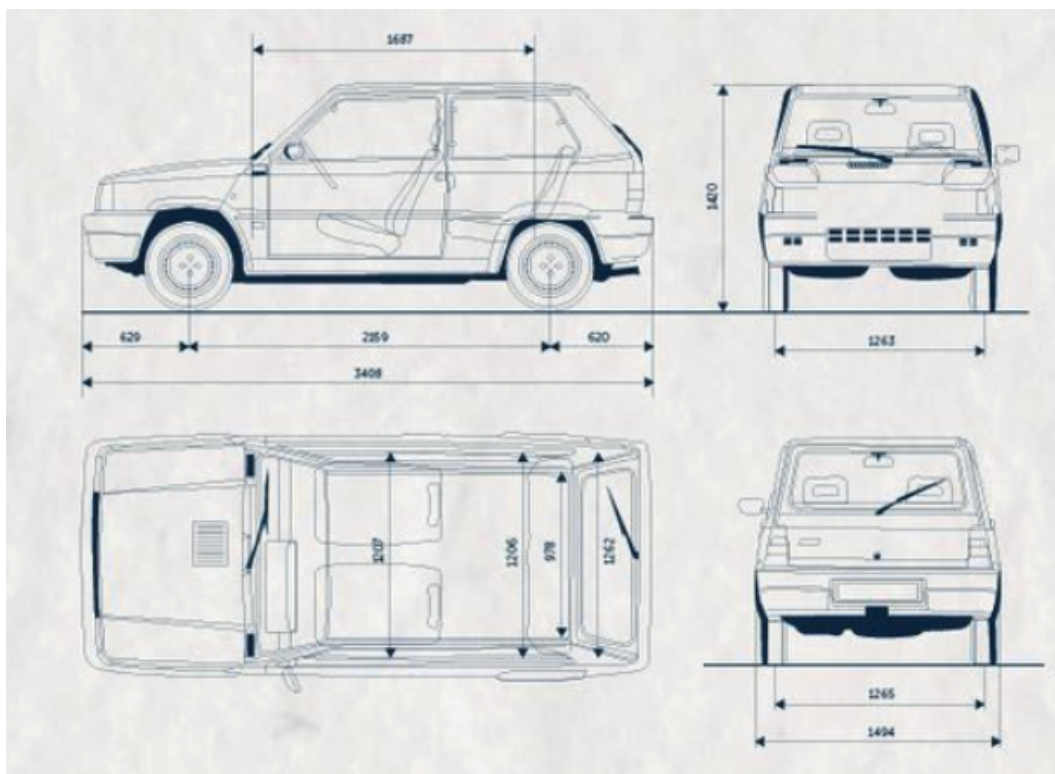


Figura 2: Ingombri dichiarati dal costruttore della Fiat Panda prima serie.

Un esemplare del veicolo è stato acquistato e disassemblato del sistema di trazione originale.



Per quanto riguarda la parte posteriore è stato smontato il serbatoio del carburante in previsione di un'ipotesi di collocazione del pacco batteria sottoscocca (Figura 3) senza quindi modificare l'abitabilità passeggeri sul sedile posteriore e il vano bagagli.



*Figura 3: Fiat Panda disassemblata: sottoscocca posteriore.*

Per quanto riguarda il vano anteriore si è smontato il motore benzina (Fire 4 cilindri, 1000 cm<sup>3</sup>) insieme ai suoi ausiliari (Figura 4) con eccezione dell'impianto elettrico di base e del radiatore (in vista di un potenziale riutilizzo per una versione di motopropulsore elettrico con raffreddamento a liquido).



*Figura 4: Fiat Panda disassemblata: vano anteriore.*

## **Rilevamento pesi e volumi**

A seguire il disassemblaggio del veicolo si è provveduto al rilevamento del peso complessivo e delle parti così come della loro distribuzione sugli assi anteriore e posteriore (vedi Tabella 1). La

distribuzione dei pesi del veicolo originale verrà confrontata con quella del veicolo trasformato per verificare di rientrare nei margini previsti dal costruttore per un corretto funzionamento delle sospensioni, dello sterzo e soprattutto del sistema frenante.

In vista di un potenziale riutilizzo del gruppo cambio differenziale si è inoltre provveduto alla rilevazione dei rapporti alle diverse marce e al differenziale (vedi Tabella 2).

Ripartizione dei pesi: Anteriore Posteriore	Sx 224 Dx 207 - TOT 431 (62.8%) Sx 117 Dx 137 - TOT 255 (37.2%)
<b>Veicolo originale completo</b>	<b>689</b>
Serbatoio ed impianto benzina	8
Motore FIRE 4 cilindri	84
Impianto scarico	12
Paratie anticalore scarico e filtro aria	5.5
<i>Totale motore e ausiliari</i>	<i>109.5</i>
<i>Cambio completo</i>	<i>33</i>
<i>2 semiassi + 4 giunti</i>	<i>8</i>
<b>Veicolo disassemblato</b>	<b>538.5</b>

Tabella 1: Fiat Panda: ripartizione dei pesi veicolo e componenti.

	Parziali	Finale
<b>1° marcia</b>	11-43	16,54
<b>2° marcia</b>	20-41	8,67
<b>3° marcia</b>	32-43	5,68
<b>4° marcia</b>	44-43	-
<b>5° marcia</b>	49-41	-
<b>Rapporto coppia conica</b>	13-55	
<b>Misura ruota</b>	135/80 R13	

Tabella 2: Fiat Panda: rapporti riduzione cambio e differenziale.

## Rilevamento scocca posteriore

A seguire il disassemblamento del veicolo originale, Italtecnica ha disposto un accurato rilevamento<sup>2</sup> delle superfici sottoscocca per permettere di valutare i volumi a disposizione per il pacco batteria (Figura 5), considerando anche lo scuotimento della sospensione (Figura 6).

A partire dal rilevamento effettuato si è provveduto ad identificare un volume di massima disponibile per alloggiare il pacco batteria e relativi ausiliari in posizione sottoscocca (Figura 7).

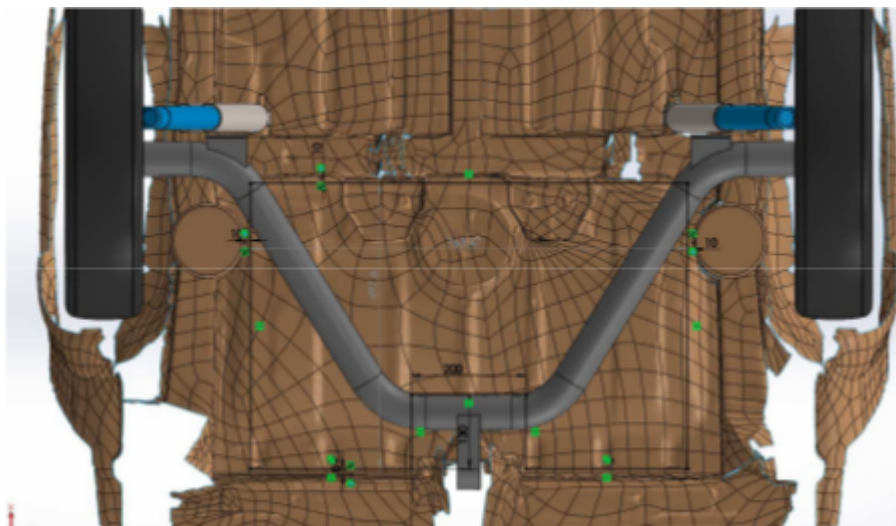


Figura 5: Fiat Panda: rilevamento sottoscocca asse posteriore.

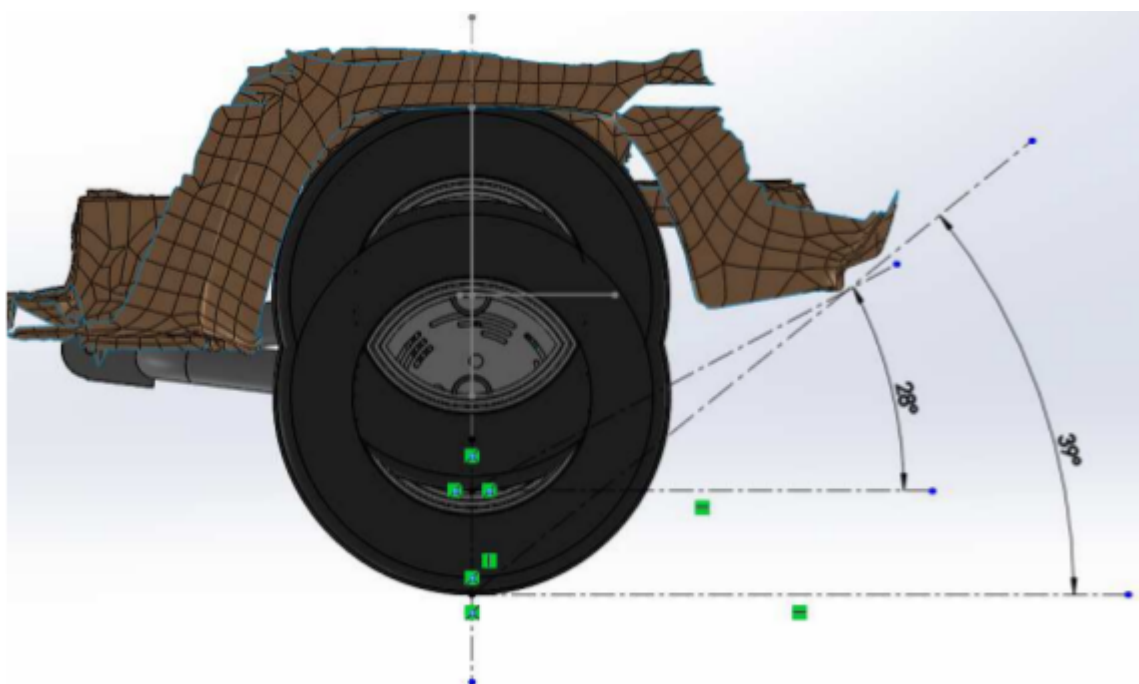


Figura 6: Fiat Panda: rilevazione scuotimento sospensione.

---

2 “Progetto SAVER - Rilevamenti su scocca Fiat Panda prima serie”, Italtecnica 2018

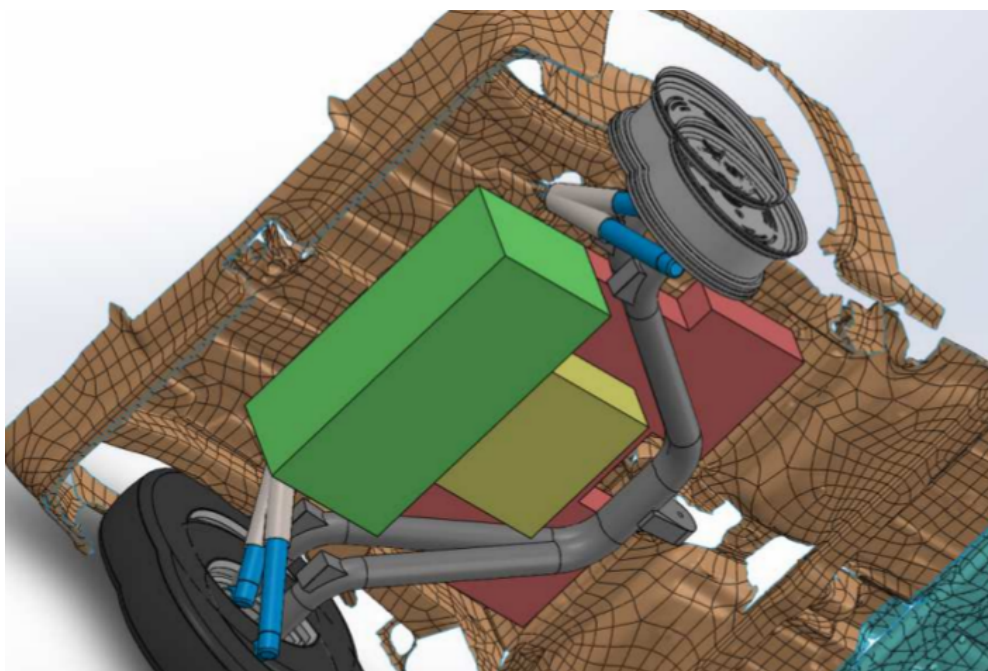


Figura 7: Fiat Panda: volumi disponibili sottoscocca.

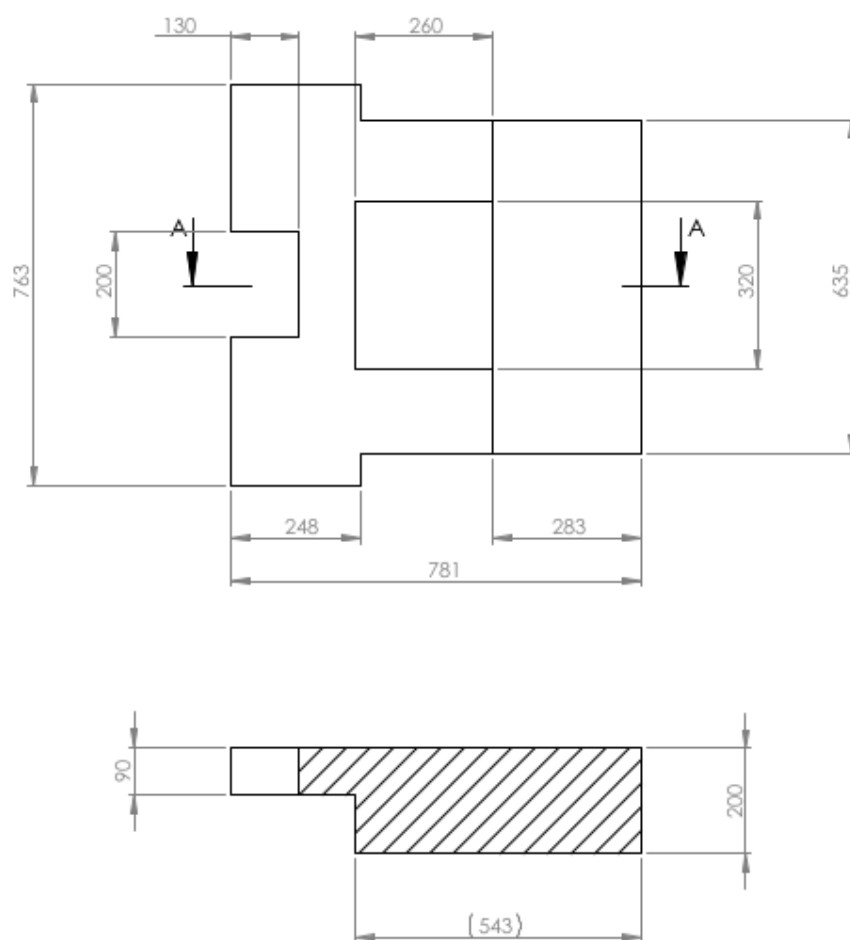


Figura 8: Dimensioni volume disponibile (circa 74 l).

## Analisi cinematica

Per valutare preliminarmente i requisiti di base del sistema di trazione (coppia e potenza) e di accumulo (energia) viene condotta un'analisi puramente cinematica del comportamento del veicolo. In altri termini viene calcolata la potenza complessiva (inerzie e attriti) e parziale (attriti) per accelerare e decelerare il veicolo che viene fatto seguire un profilo di velocità noto (Figura 9).

I parametri del modello sono ricavati in modo analitico dalle principali caratteristiche tecniche del veicolo<sup>3</sup>. Da notare che, una volta realizzato un prototipo funzionante, gli stessi parametri potranno essere ricavati in via sperimentale mediante le cosiddette prove di “coast-down” ovvero di decelerazione del veicolo in assenza di propulsione. I principali parametri sono i seguenti:

- Massa a vuoto → pieno carico: 700 → 1000 kg
- Area frontale e coefficiente aerodinamico: 1.7 m<sup>2</sup> e 0.41
- Taglia e classe pneumatico: 165/70R14, classe E

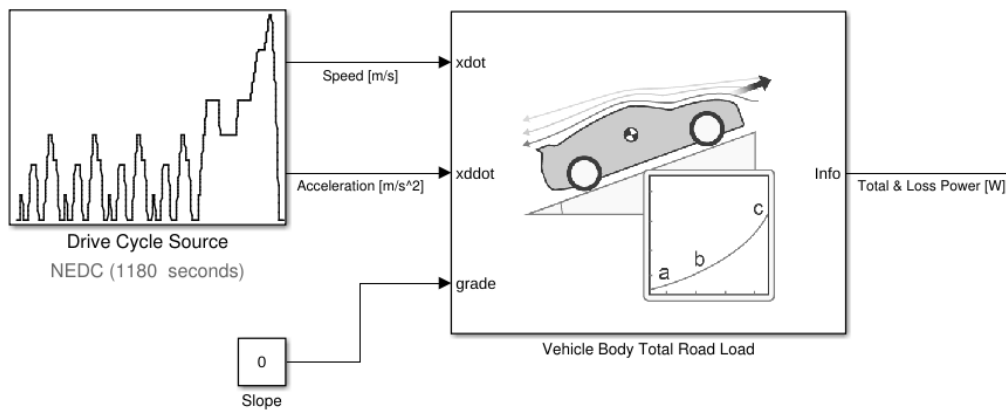


Figura 9: Schema per l'analisi cinematica.

I profili di velocità utilizzati sono quelli previsti in fase di omologazione in sede europea:

- New European Driving Cycle (NEDC)
- Worldwide Light-vehicle Test Procedure (WLTP)

Entrambi i cicli vengono analizzati in modo completo (ciclo Full) e parziale a velocità limitata per evidenziare il comportamento del veicolo in ambito urbano (ciclo Urban). I dati generati in simulazione (Figura 10) vengono quindi elaborati integrando potenze e velocità (Figura 11) per ottenere energie utilizzate, distanze percorse e consumi previsti in aggiunta alla coppia “alla ruota” necessaria (Figura 12 e Figura 13).

3 “Panda BEVintage – Vehicle Coast-down Parameters”, Politecnico 2018



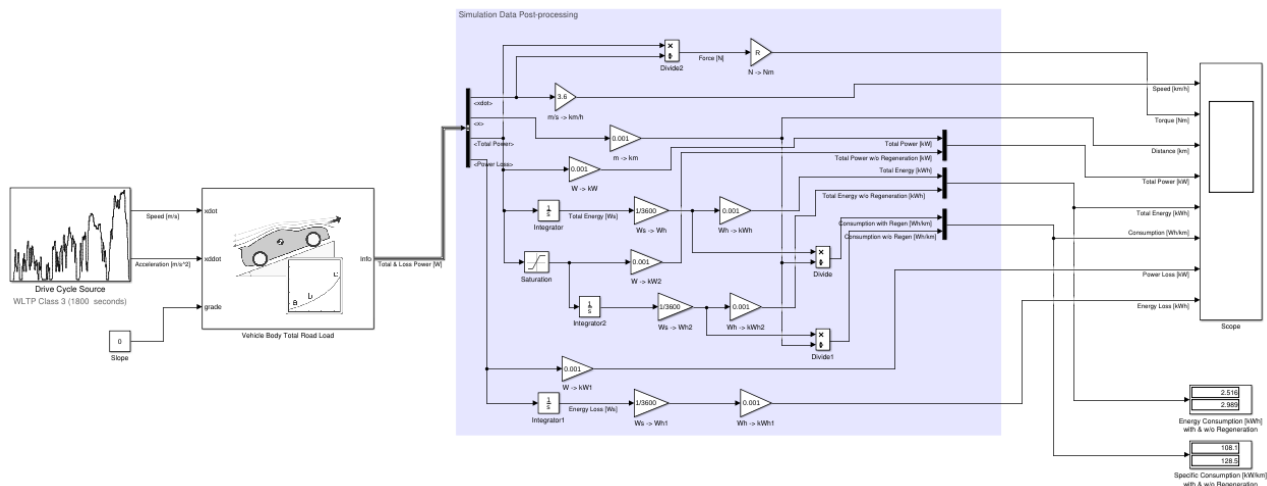


Figura 10: Schema di elaborazione per l'analisi cinematica.

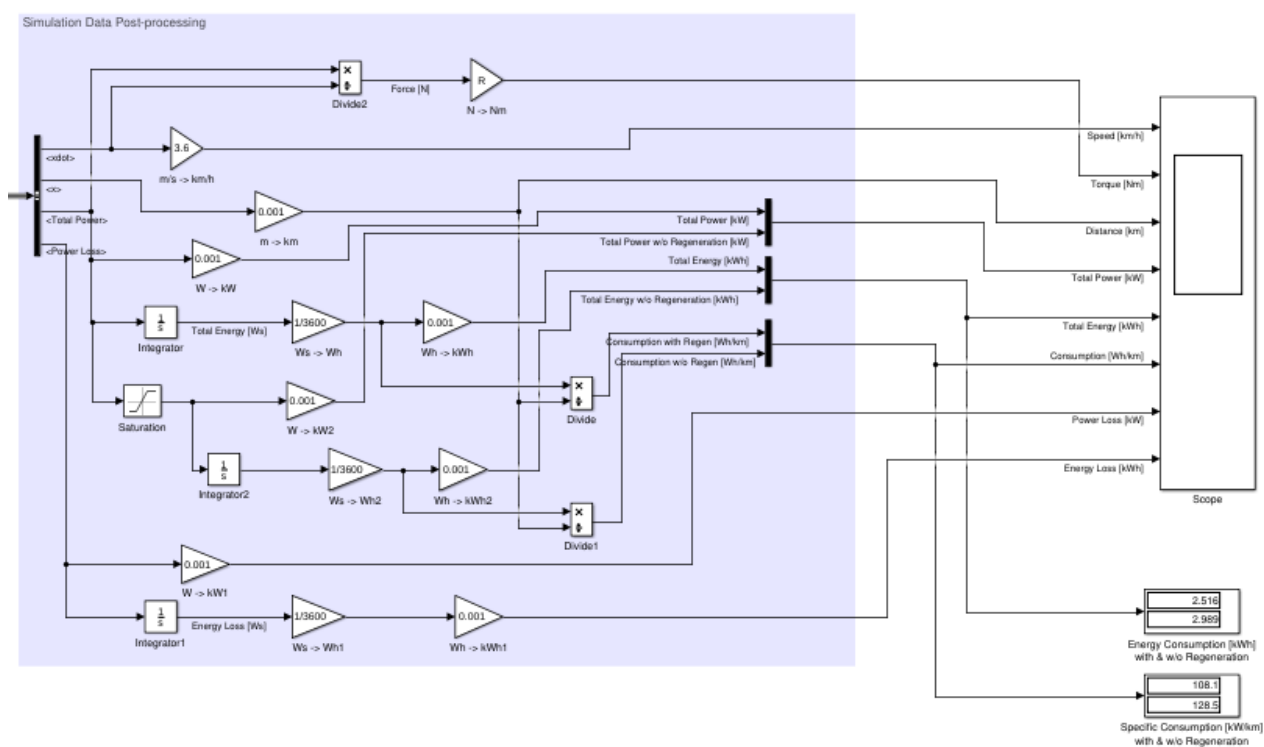
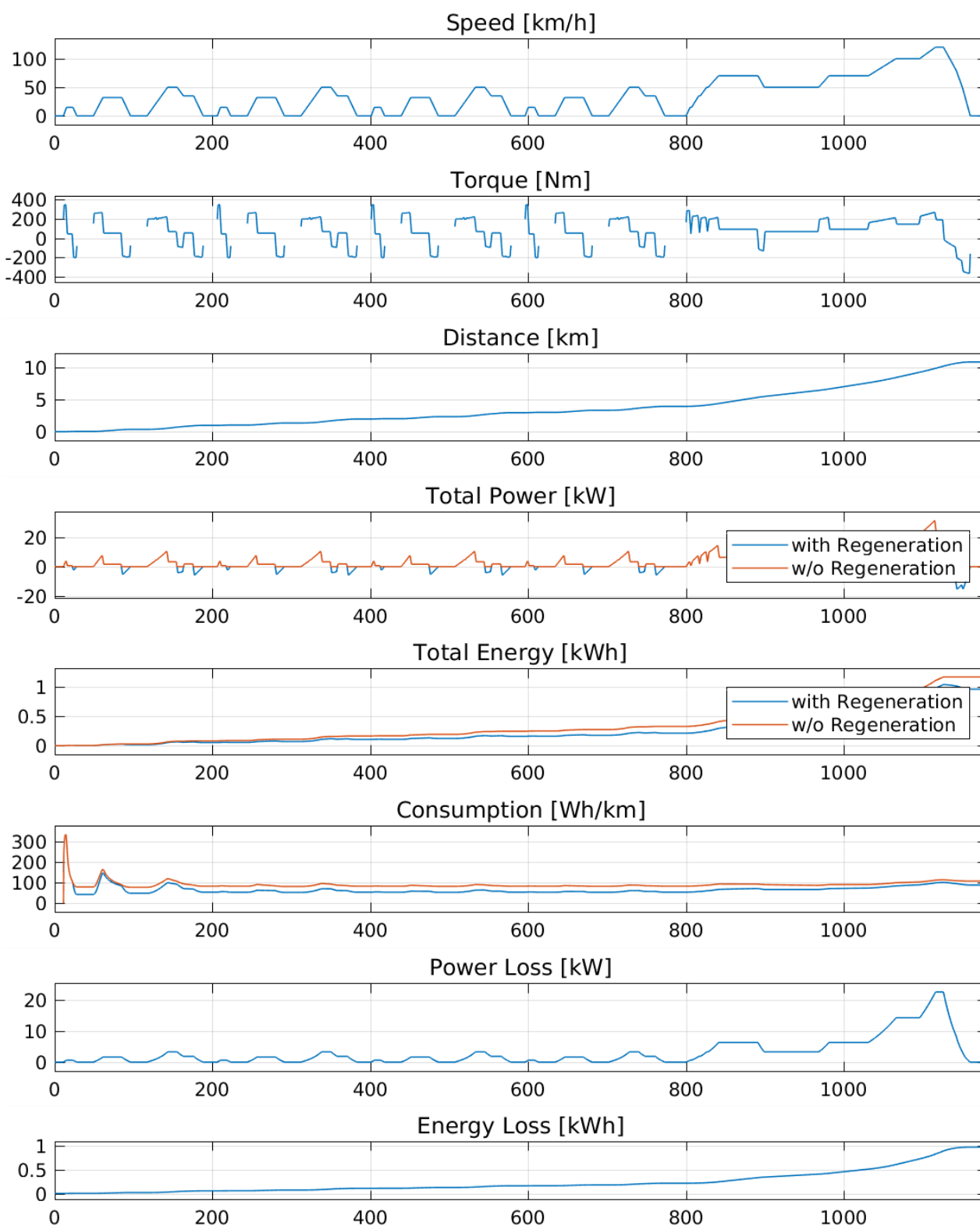


Figura 11: Dettaglio schema di elaborazione.





Offset=0

Figura 12: Evoluzione cinematica su ciclo NEDC.

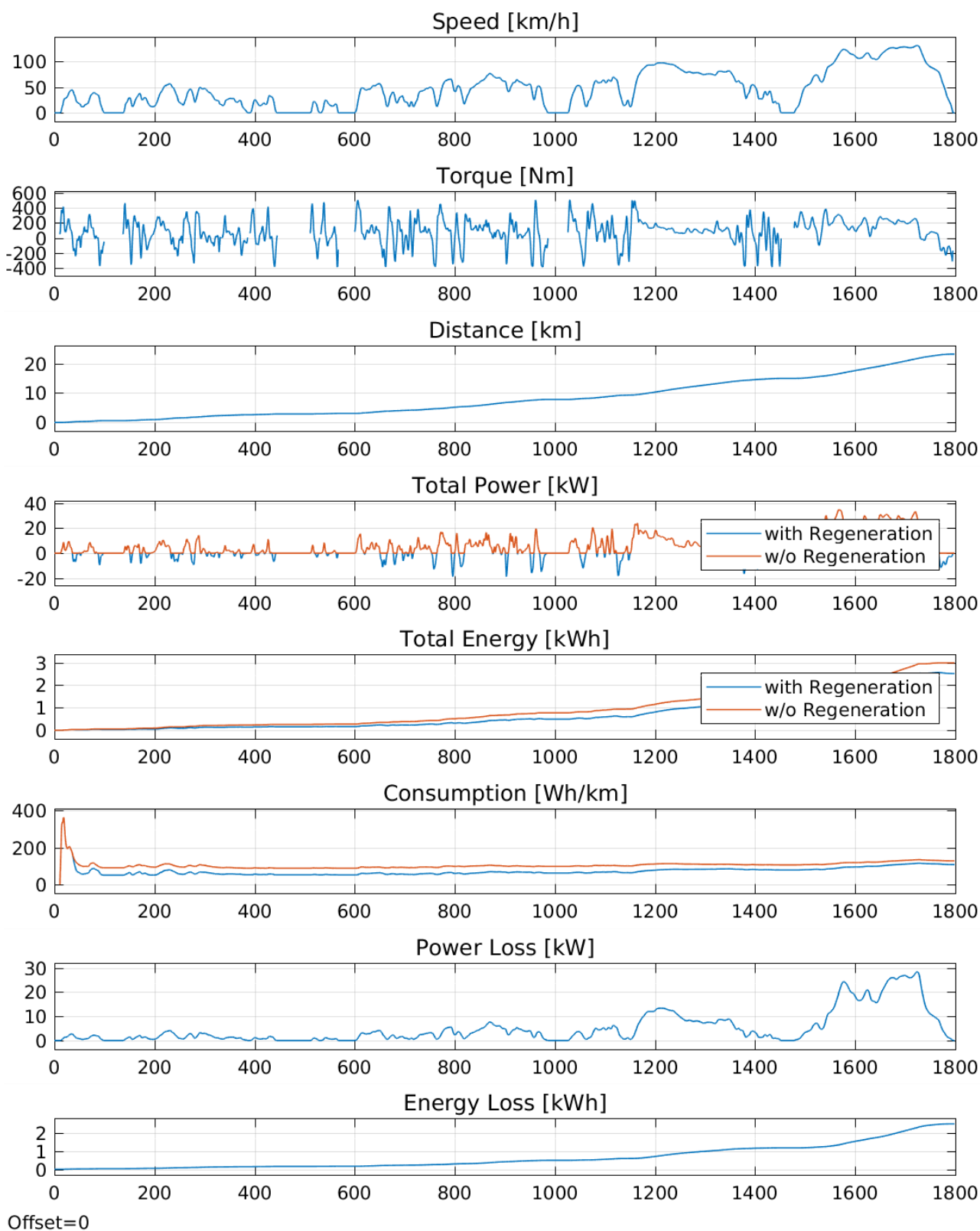


Figura 13: Evoluzione cinematica su ciclo WLTP.

## Requisiti energia

I risultati riportati in Tabella 3 evidenziano il consumo energetico trascurando le inefficienze del sistema di trazione e accumulo. Pertanto costituiscono il limite minimo dei consumi raggiungibile in condizioni ideali in cui tutta l'energia cinetica possa essere recuperata in fase di frenata.

Ciclo / Consumi [Wh/km]	Senza rigenerazione	Con rigenerazione
NEDC Full	107.6	88.5
NEDC Urban	82.6	53.5
WLTP Full	128.4	108.1
WLTP Urban	98.2	62.6

*Tabella 3: Consumi veicolo in pura evoluzione cinematica.*

Utilizzando i risultati riportati in Tabella 3 si ottiene un fabbisogno minimo di energia compreso tra 5.35 e 6.26 kWh per una percorrenza di 100 km in ambito urbano secondo i cicli NEDC e WLTP rispettivamente.

Ipotizzando cautelativamente un'efficienza complessiva del 60% si ottiene un primo dimensionamento della capacità del pacco batteria compreso tra circa 9 e 10 kWh. Ipotizzando inoltre una capacità utile del pacco batteria pari allo 85% si ottiene un'energia nominale compresa tra circa 10.5 e 12 kWh.

## Requisiti coppia e potenza

I valori massimi di coppia e di potenza evidenziati su ciclo NEDC (Figura 14 e Figura 15) e WLTP (Figura 16 e Figura 17) sono riassunti nella Tabella 4.

Ciclo	Coppia massima [Nm]	Potenza massima [kW]
NEDC Urban	344.6	10.4
NEDC Extra Urban (> 800 s)	284.3	31.5
WLTP Urban	502.6	20.0
WLTP Extra Urban (> 1000 s)	493.5	35.1

*Tabella 4: Massimi di coppie e potenza veicolo in pura evoluzione cinematica.*

Da notare come tali risultati evidenziano una maggiore richiesta di coppia nella parte di ciclo urbano e viceversa nella parte di ciclo extra-urbano.

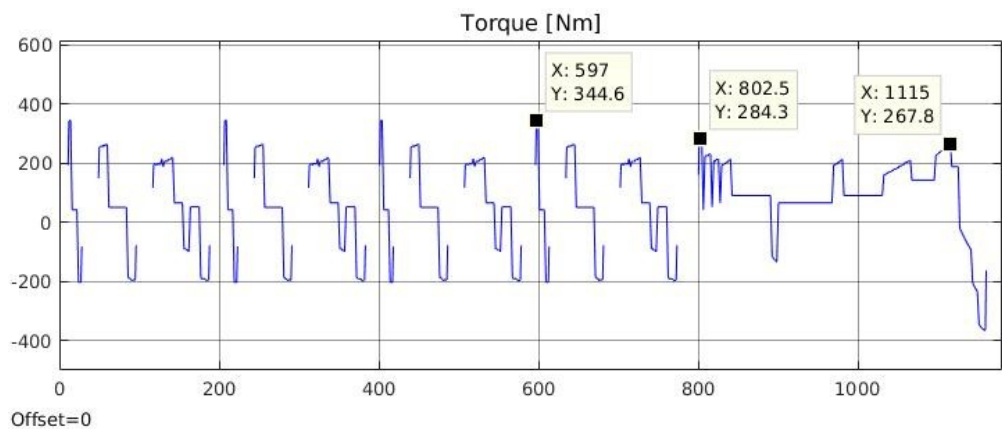


Figura 14: Picchi di coppia su ciclo NEDC.

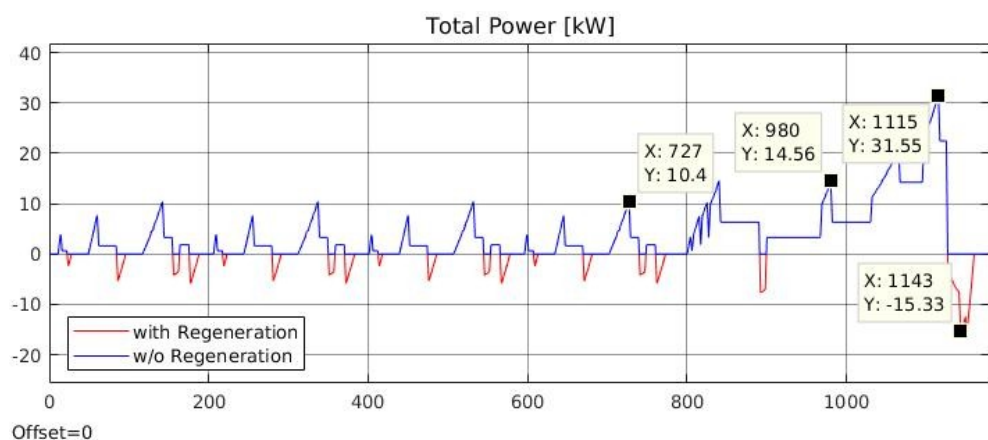


Figura 15: Picchi di potenza su ciclo NEDC.

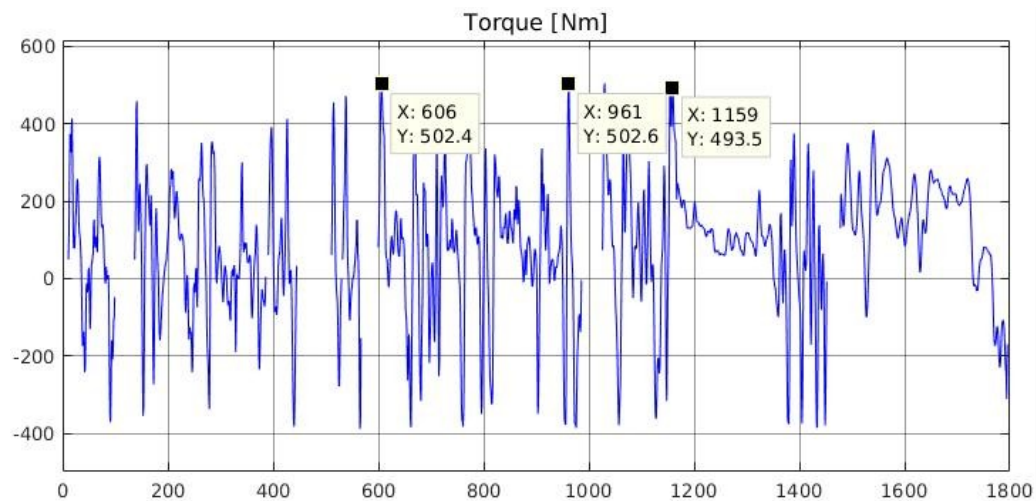


Figura 16: Picchi di coppia su ciclo WLTP.

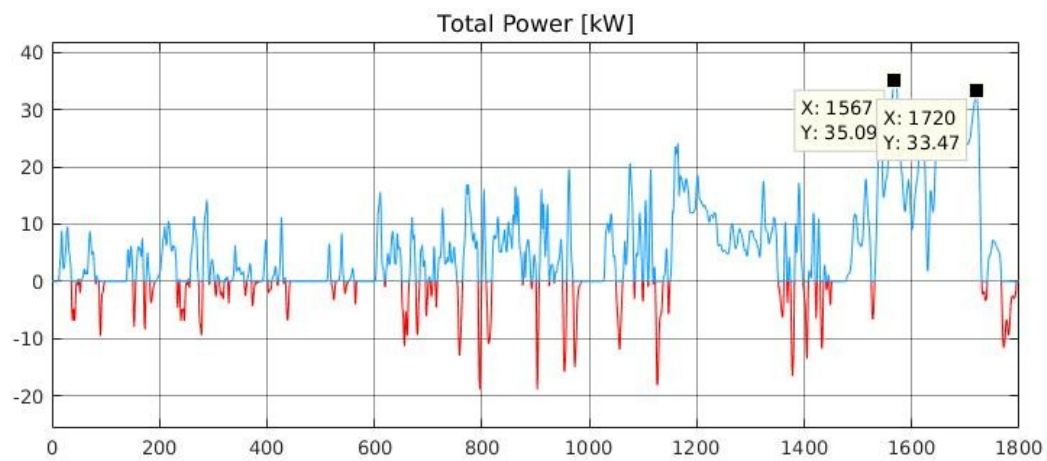


Figura 17: Picchi di potenza su ciclo WLTP.

## Impostazione del sistema di trazione e accumulo

L'architettura generale del sistema di trazione e accumulo è illustrato schematicamente in Figura 18.

Il sistema è governato da una centralina VMU (Vehicle Management Unit) interfacciata direttamente (connessione elettrica) ai principali comandi utente e alla rete "Powertrain CAN" attraverso la quale interagisce con il sistema di trazione (Motopropulsion) e di accumulo (Battery Pack).

Da notare che nel caso specifico della Fiat Panda non è presente una rete CAN di veicolo e anche la scelta del carica batteria da installare su veicolo (On-board Charger) potrebbe non prevedere un'interfaccia di rete ma solo un'interfaccia elettrica verso il pacco batteria.

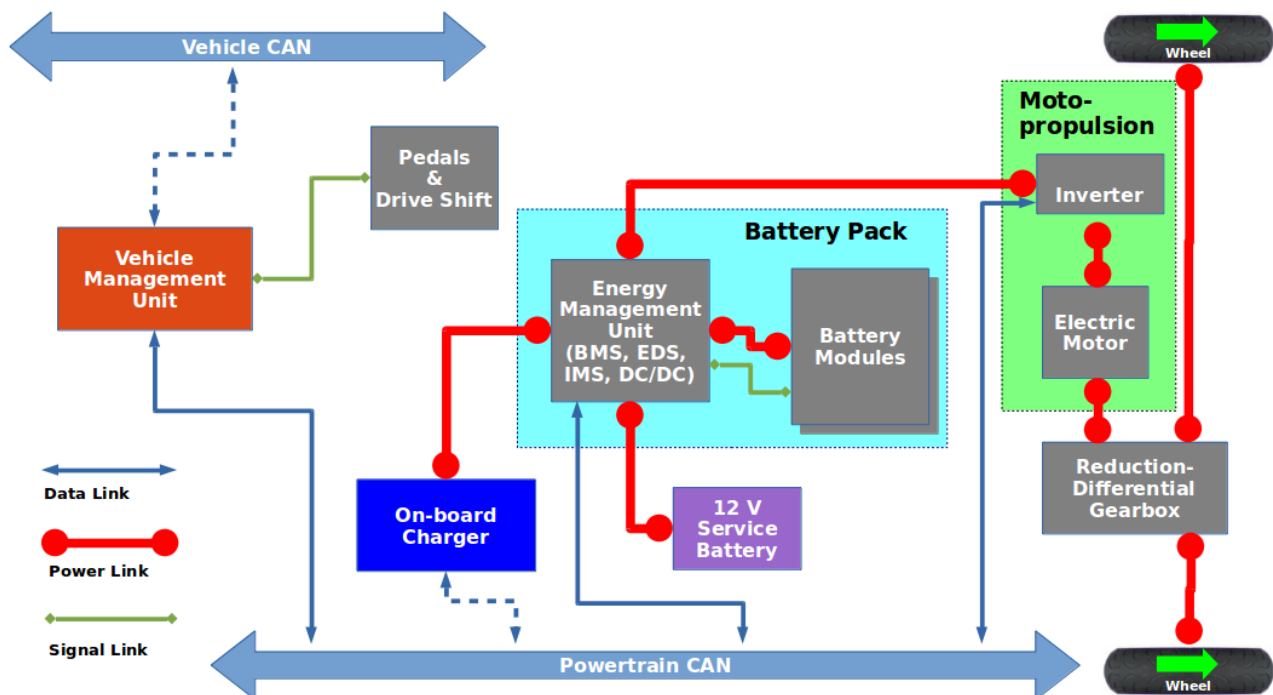


Figura 18: Architettura generale sistema di trazione e accumulo.

La prima valutazione rispetto alla definizione del sistema di trazione e accumulo è stata la scelta della tensione del tensione continua (bus in continua) fornita dal pacco batteria all'azionamento (inverter) del motore elettrico. A tal fine sono state esaminate due soluzioni disitinte e alternative:

- soluzione in alta tensione (380 V) tipica dei veicoli elettrici di ultima generazione di categoria M1,
- soluzione in medio-bassa tensione (96 V) tipica dei veicoli elettrici leggeri, categoria L7 (quadricicli pesanti).

Il peso contenuto del veicolo da trasformare – circa 500 kg – insieme alle ridotte dimensioni della batteria – sia per ragioni di costo che di ingombro – portano ad ipotizzare l'utilizzo di una tensione medio bassa senza il bisogno di gestire correnti eccessive.

In ogni modo entrambe le soluzioni verranno analizzate per quanto riguarda sia il sistema di motopropulsione (motore elettrico e inverter) che il sistema di accumulo (pacco batteria) lasciando la scelta finale a valutazioni di tipo economico mediante la preparazione di una distinta base referenziata e valorizzata rispetto ai volumi di produzione previsti.



## Pacco batteria

A partire da una prima ipotesi sulla capacità nominale della batteria di circa 12 kWh (vedi Requisiti energia a pagina 13), si è ipotizzato l'uso di celle al litio costituite da elementi cilindrici 18650 (18 mm di diametro e 65 mm di altezza) per diverse ragioni. (In prospettiva la più recente soluzione 21700 che non differisce di molto, vedi Figura 19.)

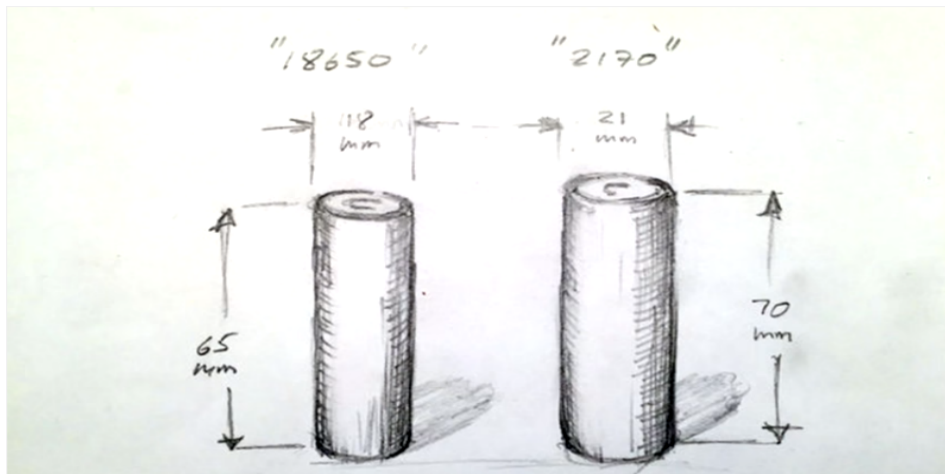


Figura 19: Dimensioni celle cilindriche "18650" e "21700" a confronto.

In primo luogo la dimensione fisica assai contenuta ne permette la "distribuzione" in forme adattabili alle diverse disponibilità di spazi. In secondo luogo la dimensione elettrica parimenti contenuta ne permette la composizione in combinazioni serie-parallelo assai varie sia in termini di tensione che di corrente.

Infine l'ampia disponibilità sia in termini di densità di energia sia di produttori: da 1200 mAh a 3600 mAh da parte di Panasonic, LG e Samsung per citare i più noti e affermati.

### Dimensionamento elettrico

Per realizzare un pacco batteria, le celle elementari sono assemblate in sottosistemi – detti moduli – dotati di un proprio sistema di controllo in grado di svolgere le seguenti funzioni:

- monitorare in modo continuo temperatura, tensione e corrente,
- gestire stato di carica e salute,
- operare il bilanciamento delle diverse celle sia in fase di carica che scarica.

A loro volta i moduli sono composti in serie e parallelo e gestiti da una centralina di supervisione "master" collegata in rete ai diversi moduli "slave" costituendo il cosiddetto BMS (Battery Management System).

A titolo di esempio si è selezionata una cella di buona qualità e di ampia diffusione: Panasonic NCR18650B le cui caratteristiche principali sono riportate in Tabella 5.

La composizione di tali elementi in moduli e pacco in medio-alta e alta tensione – a parità di capacità – sono riportati nella Tabella 7 e nella Tabella 6.

# Panasonic

# Lithium Ion NCR18650B

## Features & Benefits

- High energy density
- Long stable power and long run time
- Ideal for notebook PCs, boosters, portable devices, etc.

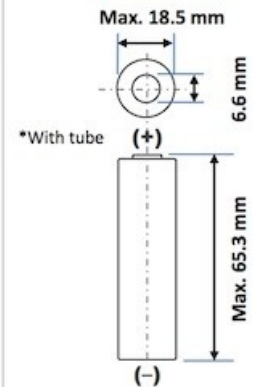
\* At temperatures below 10°C, charge at a 0.25C rate.

## Specifications

Rated capacity <sup>(1)</sup>	Min. 3200mAh
Capacity <sup>(2)</sup>	Min. 3250mAh Typ. 3350mAh
Nominal voltage	3.6V
Charging	CC-CV, Std. 1625mA, 4.20V, 4.0 hrs
Weight (max.)	48.5 g
Temperature	Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C
Energy density <sup>(3)</sup>	Volumetric: 676 Wh/l Gravimetric: 243 Wh/kg

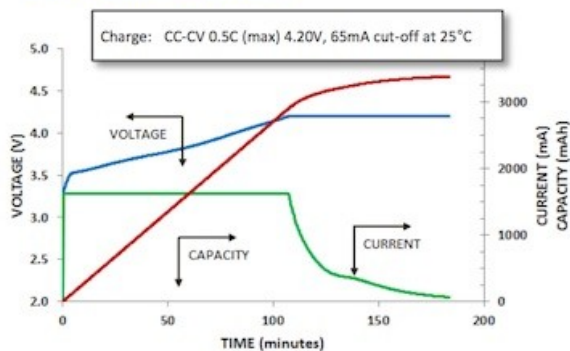
<sup>(1)</sup> At 20°C <sup>(2)</sup> At 25°C <sup>(3)</sup> Energy density based on bare cell dimensions

## Dimensions

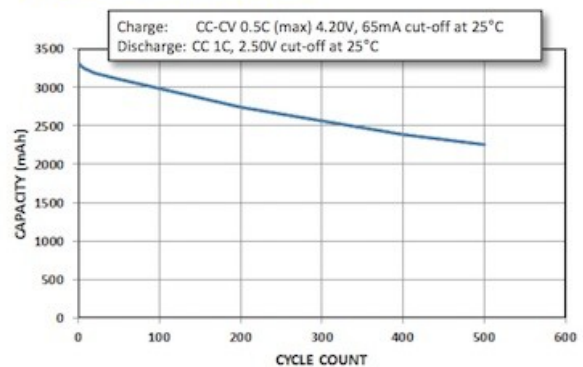


For Reference Only

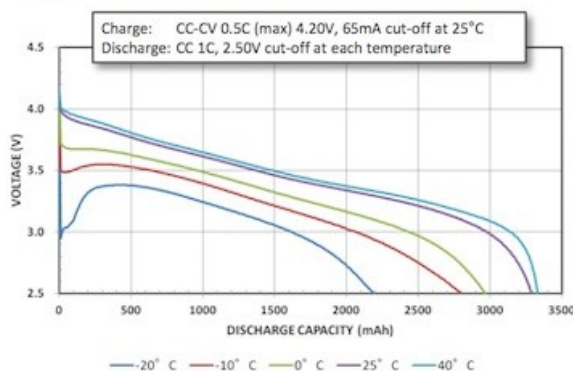
## Charge Characteristics



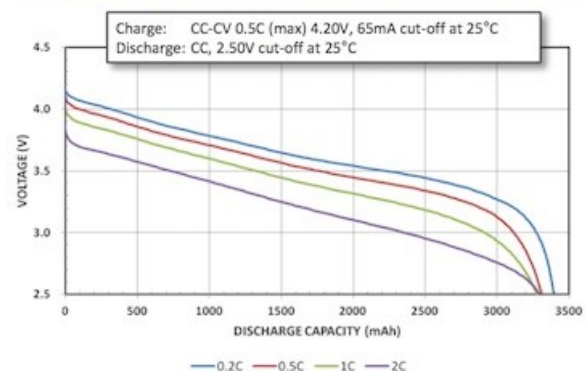
## Cycle Life Characteristics



## Discharge Characteristics (by temperature)



## Discharge Characteristics (by rate of discharge)



The data in this document is for descriptive purposes only and is not intended to make or imply any guarantee or warranty.

VERSION 13.11 R1 | Copyright© 2012 Energy Company. All Rights Reserved.

Tabella 5: Data Sheet Panasonic NCR18650B.

<b>Nominal voltage</b>	<i>V</i>
<i>Upper limit voltage</i>	<i>V</i>
<i>Lower limit voltage</i>	<i>V</i>
<b>Nominal capacity</b>	<i>Ah</i>
Specific capacity	<i>Ah/kg</i>
<b>Nominal energy</b>	<i>kWh</i>
Specific energy (Gravimetric)	<i>Wh/kg</i>
Energy density (Volumetric)	<i>Wh/l</i>
<b>Continuous discharge current</b>	<i>A</i>
Continuous discharge power	<i>kW</i>
Specific discharge power	<i>W/kg</i>
<b>Max discharge current (5 s)</b>	<i>A</i>
Max discharge power	<i>kW</i>
<b>Continuous charge current</b>	<i>A</i>
Continuous charge power	<i>kW</i>
<b>Max charge current (5 s)</b>	<i>A</i>
Max charge power	<i>kW</i>
<b>Life cycle</b>	<i>#</i>
Curb weight	<i>kg</i>
Structure weight	<i>kg</i>
<b>Total weight</b>	<i>kg</i>
Height	<i>mm</i>
Width (Diameter)	<i>mm</i>
Thickness (Diameter)	<i>mm</i>
<b>Volume</b>	<i>l</i>
<b>Series</b>	---
<b>Parallel</b>	---

<b>Note</b>	---
-------------	-----

<b>Element</b>	<b>Module</b>	<b>Pack</b>
<b>3.6</b>	<b>46.8</b>	<b>374.4</b>
4.2	54.6	436.8
2.7	35.1	280.8
<b>3.3</b>	<b>33</b>	<b>33</b>
68		
<b>0.0119</b>	<b>1.54</b>	<b>12.36</b>
245	165.98	118.30
677		
<b>4.87</b>	<b>48.7</b>	<b>48.7</b>
0.02	2.28	18.23
361	244.94	174.58
<b>6.6</b>	<b>66</b>	<b>66</b>
0.02	3.09	24.71
<b>1.5</b>	<b>15</b>	<b>15</b>
0.01	0.70	5.62
<b>3.3</b>	<b>33</b>	<b>33</b>
0.01	1.54	12.36
0.0485	6.305	74.44
0	3	30
<b>0.0485</b>	<b>9.305</b>	<b>104.44</b>
65.3		
18.5		
18.5		
<b>0.0175</b>	<b>2.28</b>	<b>18.25</b>
104	13	8
10	10	1

1040

All values @25 °C AND SoC 50%

Tabella 6: Pacco batteria 380 V.

<b>Nominal voltage</b>	<i>V</i>
<i>Upper limit voltage</i>	<i>V</i>
<i>Lower limit voltage</i>	<i>V</i>
<b>Nominal capacity</b>	<i>Ah</i>
Specific capacity	<i>Ah/kg</i>
<b>Nominal energy</b>	<i>kWh</i>
Specific energy (Gravimetric)	<i>Wh/kg</i>
Energy density (Volumetric)	<i>Wh/l</i>
<b>Continuous discharge current</b>	<i>A</i>
Continuous discharge power	<i>kW</i>
Specific discharge power	<i>W/kg</i>
<b>Max discharge current (5 s)</b>	<i>A</i>
Max discharge power	<i>kW</i>
<b>Continuous charge current</b>	<i>A</i>
Continuous charge power	<i>kW</i>
<b>Max charge current (5 s)</b>	<i>A</i>
Max charge power	<i>kW</i>
<b>Life cycle</b>	<i>#</i>
Curb weight	<i>kg</i>
Structure weight	<i>kg</i>
<b>Total weight</b>	<i>kg</i>
Height	<i>mm</i>
Width (Diameter)	<i>mm</i>
Thickness (Diameter)	<i>mm</i>
<b>Volume</b>	<i>l</i>
<b>Series</b>	---
<b>Parallel</b>	---

<b>Note</b>	---
-------------	-----

<b>Element</b>	<b>Module</b>	<b>Pack</b>
<b>3.6</b>	<b>46.8</b>	<b>93.6</b>
4.2	54.6	109.2
2.7	35.1	70.2
<b>3.3</b>	<b>132</b>	<b>132</b>
68		
<b>0.0119</b>	<b>6.18</b>	<b>12.36</b>
245	218.91	142.93
677		
<b>4.87</b>	<b>194.8</b>	<b>194.8</b>
0.02	9.12	18.23
361	323.06	210.94
<b>6.6</b>	<b>264</b>	<b>264</b>
0.02	12.36	24.71
<b>1.5</b>	<b>60</b>	<b>60</b>
0.01	2.81	5.62
<b>3.3</b>	<b>132</b>	<b>132</b>
0.01	6.18	12.36
0.0485	25.22	56.44
0	3	30
<b>0.0485</b>	<b>28.22</b>	<b>86.44</b>
65.3		
18.5		
18.5		
<b>0.0175</b>	<b>9.12</b>	<b>18.25</b>
26	13	2
40	40	1

1040

All values @25 °C AND SoC 50%

Tabella 7: Pacco batteria 96 V.

## Dimensionamento meccanico

A seguire il disassemblamento del veicolo originale, Italtecnica ha disposto un accurato rilevamento<sup>4</sup> delle superfici sottoscoppa per permettere di valutare i volumi a disposizione per il pacco batteria (Figura 5), considerando anche lo scuotimento della sospensione (Figura 6).

Le celle cilindriche 18650 sono abitualmente impaccate meccanicamente includendo un certo numero di sensori di temperatura: a titolo di esempio si riportano i moduli illustrati in Figura 20.

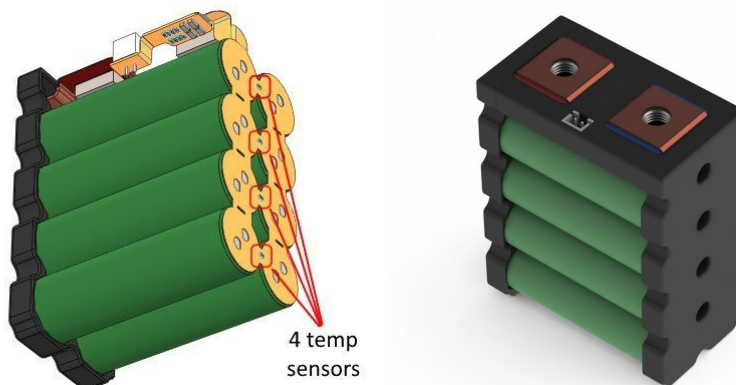


Figura 20: Esempio di modulo sensorizzato a base di celle 18650 della Energus Power Solutions Ltd..

Con specifico riferimento alla Tabella 6 e alla Tabella 7, si è ipotizzato l'uso di moduli da 10 e 20 celle rispettivamente (illustrati in Figura 21).

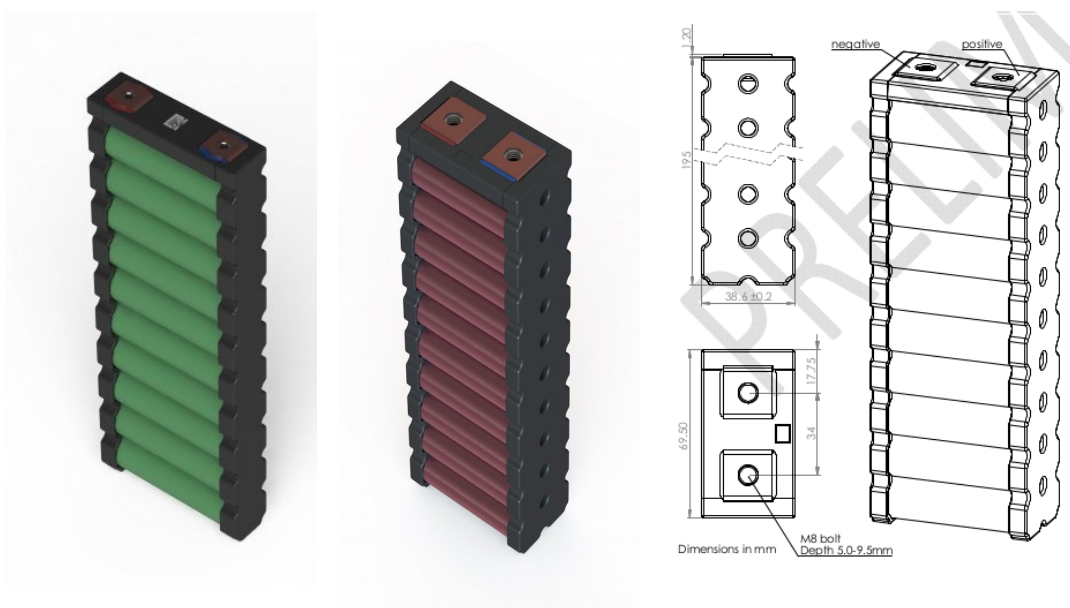


Figura 21: Moduli 10x1 e 10x2.

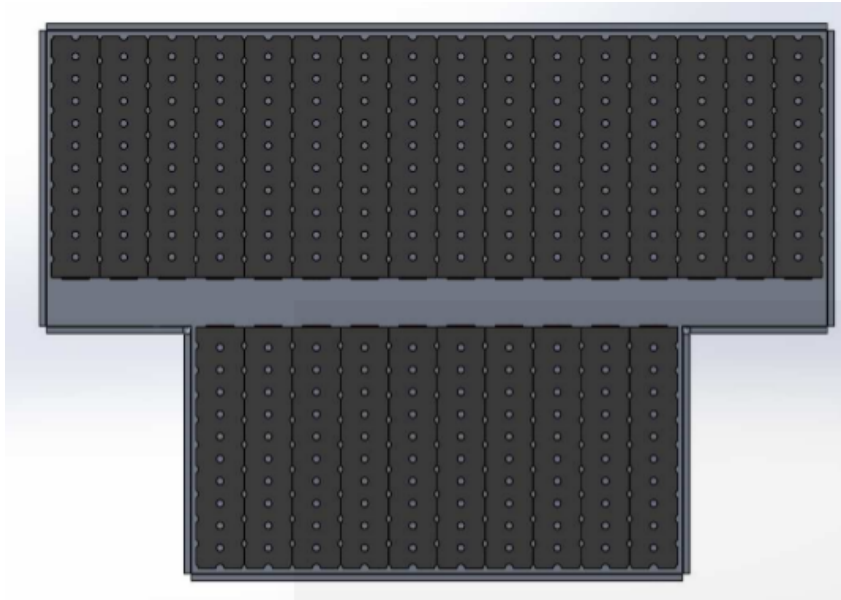
Una possibile organizzazione dei moduli 2x10 a comporre un pacco batteria da 96 V è illustrata in Figura 22. Nel caso di batteria da 380 V i moduli 1x10 sono disposti uanlogamente. In entrambi i casi, la disposizione scelta per i moduli permette il collegamento dei terminali nella parte interna del modulo e una convezione naturale o forzata in senso verticale.

4 Progetto SAVER - Rilevamenti su scocca Fiat Panda prima serie, Italtecnica 2018

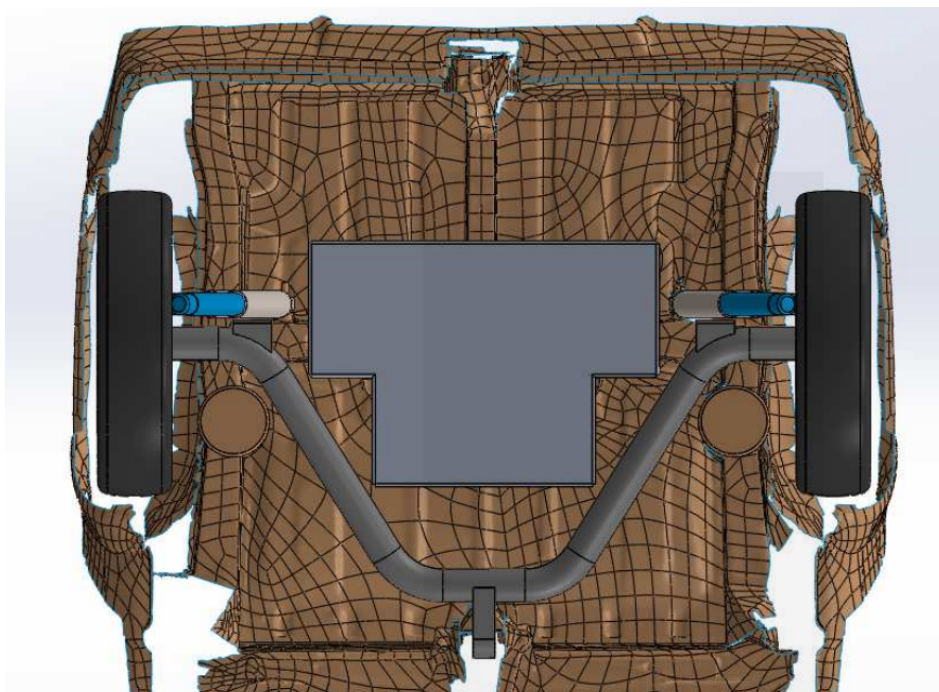


Le dimensioni complessive dell'involucro del pacco batteria (riportate in Figura 25) includono gli spazi di rispetto per le connessioni e la circolazione d'aria interna prevista per contribuire all'equalizzazione termica all'interno dei moduli e tra i moduli.

Il posizionamento del pacco batteria rispetto alla scocca vettura è illustrato in Figura 23 e in Figura 24.



*Figura 22: Pacchetto batteria realizzato con moduli 2x10 accoppiati in parallelo.*



*Figura 23: Fiat Panda: Ingombro pacco batteria in pianta.*



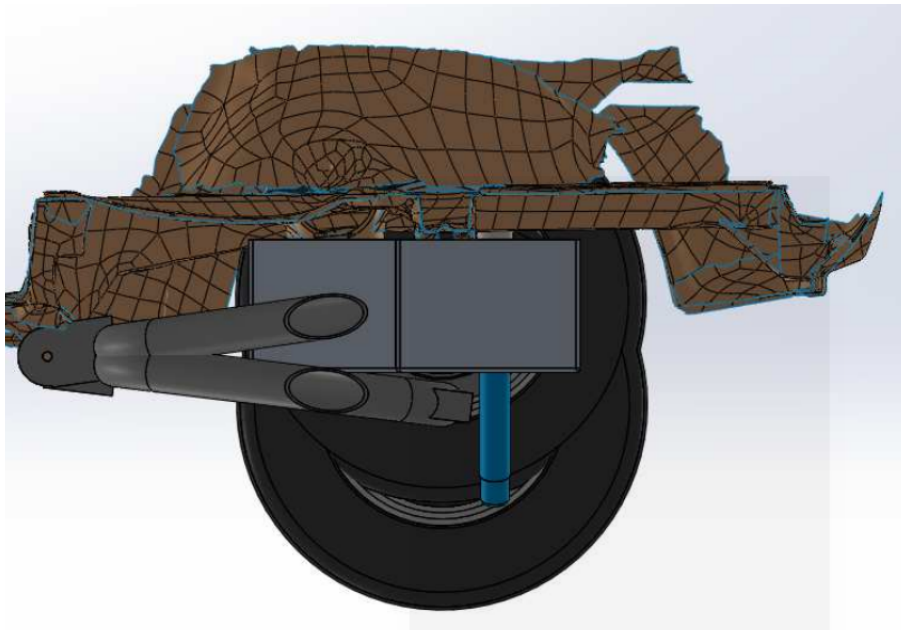


Figura 24: Fiat Panda: ingombro laterale pacco batteria.

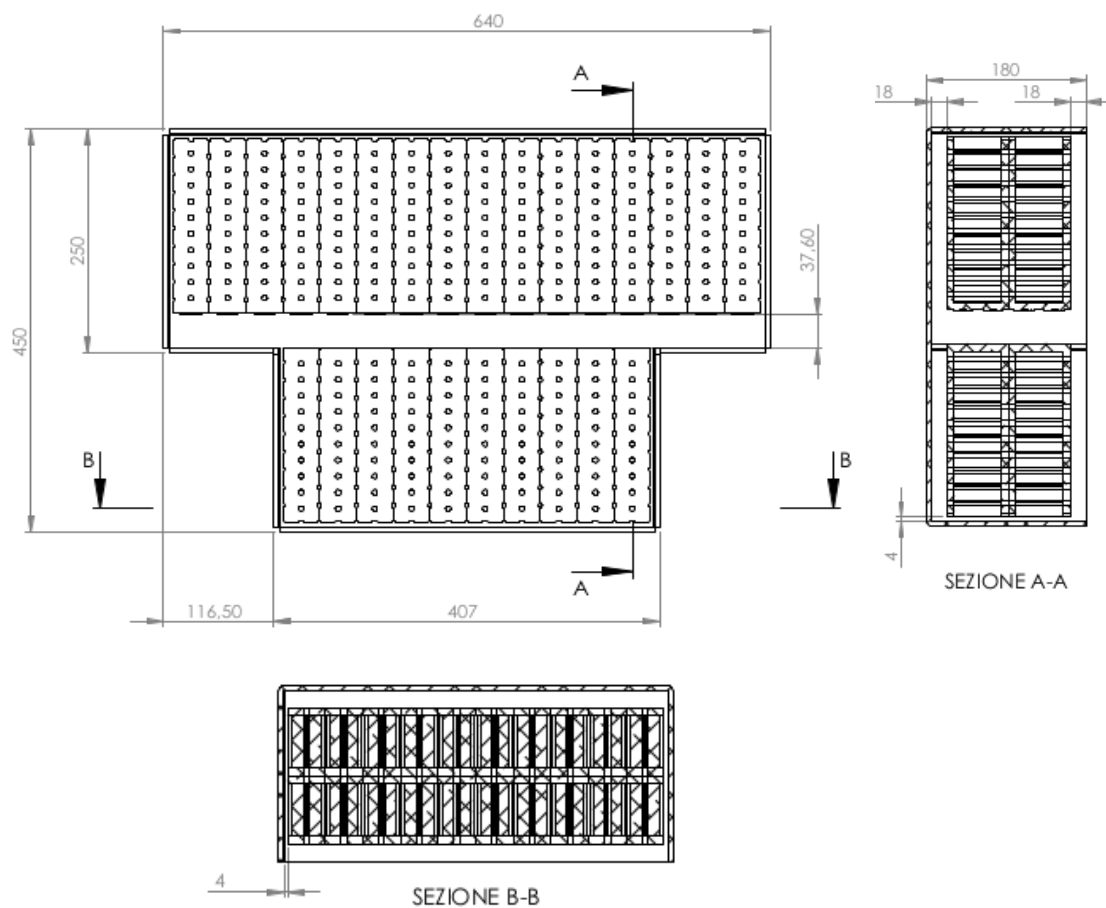


Figura 25: Dimensioni pacco batteria (circa 44 l).

## Motopropulsore elettrico

Il gruppo motopropulsore è costituito dall'insieme di un motore elettrico e dalla relativa elettronica di potenza e di controllo che ne permette l'attuazione ovvero la generazione di una coppia motrice in funzione di un riferimento fornito dall'esterno.

Dall'analisi cinematica (vedi Requisiti coppia e potenza a pagina 13) si ottengono la coppia minima e la potenza minima necessaria per compiere le diverse missioni del veicolo previste dai diversi cicli, inclusa la parte extra-urbana riportate nella Tabella 4.

La vocazione più marcatamente urbana del veicolo trasformato suggerisce di adottare un motopropulsore in grado di generare una coppia massima uguale o superiore a quella evidenziata dall'analisi cinematica di oltre 500 Nm. Per contro un'eventuale limitazione di potenza massima avrebbe influenza solo ai regimi di velocità massima, ben superiore a quella permessa in ambito urbano.

La coppia alla ruota viene fornita dal motore elettrico attraverso un riduttore meccanico che, in prima analisi, potrebbe essere lo stesso gruppo già utilizzato per il propulsore a combustione interna, in particolare in "terza marcia" con un rapporto complessivo come riportato in Tabella 2. Di conseguenza la coppia minima richiesta al motopropulsore elettrico risulta pari a quella alla ruota (500 Nm) divisa per il rapporto di riduzione (8.57) ovvero pari a circa 60 Nm.

La velocità massima del veicolo di 100 km/h con il rapporto di riduzione adottato impongono una velocità massima del motore elettrico<sup>5</sup> di almeno 8000 rpm come illustrato in Figura 26.

## Dimensionamento elettrico

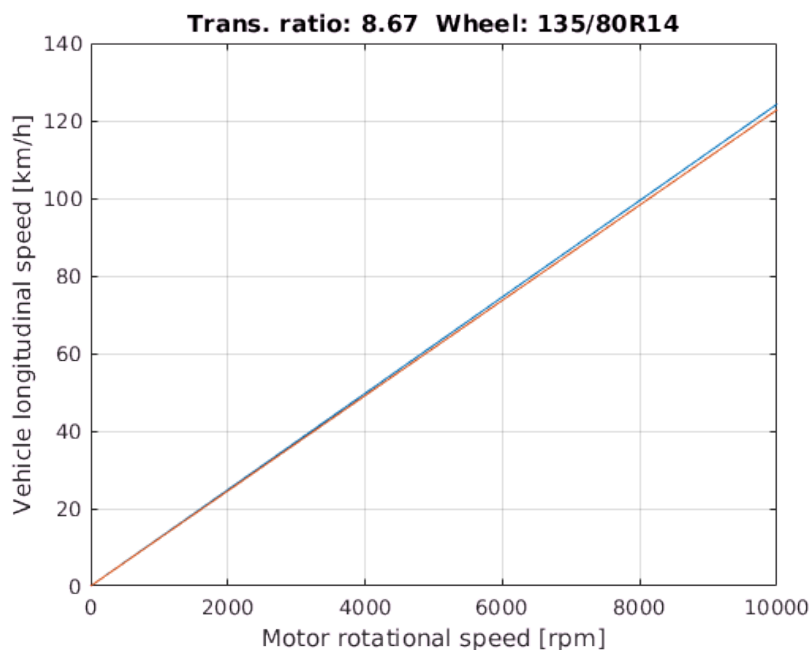


Figura 26: Rapporto velocità veicolo e velocità motore elettrico.

Entro limiti ragionevoli, le caratteristiche in coppia e potenza di un motore elettrico sono indipendenti dalla tensione e corrente di alimentazione, di conseguenza entrambe le tensioni di alimentazione, alta o medio-bassa, possono essere adottate quasi a pari prestazioni.

Per contro l'energia richiesta al pacco batteria dipende dall'efficienza del motopropulsore elettrico nel trasformare potenza elettrica in potenza meccanica (e viceversa nel caso di rigenerazione). L'efficienza del motopropulsore è il prodotto di quella dell'elettronica di

5 "Panda\_BEVintage\_Vehicle\_vs\_MotorSpeed", Politecnico 2018

azionamento e di quella del motore elettrico che dipende dalle potenze dissipate principalmente nel rame per effetto Joule (in proporzione al quadrato della coppia) e nel ferro per correnti isteretiche (in proporzione al quadrato della velocità).

Da questo punto di vista sono state ipotizzate due diverse soluzioni a parità di prestazioni in coppia e potenza ma diverse classi di potenze dissipate alla velocità nominale: 1000 W (Figura 27 e Figura 29) e 2000 W (Figura 28 e Figura 30).

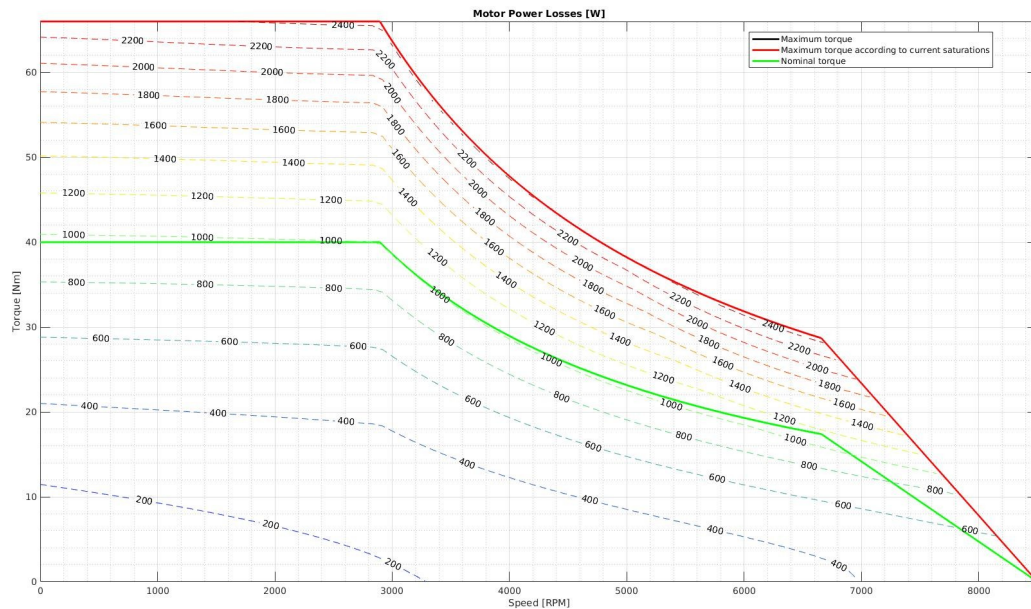


Figura 27: Caratteristica del motore elettrico (potenza dissipata a velocità base di 1000 W).

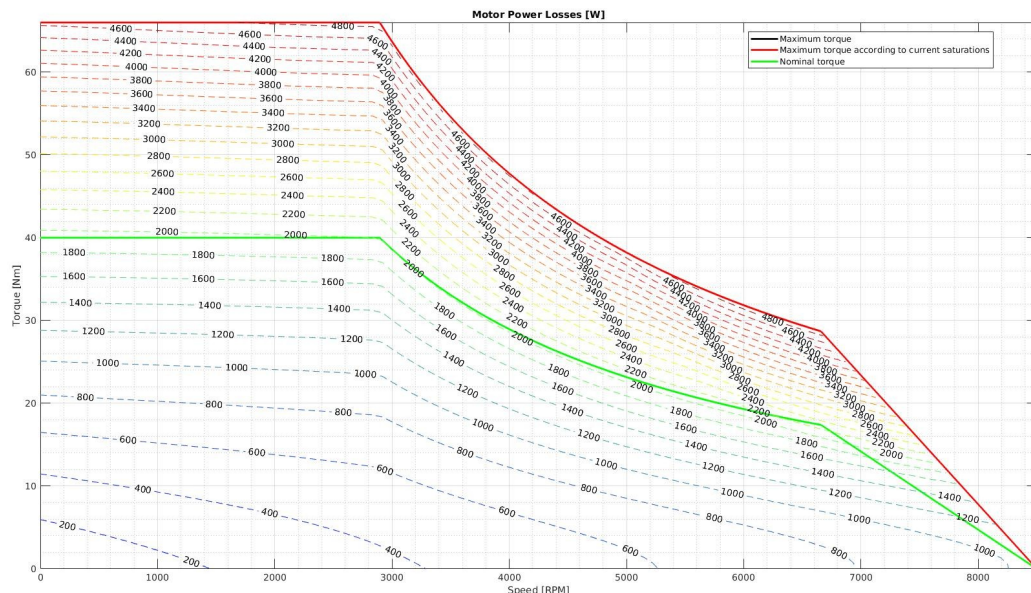


Figura 28: Caratteristica del motore elettrico (potenza dissipata a velocità base di 2000 W).

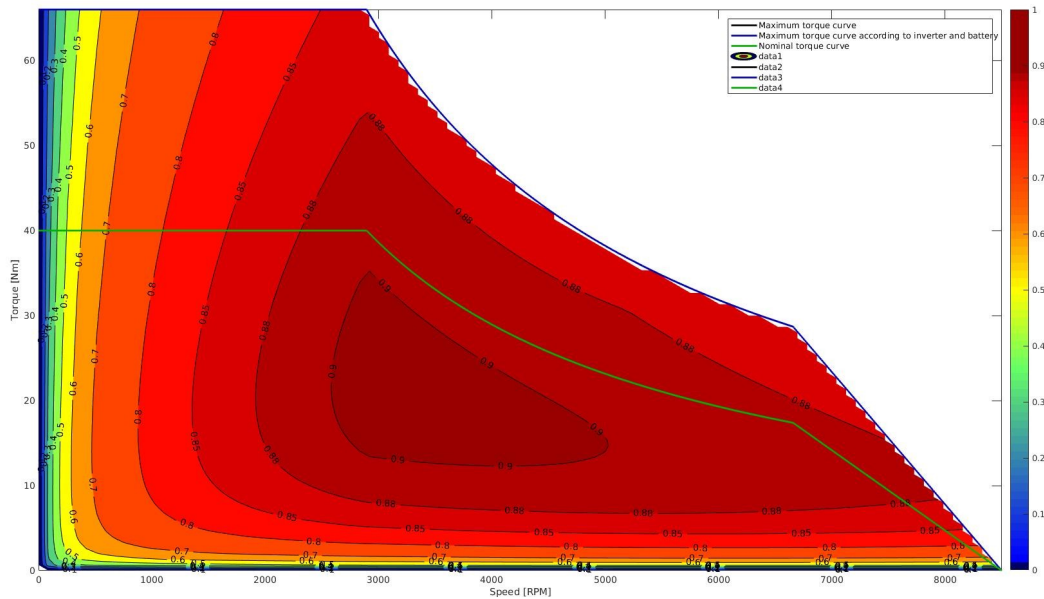


Figura 29: Efficienza del motore elettrico (potenza dissipata a velocità base di 1000 W).

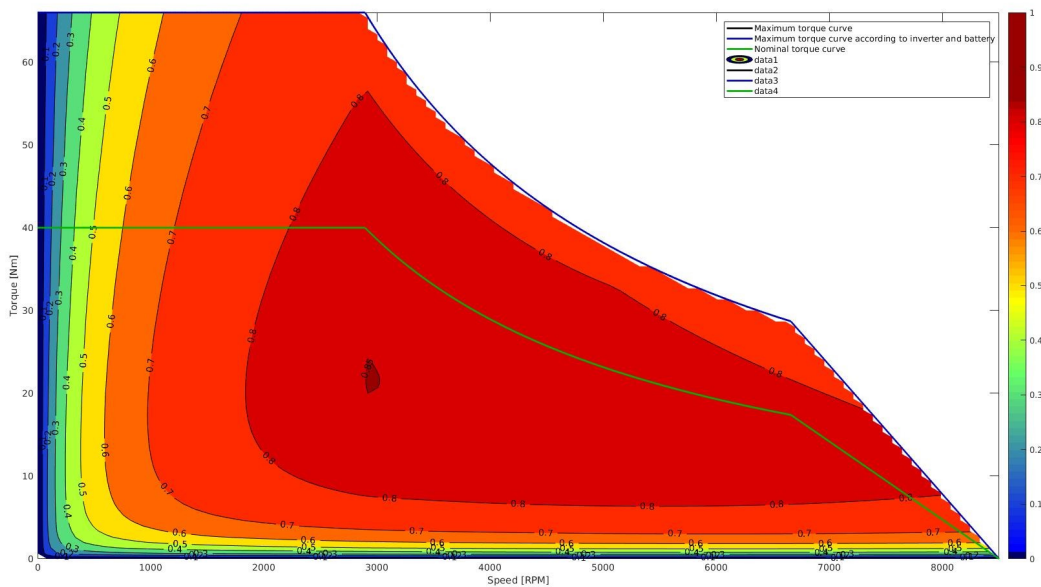


Figura 30: Efficienza del motore elettrico (potenza dissipata a velocità base di 2000 W).

Da notare come allo scalamento in tensione del motore elettrico corrisponda un analogo e inverso scalamento in corrente: a parità di potenza, al crescere della tensione decresce la corrente. Di conseguenza la scelta della sezione dei cavi e dell'elettronica di potenza (inverter) per classe di tensione (tecnologia MOSFET o IGBT) e taglia di corrente. La scelta dell'inverter è inoltre subordinata alla tipologia di controllo che, nei casi presentati, deve essere a controllo vettoriale con capacità di deflussaggio.

## Impostazione del sistema solare

L'integrazione dell'opzione relativa al sistema di pannelli solari è illustrata dallo schema di Figura 31.

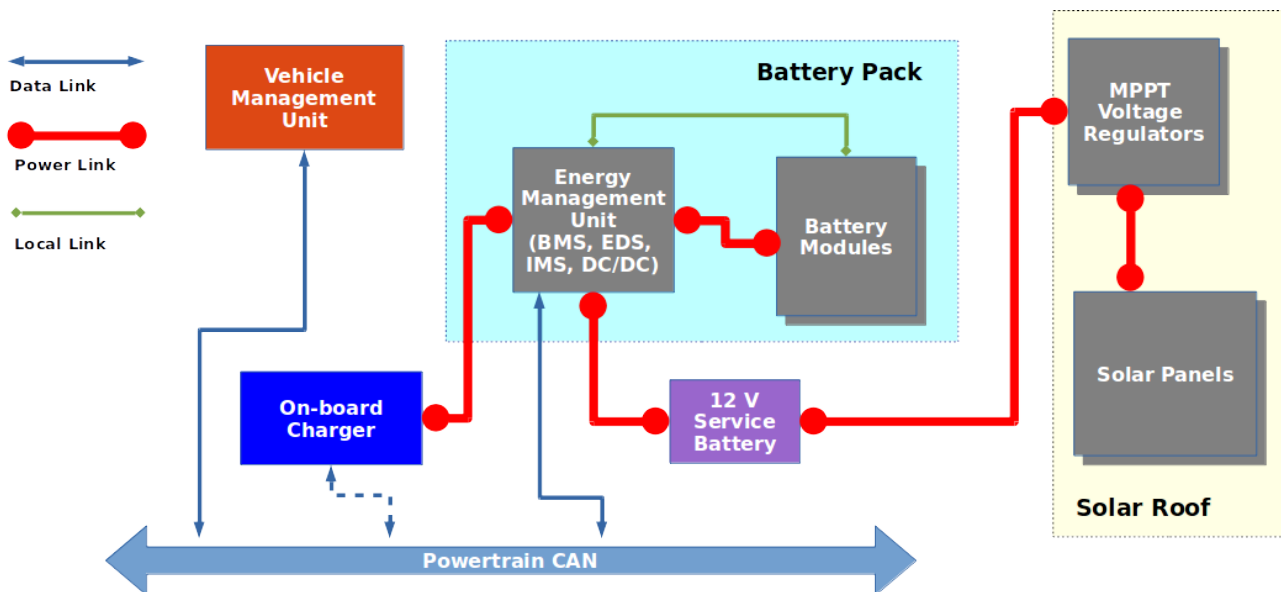


Figura 31: Integrazione del sistema solare nell'architettura generale.

Il tetto della Fiat Panda prima serie, rettangolare e piatto, presenta una forma quasi ideale per la posa dei pannelli solari. Dagli ingombri riportati in Figura 2 si stima una superficie utile di circa 950 x 1300 mm. In ogni modo è previsto l'utilizzo di pannelli solari flessibili (Figura 32) che permettono di adattarsi a superfici non perfettamente piane.

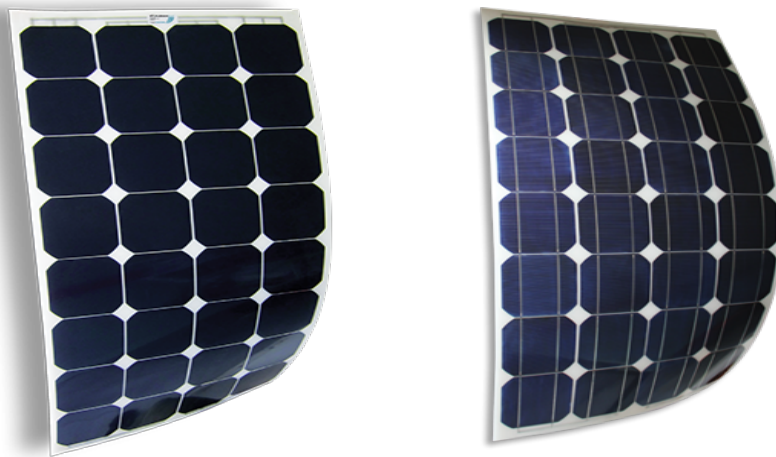


Figura 32: Esempio di pannelli solari flessibili della Solbian EA Srl.

Le celle solari possono essere ad alta efficienza, ad esempio quelle della SunPower raggiungono il 24% di conversione, oppure le più economiche monocristalline con fattore di conversione di circa 18%. Assumendo celle di dimensione standard 125 x 125 mm e un intervallo di rispetto di 2 mm (Figura 33) è possibile posizionare 7 x 10 celle da 3.5 W, per un totale di 245 W (nelle migliori condizioni, vedi Figura 34).



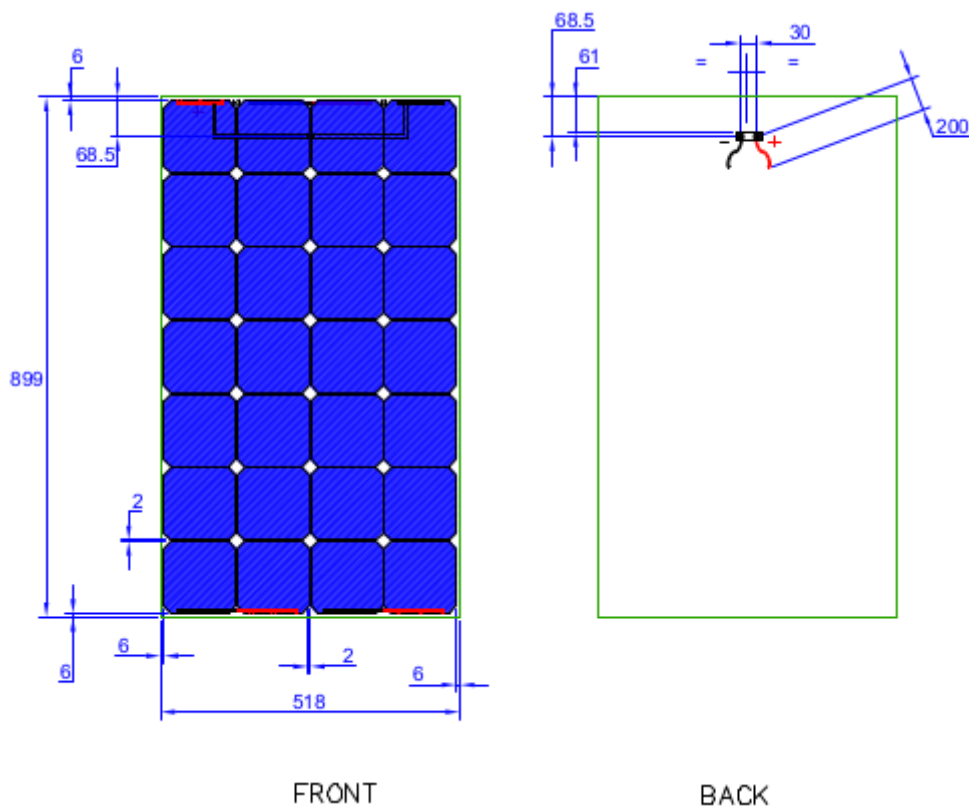


Figura 33: Tipica disposizione delle celle solari a costituire un pannello.

Come evidenziato in Figura 31, il regolatore di tensione (Maximum Power Point Tracking, MPPT) è collegato direttamente alla batteria di servizio da 12 V: a meno di situazioni particolari, l'energia solare raccolta dai pannelli solari non è sufficiente a ricaricare efficacemente il pacco batteria ma può essere efficacemente utilizzata per mantenere in temperatura l'abitacolo e il pacco batteria stesso. In alternativa è possibile utilizzare un convertitore DC/DC bidirezionale oppure un regolatore di tensione in media tensione per alimentare direttamente il pacco batteria, in particolare in medio-bassa tensione.

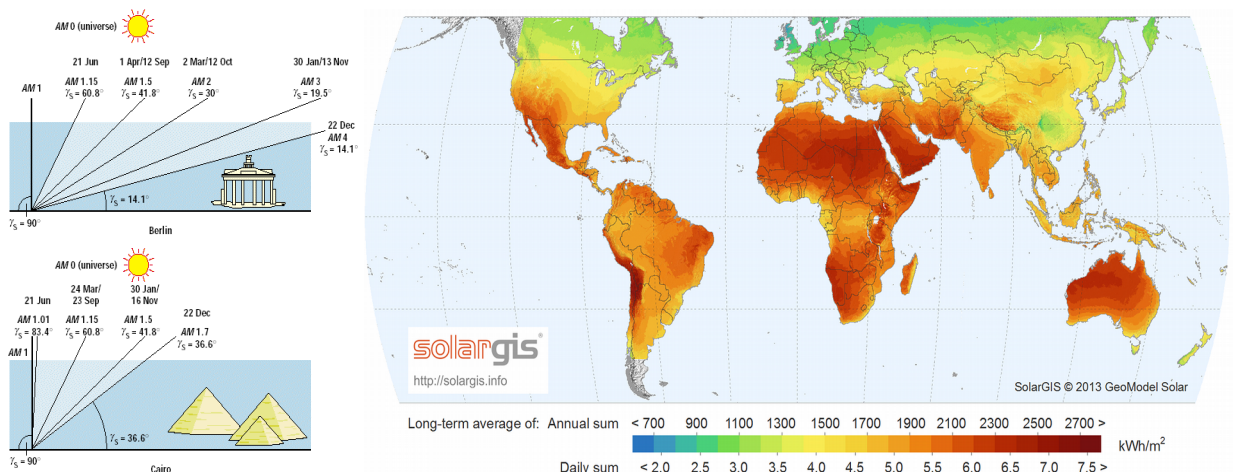


Figura 34: Distribuzione dell'irraggiamento e dell'incidenza dei raggi solari.



## Analisi della dinamica longitudinale

La dinamica longitudinale del veicolo viene condotta in anello chiuso ovvero con la presenza di un guidatore che agisce sui comandi in funzione del profilo di velocità richiesto. Inoltre all'interno del sistema di trazione sono presenti le eventuali limitazioni sia in termini di efficienza che di valori massimi del motopropulsore.

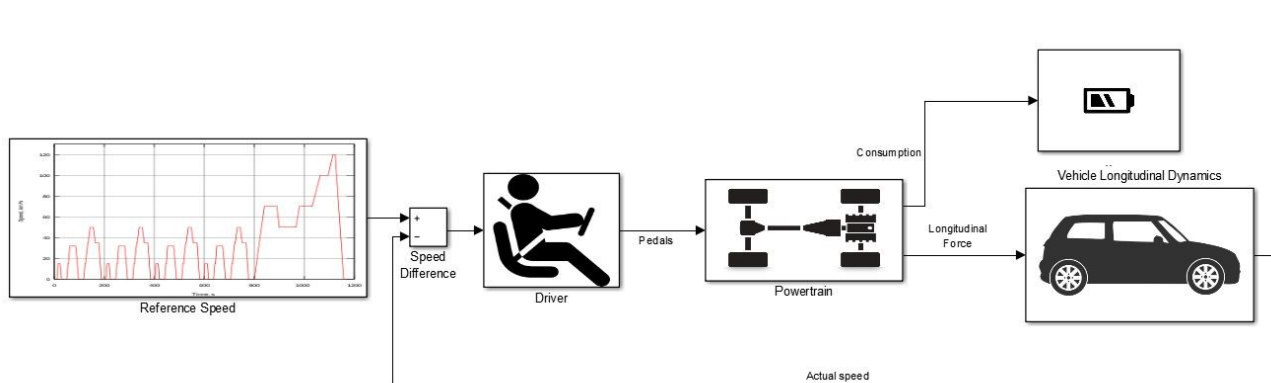


Figura 35: Schema di principio per l'analisi dinamica in anello chiuso.

I risultati delle simulazioni illustrati nel seguito assumono l'efficienza del motopropulsore nel caso peggiore di potenza dissipata alla velocità nominale pari a 2000 W. Il confronto con il sistema a efficienza superiore (1000 W di dissipazione) è riportato nella tabella consuntiva dei consumi su diverse tipologie di ciclo.

Tutte le simulazioni prevedono l'impiego di una frenata rigenerativa limitata in coppia a 20 Nm e funzione della velocità (vedi Figura 36).

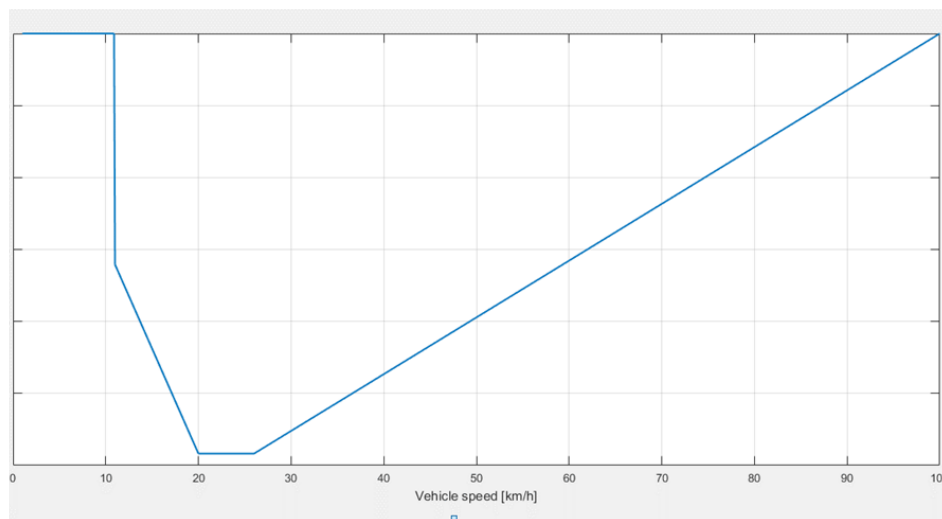


Figura 36: Profilo della frenata generativa rispetto alla velocità.

## Accelerazione massima

Il comportamento dinamico ad acceleratore a fondo corsa illustrato in Figura 37 permette di determinare il tempo da 0 a 50 km/h e la velocità massima del veicolo: circa 10 s e 90 km/h.

La simulazione permette di valutare la potenza massima richiesta alla batteria: circa 26 kWh da confrontare con le caratteristiche elettriche previste per la stessa (vedi Tabella 7) ovvero ai limiti delle sue capacità di scarica (circa 25 kW per 5 s). In altri termini il fattore limitante delle prestazioni risulta il pacco batteria da cui la considerazione che l'adozione di un motopropulsore di prestazioni maggiori sarebbe comunque inutile.

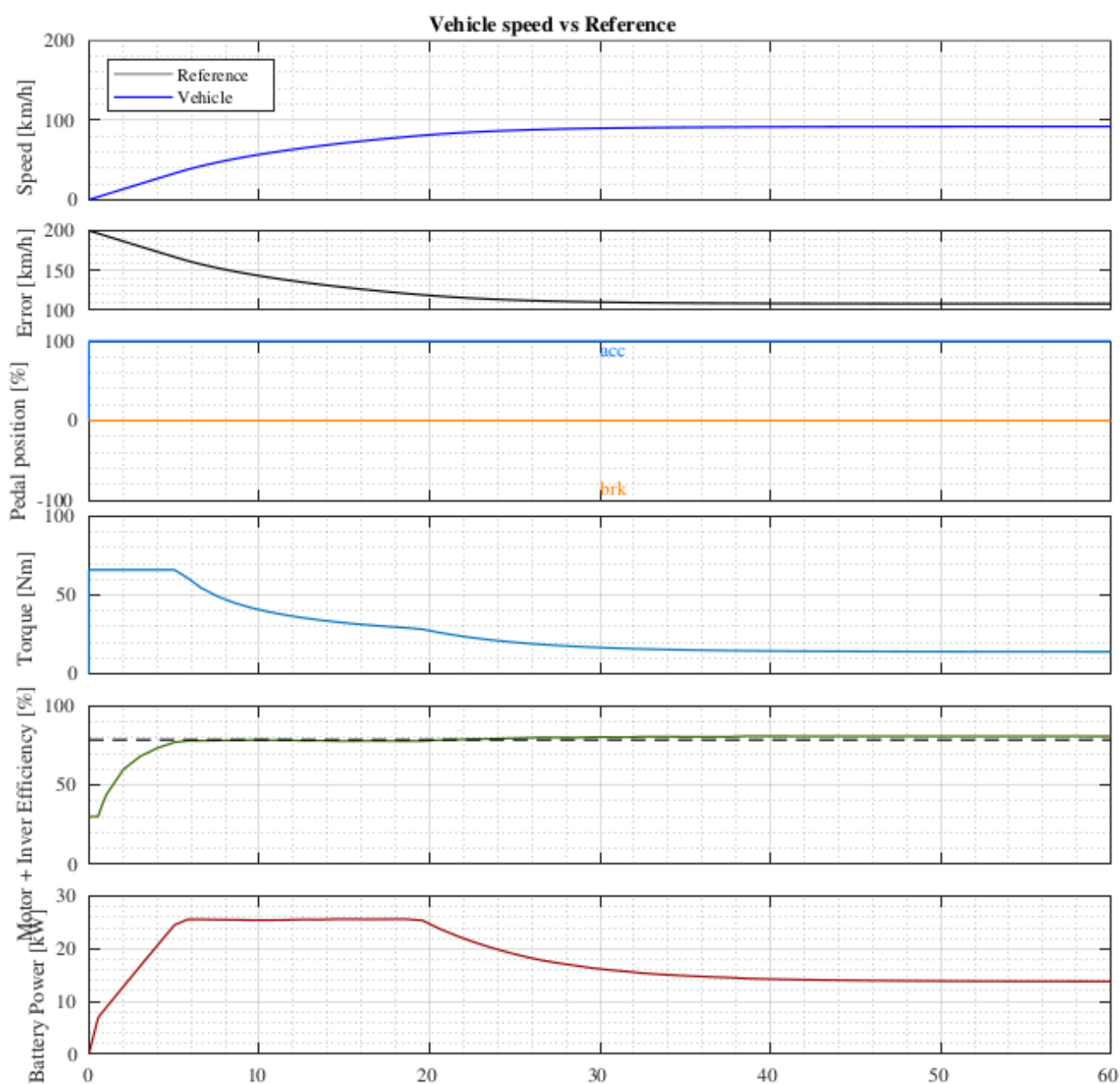


Figura 37: Pedale acceleratore a fondo corsa.

## Ciclo NEDC

Le simulazioni su ciclo NEDC urbano (Figura 38) e completo (Figura 39) denotano una richiesta di coppia al motopropulsore e di potenza alla batteria sempre inferiori ai limiti massimi sia in fase di scarica che di carica dovuta alla frenata rigenerativa (confronta Tabella 7).

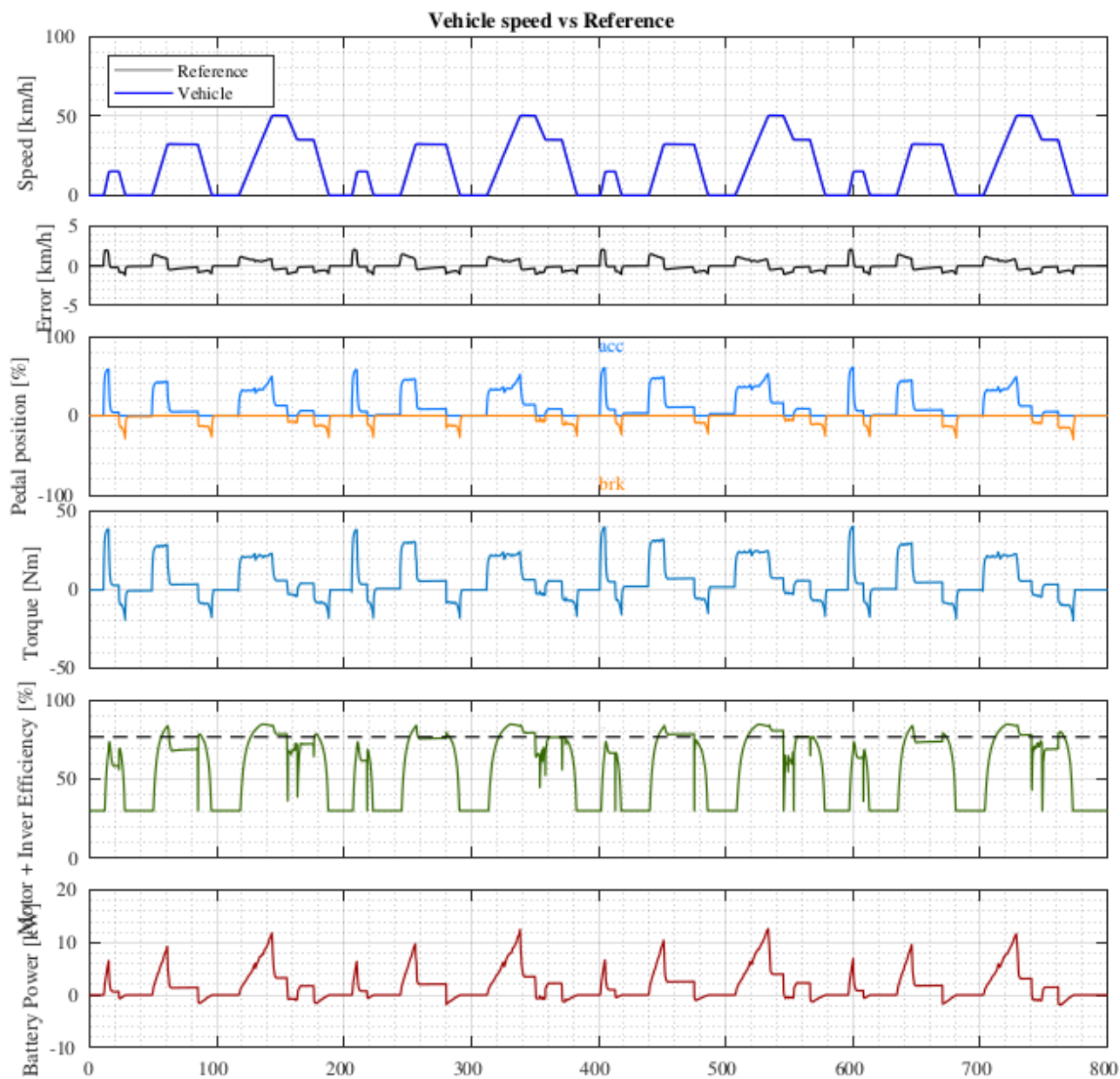


Figura 38: Ciclo NEDC urbano.

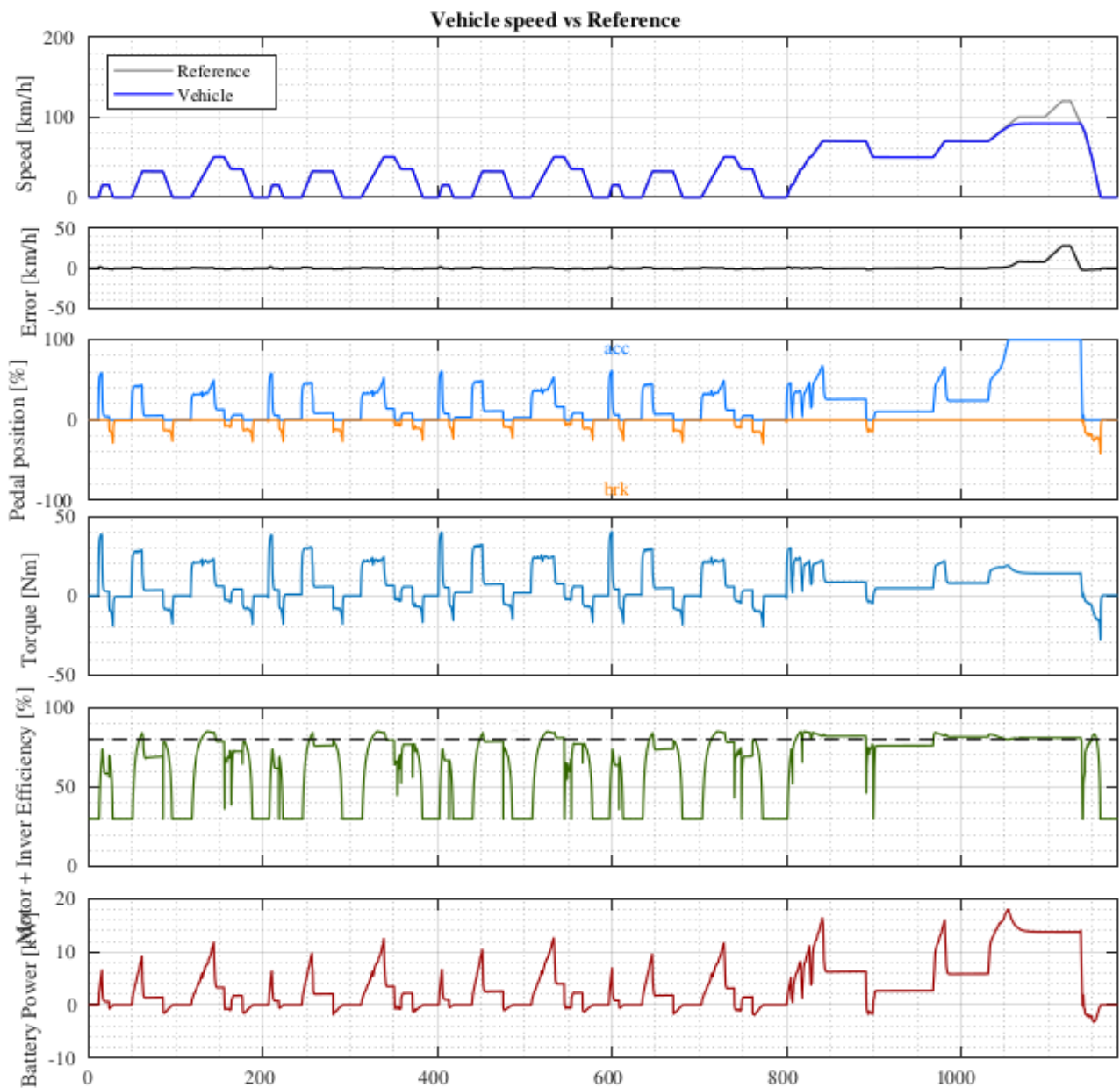


Figura 39: Ciclo NEDC completo.

## Ciclo WLTP

I cicli WLTP sono generalmente riconosciuti come più vicini alle condizioni di guida reali sia in ambito urbano (Figura 40) che extraurbano (Figura 41) e risultano più severi in termini di coppie e potenze richieste che daranno verosimilmente origine a consumi maggiori rispetto ai cicli NEDC.

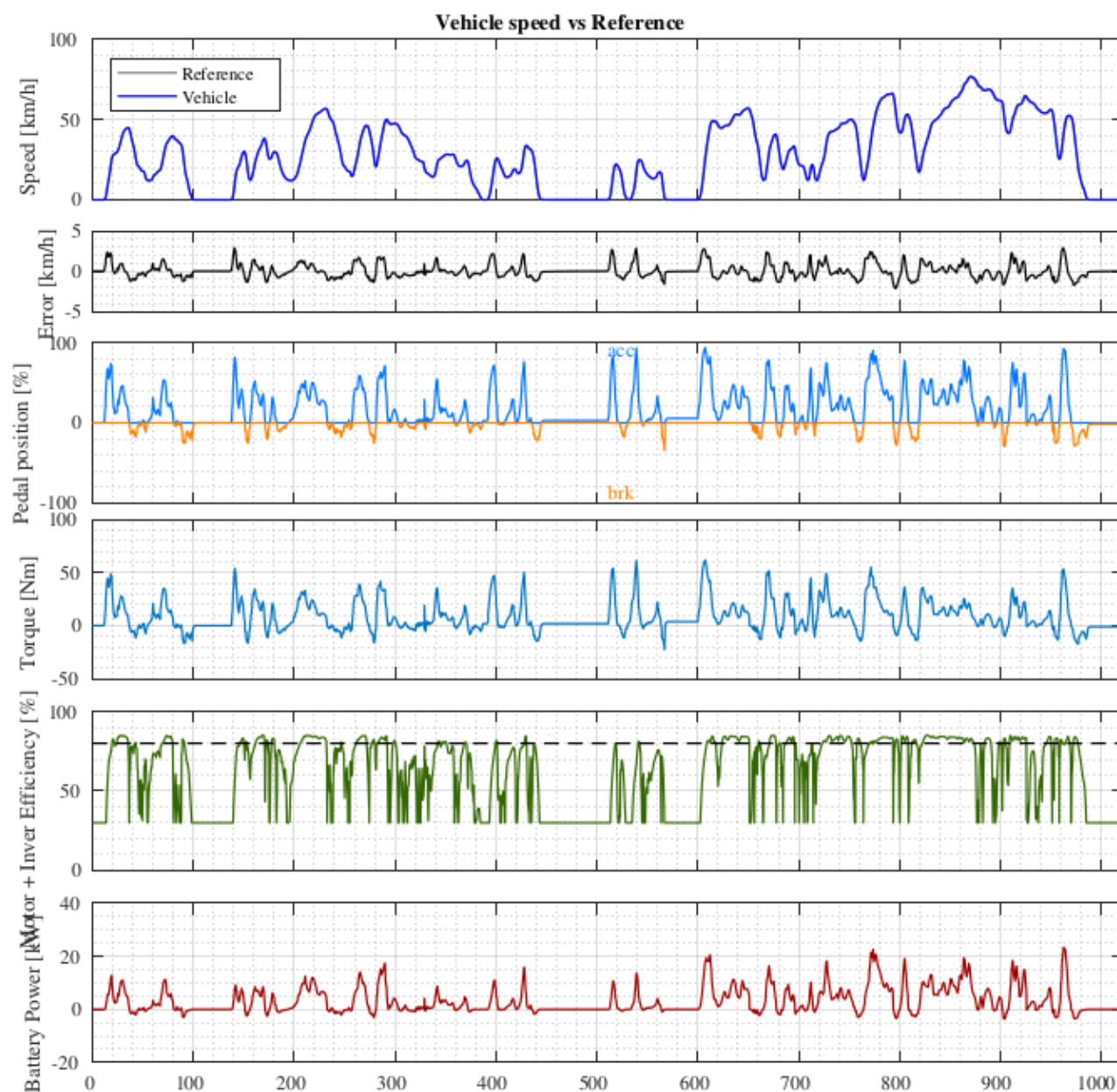


Figura 40: Ciclo WLTP urbano.

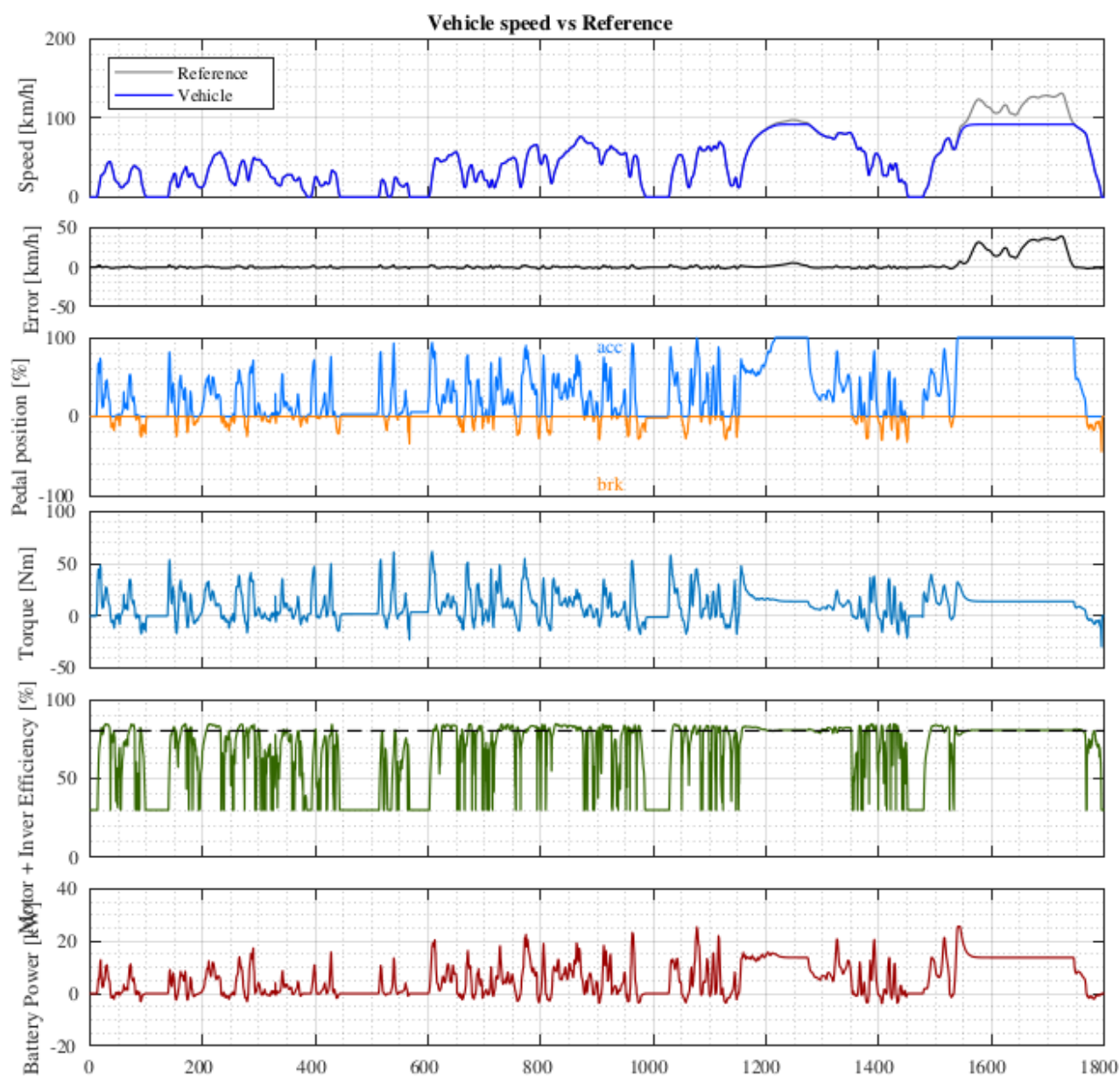


Figura 41: Ciclo WLTP completo.



## Confronto consumi

I risultati delle simulazioni dinamiche e cinematiche in termini di consumi sono riassunti e portati a confronto nella Tabella 8.

La prima considerazione riguarda i consumi per 80-100 km di percorrenza che rimangono comunque ampiamente compatibili con la capacità energetica utile del pacco batteria come ipotizzato, in particolare per un uso strettamente urbano.

La seconda considerazione riguarda l'efficacia della frenata rigenerativa che, con le limitazioni adottate, rimane abbastanza limitata rispetto al recupero teorico in caso ideale. Si prevede di lavorare estensivamente sulle strategie di frenata rigenerativa per incrementare tale effetto.

Ciclo / Consumi [Wh/km]		Senza rigenerazione	Con rigenerazione	Differenza relativa
NEDC Urban	2000 W	99.6	92.0	8.3%
	1000 W	89.6	80.6	11.2%
	ideale	82.6	53.5	54.4%
NEDC Full	2000 W	111.3	104.6	6.4%
	1000 W	109.9	101.2	8.6%
	ideale	107.6	88.5	21.6%
WLTP Urban	2000 W	118.2	109.1	8.3%
	1000 W	107.7	97.6	10.3%
	ideale	98.2	62.6	56.9%
WLTP Full	2000 W	133.4	128.3	4.0%
	1000 W	130.0	116.4	11.7%
	ideale	128.4	108.1	18.8%

Tabella 8: Confronto consumi (ideale dalla simulazione cinematica).

## Conclusioni

L'analisi di fattibilità svolta per la trasformazione della Fiat Panda I serie in veicolo elettrico ha permesso di definire le caratteristiche di massima di tutti i componenti del sistema di trazione rispetto alle prestazioni attese.

Le caratteristiche di massima delle diverse componenti sono state utilizzate per una ricerca preliminare dei potenziali fornitori e la compilazione della distinta base provvisoria. La trattativa con i diversi fornitori riguarda non solo la fornitura di un prototipo ma la disponibilità e il costo della componentistica per una piccola serie (100 veicoli/anno). La completa referenziazione tecnica e la valorizzazione economica caratterizzeranno la distinta base definitiva.

Il modello dinamico utilizzato per la simulazione della dinamica longitudinale del veicolo sarà ulteriormente utilizzato per la definizione delle strategie di controllo del sistema di trazione che andranno ad essere implementate nella centralina di controllo del sistema di trazione (Vehicle Management Unit, VMU). La scelta di tale componente riguarda non solo il componente medesimo ma gli strumenti di gestione della catena di sviluppo del software e della sua parametrizzazione in fase di messa a punto e successiva manutenzione (diagnostica).

# Vehicle Coast-down Parameters

## Longitudinal Dynamics

$$m_e \dot{V}(t) + F_r(t) + F_d(t) + F_s(t) = F_t(t)$$

where

$m_e \dot{V}(t)$  is the longitudinal inertia,

$F_r(t)$  is the rolling resistance,

$F_d(t)$  is the drag resistance,

$F_s(t)$  is the slope gravitational resistance,

$F_t(t)$  is the total traction force.

## Longitudinal Inertia

$$m_e \dot{V}(t)$$

where

$\dot{V}(t)$  is the longitudinal speed

$m_e = m + \frac{n_w J_w + n_m (J_m \tau^2 + J_t)}{R^2}$  is the equivalent mass

with

$m$  vehicle mass,

$R$  wheel radius,

$n_w$  number of wheels, each with angular inertia  $J_w$ ,

$n_m$  number of motors with angular inertia  $J_m$  and related transmission, each with angular inertia  $J_t$  (as seen at the output to the drive shafts) and transmission ratio  $\tau$  (from electric motor to drive shaft).

$$m = 700 + 300 \text{ \%kg}$$

$$m = 1000$$

$$R = 13 / 2 * 0.0254 + 165 / 1000 * 0.7 \text{ \%m}$$

$$R = 0.2806$$

$$n_w = 4$$

$$n_w = 4$$

$$J_w = 0.707 \text{ \%kg*m}^2$$

$$J_w = 0.7070$$

$$n_m = 1$$

$$n_m = 1$$

$$J_m = 0.0033 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

$$J_m = 0.0033$$

$$\tau = 8.67$$

$$\tau = 8.6700$$

$$J_t = 0.015 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

$$J_t = 0.0150$$

$$m_r = (n_w J_w + n_m (J_m \tau^2 + J_t)) / R^2$$

$$m_r = 39.2583$$

$$m_e = m + m_r$$

$$m_e = 1.0393\text{e}+03$$

## Slope Gravitational Resistance

$$F_s(t) = mg \sin(\alpha(t))$$

with

$g$  gravitational constant,

$\alpha(t)$  slope angle.

$$g = 9.81; \text{ N/kg}$$

## Rolling Resistance

$$F_r(t) = (f_0 + f_2 V^2(t)) mg \cos(\alpha(t))$$

with

$f_2$  constant,

$f_0 = f_{RCC} - f_2 V_{80}^2$  depending on the Rolling Resistant Coefficient efficiency class (EU label).

RRC [kg/t]	Energy Efficiency class
RRC ≤ 6.5	A
6.6 ≤ RRC ≤ 7.7	B
7.8 ≤ RRC ≤ 9.0	C
Empty	D
9.1 ≤ RRC ≤ 10.5	E
10.6 ≤ RRC ≤ 12.0	F
RRC ≥ 12.1	G

$$f_2 = 6.5e-6 \text{ \%s}^2/\text{m}^2$$

$$f_2 = 6.5000e-06$$

$$f_{\text{RCC}} = 10.6 \text{ \%kg/t}$$

$$f_{\text{RCC}} = 10.6000$$

$$f_0 = 18.0/1000 - f_2 \cdot (80/3.6)^2$$

$$f_0 = 0.0148$$

## Drag Resistance

$$F_d(t) = \frac{1}{2} \rho c_x A V^2(t)$$

with

$\rho$  air mass density,

$c_x$  vehicle drag coefficient,

$A$  vehicle frontal area.

$$\rho = 1.184 \text{ \%kg/m}^3 \text{ @25}^\circ\text{C}$$

$$\rho = 1.1840$$

$$c_x = 0.41$$

$$c_x = 0.4100$$

$$A = 1.7 \text{ \%m}^2$$

$$A = 1.7000$$

## Coast-down Coefficients

Under coast-down experimental conditions  $F_t(t) = 0$  and slope  $\alpha = 0$  the longitudinal dynamic equation simplifies to

$$m_e \dot{V}(t) + c_0 + c_1 V(t) + c_2 V^2(t) = 0$$

with

$$c_0 = f_0 mg,$$

$$c_1 = 0,$$

$$c_2 = f_2 mg + \frac{1}{2} \rho c_x A.$$

$$c\_0 = f\_0 * m * g \text{ \%N}$$

$$c\_0 = 145.0911$$

$$c\_1 = 0 \text{ \%kg/s}$$

$$c\_1 = 0$$

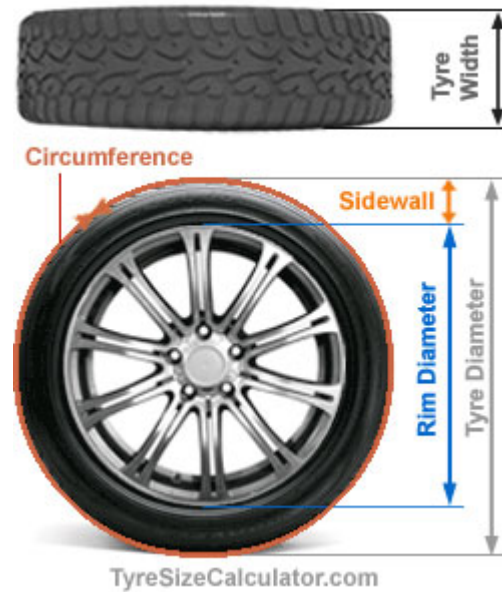
$$c\_2 = f\_2 * m * g + 1/2 * \rho * c\_x * A \text{ \%kg/m}$$

$$c\_2 = 0.4764$$



# Vehicle Longitudinal vs. Motor Rotational Speed

## Mathematics



Tyre (Wheel) radius, by definition

$$r = \frac{D_r}{2} + (W_t a_t)$$

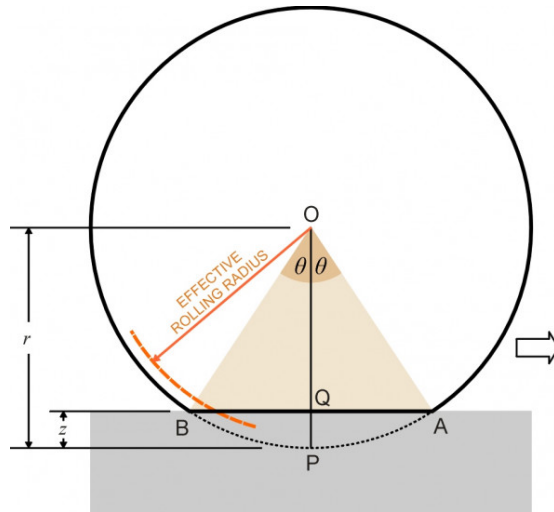
with

$D_r$  rim diameter,

$W_t$  tyre width,

$a_t$  tyre aspect ratio (sidewall height with respect to tyre width).

to be found on tyre as Tyre width [mm] / Aspect ratio [%] - Rim diameter [inches], ex. 135/80R13



Effective rolling radius, by definition

$$r_e = \frac{V}{\Omega} = \frac{r \sin \theta}{\theta}$$

with

$V$  vehicle longitudinal speed,

$\Omega$  wheel rotational speed.

For small  $\theta$

$$r_e \approx r \left( 1 - \frac{z}{3r} \right)$$

with

$z$  tyre deflection.

## Input Parameters

Rim & tyre characteristics: Width / Aspect ratio - Rim diameter.

Examples:

- Panda 30: 135/80 R13
- Panda 1.2: 165/70 R14

```
W_t = 135; %mm
a_t = 0.8; %
z = 10; %mm
D_r = 14; %Inches
```

Overall transmission ratio (from Motor to Wheel).

Examples:

- Oerlikon Think!: 1/10.156 or 1/8.46
- Comex Twizzy: 1/8.51

- Panda 45 (I-II, inclusive of differential 13/55): 1/16.54 - 1/8.67

```
T_r = 8.67; %%
```

Motor rotational speeds

```
w_rpm_max = 12000; %rpm
w_rpm = linspace(0,w_rpm_max,100); %rpm
```

## Function Evaluation

Compute wheel effective radius and rotational speed (with measurement units conversion ;-)

```
r = D_r/2*0.0254 + (W_t /1000 * a_t) %m
```

```
r = 0.2858
```

```
r_e = r * (1 - z/1000 /3 /r) %m
```

```
r_e = 0.2825
```

```
w = w_rpm /60 *2*pi /T_r; %rad/s
```

Compute speed

```
V = w * r; %m/s
V_kmh = V /1000 *3600; %km/h
V_kmh_max = V_kmh(100)
```

```
V_kmh_max = 149.1267
```

```
V_e = w * r_e; %m/s
V_e_kmh = V_e /1000 *3600; %km/h
V_e_kmh_max = V_e_kmh(100)
```

```
V_e_kmh_max = 147.3874
```

Plot speeds

```
plot(w_rpm, V_kmh, w_rpm, V_e_kmh)
title(['...
      'Trans. ratio: ', num2str(T_r), ' ', ...
      'Wheel: ', num2str(W_t), '/', num2str(a_t*100), 'R', num2str(D_r) ...
      ])
xlabel('Motor rotational speed [rpm]')
ylabel('Vehicle longitudinal speed [km/h]')
grid on
```