



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Prova vita di batterie piombo acido
con e senza livellamento del carico

Vincenzo Sglavo e Francesco Vellucci

PROVA VITA DI BATTERIE PIOMBO ACIDO CON E SENZA LIVELLAMENTO DEL CARICO

Vincenzo Sglavo, Francesco Vellucci (ENEA)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia

Progetto: Nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Responsabile del Progetto: Giuseppe Barbieri, ENEA

Indice

| | |
|---|-----------|
| Sommario | 4 |
| 1 <i>Introduzione</i> | 6 |
| 2 Set-up sperimentale | 11 |
| 2.1 <i>Razionale della prova</i> | 11 |
| 2.2 <i>Prerequisiti e preparazione del test.....</i> | 13 |
| 2.3 <i>Equipaggiamento di prova</i> | 14 |
| <i>Punti di misura</i> | 14 |
| 3. Sequenza di prova | 15 |
| 4. Risultati della prova | 16 |
| Conclusioni | 18 |
| APPENDICI A&B: SPECIFICHE BATTERIE ED APPARECCHIATURE | |
| Tabella A1 : Data profile batterie..... | 19 |
| <i>Tabella A1 : Data profile batterie.....</i> | 20 |
| Tabella B.1 : Test Bench #1..... | 20 |
| Tabella B.2 : Test Bench #2..... | 22 |
| APPENDICE C : DEFINIZIONI E PROCEDURE DI PROVA | 23 |
| <i>Ciclo standard (SC).....</i> | 24 |
| <i>Prova di capacità a corrente costante</i> | 24 |
| <i>Prova di capacità in condizioni dinamiche e prove vita</i> | 24 |
| APPENDICE D :ESTRATTO ALLA TESI “ Studio e sperimentazioni di un sistema di accumulo misto per una vettura a trazione elettrica”, Alessandro Thoma, Relatore: Prof. Leone Martellucci, Università “La Sapienza”. | 31 |

Sommario

Il rapporto che segue è relativo all'attività svolta dall'ENEA nell'ambito dell'Obiettivo A, con riferimento all'ultimo capoverso:

“Nel campo dell'accumulo misto, la disponibilità di un accumulo misto a 48V e dei ciclatori del laboratorio prova batterie, permetterà l'esecuzione (secondo anno) di prove vita con e senza supercondensatori, necessarie per le valutazioni economiche (incremento di durata delle batterie) di questa tipologia d'accumulo elettrico, che è particolarmente adatto per il retrofit/repowering di batterie piombo-acido.

Quella dell'accumulo misto è una tecnologia già approfondita nell'ambito delle attività di ricerca svolte nelle precedenti annualità dell'Accordo di Programma, sia dal punto di vista delle interfacce di potenza (Uni Padova) che delle valutazioni tecnico-economiche (Politecnico di Milano).

Rimanevano da verificare le ipotesi fatte circa l'incremento atteso della durata di batterie piombo-acido, incremento ottenuto proprio grazie al livellamento del prelievo di corrente ad opera dei supercondensatori

Oggetto dell'attività dell'anno corrente è stato quindi di quantificare questo incremento e verificare contemporaneamente l'ipotizzata correlazione tra vita utile della batteria e potenza di picco prelevata dalla batteria piombo-acido (vedi “Studio di sistemi avanzati di accumulo di energia quali supercondensatori e sistemi di accumulo misti (batterie + supercondensatori, Tironi, L. Piegari, V. Musolino, S. Grillo,” Report RdS/2011/34).

La verifica è stata eseguita caratterizzando pacchi batterie piombo-acido con cicli di carica/scarica corrispondenti a due diverse configurazioni: “pura” (cioè solo batterie) ed “assistita” da un banco di supercondensatori.

A tal fine sono stati preparati due pacchi batterie uguali e sono stati sottoposti, nello stesso periodo ed in identiche condizioni ambientali, a “prova vita”, portandoli cioè “a fine vita utile”¹.

Il profilo di carico del primo pacco corrispondeva a quello di un accumulo elettrico veicolare in configurazione “pura”, il profilo di carico del secondo pacco corrispondeva a quello di un accumulo elettrico veicolare in configurazione “assistita”. A tal fine, il valore del picco di potenza per il pacco in configurazione “assistita” è stato perciò posto uguale alla metà del picco di potenza del pacco in configurazione “pura”. Inoltre nel profilo di carico del pacco batterie in configurazione “assistita” non ci sono fasi di recupero_energia/ricarica in frenata, perché è stato ipotizzato che tutto il recupero venisse fatto con i SC.

Il tutto, naturalmente, a parità di energia scaricata, per ciclo, dai due pacchi².

Le prove sono state eseguite come sopra detto e diversamente da quanto ipotizzato nel piano d'attività, perché:

1. in questo modo se ne è assicurato uno svolgimento più regolare, svincolato da ogni problematica inerente il corretto funzionamento dell'interfaccia di potenza dei SC,

¹ Per le batterie automobilistiche vige la convenzione che una batteria si considera “morta” quando la sua capacità si è ridotta del 25% rispetto al valore nominale

² Si osservi che questa condizione è svantaggiosa, nel confronto, per l'accumulo “batterie+SC”, che gode di una maggiore capacità di recupero energia in frenata e quindi percorre lo stesso ciclo scaricando meno il pacco batteria

2. si è ridotto alla sola potenza di picco (prelevata dalla batteria) il numero delle variabili in gioco che influenzano la vita utile della batteria.

La sperimentazione è stata compiuta presso i Laboratori ENEA UTTEI-VEBIM di Casaccia (RM), utilizzando le apparecchiature di laboratorio costituite da convertitori AC/DC bidirezionali.

1 Introduzione

Il Presente report si inquadra nella Ricerca di Sistema Elettrico svolta dall'ENEA nell'ambito del relativo Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA.

La Ricerca di Sistema ha come obiettivo l'innovazione del Sistema Elettrico per migliorarne l'economicità, la sicurezza e la compatibilità ambientale, assicurando al Paese le condizioni per uno sviluppo sostenibile.

Nell'Accordo di Programma sono previsti temi di ricerca fondamentale e studi di carattere sistemico e prenormativo a totale beneficio dell'utente di sistema elettrico nazionale.

Le ricerche sono condotte dall'ENEA in collaborazione con le principali Istituzioni universitarie nazionali e con le partecipate SOTACARBO e FN Nuove Tecnologie Avanzate.

L'accordo è meglio definito da un piano annuale di realizzazione, suddiviso in Attività. Ogni attività ha un contesto scientifico-programmatico di riferimento, suddiviso in aree e tematiche di ricerca, in ognuna delle quali sono definiti specifici progetti di ricerca, a loro volta suddivisi in obiettivi da perseguire.

Nel dettaglio, l'inquadramento programmatico completo del presente report è il seguente:

- Accordo di Programma MSE-ENEA: Attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale.
- Piano Triennale 2009-2011.
- Piano annuale di realizzazione Terza annualità (2011-2012): da realizzarsi tra l'ottobre 2011 ed il settembre 2012.
- Attività: Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto.
- Area di riferimento: razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica.
- Tematica di ricerca: risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto elettrici.
- Progetto 3.5: studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto.
- Obiettivo A: Sviluppo di moduli integrati, completi di BMS ed accumulo misto.

In particolare, il report tratta del cosiddetto "accumulo misto", batterie piombo-acido + supercondensatori.

Le batterie piombo-acido rappresentano la tecnologia di accumulo maggiormente consolidata e sperimentata. I suoi principali vantaggi riguardano sia la ormai diffusa conoscenza delle prestazioni di tali sistemi di accumulo, sia i criteri di progettazione degli stessi al fine di realizzare una batteria con specifiche caratteristiche meccaniche/elettriche. Inoltre, la possibilità di utilizzare tali sistemi in configurazioni serie e parallelo senza particolari circuiti di monitoraggio e bilanciamento rappresenta un notevole vantaggio nelle applicazioni industriali di potenza.

La vera limitazione a confronto con gli accumuli elettrochimici più innovativi risiede nella bassa densità di energia di tali dispositivi, svantaggio particolarmente significativo negli usi di trazione, fatta eccezione per alcune categorie (muletti e trattori per l'industria).

L'energia estraibile da tali dispositivi è fortemente funzione del profilo di corrente di scarica, sia della corrente media che della corrente efficace, Legge di Peukert, e la potenza di picco della batteria diminuisce con il progredire della scarica, per cui un veicolo elettrico a trazione autonoma, equipaggiato con batterie piombo-acido, ha prestazioni decrescenti durante l'uso, in special modo se il ciclo d'utilizzo è ricco di transitori di accelerazione e decelerazione.

Dualmente i sistemi di accumulo elettrostatici basati sulla tecnologia a supercondensatore presentano a fronte di un limitato accumulo di energia in termini di densità di energia, un'elevata densità di potenza e un elevatissimo numero di cicli di vita (sino a 1 milione).

La possibilità di disporre di sistemi di accumulo di potenza da accoppiare ai sistemi di accumulo tradizionale piombo acido permette quindi di realizzare la funzione di peak-shaving al fine di raggiungere i benefici sopra elencati.

A questi benefici se ne aggiunge un altro, e cioè l'allungamento della vita utile della batteria che deriva dalla riduzione degli picchi di corrente erogata (ed assorbita, nel recupero in frenata), riduzione ottenuta proprio grazie all'ibridazione del sistema: così come in un veicolo ibrido la presenza della batteria riduce i picchi di potenza del motore, in un accumulo misto lo stesso fanno i supercondensatori nei confronti della batteria.

E' ben noto, infatti, che tanto maggiore è la possibilità del dispositivo di accumulo elettrochimico di funzionare a corrente costante, tanto più la vita attesa, in termini di cicli di vita, si avvicina ai valori dichiarati dai costruttori.

Questo effetto positivo fu evidenziato una decina di anni orsono da prove condotte in ENEA nell'ambito di un programma di ricerca europeo.

Si trattava di una prova vita di un sistema di accumulo costituito da una batteria da 36 V/20 Ah, (batteria usata per un ibrido "minimo", la Toyota Crown, non commercializzata in Europa) assistita da un banco di supercondensatori, Fig.1, e per confronto una analogo prova vita per un'altra batteria, identica alla prima, testata da sola.



Fig. 1 – Andamento nel tempo della capacità dei due sistemi d’accumulo

I risultati della prova vita delle due batterie sono rappresentati in Fig.2: come può vedersi la presenza del banco di supercondensatori permette di migliorare di un fattore 2.5 la vita della batteria, che raggiunge lo stesso degrado in termini di capacità estraibile dopo un numero di ciclaggi ben maggiore rispetto alla batteria da sola, 160 cicli contro 66 cicli. Questo ha evidenti riflessi positivi sul costo “a fine vita” del sistema “batteria + supercondensatori.

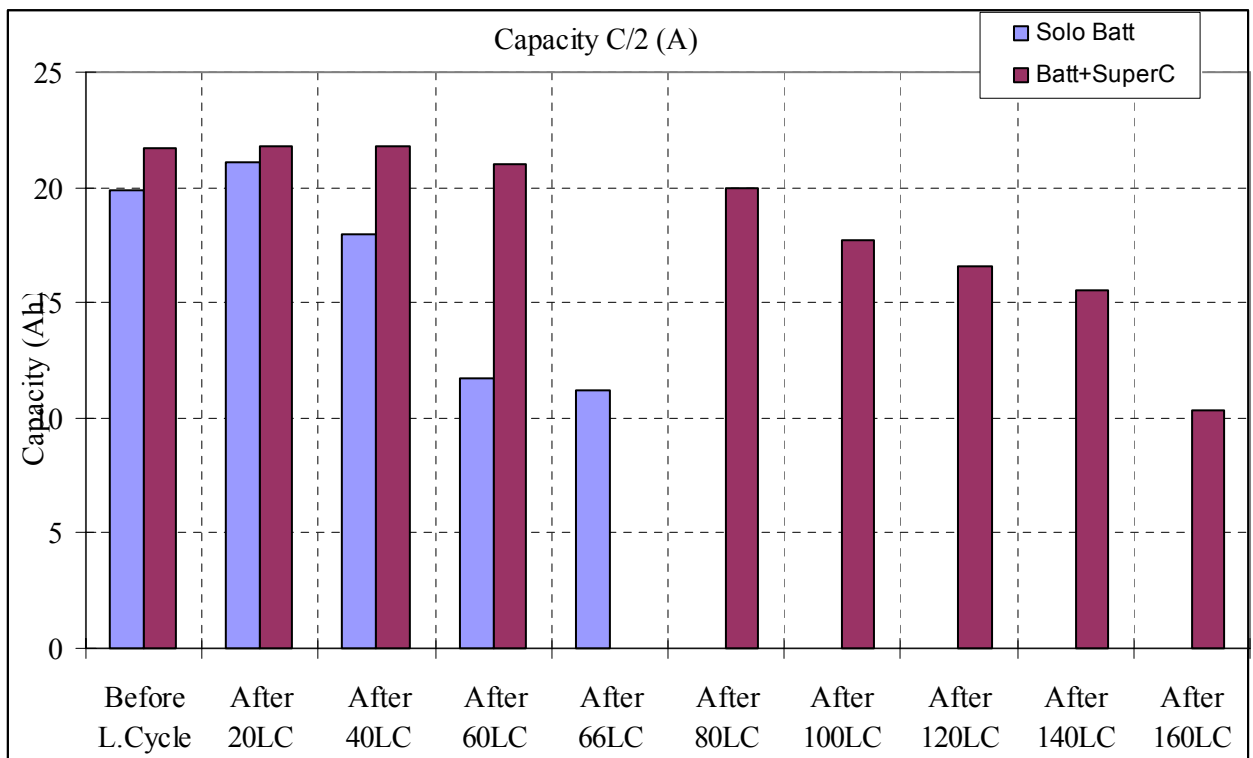


Fig. 2 – Andamento nel tempo della capacità dei due sistemi d’accumulo

Nel corso delle attività della Ricerca di Sistema dello scorso anno, è stata poi effettuata un’analisi sullo stato dell’arte degli studi sull’invecchiamento delle batterie, con particolare riferimento agli accumuli misti

piombo-SC (“Studio di sistemi avanzati di accumulo di energia quali supercondensatori e sistemi di accumulo misti (batterie + supercondensatori, Tironi, L. Piegari, V. Musolino. S. Grillo,” Report RdS/2011/34).

Dallo studio risulta che non è attualmente possibile utilizzare un modello di invecchiamento per dimensionare l’insieme batterie-supercondensatori in modo da garantire una maggior durata delle batterie. E’ stata quindi riproposta un’ipotesi di correlazione tra vita utile della batteria e potenza di picco prelevata dalla batteria piombo-acido. L’ipotesi deriva da una serie di prove di durata effettuate in ENEA su batterie dello stesso tipo (VRLA) ma di capacità diversa, sottoposte a cicli tipici della trazione elettrica stradale, ma diversi tra di loro (solo elettrico per la prima batteria, ibrido “power assist” per la seconda).

L’analisi dei risultati delle due campagne di prova perviene alla funzione

$$y = 50350 \exp(-0.006366x) \quad (0.1)$$

rappresentata in Fig 3:

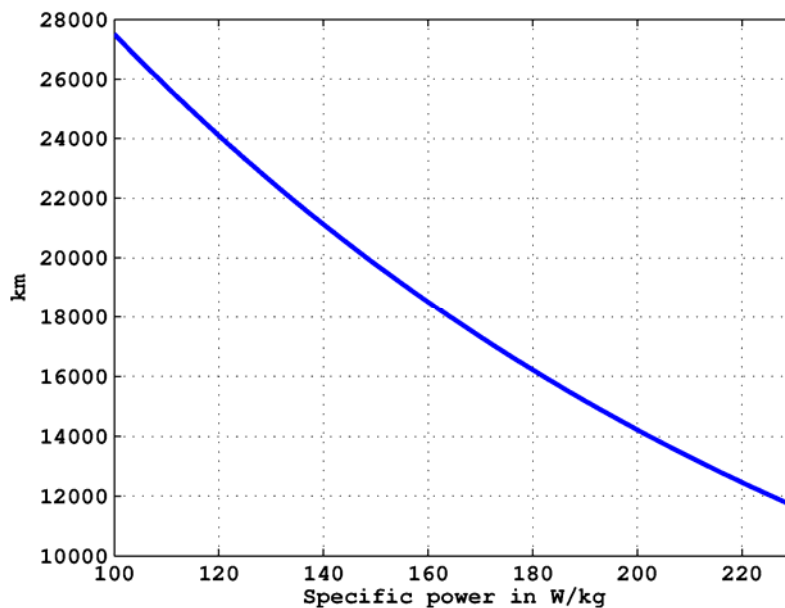


Figura 3

Una curva come quella appena descritta, purché ottenuta con riferimento a prove fatte su pacchi batteria uguali, sottoposti ad un uguale ciclo di prove, può essere molto utile nel dare indicazioni sul dimensionamento e sulla fattibilità economica della realizzazione di un sistema ibrido batterie-supercondensatori per l’alimentazione di un veicolo elettrico.

Oggetto del presente rapporto è quindi l’illustrazione della campagna di prove svolta durante la corrente annualità al fine della validazione delle ipotesi fatte l’anno scorso e della quantificazione dei risultati.

La verifica è stata eseguita caratterizzando pacchi batterie piombo-acido con cicli di carica/scarica corrispondenti a due diverse configurazioni: “pura” (cioè solo batterie) ed “assistita” da un banco di supercondensatori.

A tal fine sono stati preparati due pacchi batterie uguali e sono stati sottoposti, nello stesso periodo ed in identiche condizioni ambientali, a “prova vita”, portandoli cioè “a fine vita utile”³.

La sperimentazione è stata compiuta presso i Laboratori ENEA UTTEI-VEBIM di Casaccia (RM), utilizzando le apparecchiature del laboratorio costituite da convertitori AC/DC bidirezionali.

I risultati della campagna di prove confermano le ipotesi iniziali, ma evidenziano pure la stretta dipendenza dei risultati stessi dalla tipologia delle batterie e dalle specifiche di missione.

Di conseguenza, i valori numerici e le correlazioni ottenute con le suddette prove, diversi da quelli ottenuti con le prove precedenti, non valgono in generale, e le prove svolte andrebbero ripetute nel caso di applicazioni ad un progetto specifico.

³ Per le batterie automobilistiche vige la convenzione che una batteria si considera “morta” quando la sua capacità si è ridotta del 25% rispetto al valore nominale

2 Set-up sperimentale

2.1 Razionale della prova

Il set di prove prescelto è mirato alla verifica comparativa della durata nel tempo delle prestazioni di pacchi batterie piombo-acido per veicoli elettrici a batteria, nelle due configurazioni “solo piombo” e “piombo + supercondensatori”, di seguito denominata “assistita”.

Il test parametrico comprende pertanto solo le classiche prove di capacità a vari regimi.

Il ciclo vita è derivato, com'è d'uso, dalla parte urbana del ciclo d'omologazione NEDC. Per ridurre i tempi della sperimentazione e renderli compatibili con la durata del programma, i valori delle potenze specifiche (per unità di peso) massime richieste all'accumulo sono stati raddoppiati rispetto a quelli previsti nella procedura EUCAR.

Per rappresentare poi il livellamento (parziale) del carico permesso dai supercondensatori nel caso del pacco batteria “assistito”, per questo pacco il valore del picco di potenza è stato perciò posto uguale alla metà del picco di potenza del pacco in configurazione “pura” (l'altra metà del picco figura come assorbita dai supercondensatori).

Inoltre nel profilo di carico del pacco batterie in configurazione “assistita” non ci sono fasi di recupero_energia/ricarica in frenata, perché è stato ipotizzato che tutto il recupero venisse fatto con i supercondensatori (Allegato 1).

Il tutto, naturalmente, a parità di energia scaricata, per ciclo, dai due pacchi.

Stante le caratteristiche delle apparecchiature utilizzate per la riproduzione al banco dei cicli elettrici, che possono essere programmate per ottenere una successione di fasi di carica e scarica a potenza costante, il diagramma del carico è stato trasformato in un diagramma a gradini, Fig.4 :

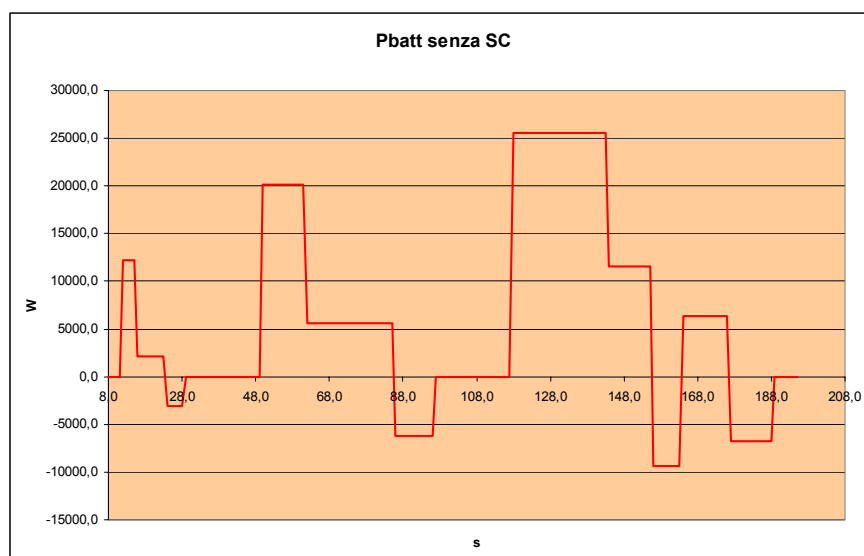


Figura 4

Si ottiene così in definitiva una sequenza di fasi a potenza positiva dove la batteria eroga, corrispondenti alle accelerazioni, e di fasi a potenza negativa, dove la batteria si ricarica, corrispondenti ai periodi di recupero in frenata.

Nella batteria "assistita dai SC", si avrà solo una sequenza di fasi a potenza positiva dove la batteria eroga, corrispondenti alle accelerazioni, Fig.5.

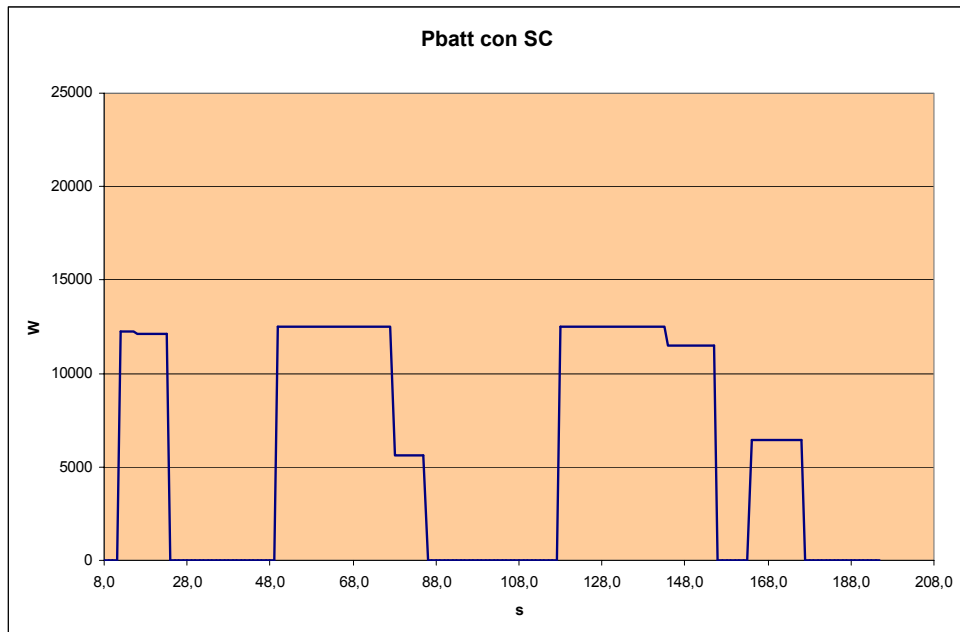


Figura 5

In entrambi i casi l'energia erogata dalla batteria è di 302 Wh

2.2 Prerequisiti e preparazione del test

I moduli sfusi da 12 V (n.6) sono stati selezionati e testati individualmente per poi essere assemblati e strumentati dall'ENEA in due pacchi da 36 V nominali, Fig. 4.



Figura 6: Assemblaggio dei pacchi e collegamento al ciclatore

Il criterio di selezione è stato il seguente: un modulo è ritenuto difettoso, oltre che per difetti palesi, quando la sua tensione, alla fine della scarica, differisca di più del 10% della tensione media del gruppo dei moduli in buone condizioni. Una volta avviata la prova, i moduli rivelatisi difettosi durante i test parametrici (uno per pacco) sono stati scartati, procedendo al ricalcolo dei parametri di prova sul pacco residuo.

La prova è stata eseguita a temperatura ambiente

Le caratteristiche dei moduli sono riportate nei "Data Profile" forniti dai costruttori (Appendice A, Tabella A1).

2.3 Equipaggiamento di prova

L'equipaggiamento di prova che è stato utilizzato è riportato nella tabella 1 e descritto in Appendice B, Tabelle B.1/2.

| Table 1. Test equipment description. | | | | |
|---|-----------------|----------------------|--|------------------|
| Type | Built by | Ratings | Remarks | Reference |
| Battery cycler E-8135 Test Bench 1 | ELTRA | 0-110 V 6-600 A | | Table B.1 |
| Battery cycler E-8376 Test Bench 2 | ELTRA | 0-330 V 1.5-400 A | | Table B.2 |
| data logger 500a | Keithley | | Voltage and temperature measurements | |

I dati sperimentali sono stati registrati dai ciclatori ELTRA e dal sistema di acquisizione dati Keithley.

Punti di misura

Corrente : misurata direttamente con uno shunt nel ciclatore.

Tensione di batteria: misurata direttamente ai morsetti di batteria.

Tensioni parziali : verranno misurate le 3 tensioni parziali di ogni pacco, tramite il SAD Keithley

Tensione a circuito aperto e resistenza interna: per poter seguire variazioni veloci di queste grandezze, è stato utilizzato il Keithley, grazie alla sua frequenza di acquisizione (25 Hz vs. 0.2 Hz).

3. Sequenza di prova

Si riporta di seguito la sequenza di prove che è stata utilizzata.

| Sezione | Test | Temp. |
|---|---|-------|
| Ispezione iniziale | | RT |
| Parameter Test (inizialmente, poi ogni 50 cicli ed a fine vita) | | |
| Scarica a corrente costante | SC | RT |
| | C/5 (100% DOD) + SCH | RT |
| Scarica a corrente costante | SC | RT |
| | C/2 (100% DOD) + SCH | RT |
| Scarica a corrente costante | SC | RT |
| | C/1 (100% DOD) + SCH | RT |
| Autoscarica | SC | RT |
| | C/3 (100% DOD) + SCH | RT |
| | Open circuit for 48 h | RT |
| | C/3 (100% DOD) + SCH | RT |
| Resistenza interna e tensione a circuito aperto | SC | RT |
| | Intervallo di scarica (1-C impulso, 30") e carica 1-C, 180" | RT |
| | Scarica con C/3 + Pausa I cicli verranno ripetuti fino al raggiungimento della tensione di cut off | |

| Ciclaggio ripetuto | | |
|---------------------------|--|----|
| | <p>Il ciclo utilizzato è stato derivato dalla parte urbana del ciclo ECE 15 ed è descritto in allegato 1.</p> <p>I cicli saranno ripetuti in modo da estrarre l'80% della capacità nominale e quindi il ciclatore passerà alla fase di carica.</p> <p>Si passerà alla fase di carica anche al raggiungimento della tensione minima operativa. Il raggiungimento della tensione minima non superabile costringerà invece al riarmo manuale del dispositivo.</p> | RT |

I cicli verranno ripetuti finchè la batteria sarà in grado di completarlo in ogni sua parte, con un "failure time" massimo di 9 secondi.

4. Risultati della prova

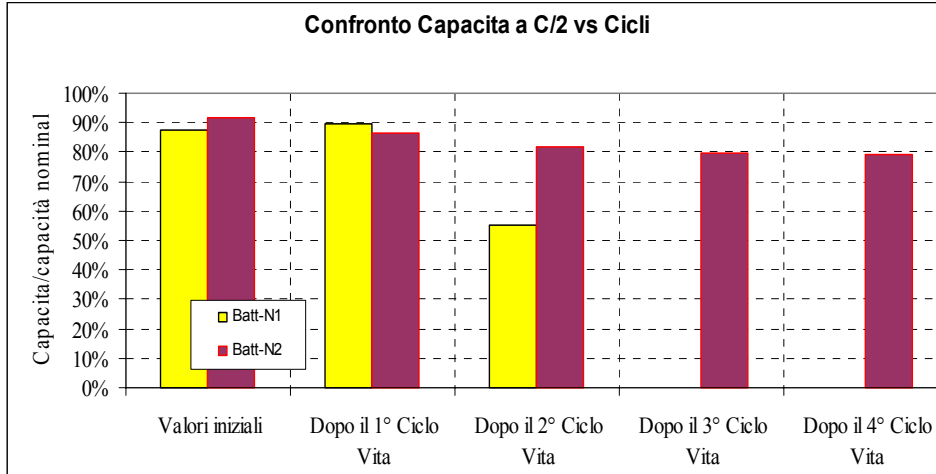


Figura 5

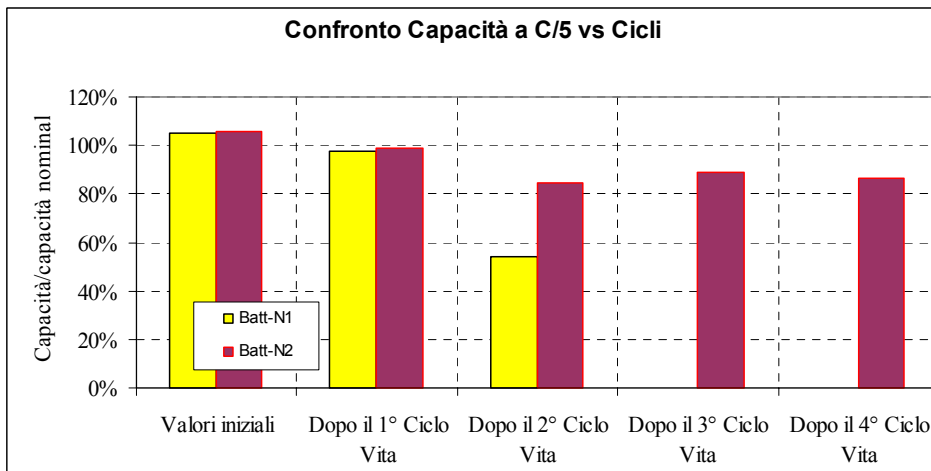


Figura 6

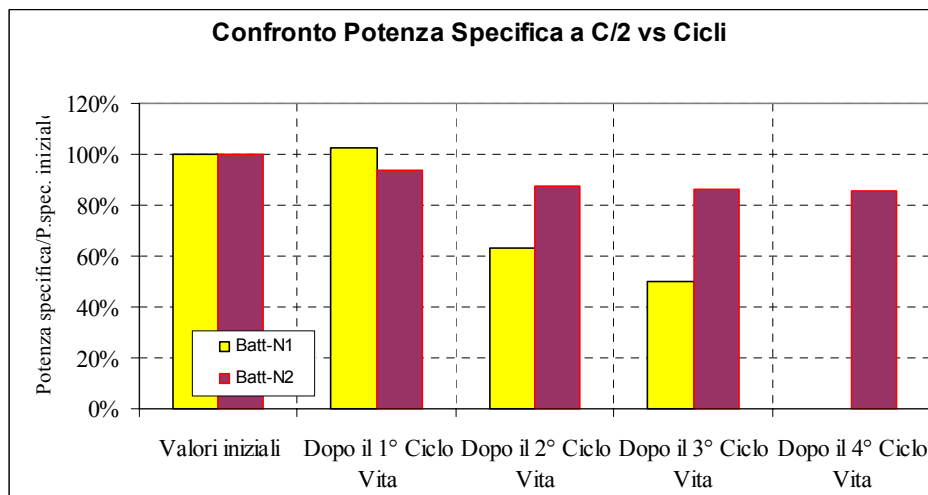


Figura 7

I risultati delle due prove vita sono rappresentati nelle FFgg. 6 e 7.

Come può vedersi, le batterie sottoposte al ciclo di prova che riproduce il funzionamento delle stesse in configurazione “assistita” sono sopravvissute ad un numero di cicli 3-4 volte maggiore delle altre.

Volendo poi esprimere la relazione tra durata delle batterie e stress cui le stesse sono sottoposte, avendo testato solo due pacchi sembrerebbe che una interpolazione non sia possibile, in quanto basata su due soli punti.

Tuttavia, altri due punti sono stati aggiunti con considerazioni di natura teorica. Infatti dai diagrammi di Ragone per le batterie al Pb-acido si può considerare che la densità massima di potenza sia intorno ai 300 W/kg. Ciò significa che il terzo punto da utilizzare per l’interpolazione dovrebbe essere il punto di coordinate (300, 0). Il quarto punto si può ipotizzare nel caso di bassissimo utilizzo delle batterie, cioè per valori prossimi all’origine dell’asse x. Il numero di km che la batteria può garantire sarà sì elevato, ma non infinito. Il quarto punto, per pura ipotesi teorica, può essere, quindi, posto alle coordinate (0, 500). Interpolando questi quattro punti con la medesima funzione esponenziale utilizzata precedente si perviene alla funzione:

$$y = 500 \exp(-0,031 x) \quad (0.2)$$

rappresentata in Fig. 8, con valori dei coefficienti analoghi ma diversi da quelli della prima esperienza.

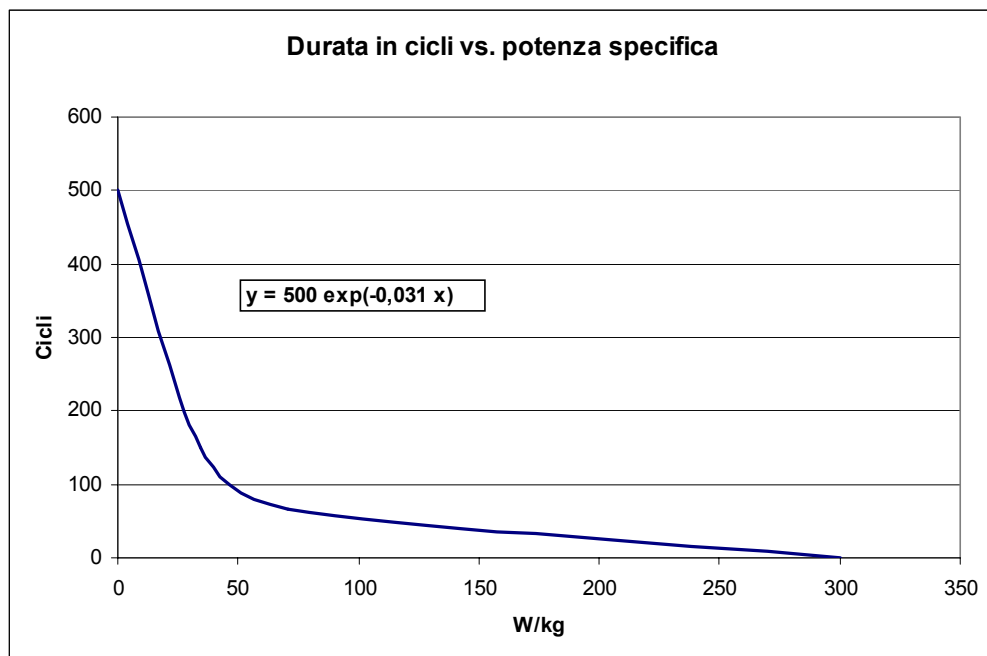


Figura 8

Conclusioni

I risultati della sperimentazione confermano:

1. un incremento di durata delle batterie piombo-acido “assistite” circa uguale a quello verificato in prove precedenti (vedi Report “Studio di sistemi avanzati di accumulo di energia: progetto e realizzazione di un sistema di accumulo misto batterie-supercondensatori per microcar elettrica” Ing. E.Rossi, Ing. A.Puccetti, Ing. F.Smargiasse”, Report RdS/2011/234), dell’ordine quindi di 2-3 volte;
2. l’esistenza di una correlazione di tipo esponenziale tra potenza di picco prelevata dalla batteria e durata della stessa, con coefficienti però diversi da quelli trovati in passato;
3. la necessità, quindi, di prevedere l’esecuzione di prove vita “di confronto” analoghe, qualora si voglia quantificare il beneficio economico derivante dall’applicazione di questa tecnologia a casi specifici. Nel caso, ad esempio, di un muletto sollevatore questo è equipaggiato con batterie piombo-acido di caratteristiche diverse da quelle provate nell’ambito di questa sperimentazione, che sono sottoposte, per di più, ad un profilo di carico anch’esso ben diverso da quello utilizzato nell’ambito della presente attività.

A completamento del rapporto, si riporta in appendice, App.D, il risultato di una sperimentazione al banco eseguita su di un veicolo “elettrico puro”, provato sul banco a rulli dell’ENEA in due diverse configurazioni, con le sole batterie e con le stesse batterie assistite da un banco di SC. L’incremento di autonomia ottenuto nel secondo caso è molto consistente. Questo costituisce un ulteriore punto di forza dell’accumulo “misto”, perché evidenzia a monte una corrispondente riduzione del consumo energetico specifico del veicolo.

Si osservi come quanto sopra detto consente anche l’utilizzo, a parità di autonomia richiesta al veicolo, di un pacco batterie piombo-acido più piccolo, compensando (in parte o completamente) il maggior costo dovuto ai SC ed all’elettronica di interfacciamento batterie-SC.

L’incremento di durata di un pacco batterie più piccolo, e quindi più sollecitato, sarebbe però minore o nullo.

Mantenendo lo stesso pacco batteria, si avrebbe invece, sicuramente, un risparmio “a fine vita” dell’accumulo elettrico, perché l’incremento di durata della batteria consente di effettuare un minor numero di sostituzioni della stessa, riducendo i costi d’acquisto delle stesse ed anche costi e tempi persi dell’operazione di sostituzione. Con un opportuno bilanciamento dei due interventi, ottimizzando cioè il dimensionamento dell’accumulo misto (e questo può esser fatto solo se si dispone di dati sperimentali sulla durata delle batterie in funzione dei profili di carico), si può in definitiva massimizzare il rapporto benefici/costi della soluzione proposta per un veicolo specifico.

APPENDICI A&B: SPECIFICHE BATTERIE ED APPARECCHIATURE

Tabella A1 : Data profile batterie

| Data Profile | | | |
|---|-----------------------------|-----------------|---|
| General Data | | | |
| Name of battery | HZY-EV12-60 | | |
| Manufacturer | HAZE | | |
| Type of battery | | | |
| Size (cell, module, system) | | | |
| Manufacturer Data (modules / cells) | | | |
| Dimensions | 260x168x180 | mm | |
| Weight | 21.5 | kg | |
| Volume | 7.9 | dm ³ | |
| Rated voltage | 12 | V | |
| OCV (0% DOD) | | V | |
| Operating Temperature | -20°C ÷ + 50°C | °C | |
| Cut-off voltage | constant current | Min 1.5 V/Cell | V |
| | constant power | Min 1.5 V/Cell | V |
| Capacity (T = 23 °C) | 60 Ah (5h rate 1.70 V/Cell) | Ah | |
| Specific Energy density (T=23 °C) | | Wh/kg | |
| Volumetric Energy density (T=23 °C) | | Wh/l | |
| Max permanent discharge current | | A | |
| Max discharge current for 30 seconds | | A | |
| Temperature compensation of the charging voltage (Vc) | | mV/°C | |

Tabella B.1 : Test Bench #1

| | |
|--------------------------------|----------------|
| Manufacturer | ELTRA |
| Type | BATTERY CYCLER |
| Code | E-8135 |
| General characteristics | |
| Nominal battery voltage | 110 V |
| Charge/discharge current | 6-600 A |
| Maximum charge voltage | 150 V |

| | |
|------------------------------------|---|
| Ripple filter | LC circuit |
| Current ripple | 2 A (with internal resistance of 1 Ohm) |
| Short circuit protection | 650 A relay and 900 A fuse |
| Automatic operation | with control software S_276-35 |
| Power requirements | 3 x 380 V/ 50 Hz |
| Output tolerances | |
| Voltage | < 0.5 % |
| Current | < 0.5 % |
| Internal meters sensitivity | |
| Voltmeter | 0.1 V |
| Ammeter | 0.1 A |
| Ampere-hour meter | 0.1 Ah |
| Interfaces and measurements | |
| Selection circuits for | Current and Voltage |
| Measuring circuits for | Current, voltage and temperatures |
| Circuits sensitivity | 16000 points with galvanic protection |
| Arranged with interface for | Remote control Unit (PC) with control software S_276-35 |

Tabella B.2 : Test Bench #2

| | |
|------------------------------------|---|
| Manufacturer | ELTRA |
| Type | BATTERY CYCLER |
| Code | E-8376 |
| General characteristics | |
| Nominal battery voltage | 330 V |
| Charge/discharge current | 1.5 - 400A |
| Maximum charge voltage | 330 V |
| Ripple filter | LC circuit |
| Current ripple | 2 A (with internal resistance of 1 Ohm) |
| Short circuit protection | 200 A relay and 450 A fuse |
| Automatic operation | with control software S_276-35 |
| Power requirements | 3 x 380 V/ 50 Hz |
| Output tolerances | |
| Voltage | < 0.5 % |
| Current | < 0.5 % |
| Internal meters sensitivity | |
| Voltmeter | 0.1 V |
| Ammeter | 0.1 A |
| Ampere-hour meter | 0.1 Ah |
| Interfaces and measurements | |
| Selection circuits for | Current and Voltage |
| Measuring circuits for | Current, voltage and temperatures |
| Circuits sensitivity | 16000 points with galvanic protection |
| Arranged with interface for | Remote control Unit (PC) with control software S_276-35 |

APPENDICE C : DEFINIZIONI E PROCEDURE DI PROVA

Ciclo standard (SC)

Cicli di scarica/carica con i seguenti valori:

Ciclo di carica (SCH) : secondo la caratteristica del costruttore

Ciclo di scarica (DSCH): eseguita a I costante, pari al valore dato dal costruttore per la scarica in 5 ore, ed indicato con il simbolo C/5.

Prova di capacità a corrente costante

Misura della capacità fornita al secondo di due cicli di scarica a corrente costante, il primo ciclo standard, il secondo alla corrente di prova

Il criterio di fine prova è la tensione minima, variabile ai vari regimi di corrente.

Prova di capacità in condizioni dinamiche e prove vita

Le prove in condizioni dinamiche cercano di riprodurre il comportamento della batteria del veicolo, in un ciclo di funzionamento che, a differenza dei cicli a corrente ed a potenza costante illustrati precedentemente, si avvicini al funzionamento reale, caratterizzato da una variabilità spinta dei carichi.

A questo scopo occorre evidentemente partire dalle caratteristiche di un ciclo urbano prestabilito e dalle caratteristiche di un veicolo ben definito, ed introdurre queste caratteristiche in un modello del comportamento su strada di un veicolo elettrico, ricavandone il diagramma delle potenze assorbite in funzione del tempo.

Il ciclo di funzionamento urbano comunemente utilizzato in Europa per la prova dei veicoli elettrici e dei componenti degli stessi, è derivato dal ciclo di omologazione utilizzato per i veicoli con motorizzazione termica, denominato ECE 15 + EUDC, costituito da quattro cicli urbani ripetuti, ciascuno costituito da tre microcicli a velocità massima crescente (Vmax = 15, 32, 50 km/h), e da un ciclo suburbano (Vmax = 120 km).

Nel nostro caso, per la prova vita della batteria si utilizzerà il singolo microciclo urbano, Fig.1.

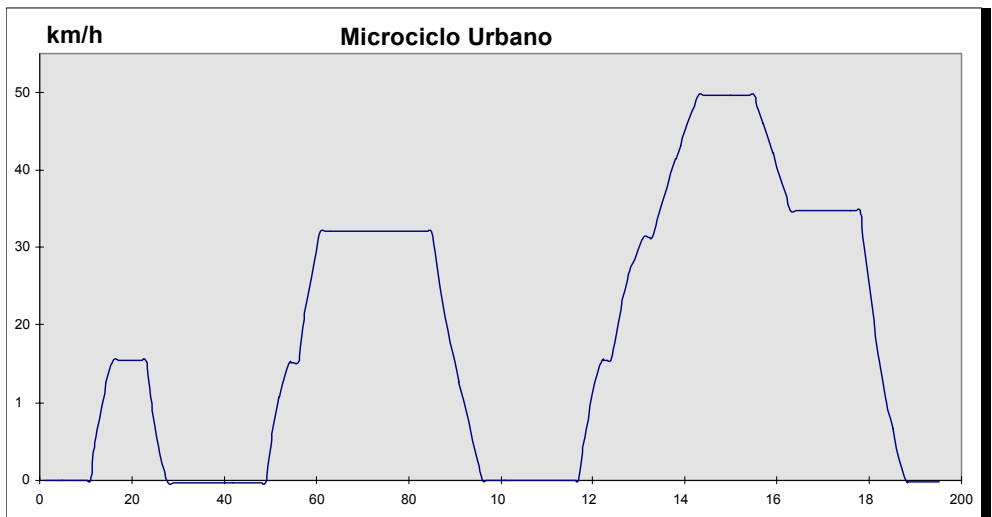


Figura 1

Le caratteristiche del veicolo di riferimento sono riportate in tabella:

| Peso pieno carico (kg) | a | Peso batteria (kg) | Sezione frontale (mq) | Resistenza aerodinamica (Cx) | Resistenza di rotolamento (kg/tonn) | Rendimento di trasmissione |
|------------------------|---|--------------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| 2300 | | 360 | 1,8 | 0.33 | 10 | 0.9 |

Stante le caratteristiche delle apparecchiature utilizzate per la riproduzione al banco dei cicli elettrici, che possono essere programmate per ottenere una successione di fasi di carica e scarica a potenza costante, il diagramma del carico è stato trasformato in un diagramma a gradini, Fig.2 :

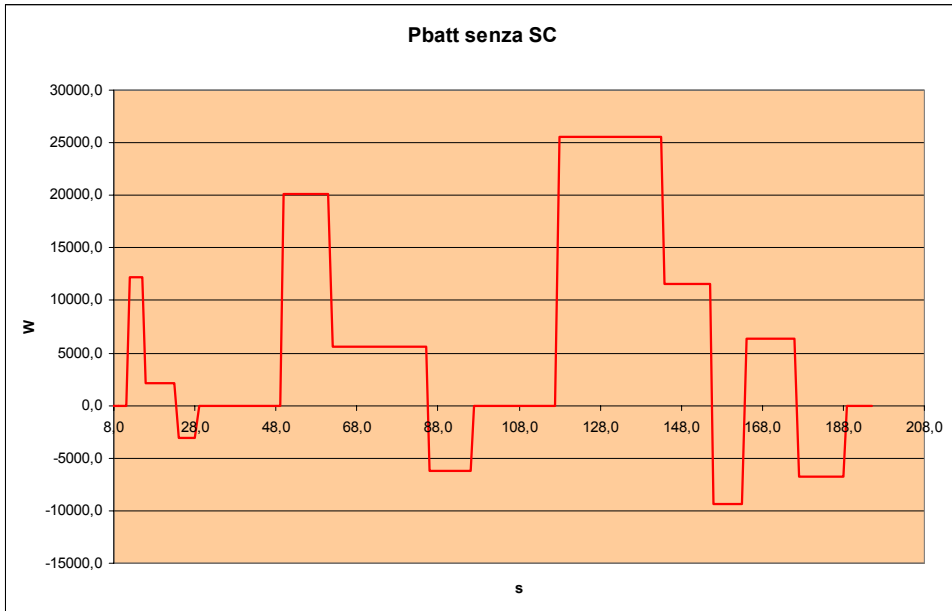
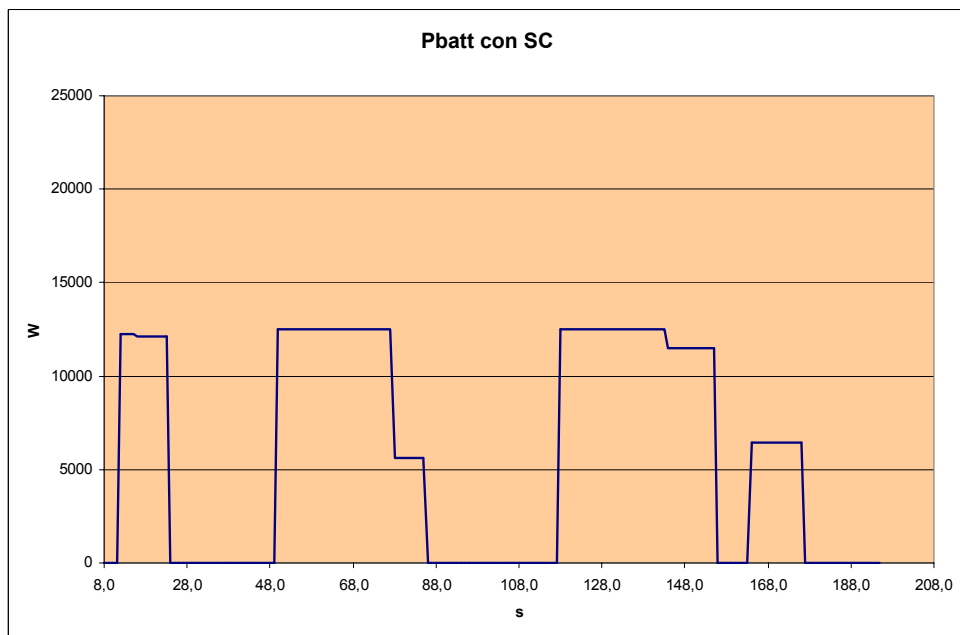


Figura 3

Si ottiene così in definitiva una sequenza di fasi a potenza positiva dove la batteria eroga, corrispondenti alle accelerazioni, e di fasi a potenza negativa, dove la batteria si ricarica, corrispondenti ai periodi di recupero in frenata. Nella batteria “assistita dai SC”, si avrà solo una sequenza di fasi a potenza positiva dove la batteria eroga, corrispondenti alle accelerazioni.



In entrambi i casi l'energia erogata dalla batteria è di 302 Wh

Nella tabella sottoriportata le colonne dei valori sono quattro, due relative al profilo di potenza calcolato per la batteria non assistita, Ciclo 1, due utilizzate per la batteria assistita dai SC, Ciclo 2. I valori sono riportati sia in potenza assoluta che riferiti alle potenze specifiche (W/kg), così da potere eseguire prove dinamiche su pacchi batterie di qualsiasi peso.

| TIME | CICLO 1 | | CICLO 2 | |
|------|---------|------|---------|--------|
| | W | W/kg | W | W/kg |
| s | | | | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 12240 | 34 | 12240 | 34 |
| 13 | 12240 | 34 | 12240 | 34 |
| 14 | 12240 | 34 | 12240 | 34 |
| 15 | 12240 | 34 | 12240 | 34 |
| 16 | 2160 | 6 | 12140 | 33,722 |
| 17 | 2160 | 6 | 12140 | 33,722 |
| 18 | 2160 | 6 | 12140 | 33,722 |
| 19 | 2160 | 6 | 12140 | 33,722 |
| 20 | 2160 | 6 | 12140 | 33,722 |
| 21 | 2160 | 6 | 12140 | 33,722 |
| 22 | 2160 | 6 | 12140 | 33,722 |
| 23 | 2160 | 6 | 12140 | 33,722 |
| 24 | -3096 | -8,6 | 0 | 0 |
| 25 | -3096 | -8,6 | 0 | 0 |
| 26 | -3096 | -8,6 | 0 | 0 |
| 27 | -3096 | -8,6 | 0 | 0 |
| 28 | -3096 | -8,6 | 0 | 0 |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 31 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 32 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 33 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 34 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 35 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 36 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | |
|----|-------|------|-------|--------|
| 37 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 38 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 39 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 40 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 41 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 42 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 43 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 44 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 45 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 46 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 47 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 48 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 49 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 20088 | 55,8 | 12500 | 34,722 |
| 51 | 20088 | 55,8 | 12500 | 34,722 |
| 52 | 20088 | 55,8 | 12500 | 34,722 |
| 53 | 20088 | 55,8 | 12500 | 34,722 |
| 54 | 20088 | 55,8 | 12500 | 34,722 |
| 55 | 20088 | 55,8 | 12500 | 34,722 |
| 56 | 20088 | 55,8 | 12500 | 34,722 |
| 57 | 20088 | 55,8 | 12500 | 34,722 |
| 58 | 20088 | 55,8 | 12500 | 34,722 |
| 59 | 20088 | 55,8 | 12500 | 34,722 |
| 60 | 20088 | 55,8 | 12500 | 34,722 |
| 61 | 20088 | 55,8 | 12500 | 34,722 |
| 62 | 5616 | 15,6 | 12500 | 34,722 |
| 63 | 5616 | 15,6 | 12500 | 34,722 |
| 64 | 5616 | 15,6 | 12500 | 34,722 |
| 65 | 5616 | 15,6 | 12500 | 34,722 |
| 66 | 5616 | 15,6 | 12500 | 34,722 |
| 67 | 5616 | 15,6 | 12500 | 34,722 |
| 68 | 5616 | 15,6 | 12500 | 34,722 |
| 69 | 5616 | 15,6 | 12500 | 34,722 |
| 70 | 5616 | 15,6 | 12500 | 34,722 |
| 71 | 5616 | 15,6 | 12500 | 34,722 |
| 72 | 5616 | 15,6 | 12500 | 34,722 |
| 73 | 5616 | 15,6 | 12500 | 34,722 |
| 74 | 5616 | 15,6 | 12500 | 34,722 |
| 75 | 5616 | 15,6 | 12500 | 34,722 |
| 76 | 5616 | 15,6 | 12500 | 34,722 |
| 77 | 5616 | 15,6 | 12500 | 34,722 |
| 78 | 5616 | 15,6 | 5616 | 15,6 |
| 79 | 5616 | 15,6 | 5616 | 15,6 |

| | | | | |
|-----|-------|-------|-------|--------|
| 80 | 5616 | 15,6 | 5616 | 15,6 |
| 81 | 5616 | 15,6 | 5616 | 15,6 |
| 82 | 5616 | 15,6 | 5616 | 15,6 |
| 83 | 5616 | 15,6 | 5616 | 15,6 |
| 84 | 5616 | 15,6 | 5616 | 15,6 |
| 85 | 5616 | 15,6 | 5616 | 15,6 |
| 86 | -6192 | -17,2 | 0 | 0 |
| 87 | -6192 | -17,2 | 0 | 0 |
| 88 | -6192 | -17,2 | 0 | 0 |
| 89 | -6192 | -17,2 | 0 | 0 |
| 90 | -6192 | -17,2 | 0 | 0 |
| 91 | -6192 | -17,2 | 0 | 0 |
| 92 | -6192 | -17,2 | 0 | 0 |
| 93 | -6192 | -17,2 | 0 | 0 |
| 94 | -6192 | -17,2 | 0 | 0 |
| 95 | -6192 | -17,2 | 0 | 0 |
| 96 | -6192 | -17,2 | 0 | 0 |
| 97 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 98 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 99 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 101 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 102 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 103 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 104 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 105 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 106 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 107 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 108 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 109 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 110 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 111 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 112 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 113 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 114 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 115 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 116 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 117 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 118 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 119 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 120 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 121 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |

| | | | | |
|-----|-------|------|-------|--------|
| 122 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 123 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 124 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 125 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 126 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 127 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 128 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 129 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 130 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 131 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 132 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 133 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 134 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 135 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 136 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 137 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 138 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 139 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 140 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 141 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 142 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 143 | 25560 | 71 | 12500 | 34,722 |
| 144 | 11520 | 32 | 11520 | 32 |
| 145 | 11520 | 32 | 11520 | 32 |
| 146 | 11520 | 32 | 11520 | 32 |
| 147 | 11520 | 32 | 11520 | 32 |
| 148 | 11520 | 32 | 11520 | 32 |
| 149 | 11520 | 32 | 11520 | 32 |
| 150 | 11520 | 32 | 11520 | 32 |
| 151 | 11520 | 32 | 11520 | 32 |
| 152 | 11520 | 32 | 11520 | 32 |
| 153 | 11520 | 32 | 11520 | 32 |
| 154 | 11520 | 32 | 11520 | 32 |
| 155 | 11520 | 32 | 11520 | 32 |
| 156 | -9360 | -26 | 0 | 0 |
| 157 | -9360 | -26 | 0 | 0 |
| 158 | -9360 | -26 | 0 | 0 |
| 159 | -9360 | -26 | 0 | 0 |
| 160 | -9360 | -26 | 0 | 0 |
| 161 | -9360 | -26 | 0 | 0 |
| 162 | -9360 | -26 | 0 | 0 |
| 163 | -9360 | -26 | 0 | 0 |
| 164 | 6408 | 17,8 | 6408 | 17,8 |

| | | | | |
|-----|-------|-------|------|------|
| 165 | 6408 | 17,8 | 6408 | 17,8 |
| 166 | 6408 | 17,8 | 6408 | 17,8 |
| 167 | 6408 | 17,8 | 6408 | 17,8 |
| 168 | 6408 | 17,8 | 6408 | 17,8 |
| 169 | 6408 | 17,8 | 6408 | 17,8 |
| 170 | 6408 | 17,8 | 6408 | 17,8 |
| 171 | 6408 | 17,8 | 6408 | 17,8 |
| 172 | 6408 | 17,8 | 6408 | 17,8 |
| 173 | 6408 | 17,8 | 6408 | 17,8 |
| 174 | 6408 | 17,8 | 6408 | 17,8 |
| 175 | 6408 | 17,8 | 6408 | 17,8 |
| 176 | 6408 | 17,8 | 6408 | 17,8 |
| 177 | -6768 | -18,8 | 0 | 0 |
| 178 | -6768 | -18,8 | 0 | 0 |
| 179 | -6768 | -18,8 | 0 | 0 |
| 180 | -6768 | -18,8 | 0 | 0 |
| 181 | -6768 | -18,8 | 0 | 0 |
| 182 | -6768 | -18,8 | 0 | 0 |
| 183 | -6768 | -18,8 | 0 | 0 |
| 184 | -6768 | -18,8 | 0 | 0 |
| 185 | -6768 | -18,8 | 0 | 0 |
| 186 | -6768 | -18,8 | 0 | 0 |
| 187 | -6768 | -18,8 | 0 | 0 |
| 188 | -6768 | -18,8 | 0 | 0 |
| 189 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 190 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 191 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 192 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 193 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 194 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 195 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Il “ failure time” massimo ammissibile durante la prova è di 9 sec., pari al 5 % circa del tempo totale, o alla durata della fase più gravosa (Fase 14). La prova vita si considera finita quando la batteria non è più in grado di ripetere il ciclo con la tolleranza predetta.

APPENDICE D :ESTRATTO ALLA TESI “ Studio e sperimentazioni di un sistema di accumulo misto per una vettura a trazione elettrica”, Alessandro Thoma, Relatore: Prof. Leone Martellucci, Università “La Sapienza”.

1 Test della Urb-e sul Banco a Rulli

1.1 Prove al banco a rulli della Urb-e: condizioni iniziali e finali

Innanzitutto si necessita di puntare un riflettore su quelle che sono le condizioni iniziali e condizioni finali della prova. Al fine di ottenere una prova che possa essere ritenuta valida occorre verificare la tensione iniziale delle batterie, in caso di bisogno si deve procedere alla ricarica delle stesse. Per il processo di ricarica si è utilizzato un caricabatterie progettato appositamente per la nostra applicazione, esso prevede la ricarica contemporanea delle sei batterie presenti sulla vettura. Inoltre è dotato di indicatori led luminosi che progressivamente segnalano lo stato di carica e la loro accensione è legata al passaggio di corrente e non alla tensione delle batterie durante la ricarica, infatti, proprio come i comuni caricabatterie in commercio, esso presenta un amperometro proprio al fine di controllare lo stato di carica. Quando il pacco composto dalle sei batterie è carico, mostrando quindi tutti i led accesi fino al verde che segna 100%, è chiaro che la corrente che circola nel circuito costituito dall'insieme del caricabatterie e delle batterie stesse diventa pressoché nulla. Dunque per quanto riguarda la tensione, una batteria come quella utilizzata sulla vettura, può ritenersi carica quando la sua tensione a vuoto è circa di 13 Volt e tale valore è stato riscontrato alla fine di ogni processo di ricarica con un tester; solo in presenza di questo valore per ciascuna batteria è possibile procedere con la prova dinamica.



Figura 1.1.1 Caricatore Pacco Batterie



Figura 1.1.2 Pacco Batterie in ricarica

Andando invece ad affrontare il discorso relativo alle condizioni finali per le quali bisogna ritenere conclusa una prova bisogna fare delle attente osservazioni. Innanzitutto si evidenzia che l'elettronica di controllo dell'auto, vale a dire il software di gestione elaborato in ambito Matlab, arresta il veicolo nel momento in cui la variabile TensioneUC raggiunge un valore inferiore ai 30V (si fa notare che la variabile TensioneUC nel programma rappresenterebbe la tensione ai capi dei supercondensatori, invece nel nostro caso di alimentazione a sole batterie essa indica la tensione di quest'ultime). Per quanto riguarda le batterie, la loro tensione non può essere azzerata, ma al contrario, si abbassa di poco rispetto ai 13 Volt previsti nelle condizioni di massima carica e dunque una batteria si ritiene scarica nel corso delle prove quando la sua tensione è compresa tra 10 V e 11 V. Inoltre come sarà mostrato nei grafici ottenuti con i dati registrati, in corrispondenza delle richieste di corrente si hanno abbassamenti di tensione, che diventano sempre più significativi al crescere delle richieste di corrente stesse, specialmente quando le batterie sono in procinto di scaricarsi. Infine, tornando all'elettronica di controllo dell'hardware, si ha un blocco totale della vettura nel momento in cui la tensione di link diventa troppo variabile e per questo motivo si è scelta questa condizione come condizione limite che determina la fine della prova.

Avendo chiarito questi aspetti è possibile partire con l'analisi dei risultati ottenuti nelle prove. L'analisi dei dati è sviluppata direttamente in ambiente Matlab in quanto il software di gestione del veicolo permette di raccogliere le informazioni e di ordinarle in una serie di vettori utilizzabili per la suddetta analisi. Tali vettori sono raccolti ed elencati nel Workspace, poi attraverso il Variable Editor è possibile accedere ai singoli vettori e dunque avere disponibili tutti i valori registrati per una determinata variabile. Con il comando Plot è possibile graficare l'andamento delle diverse grandezze. Si noti che per tutti i grafici che andremo a discutere in ascissa non troviamo il tempo in secondi, ma semplicemente il numero del campione acquisito.

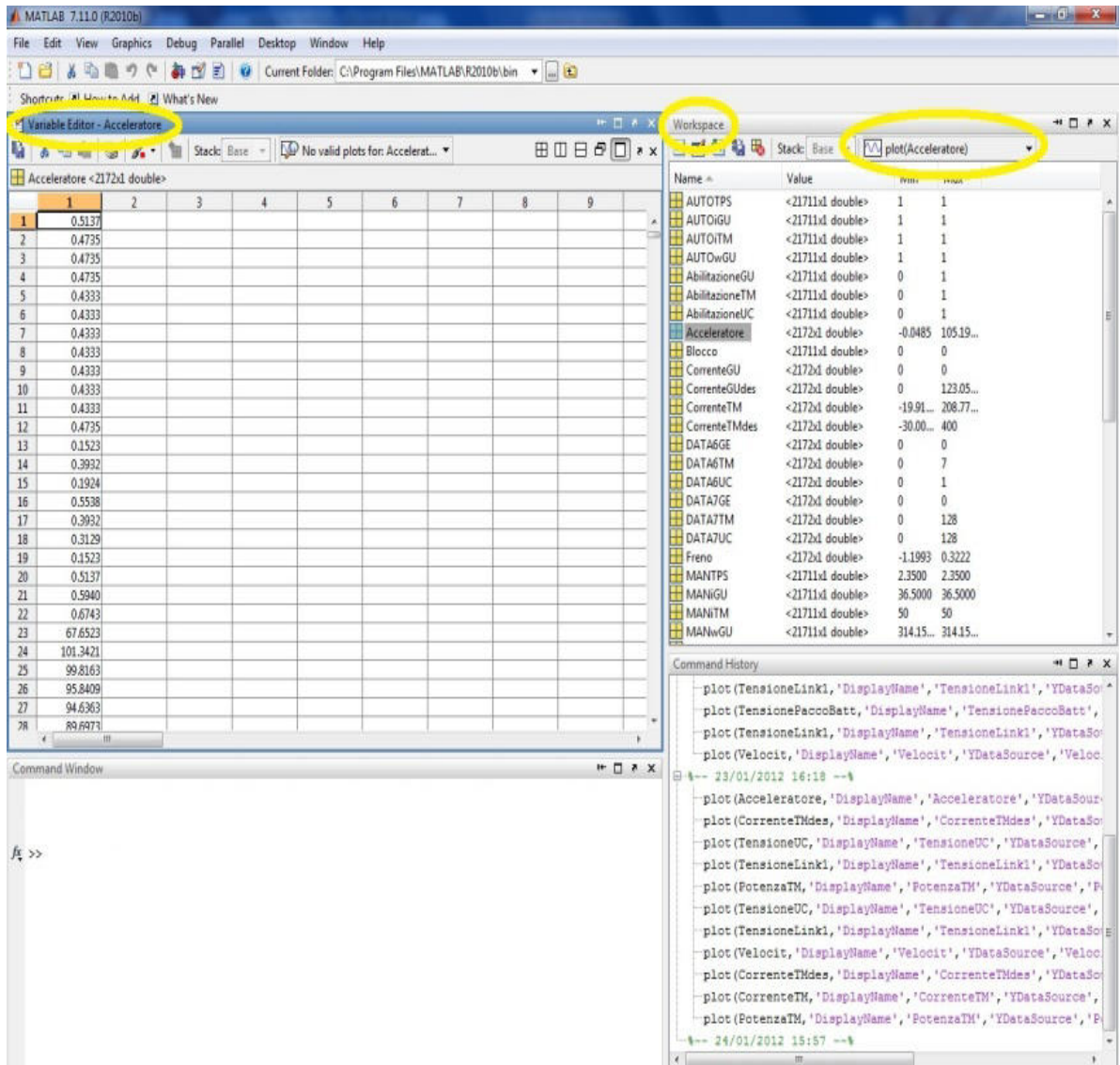


Figura 1.1.3 Ambiente di lavoro Matlab

1.2 Prove al banco a rulli: alimentazione a 5 batterie

Innanzitutto è interessante analizzare il segnale dell'acceleratore che, come spiegato nella presentazione dell'hardware, essendo di natura analogica necessita di una conversione in digitale. L'andamento ciclico causato dal dover perseguire il Ciclo ECE15, non deve trarre in inganno il Lettore, si evidenzia infatti che ogni periodo non è identico al successivo poiché la posizione dell'acceleratore è controllata dal piede impreciso del pilota.

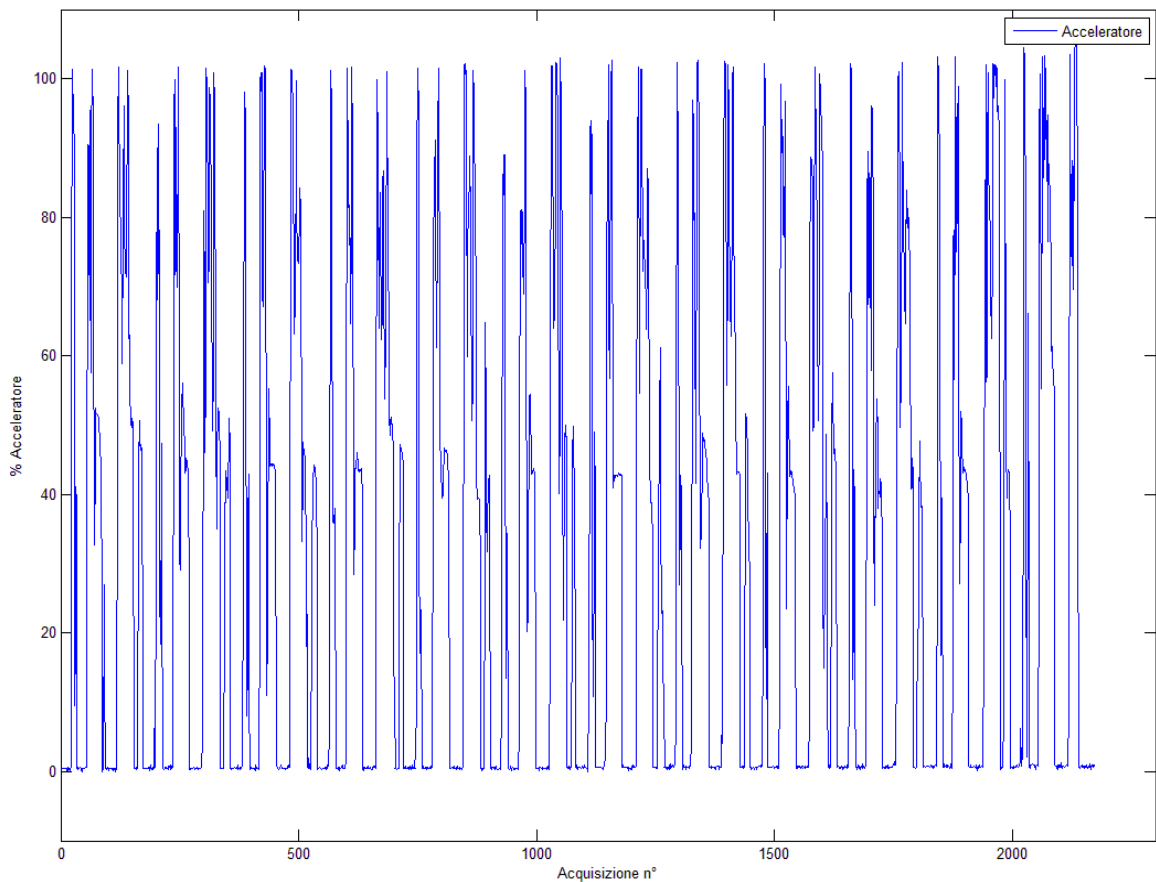


Figura 1.2.1 Segnale Acceleratore acquisito

Si osserva come il valore massimo sia pari a circa il 105%; questo aspetto non rappresenta un problema, in quanto se è vero che la corrente richiesta viene calcolata proprio a partire dalla posizione dell'acceleratore, è comunque presente un limite di sicurezza della richiesta di corrente, come visto nell'analisi del file *Strategy*. Per questo motivo, non vengono a presentarsi nemmeno richieste eccessive di potenza, essendo quest'ultima calcolata a partire dalla richiesta di corrente stessa. Si osserva anche la presenza di alcune pause, in

corrispondenza delle quali, ovviamente, il segnale dell'acceleratore è pressoché nullo; inoltre andando ad analizzare un ingrandimento del precedente grafico, corrispondente all'andamento relativo ad un singolo ciclo, si può apprezzare la parzializzazione dell'acceleratore in corrispondenza delle varie salite e discese previste dal Ciclo ECE15.

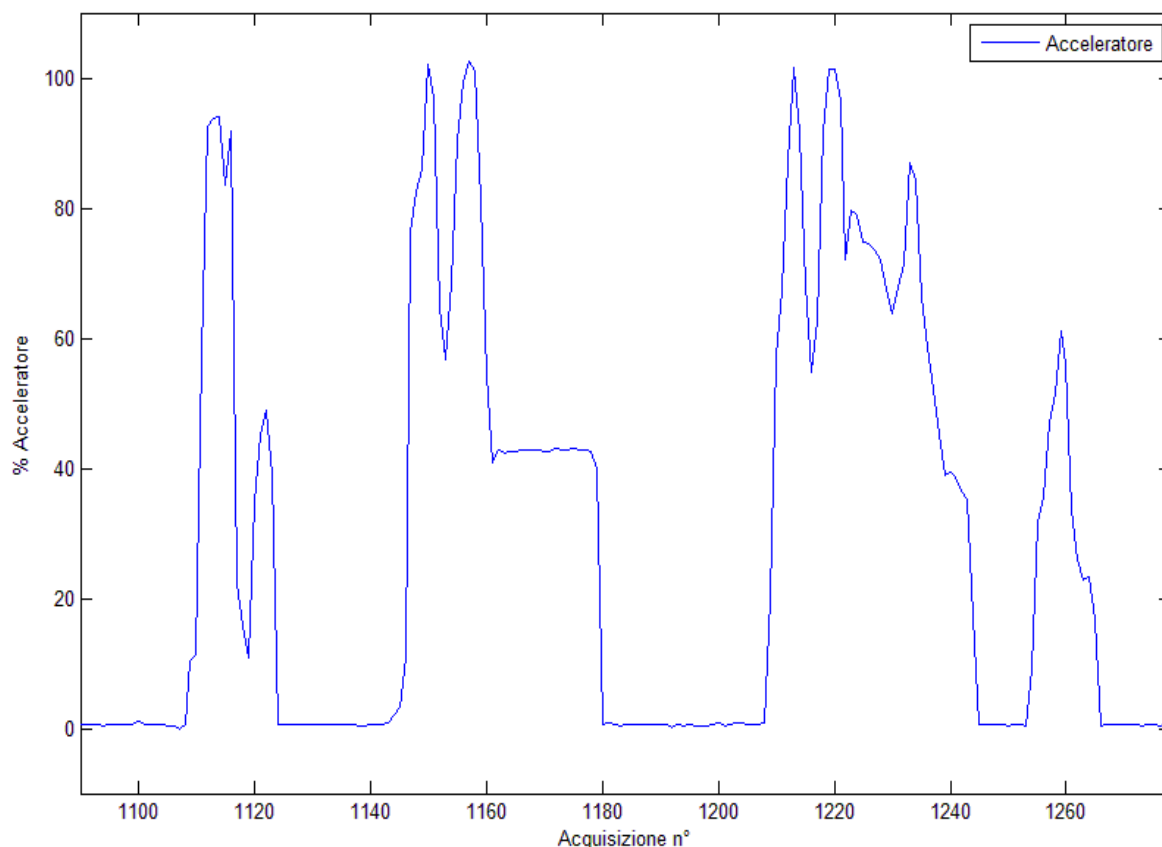


Figura 1.2.2 Segnale Acceleratore acquisito (singolo ciclo)

Informazioni più rilevanti vengono fornite dal grafico delle correnti del motore di trazione. Come detto in precedenza si acquisiscono sia la richiesta di corrente, sia la corrente che viene effettivamente erogata. Si precisa intanto che, per motivi illustrati più avanti nell'elaborato, il parametro fondamentale non è quello della corrente ma quello della potenza, e se ne avrà prova commentando i diagrammi delle potenze o anche analizzando il file *Strategy*. Si è dunque impostato un valore massimo di corrente desiderata pari a 400 Ampère, valore di fatto eccessivo. Infatti mentre il sistema consente di avere una corrispondenza tra posizione dell'acceleratore e corrente desiderata, come si nota nella seguente figura, lo stesso non accade per corrente desiderata e corrente fornita.

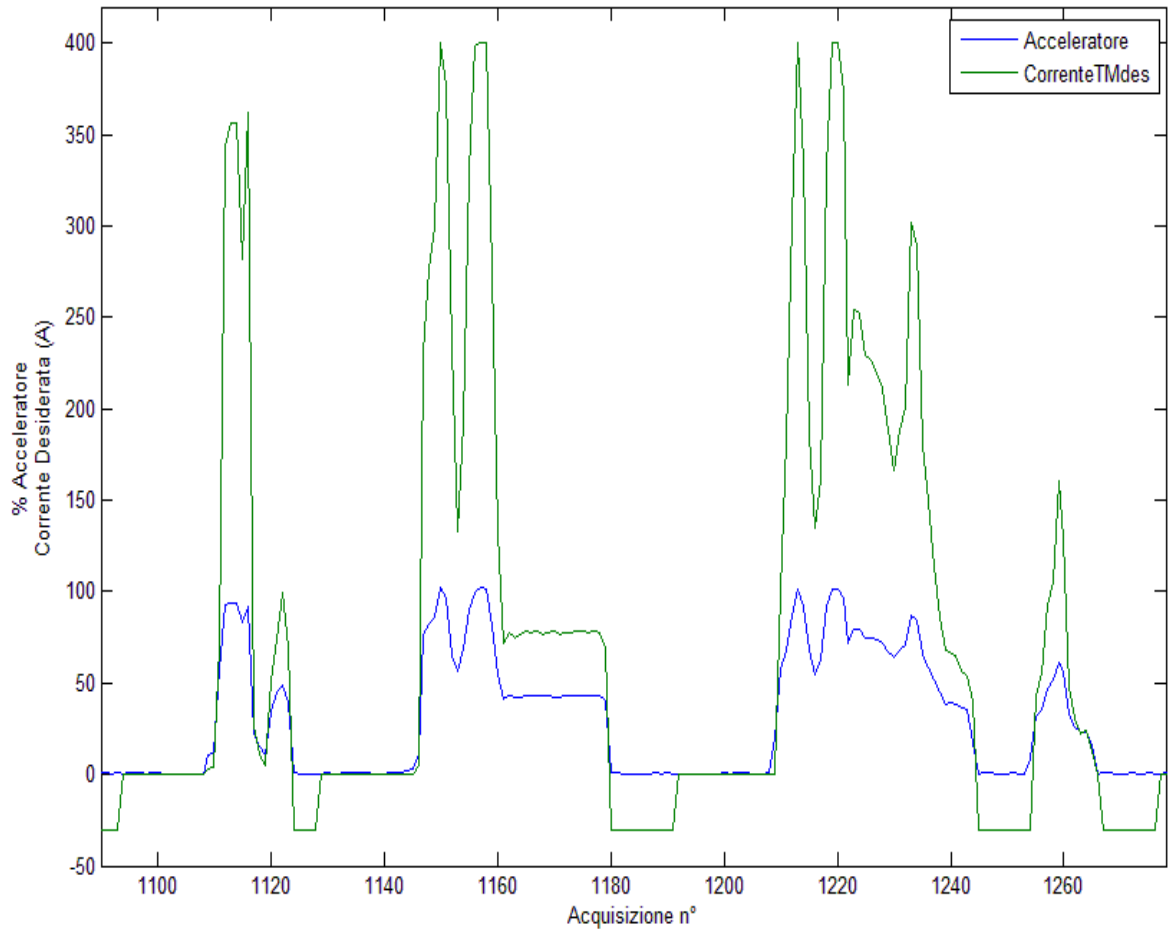


Figura 1.2.3 Corrente Desiderata - Segnale Acceleratore (singolo ciclo)

Costruendo quindi un grafico con l'andamento delle due correnti, fornita e desiderata, si osserva la differenza di pendenza delle due curve. In particolare si ha che la velocità con la quale cresce la corrente fornita, è notevolmente minore della velocità di crescita della corrente richiesta. Da notare come l'effetto sia tanto più evidente (con l'ausilio di un ingrandimento del grafico, corrispondente ad un singolo ciclo) quanto più la richiesta di corrente è istantanea, ovvero quanto più velocemente si passa da un valore nullo a quello massimo, che nella pratica si traduce nelle ripartenze da fermo. Si anticipa già il Lettore che, per motivi discussi nel prossimo paragrafo, si sono riscontrati miglioramenti del sistema nell'erogazione istantanea di corrente affiancando alle batterie i supercondensatori.

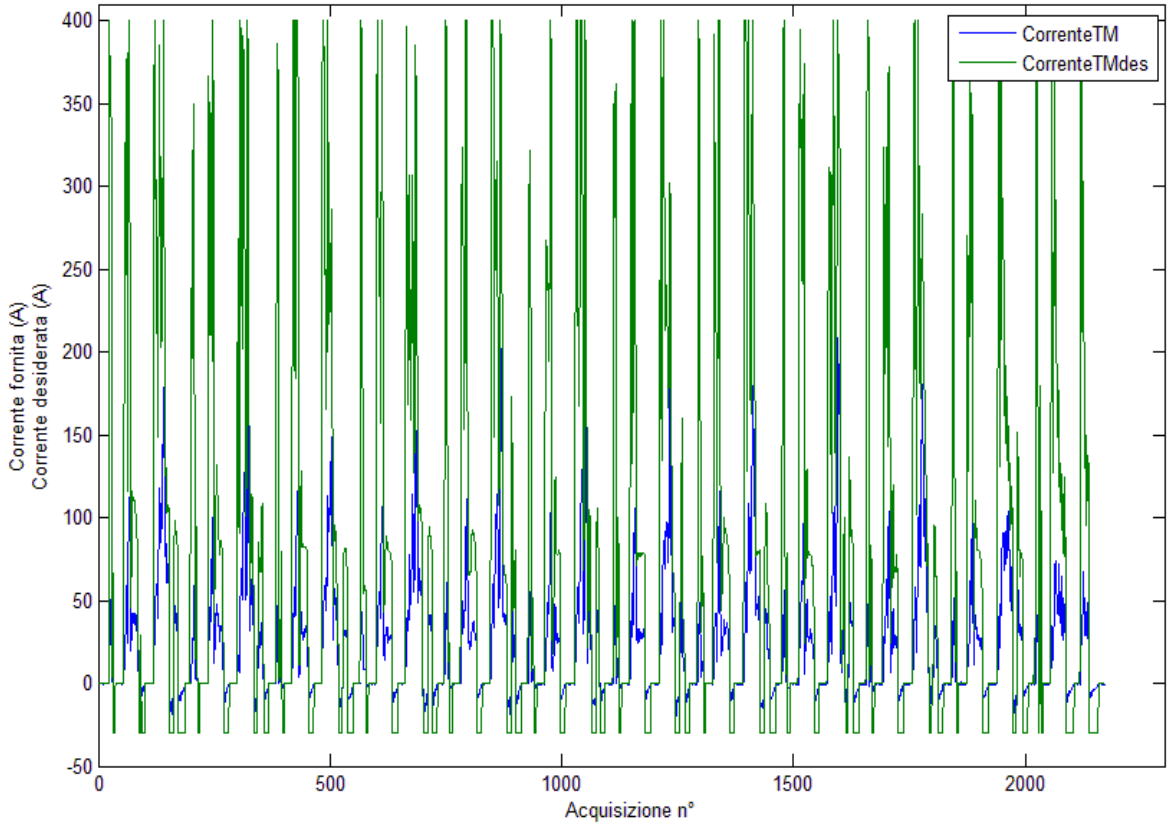


Figura 1.2.4 Corrente Desiderata - Corrente Fornita

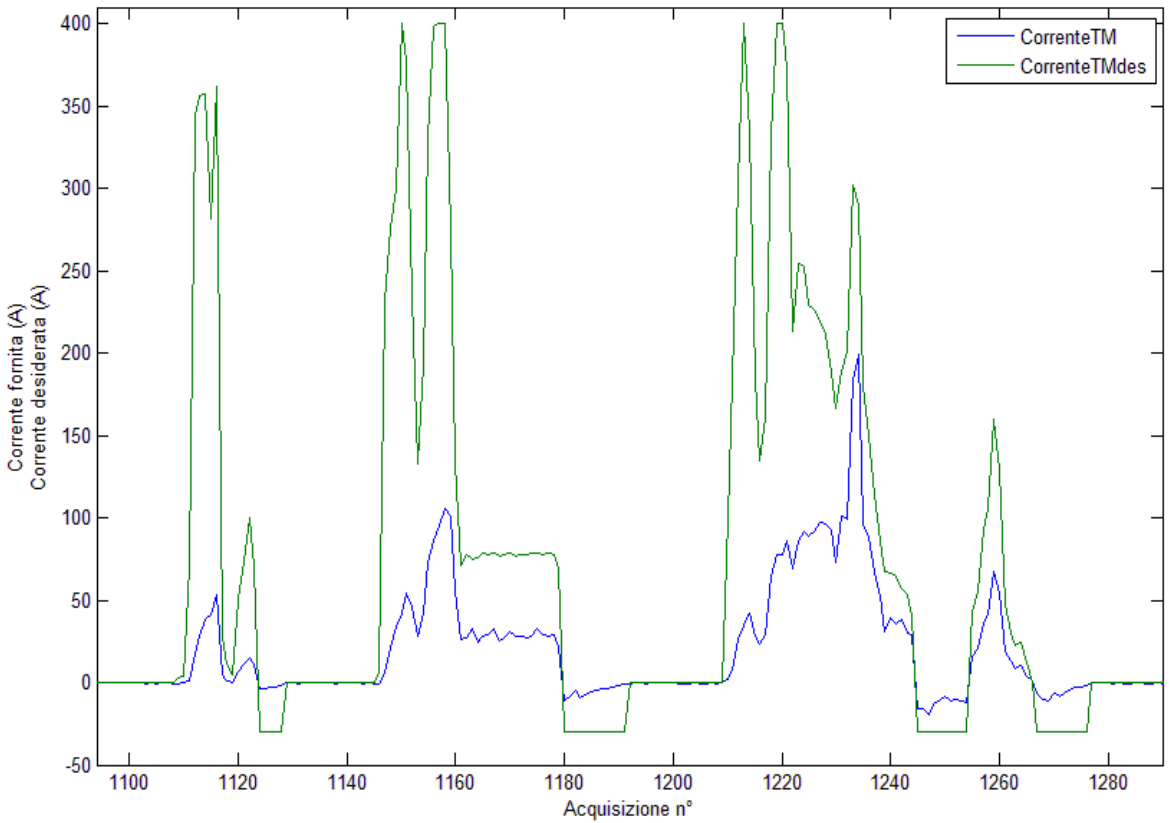


Figura 1.2.5 Corrente Desiderata - Corrente Fornita (singolo ciclo)

Si nota che il valore massimo fornito è dell'ordine dei 200 Ampère. E' importante osservare come il valore minimo (in valore assoluto) della corrente desiderata è sempre di 30 Ampère, valore relativo al recupero di energia in frenata utilizzando il freno motore. A questo proposito si osservi come in fase di rilascio brusco dell'acceleratore la corrente fornita decresce con buona rapidità, aspetto che porta a pensare che la richiesta alla batteria sia troppo gravosa anche in termini di corrente. In ogni caso si noti come anche il recupero dal freno motore non consente di raggiungere il valore desiderato, con picchi massimi in ricarica di 18.5 A e un valore medio di circa 15 Ampère, a fronte dei 30 richiesti. Questa situazione è dovuta a due fattori che riguardano sia la potenza, di cui si discuterà più avanti nel capitolo, sia la resistenza interna delle batterie, le quali soffrono i cambi di polarità, amplificando il ritardo di risposta già evidenziato nel momento in cui sono le batterie ad erogare corrente.

Un calcolo interessante per rendersi conto degli ordini di grandezza in gioco durante il ciclo, è quello del valor medio della corrente erogata. In effetti poiché la stessa assume anche valori negativi nelle fasi di ricarica, si può calcolare sia il valore medio della corrente, sia quello dei suoi valori assoluti e si ottiene:

- $MediaCorrente_{fornita} = 22A$
- $MediaAssolutiCorrente_{fornita} = 25A$
- $MediaCorrente_{des} = 81A$
- $MediaAssolutiCorrente_{des} = 93A$

Si noti che su tali valori medi calcolati hanno forte rilevanza i valori rilevati nei periodi di pausa, quando tutte le grandezze sono all'incirca nulle. Questi calcoli hanno valore puramente indicativo e non sono collegati né alla discrepanza tra le correnti richieste e fornite, né tanto meno al confronto con i valori di capacità teorici delle batterie. Infatti se si considerano i valori di capacità delle nostre batterie, i dati di targa sono:

- $C5 = 60 Ah$
- $C20 = 74 Ah$

C5 indica che la corrente che la batteria può erogare in modo continuativo per 5 ore prima di raggiungere i 10.5 Volt (valore convenzionale di batteria completamente scarica), può essere calcolata come:

$$\triangleright 60Ah = 5h \times i \Rightarrow i = 12A$$

Allo stesso modo per il valore C20 si trova:

$$\triangleright 74Ah = 20h \times i \Rightarrow i = 3.7A$$

Si vede quindi come il rapporto tra capacità e durata, che dà la corrente, non è costante. Infatti, in tal senso, le durate decrescono fortemente al crescere delle correnti perché ci si avvicina sempre di più al valore della corrente di spunto che nel nostro caso è di 400 A, ovvero di quella corrente che la batteria è in grado di erogare solo per qualche secondo. Inoltre le variazioni di richiesta di corrente implicano comunque una durata minore rispetto al caso di una richiesta costante, altro motivo per cui non hanno particolare significato i valori medi calcolati in precedenza. Oltretutto quest'ultimi passano in secondo piano nel momento in cui si prendono in considerazione i valori di picco, che alla luce di quanto osservato, sono di grande interesse.

Facendo un altro passo in avanti prima di andare a studiare le curve della potenza, è importante aprire una discussione sulle curve delle tensioni, sia del pacco batterie, sia quella di link.

Andando a studiare la curva di tensione del pacco batterie, riportata nella figura seguente, si osserva che la tensione, presenta degli abbassamenti consistenti in corrispondenza delle richieste di corrente più alte. Nel caso più gravoso, corrispondente alle accelerazioni negli ultimi due cicli, la tensione si abbassa addirittura da 59 a 24 Volt, con una riduzione quindi del 40% circa. Il valore della tensione a vuoto, ovvero quando non è presente una richiesta di corrente, varia in maniera limitata; più precisamente si passa da circa 64.1 a 58.4 Volt con un valore finale che quindi per ciascuna batteria è di 11.68 Volt a vuoto. E' fondamentale notare che aumenta la consistenza delle cadute di tensione nel susseguirsi dei cicli, passando da valori intorno a 15-20 V fino a 30V.

La fine della prova è stata determinata a causa delle particolarmente scarse prestazioni della vettura, non dal blocco totale hardware poiché, come si noterà dai prossimi grafici, la V_{link} rimane sufficientemente costante da non permettere lo spegnimento della vettura.

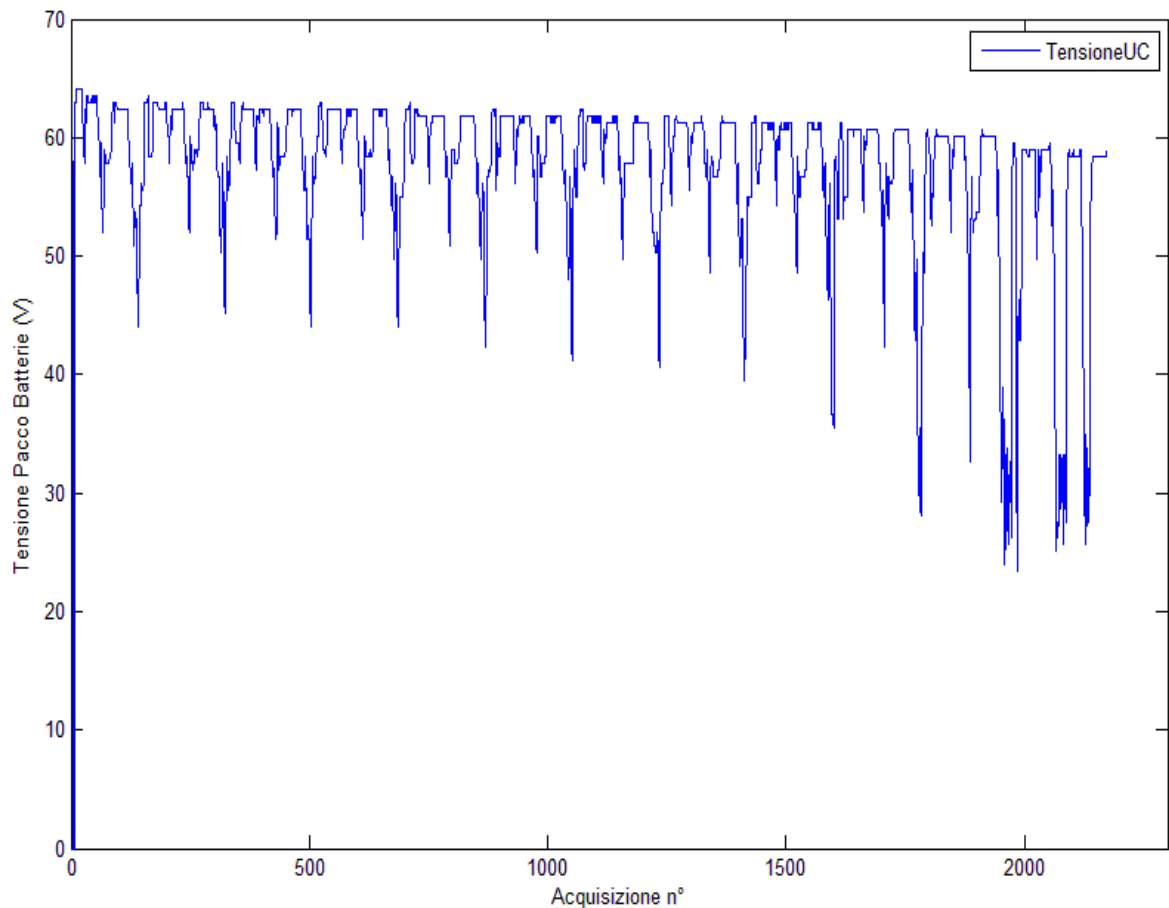


Figura 1.2.6 Tensione Pacco Batterie

Andando quindi a studiare la sopra citata V_{link} , questa risulta legata alla potenza effettivamente erogata dal motore elettrico. Dalla figura che segue risulta evidente che la tensione in corrispondenza dei valori più alti di corrente subisce un abbassamento piuttosto marcato dell'ordine di 15-20 Volt, quando invece dovrebbe, nel caso teorico, essere costante. Ad ogni modo non si arriva mai a toccare i 30 Volt, valore per cui si avrebbe il blocco della vettura. Da notare che nel caso il sistema si blocchi viene registrato un valore di riferimento pari a 110 Volt. Anche qui, come nel caso della tensione del pacco batteria, si nota un progressivo aumento delle variazioni di tensione con il proseguire della prova e inoltre nella zona finale si presenta molto instabile.

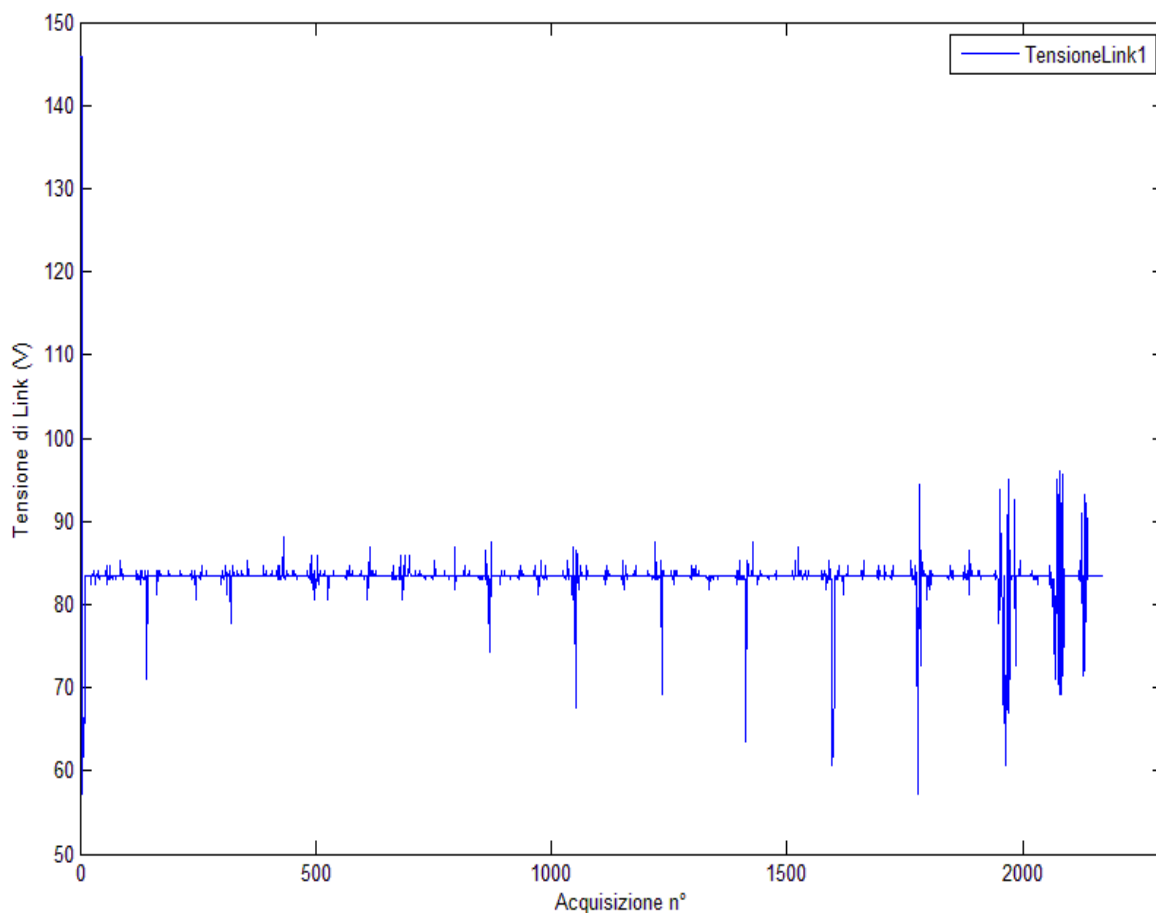


Figura 1.2.7 Tensione di Link

L'eccessivo abbassamento della tensione di link fa pensare ad una tensione troppo bassa del pacco batterie, situazione che, come visto, si verifica in corrispondenza delle correnti erogate più elevate. Andando infatti a graficare i due andamenti, come illustrato nella seguente figura, si può validare questa affermazione notando che i picchi negativi delle due curve sono allineati.

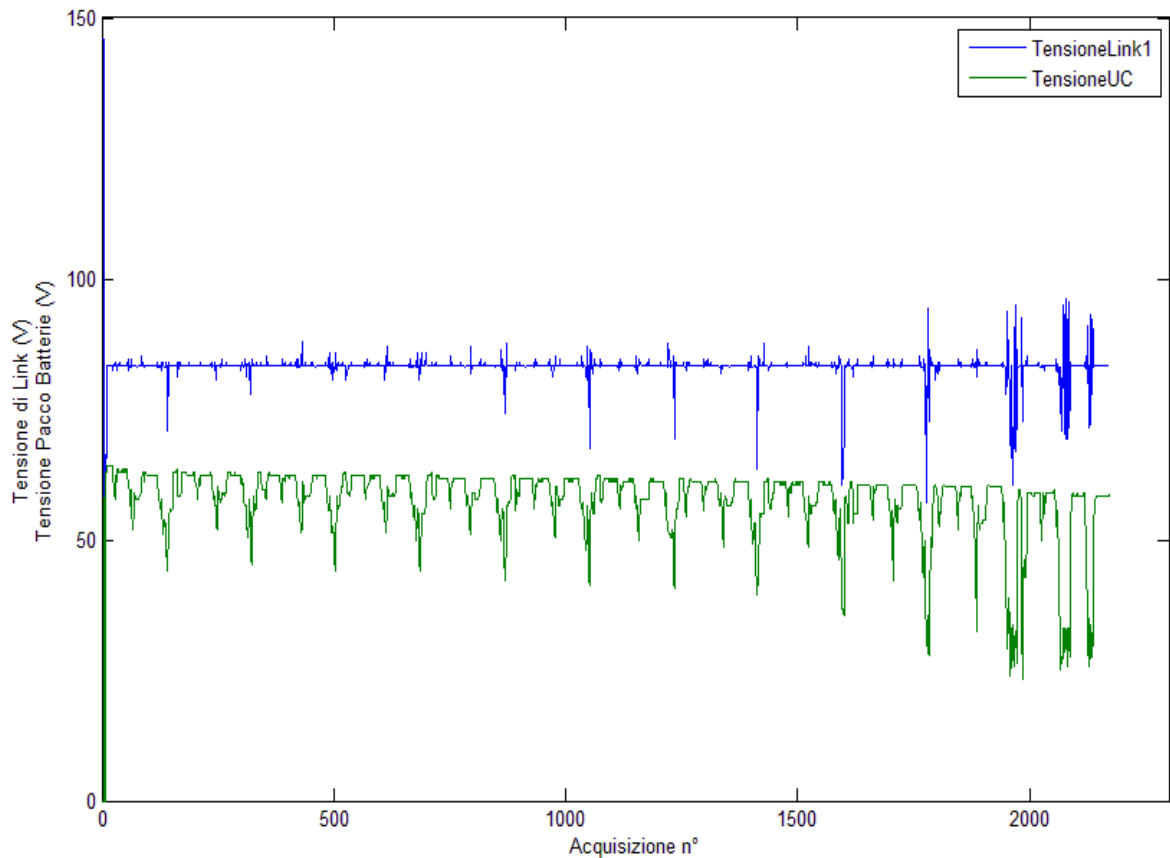


Figura 1.2.8 Tensione di Link - Tensione Pacco Batterie

Si affronta ora l'analisi della potenza. Attraverso il confronto tra le curve di potenza fornita e potenza desiderata si ha infatti un immediato riscontro del funzionamento della vettura. Innanzitutto si considera la potenza fornita durante l'intera prova, la cui curva corrispondente è mostrata nella figura che segue. Risulta subito evidente l'andamento periodico, come del resto tutti i grafici già osservati e non, e anche che la potenza erogata non raggiunge mai i 16 kW di picco teorici di potenza massima ma si aggira intorno ai 14kW nella parte iniziale, fino a scendere gradualmente a 5kW nella parte finale. Quest'ultimo è stato infatti il motivo che ha portato a determinare la fine della prova.

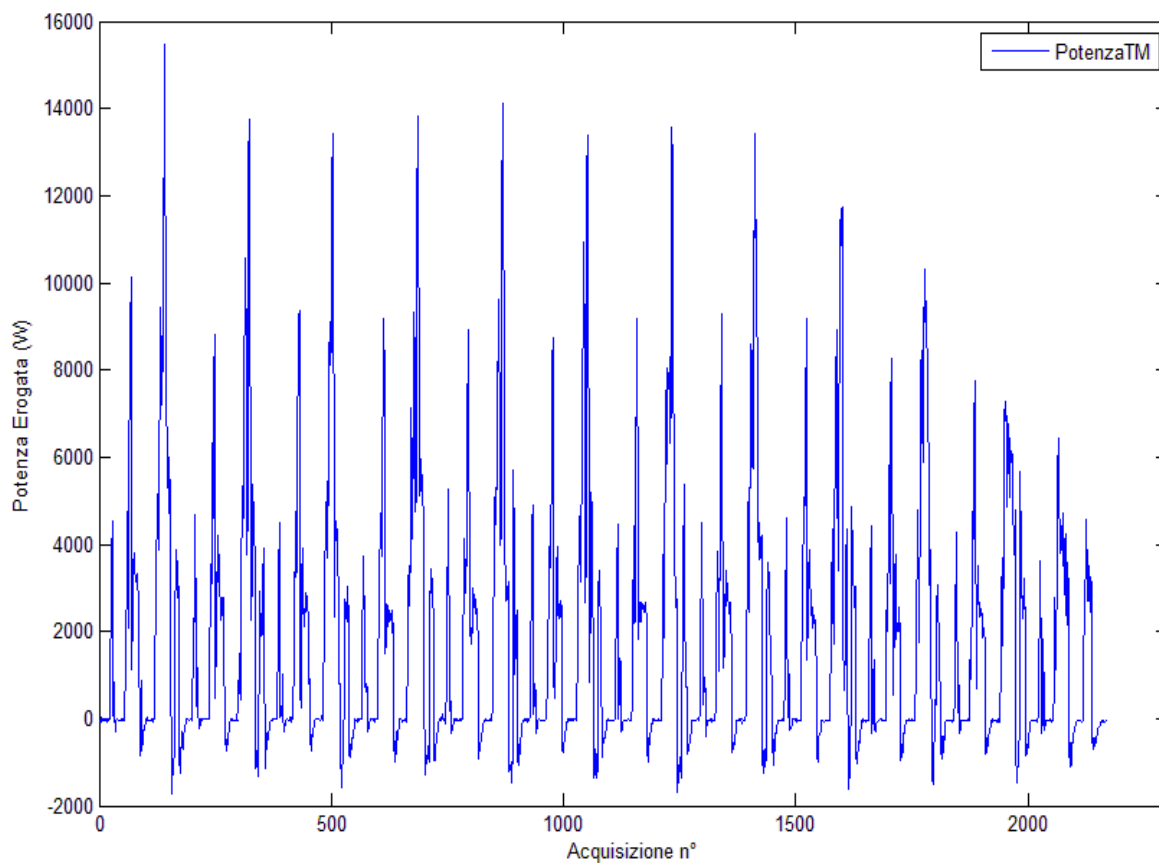


Figura 1.2.9 Potenza Erogata

Per effettuare un confronto delle due potenze in questione si traccia un grafico con le curve sovrapposte, ed un ingrandimento di quest'ultimo corrispondente ad un singolo ciclo.

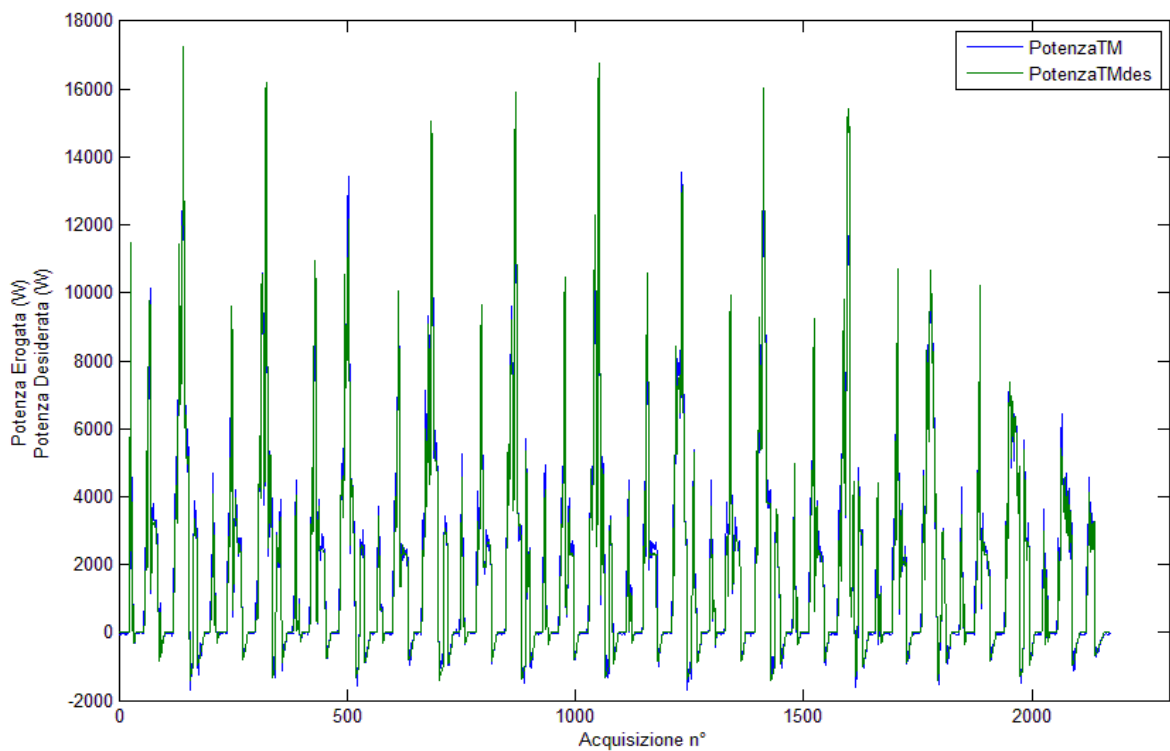


Figura 1.2.10 Potenza Erogata - Potenza Desiderata

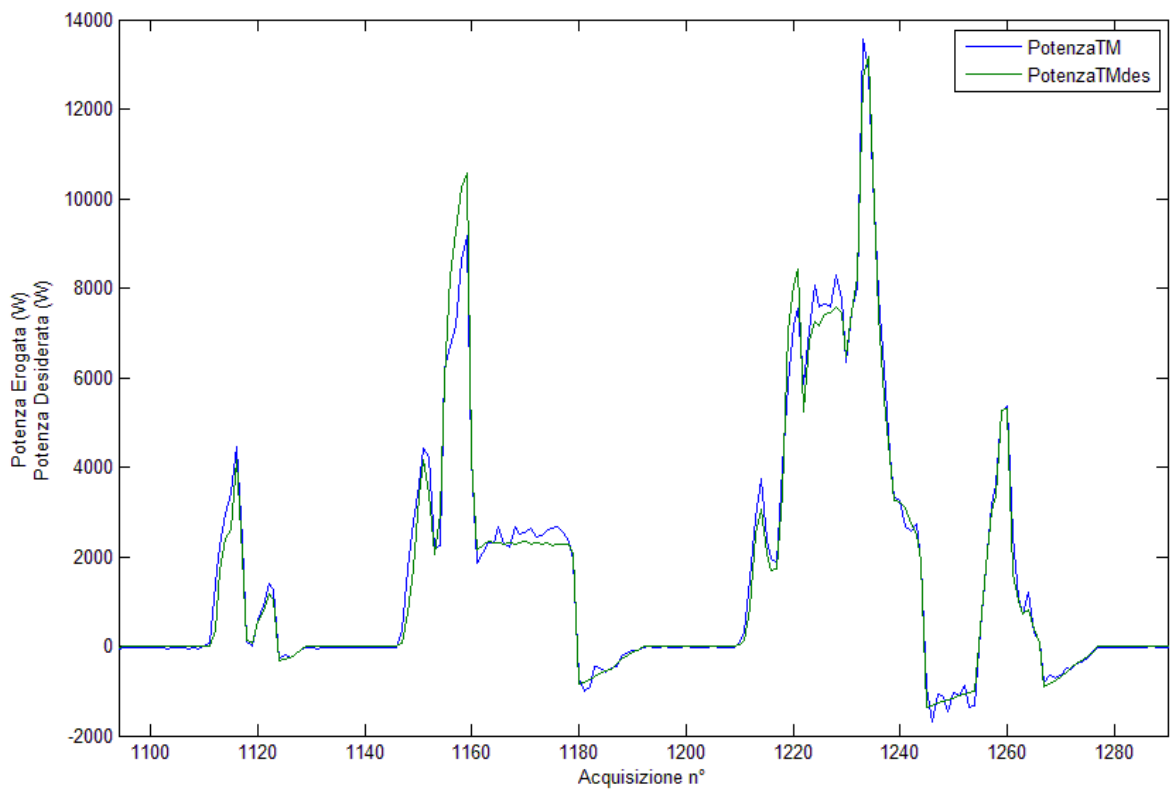


Figura 1.2.11 Potenza Erogata - Potenza Desiderata (singolo ciclo)

Il risultato fondamentale che si evince dai grafici è che, nonostante si abbia conferma di quanto già detto in precedenza, ossia che non si riesce a raggiungere il valore di picco in corrispondenza delle richieste maggiori, si ha, a differenza di quanto visto per le correnti, una corrispondenza quasi perfetta tra la richiesta di potenza e quella erogata, anche nei tratti di accelerazione.

La spiegazione di questo risultato emerge dalla struttura del file *Strategy* nel quale si possono trovare le modalità di calcolo della potenza desiderata e di quella fornita.

Si ha:

$$\begin{aligned} \triangleright P_{des} &= I_{des} \times n^{\circ} \text{ giri} \times k \\ \triangleright P_{fornita} &= I_{link} \times V_{link} \end{aligned}$$

La corrente desiderata I_{des} è correlata alla posizione dell'acceleratore, k è un guadagno pari a 0.1390 necessario per calcolare correttamente la potenza tramite il numero di giri del motore elettrico.

Bisogna fare ora qualche considerazione sulla variabile I_{des} , essa può assumere valori compresi tra -30 e 400 Ampère. Inoltre si è esclusa in questa prova la logica di controllo per la sua determinazione a partire dalla tensione UC, infatti, come spiegato nella descrizione del file *Strategy*, nella configurazione ibrida si operava un confronto tra la richiesta di corrente determinata a partire dalla posizione dell'acceleratore e un valore calcolato a partire dalla tensione dei supercondensatori secondo la legge:

$$\triangleright I_{des} = (V_{UC} - 38) / 2 \times 400 - I_{GUdes}$$

scegliendo poi il valore minore tra le due richieste. Se si escludesse la I_{GUdes} da questa stessa legge si otterrebbe che nel momento in cui la tensione scende a 39 Volt, la richiesta di corrente sarebbe di soli 200 Ampère; mantenendo la logica della scelta della richiesta minima, il sistema provvederebbe a richiedere proprio questo valore. Ad una situazione di questo tipo corrisponderebbe conseguentemente una richiesta di potenza inferiore viste le modalità in cui questa viene calcolata.

Si potrebbe però pensare allora di adattare la legge ai picchi negativi della tensione delle batterie riscontrati nella prova evidenziati nella figura seguente.

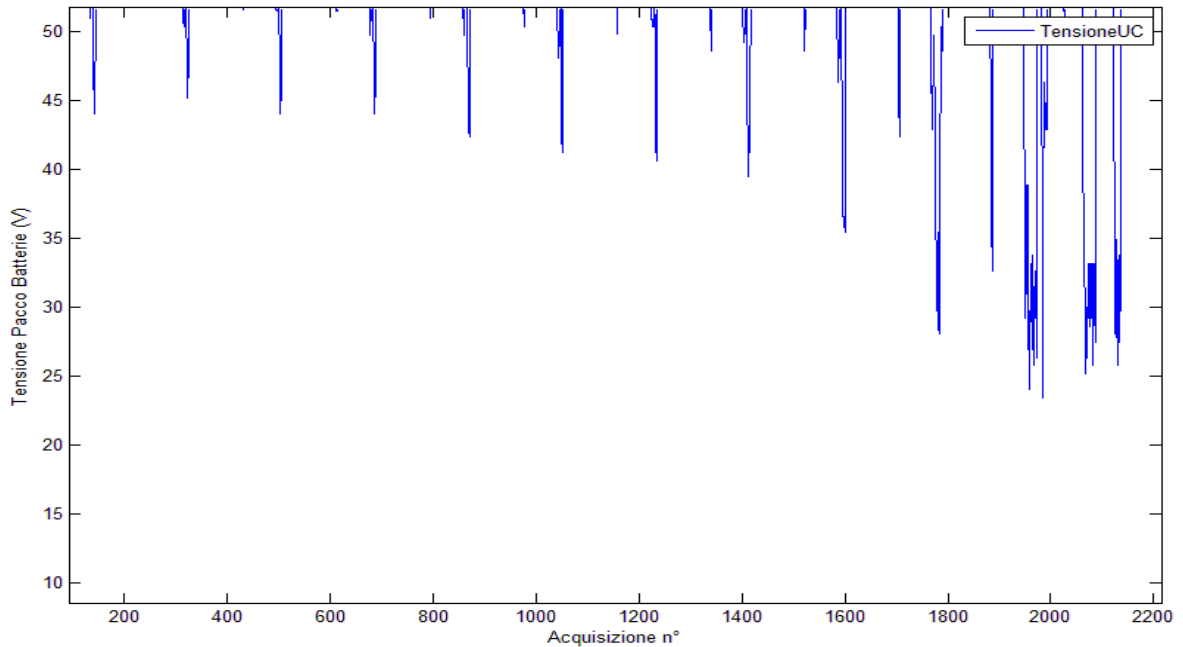


Figura 1.2.12 Picchi minimi Tensione Pacco Batterie alle richieste massime

Però risulta molto difficile elaborare una legge di questo tipo, ossia che adegui la richiesta di corrente alla tensione, poiché le cadute di tensione diventano sempre più consistenti con lo scaricarsi delle batterie, situazione che non si verificava quando la vettura era in configurazione ibrida, in cui il motogeneratore manteneva un comportamento costante dei parametri.

Andando inoltre a ragionare sulle potenze, emerge che una elaborazione in tale direzione appare quasi superflua. Il sistema infatti non cerca di adeguare il valore di corrente erogata a quella desiderata. Il parametro fondamentale è proprio quello della potenza. In altri termini, tramite il valore di corrente desiderata il sistema calcola un valore di potenza desiderata; a questo punto cerca di eguagliare il valore di potenza fornita a quella desiderata; poiché però la potenza fornita è, come detto, il prodotto della I_{link} e della V_{link} , ed essendo quest'ultima un valore che viene monitorato costantemente, di fatto il sistema calcola il valore di corrente opportuno da erogare semplicemente come:

$$\triangleright I_{link} = P_{des} / V_{link}$$

E' chiaro a questo punto il motivo per il quale la corrente erogata è molto più bassa di quella desiderata soprattutto nelle fasi di partenza: in una situazione di questo tipo il sistema riesce ancora a mantenere un valore di V_{link} prossimo a quello di progetto (83.5 Volt), quindi eroga correnti decisamente minori dei 400 Ampère richiesti, ai quali corrisponderebbe una potenza di:

$$\triangleright P_{fornita} = 400 \times 83.5 = 33400W = 33.4kW$$

ovvero, nel caso in cui la tensione fosse mantenuta rigorosamente a 83.5 volt, il motore erogherebbe più di 33 kW a fronte dei 16 kW di picco di progetto. Questa considerazione ha permesso di dedurre il motivo per il quale nel progetto originario si era impostato un valore massimo di corrente desiderata di 400 Ampère. Infatti proprio da questo valore se si va a calcolare a ritroso la tensione di link, imponendo il valore di potenza massima di 16 kW si ha:

$$\triangleright V_{link} = 16000 / 400 = 40V$$

Quindi si era deciso di prevedere un valore di corrente massima di 400 Ampère in maniera tale che il sistema potesse sopperire alle situazione nelle quali la tensione di link scendeva molto al di sotto del valore previsto. Una situazione di questo tipo era legata senz'altro ad una tensione eccessivamente bassa dei supercondensatori e quindi ad una richiesta ingente al generatore che doveva garantire la ricarica degli stessi. La stessa precauzione sembrerebbe quindi utile anche per la vettura nella nuova configurazione. Bisogna però osservare che nella configurazione ibrida, per quanto la condizione ora considerata fosse critica per il sistema, e quindi in generale sicuramente da evitare, non si venivano a creare condizioni pericolose per nessun componente della vettura. Al contrario nel nostro caso, l'abbassamento della V_{link} , nasce ancora dall'abbassamento della tensione delle batterie (che sono connesse al posto dei supercondensatori), ma le stesse, costituiscono l'unica fonte di energia installata sulla vettura. Quindi, tornando alle potenze, quello che succede è che il sistema cerca di rispondere alla richiesta di potenza innalzando la sola corrente

fornita, così come previsto. Quindi ad una richiesta di 16 kW si dovrebbero erogare, se la tensione di link fosse costante e pari a 83.5 Volt:

$$\triangleright I_{link} = 16000 / 83.5 = 191.6A$$

Tuttavia, nel tentativo di erogare questo valore di corrente, che non va confuso con quello teorico richiesto, la tensione di link scende a causa dell'erogazione di corrente, a valori minimi compresi tra i 50 e i 60 Volt, situazione nella quale il sistema va a richiedere il valore massimo erogabile, previsto proprio per queste situazioni (400 A).

Quindi nel caso della configurazione puramente elettrica, l'abbassamento della tensione di link è, di fatto, una situazione da evitare assolutamente, perché è indice del fatto che si sta eccessivamente richiedendo potenza al pacco batterie, proprio in virtù del fatto che il sistema non è più in grado di mantenere costante V_{link} . Se quindi una situazione di questo tipo poteva essere accettata occasionalmente nel funzionamento in configurazione ibrida, per la presenza del generatore, in configurazione puramente elettrica si vengono a creare dei picchi (di tensione e di corrente) che limitano la durata delle batterie e le danneggiano. Quando invece i valori di corrente forniti dal sistema e calcolati sulla base della V_{link} sono più bassi, si riesce a mantenere quest'ultima al valore costante, operando la modulazione sulla base della sola corrente, come previsto in sede di progetto; si osservino a riguardo le figure seguenti che evidenziano il problema esposto.

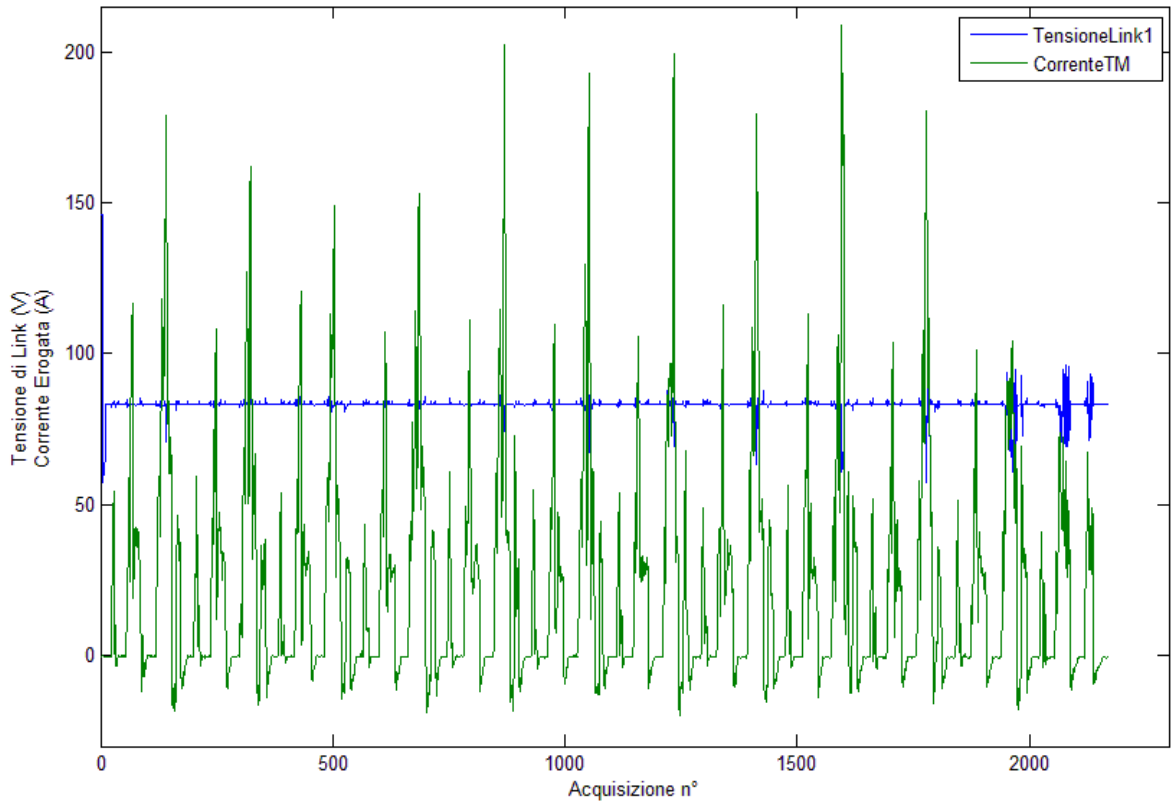


Figura 1.2.13 Tensione di Link - Corrente Erogata

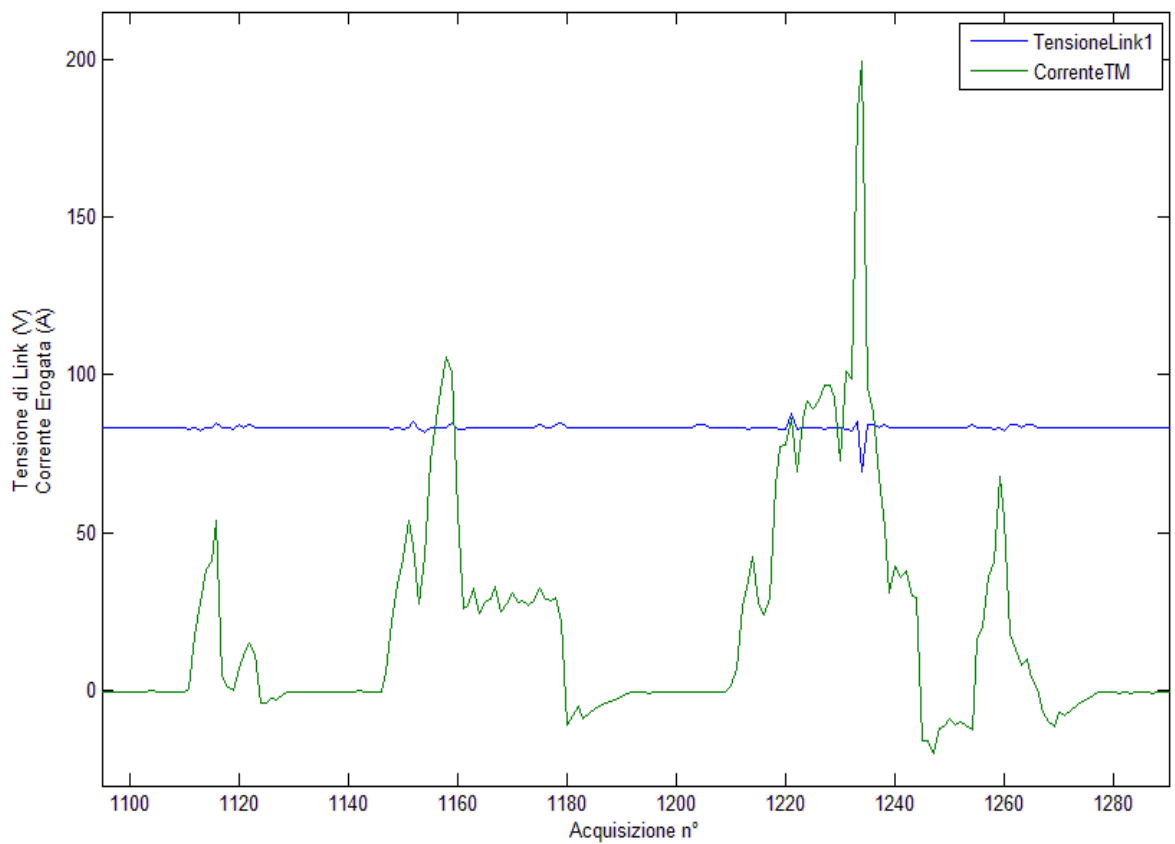


Figura 1.2.14 Tensione di Link - Corrente Erogata (singolo ciclo)

Per concludere il discorso sulle potenze, si vogliono riportare i valori medi delle potenze desiderate e fornite, anche in termini assoluti, ribadendo però ancora una volta il fatto che comunque si sono raggiunti valori di picco prossimi ai 14 kW, ben distanti dai 16 richiesti; compilato un foglio Excel, si è trovato:

➤ $MediaP_{desiderata} = 1.8kW$

➤ $MediaAssolutiP_{desiderata} = 2.1kW$

➤ $MediaP_{fornita} = 1.8kW$

➤ $MediaAssolutiP_{fornita} = 2.1kW$

Alla luce delle considerazioni esposte è ragionevole attendersi delle percorrenze chilometriche della vettura piuttosto basse. Infatti, come esposto riguardo alla capacità delle batterie, tanto più le richieste di corrente sono alte e variabili, minore sarà la durata delle batterie. In effetti da un qualsiasi grafico fin qui analizzato, è immediato rendersi conto che la vettura ha percorso 12 cicli ECE15, ai quali corrispondono quindi 11.390 km. Si tratta quindi di una percorrenza assolutamente modesta. In effetti se si considera il grafico della velocità del singolo ciclo, riportato nella seguente figura, si scopre una velocità media di circa 18 km/h, ma la richiesta di potenza comunque, come si può apprezzare nel grafico ad essa relativo, è mediamente piuttosto consistente. Il valore della velocità massima dell'intera prova è 50 km/h.

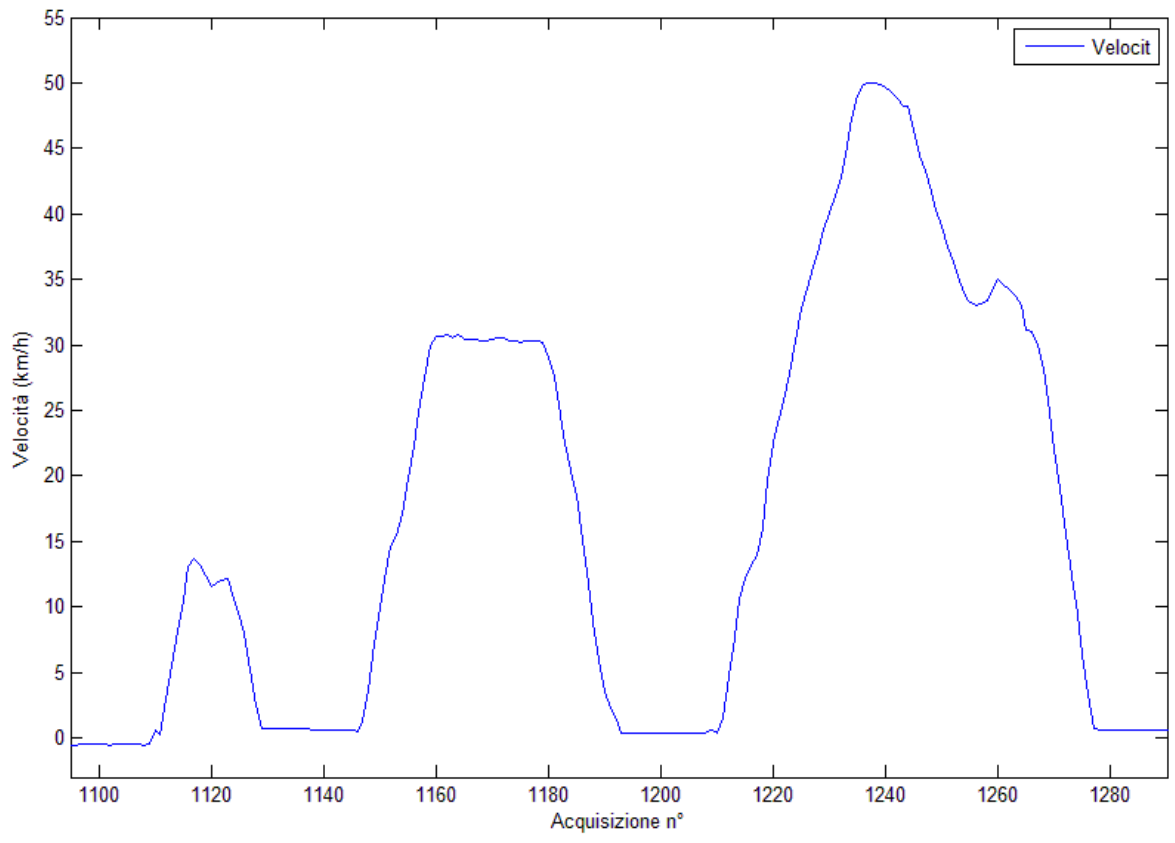


Figura 1.2.15 Velocità della vettura (singolo ciclo)

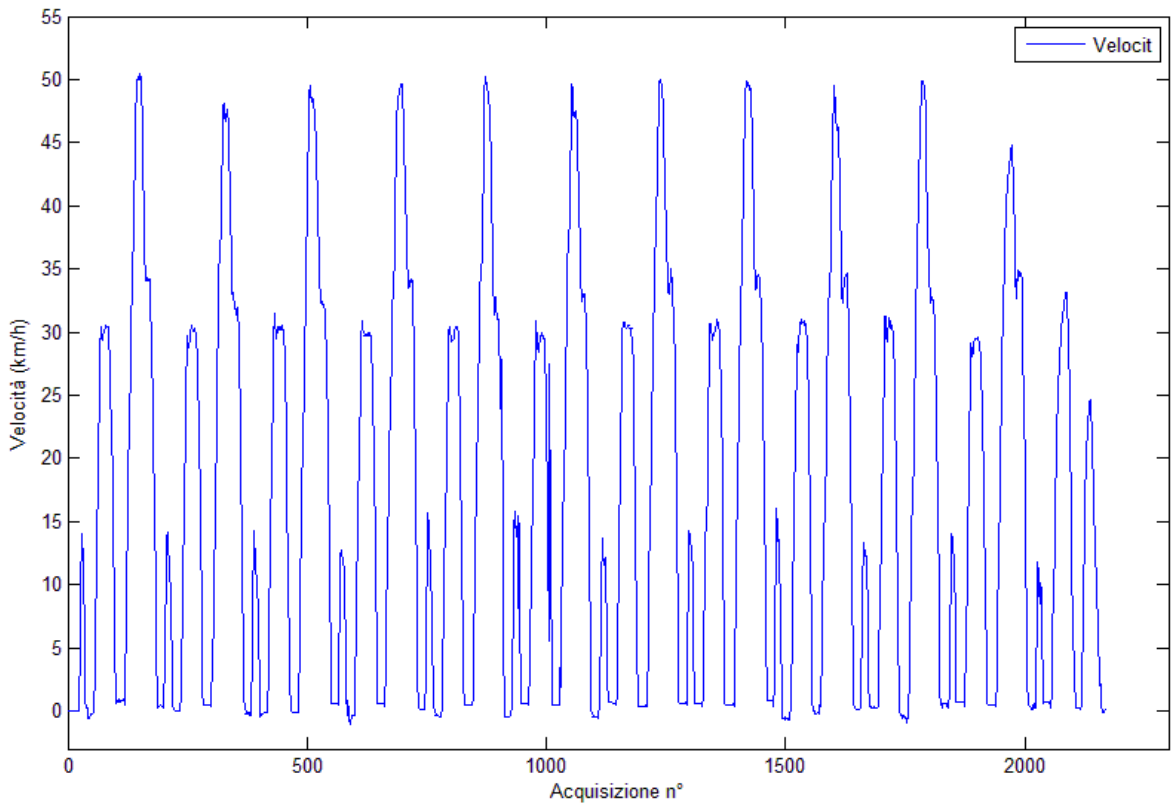


Figura 1.2.16 Velocità della vettura

1.3 Prove al banco a rulli: alimentazione a 5 batterie e ausilio supercondensatori

Andando ora ad analizzare i dati registrati durante la prova al banco a rulli della Urb-e con alimentazione a 5 batterie con l'ausilio dei supercondensatori, si considera poco utile ai fini dello scopo di questo elaborato, ripetere identiche considerazioni riguardo alcuni grafici di ovvia interpretazione, specialmente per i quali verrà effettuato, nel paragrafo successivo, un confronto diretto con i dati corrispondenti al caso precedente con alimentazione a sole batterie. Vengono dunque riportati i corrispettivi grafici relativi alla attuale prova in studio, e ci si limiterà, in questo paragrafo, a delineare i punti salienti su cui verterà il confronto tra le due prove, con e senza supercondensatori.

Dal seguente grafico, che rappresenta il segnale dell'acceleratore, si ha anche qui una corrispondenza con la forma del ciclo ECE15 con cui si effettua la prova.

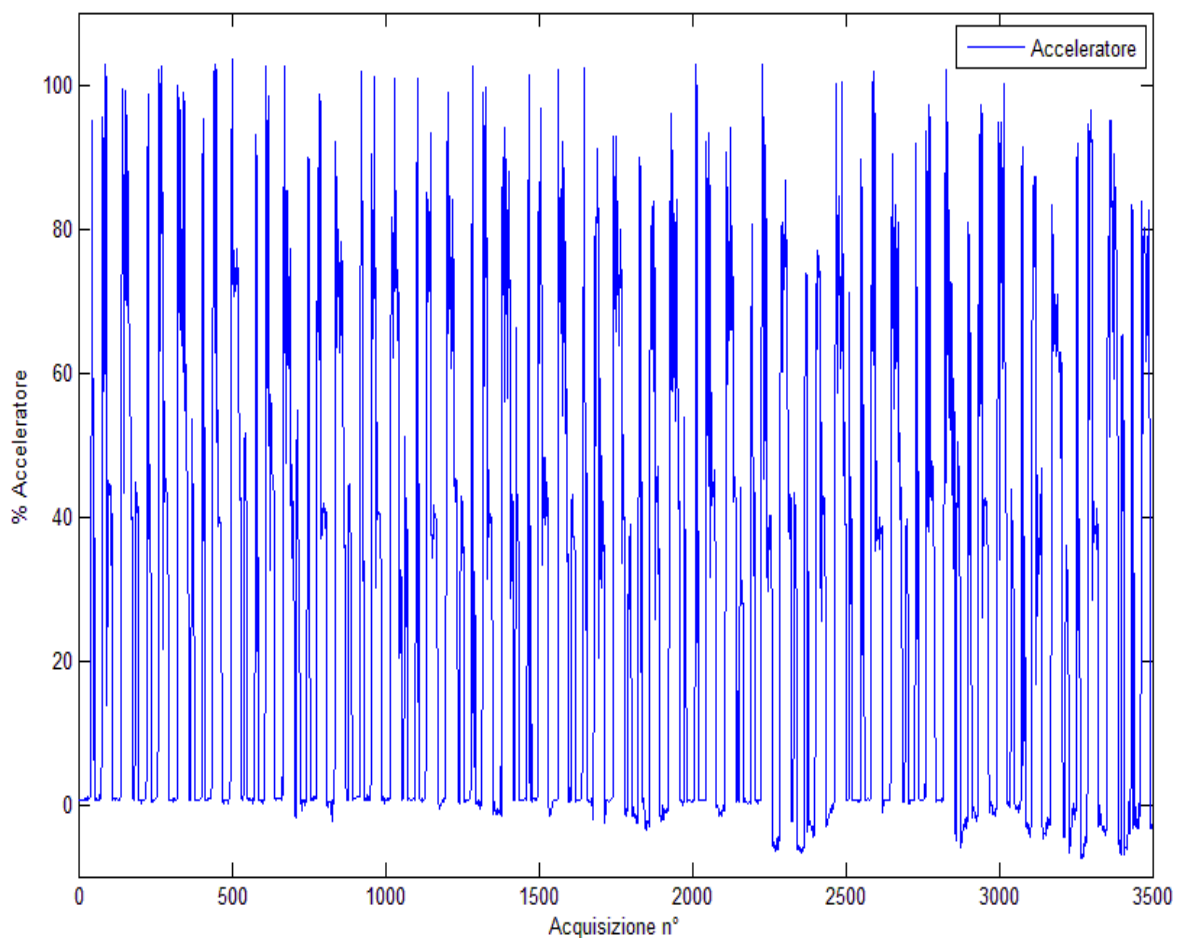


Figura 1.3.1 Segnale Acceleratore acquisito

Andando a confrontare il segnale dell'acceleratore con la corrente desiderata, anche in questo caso emerge una precisa corrispondenza tra i due segnali.

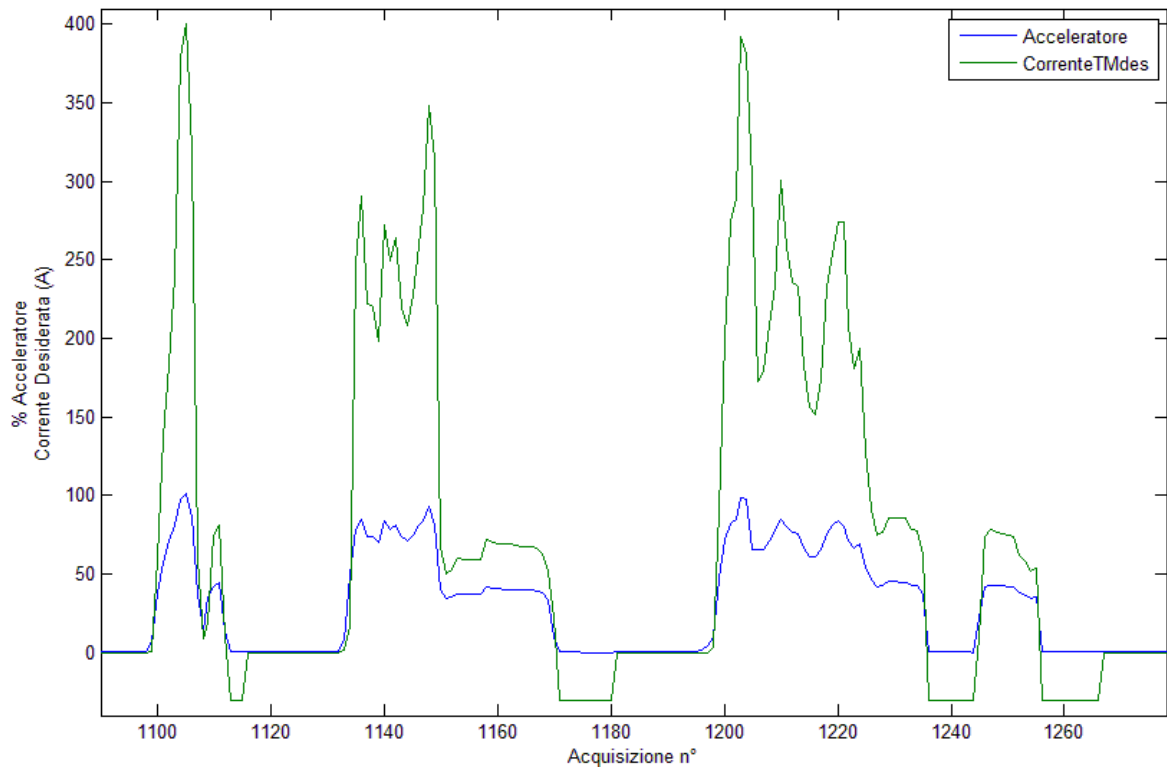


Figura 1.3.2 Corrente Desiderata - Segnale Acceleratore (singolo ciclo)

Spostando l'attenzione sui grafici che rappresentano la corrente desiderata e quella fornita si nota che il comportamento è buono, nel senso che l'erogazione segue fedelmente la forma di quella richiesta, ma in scala ridotta. Infatti mediamente il picco massimo di un singolo ciclo, è di circa 140-160 A a fronte dei 400 A richiesti. Si osserva anche che nella zona degli ultimi cicli vi è un picco di 190 A erogati.

Si nota la differenza di pendenza delle due curve. In particolare si ha che la velocità con la quale cresce la corrente fornita, è sì, minore della velocità di crescita della corrente richiesta, ma si presenta migliore rispetto al caso di alimentazione sole batterie.

Dunque l'ausilio dei supercondensatori si traduce, nella pratica, con uno spunto maggiore in fase di ripartenza, ossia, si ha un erogazione di corrente più istantanea rispetto alla prova precedentemente discussa. Questo vantaggio è merito del supercondensatore, il quale è progettato proprio per caricarsi/scaricarsi il più velocemente possibile.

Le informazioni appena discusse possono riscontrarsi nelle seguenti figure.

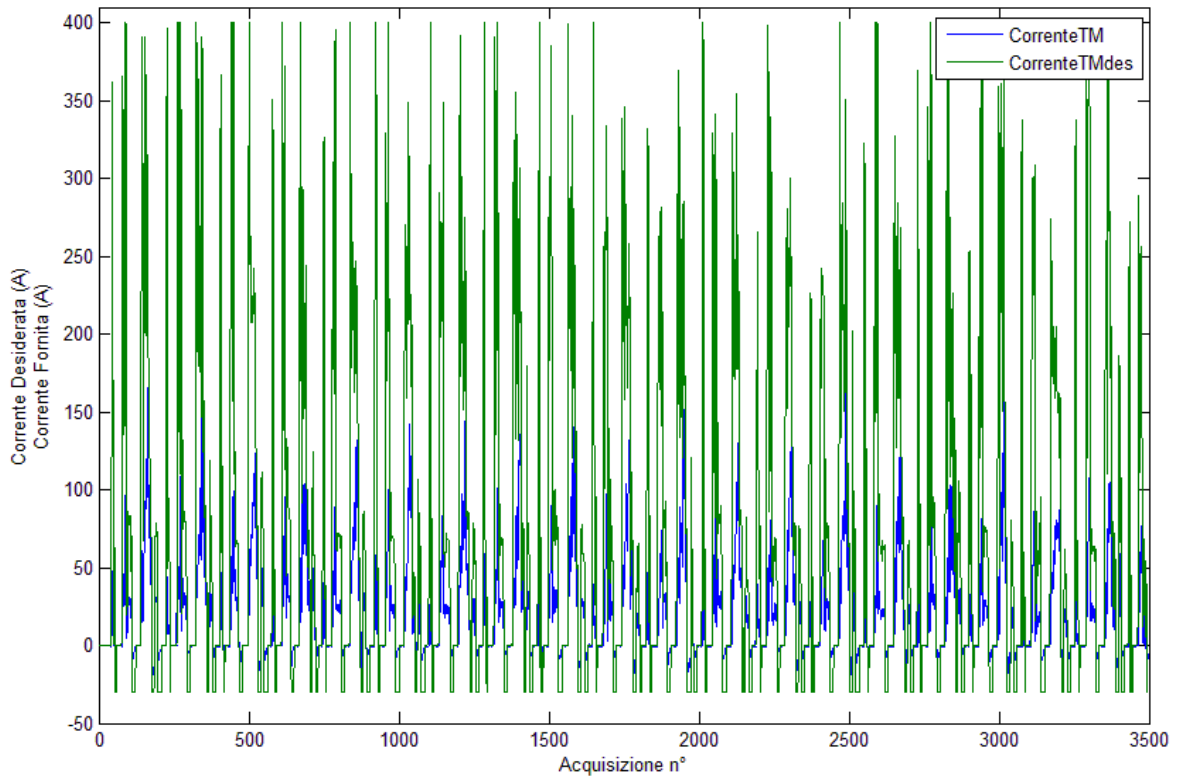


Figura 1.3.3 Corrente Desiderata - Corrente Fornita

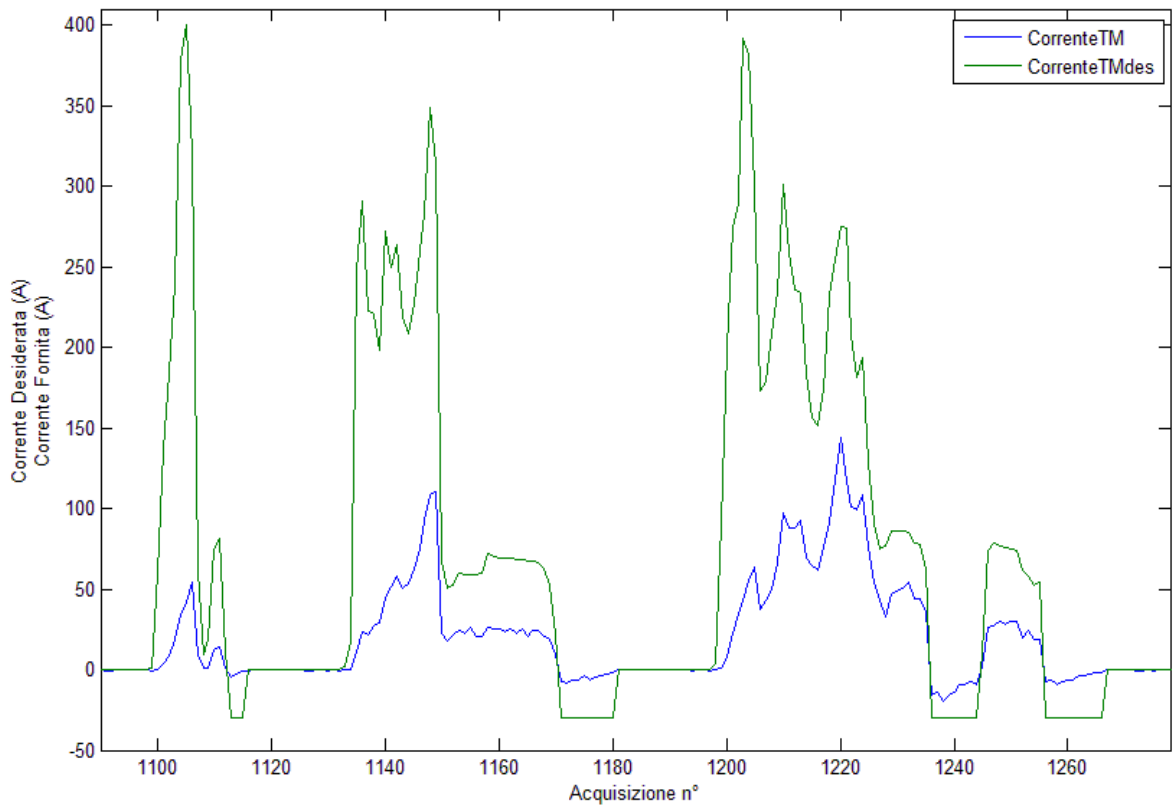


Figura 1.3.4 Corrente Desiderata - Corrente Fornita (singolo ciclo)

Grazie all'utilizzo di due sensori ad effetto Hall, il cui segnale è stato inviato ad un oscilloscopio, si è potuto acquisire dati relativi alle correnti erogate da una singola batteria e da un singolo condensatore. Questi dati, elaborati in ambito Excel, hanno fornito le curve sottostanti.

Da queste curve possono emergere alcune considerazioni interessanti specialmente dalla terza immagine che segue, la quale mostra un confronto diretto, relativo ad un singolo ciclo della prova, tra la corrente erogata dalla batteria e dal supercondensatore.

Innanzitutto si evidenzia che una singola batteria eroga nei tratti più gravosi del ciclo un valore medio di circa 150 A, il condensatore eroga invece, un valore medio di circa 100 A nei picchi superiori, mentre mostra un valore medio di -70 A nei picchi inferiori.

Tale valore negativo è legato alla convenzione utilizzata secondo la quale sotto lo zero il condensatore sta recuperando corrente in frenata, ossia si sta ricaricando grazie al freno motore. Ovviamente quando il condensatore assume segno positivo vuol dire che sta erogando. Questo però non vuole intendere che il condensatore sta erogando corrente finalizzata solamente alla trazione, ma esiste la possibilità che tale corrente serva anche a mantenere stabile la V_{link} .

Altra considerazione interessante, infatti, riguarda la discrepanza della corrente effettivamente erogata dalla macchina con quella erogata singolarmente dalle batterie e dai supercondensatori. A tal proposito si ricorda che la corrente effettivamente fornita ha valore medio di circa 150 A, mentre quella erogata dalle batterie è di circa 150 A, e infine quella fornita dai supercondensatori è di circa 100 A. Si evidenzia quindi un scarto medio positivo pari approssimativamente 100 A.

Questi 100 A avanzati rappresentano il fatto che le batterie erogano corrente in direzione dei supercondensatori per ricaricarli. Infatti dato che si è in presenza di due sistemi in parallelo, le batterie vogliono riportare i supercondensatori alla loro stessa tensione poiché essi, essendo più veloci in scarica delle batterie stesse, si sono "sbrigati" a fornire corrente al motore. Bisogna far notare però che questa è una ipotesi teorica basata sulla tecnologia intrinseca dei supercondensatori, cioè sulle basse resistenze interne ad essi, ed anche sull'inerzia delle batterie al piombo a fornire corrente. E' infatti impossibile determinare quale sia il contributo preciso finalizzato alla trazione dei singoli elementi.

Le suddette considerazioni possono riscontrarsi nelle tre seguenti figure.

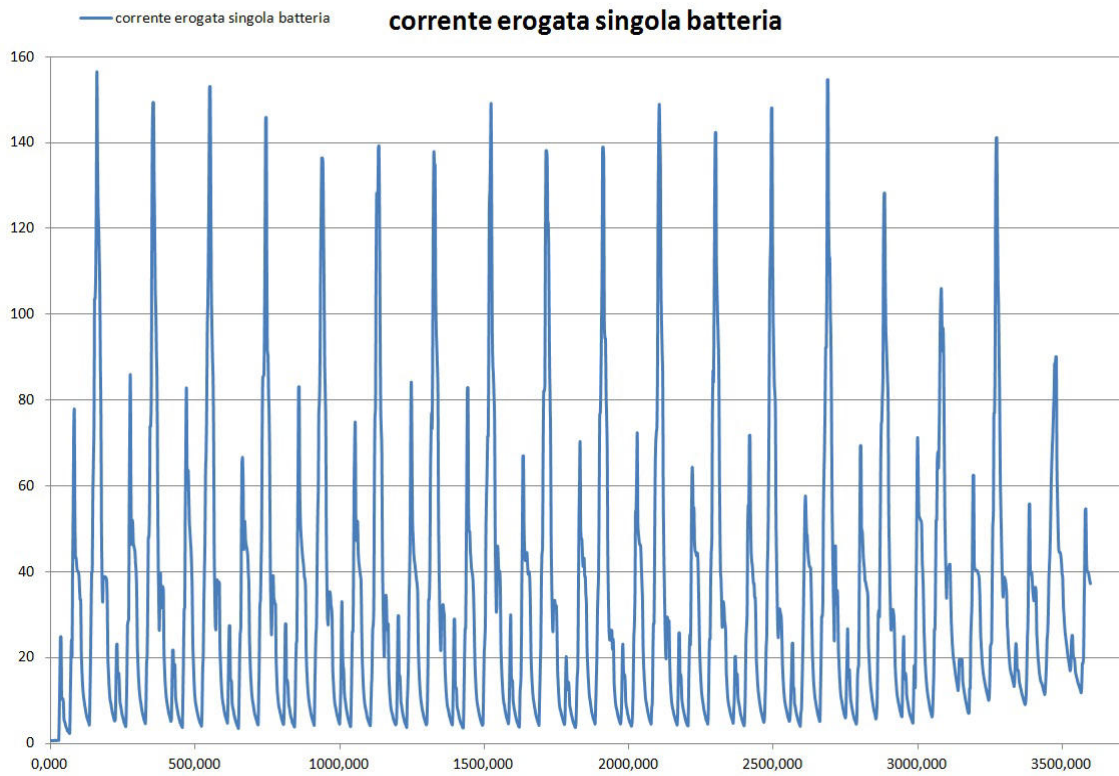


Figura 1.3.5 Corrente Fornita dalla singola batteria

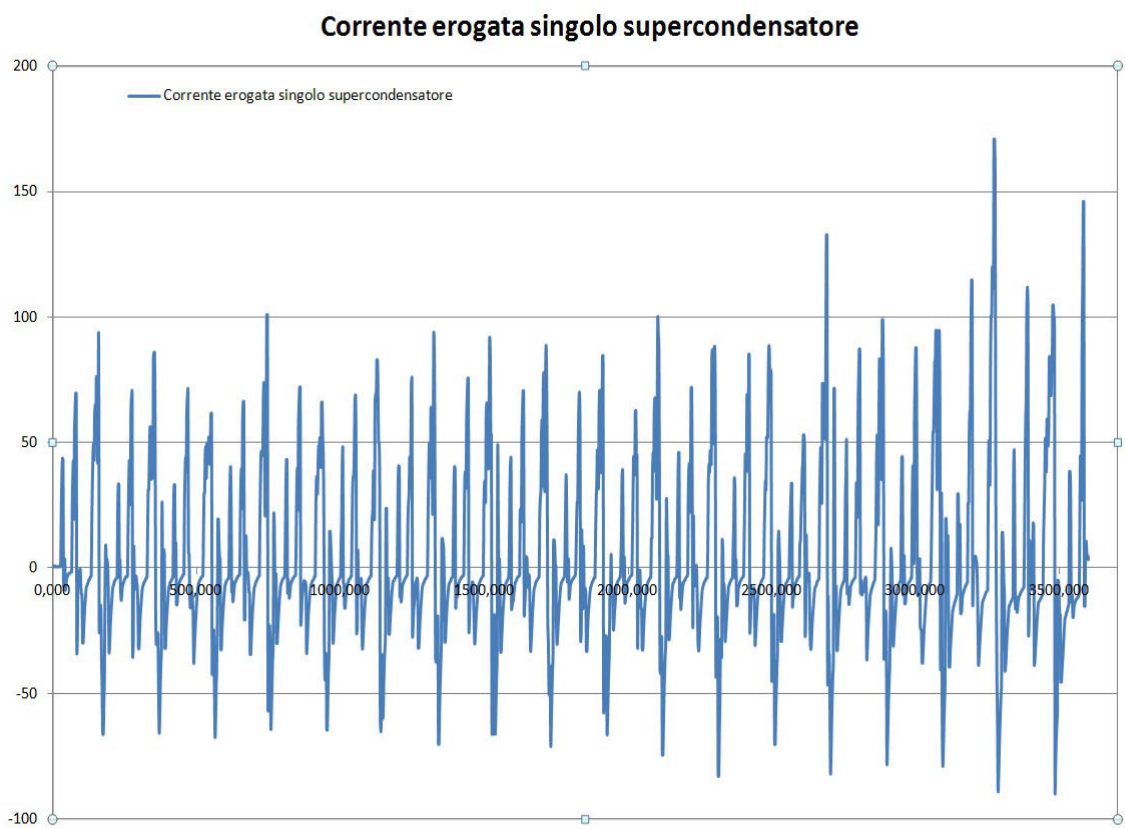


Figura 1.3.6 Corrente Fornita dal singolo supercondensatore

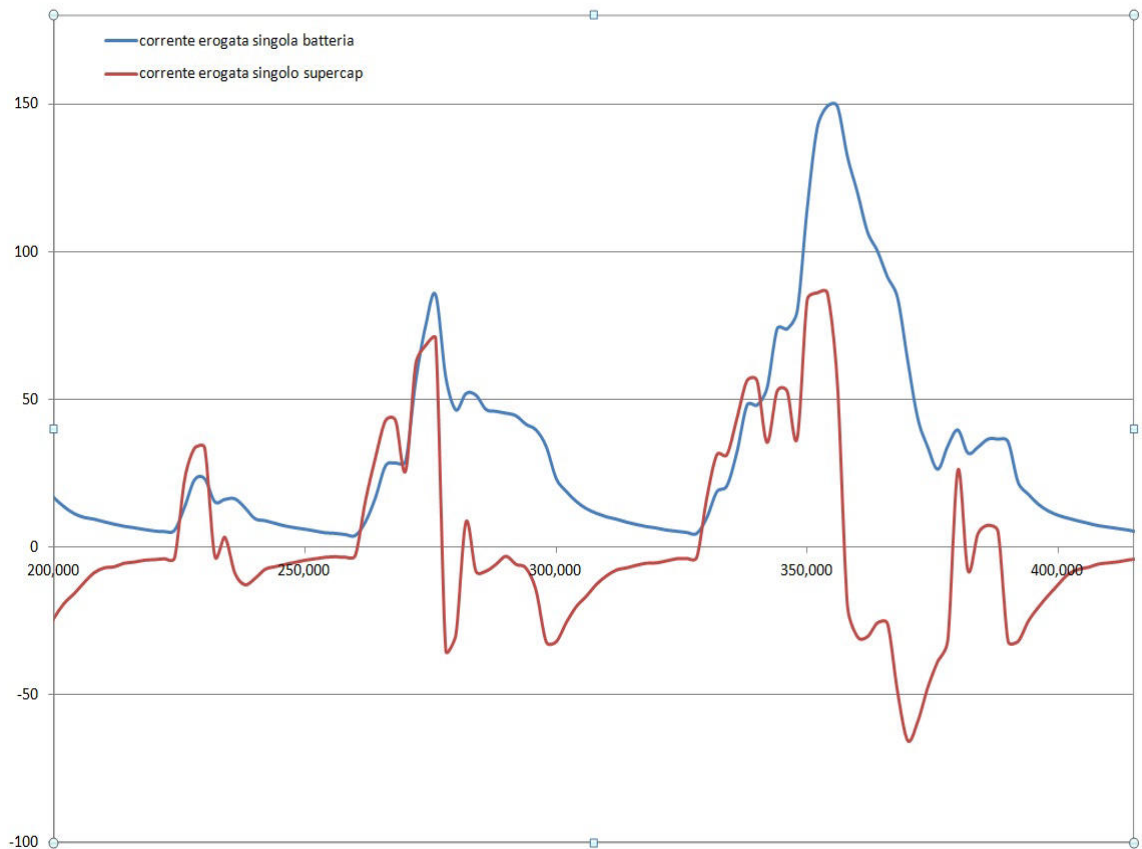


Figura 1.3.7 Corrente Fornita dalla singola batteria e dal singolo supercondensatore (singolo ciclo)

Emerge infine dai grafici che il recupero in frenata è circa pari a -20 A, valore ottenibile dalla somma di -70 A, valore medio dei picchi negativi dei supercondensatori, con il valore della corrente positiva corrispondente alle batterie nello stesso istante. Considerando nuovamente che non è possibile conoscere precisamente come si ripartiscono queste correnti all'interno degli organi della vettura, si ipotizza che il recupero in frenata possa assumere sempre un valore di -30 A, come viene anche indicato nel file Strategy, e che la corrente in eccesso di circa 10 A sia distribuita per mantenere costante la tensione di link.

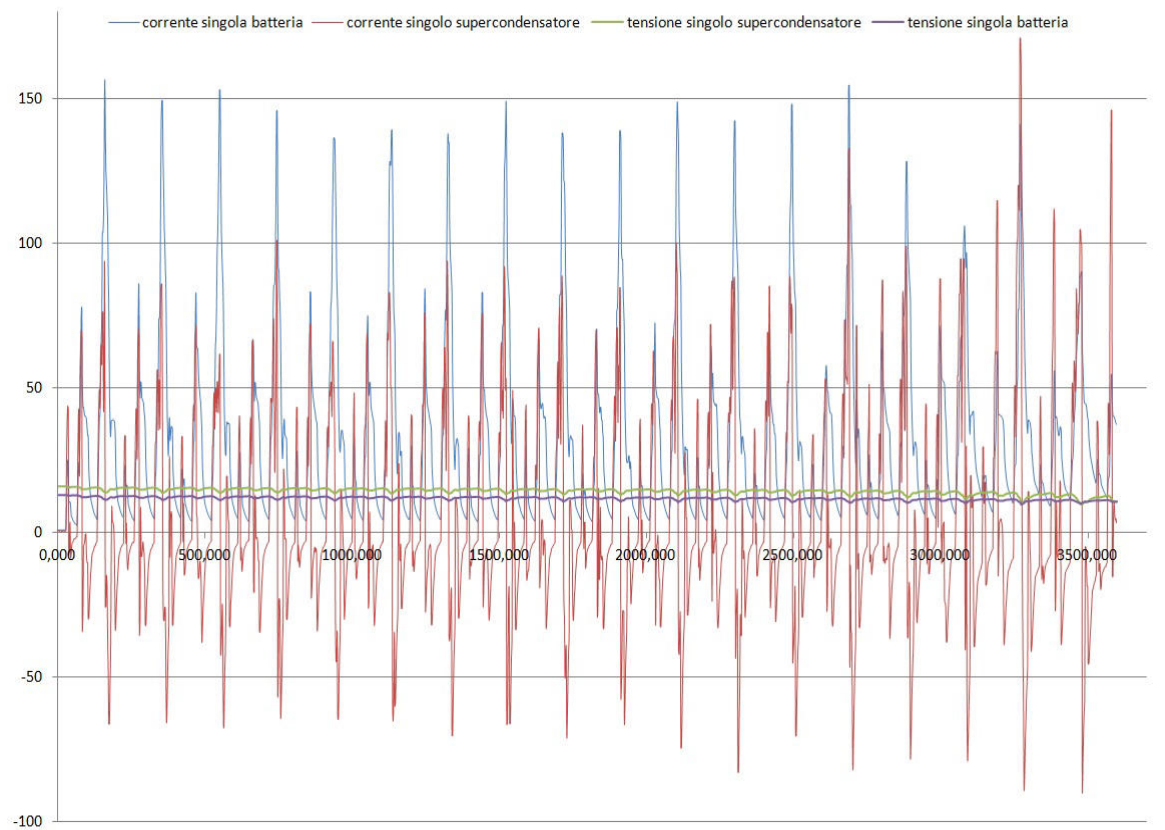


Figura 1.3.8 Correnti - Tensioni della singola batteria e del singolo supercondensatore

Si analizza adesso l'andamento delle tensioni delle batterie e dei supercondensatori.

Per quanto riguarda la batteria si ha una tensione iniziale a vuoto di circa 13 V, mentre una tensione finale, sempre a vuoto, di circa 11 V. L'ampiezza della caduta di tensione durante il susseguirsi della prova rimane pressoché costante e pari a 1.7 V.

Invece andando a guardare il comportamento del supercondensatore si ha una tensione iniziale a vuoto di circa 16 V, mentre una tensione finale, sempre senza carico, di circa 12.7 V. L'ampiezza della caduta di tensione qui è più alta, si aggira intono a valori di 2.7 V nella zona iniziale, e diventa più consistente con l'avanzamento della prova fino a variazioni di 4.1 V. Si evidenzia quindi un utilizzo dinamico dei supercondensatori, che a quanto pare, si predispongono a ricevere con leggero anticipo il carico rispetto alle batterie.

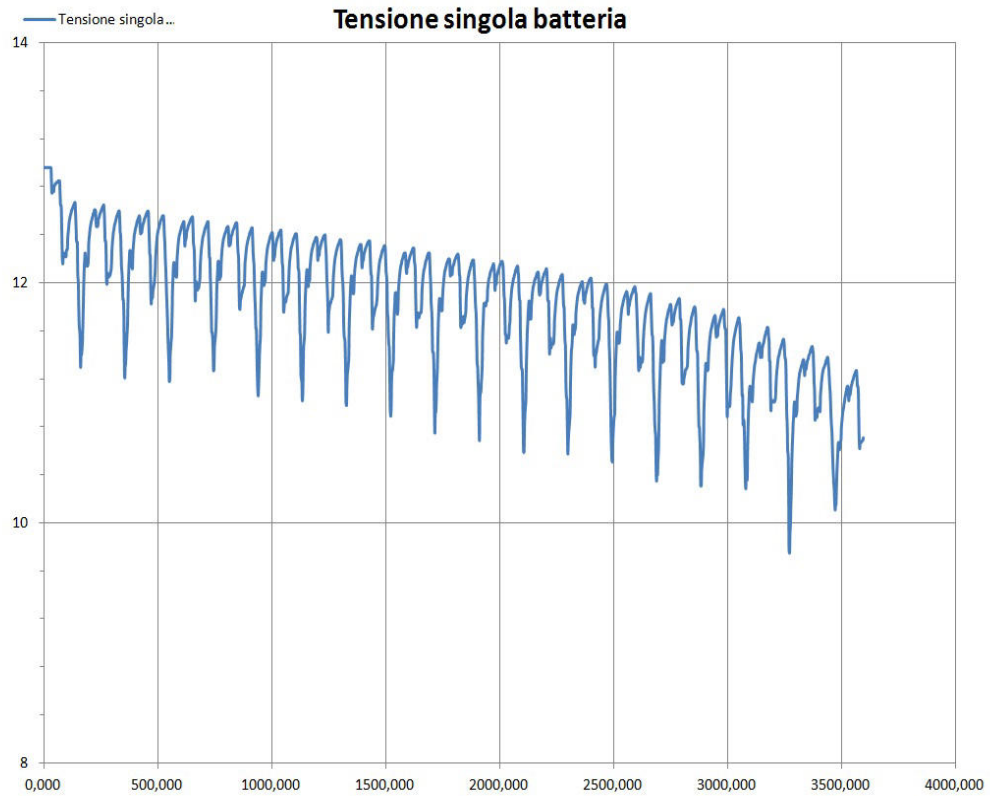


Figura 1.3.9 Tensione singola batteria

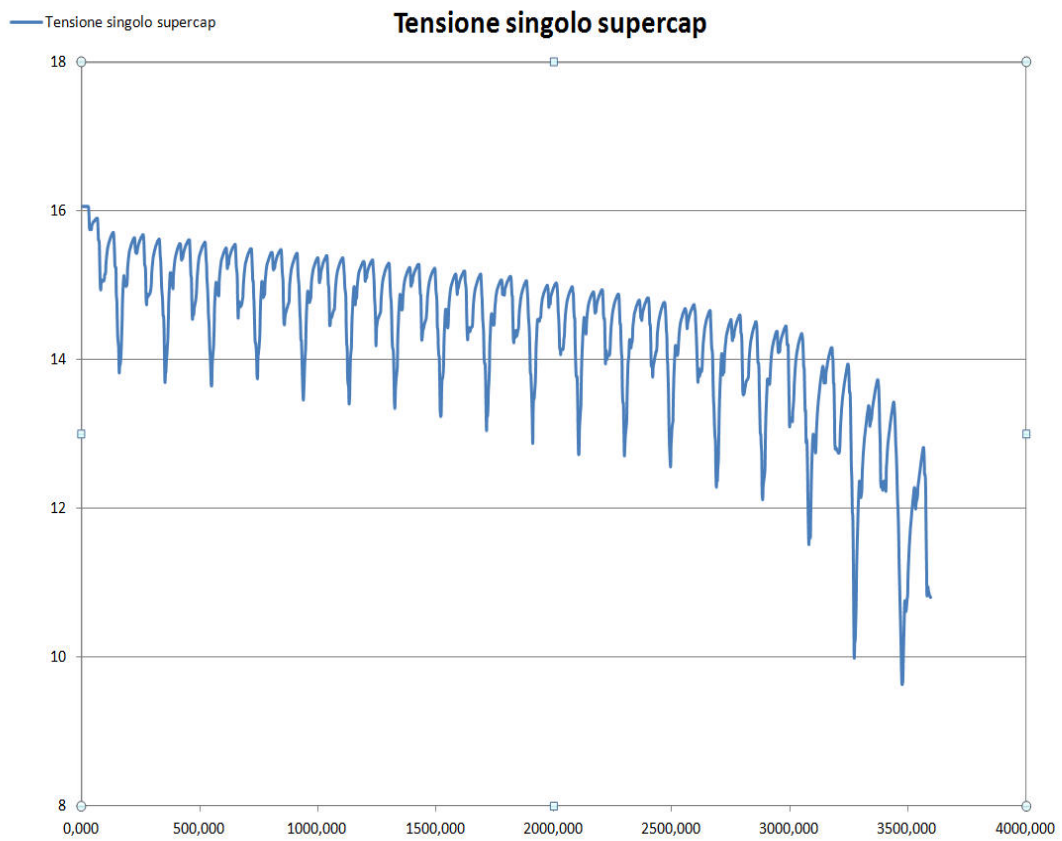


Figura 1.3.10 Tensione singolo supercondensatore

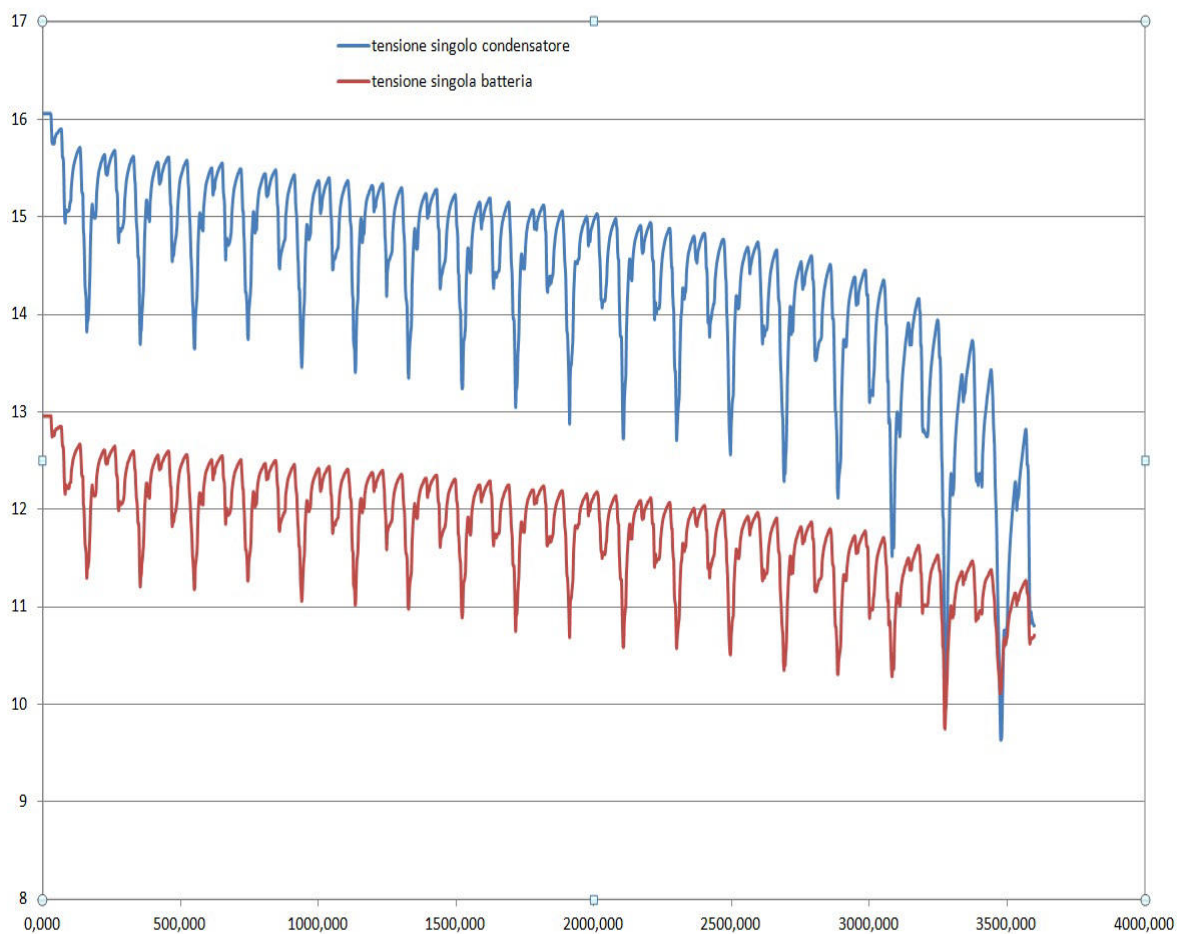


Figura 1.3.11 Tensione singola batteria e singolo supercondensatore

Per quanto riguarda invece la potenza erogata essa non raggiunge i 16 kW di picco teorici di potenza massima ma si aggira intorno ai 12kW in quasi tutta la prova, con alcuni picchi fino a 13.5 kW, per poi a scendere a circa 7kW nella parte finale. Quest'ultimo è stato il motivo che ha portato a determinare la fine della prova, poiché a sensibilità del pilota, le prestazioni della vettura erano diventate estremamente scarse.

Tali valori possono riscontrarsi nelle successive immagini relative alla potenza.

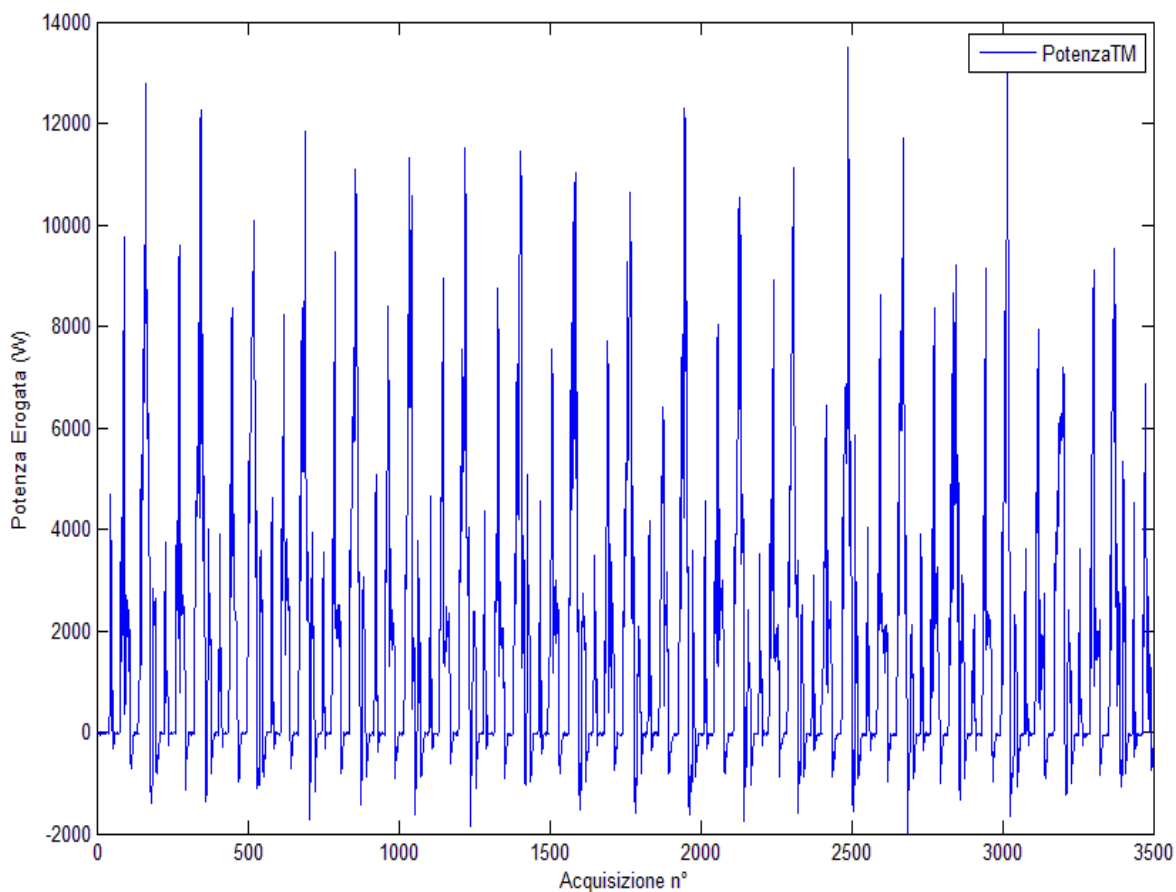


Figura 1.3.12 Potenza Erogata

Si riportano inoltre i valori medi delle potenze desiderate e fornite, anche in termini assoluti, ribadendo però ancora una volta il fatto che comunque si sono raggiunti valori di picco prossimi ai 14 kW, ben distanti dai 16 richiesti; compilato un foglio Excel, si è trovato:

- $MediaP_{desiderata} = 1.6kW$
- $MediaAssolutiP_{desiderata} = 1.9kW$
- $MediaP_{fornita} = 1.7kW$
- $MediaAssolutiP_{fornita} = 2kW$

Si osserva anche che ponendo sul medesimo grafico entrambe le curve di potenza si ha un'ottima corrispondenza tra di loro, escludendo ovviamente come detto in precedenza il picco massimo non raggiunto.

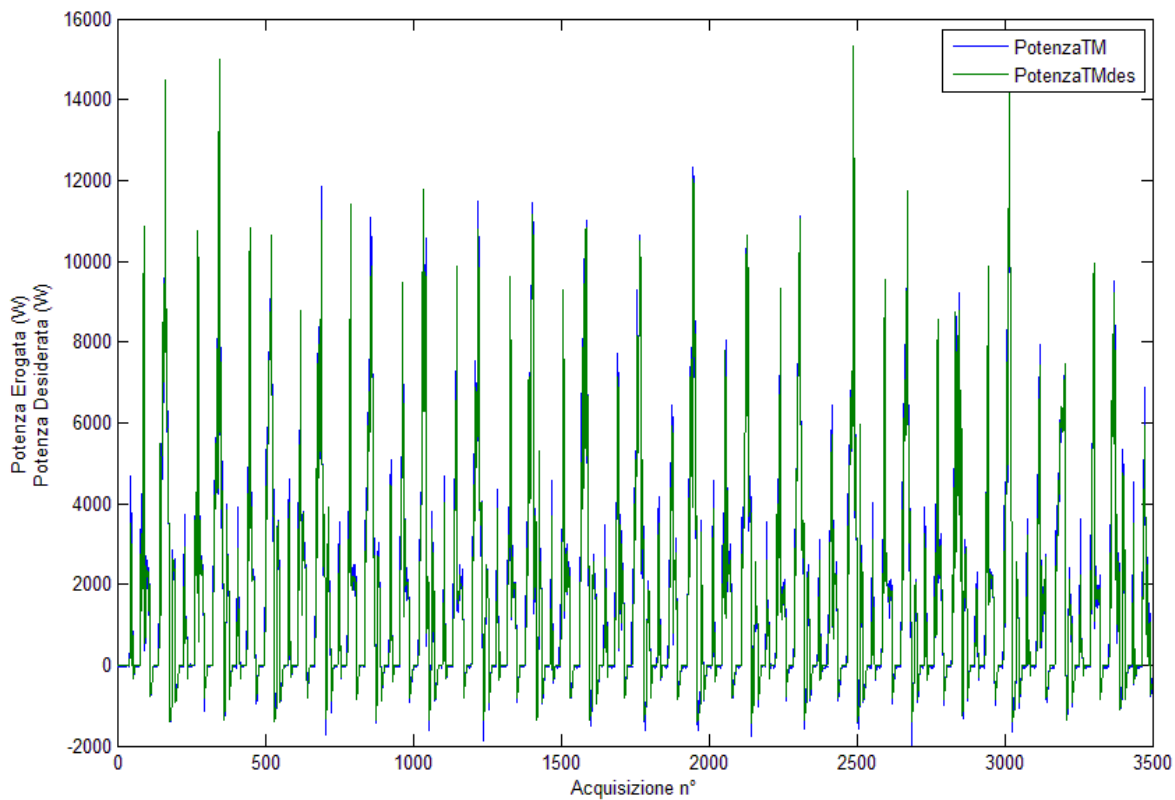


Figura 1.3.13 Potenza Erogata – Potenza Desiderata

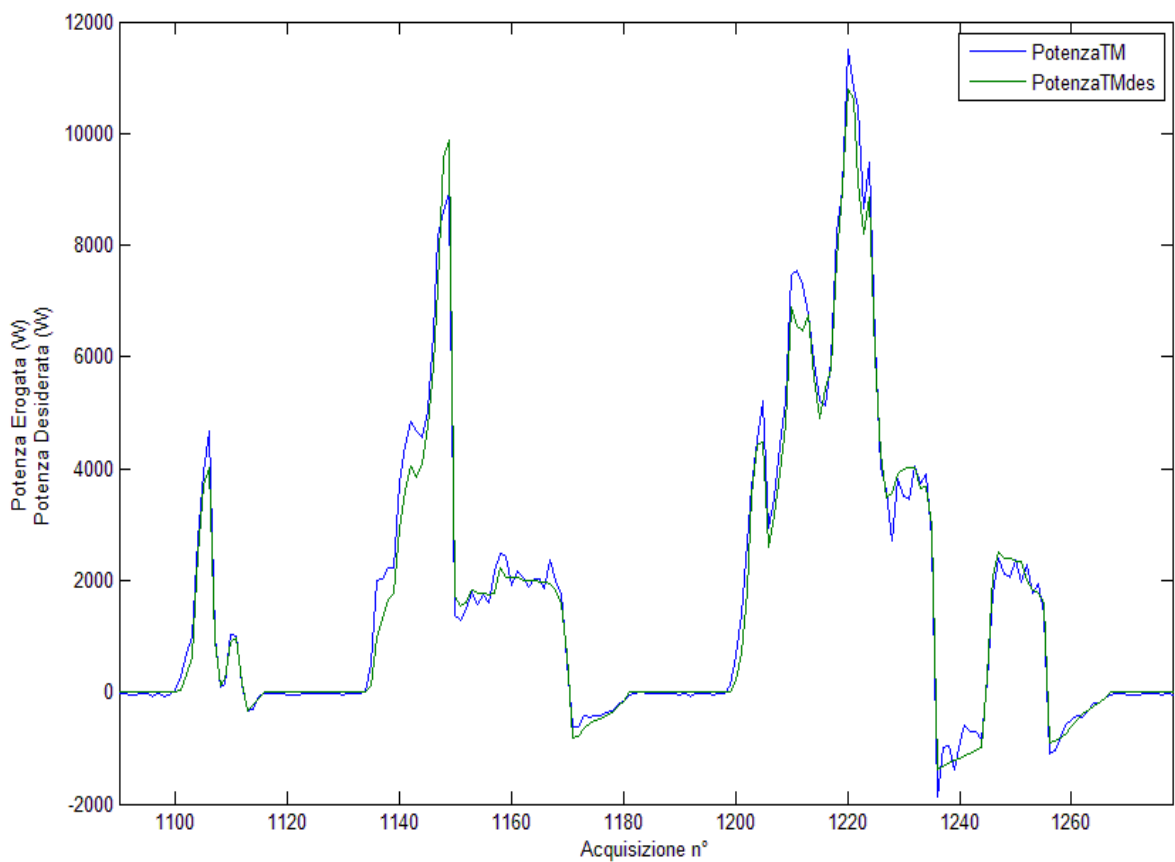


Figura 1.3.14 Potenza Erogata - Potenza Desiderata (singolo ciclo)

Nella figura seguente invece è rappresentata la tensione di link, essa subisce degli abbassamenti di circa 5-10 V durante tutto il ciclo tranne un picco negativo di circa 20 V verso la fine della prova; inoltre presenta una zona instabile proprio in corrispondenza dell'ultimo ciclo. A suo favore però presenta un andamento molto lineare, e gli abbassamenti si spostano comunque in range limitati.

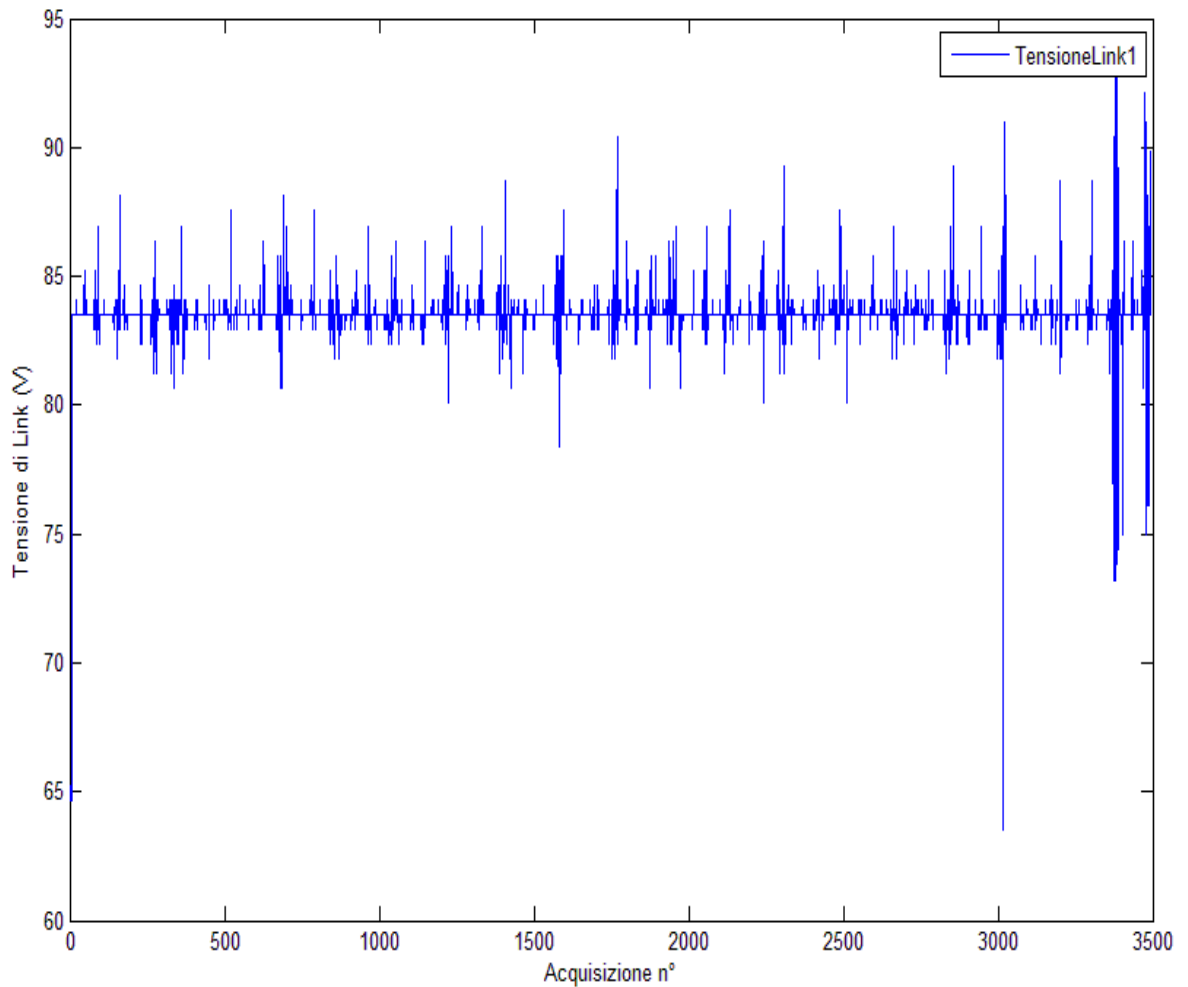


Figura 1.3.15 Tensione di Link

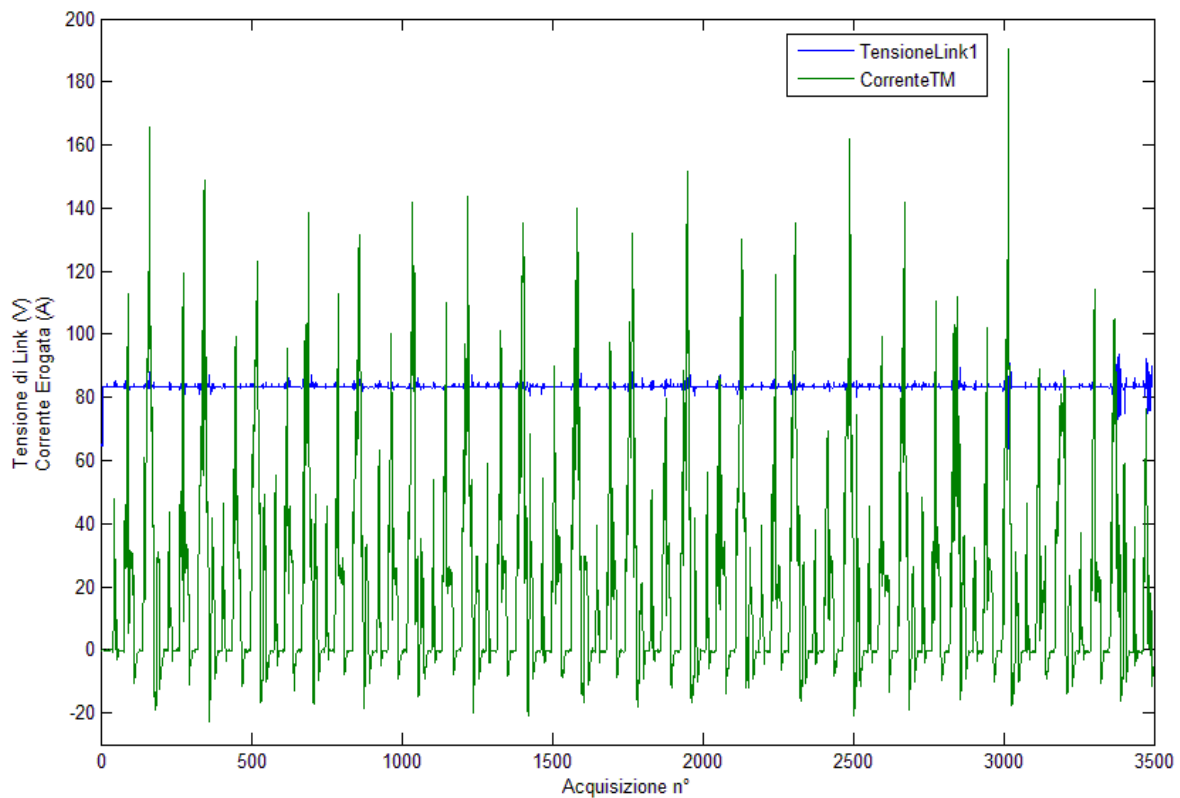


Figura 1.3.16 Tensione di Link - Corrente Erogata

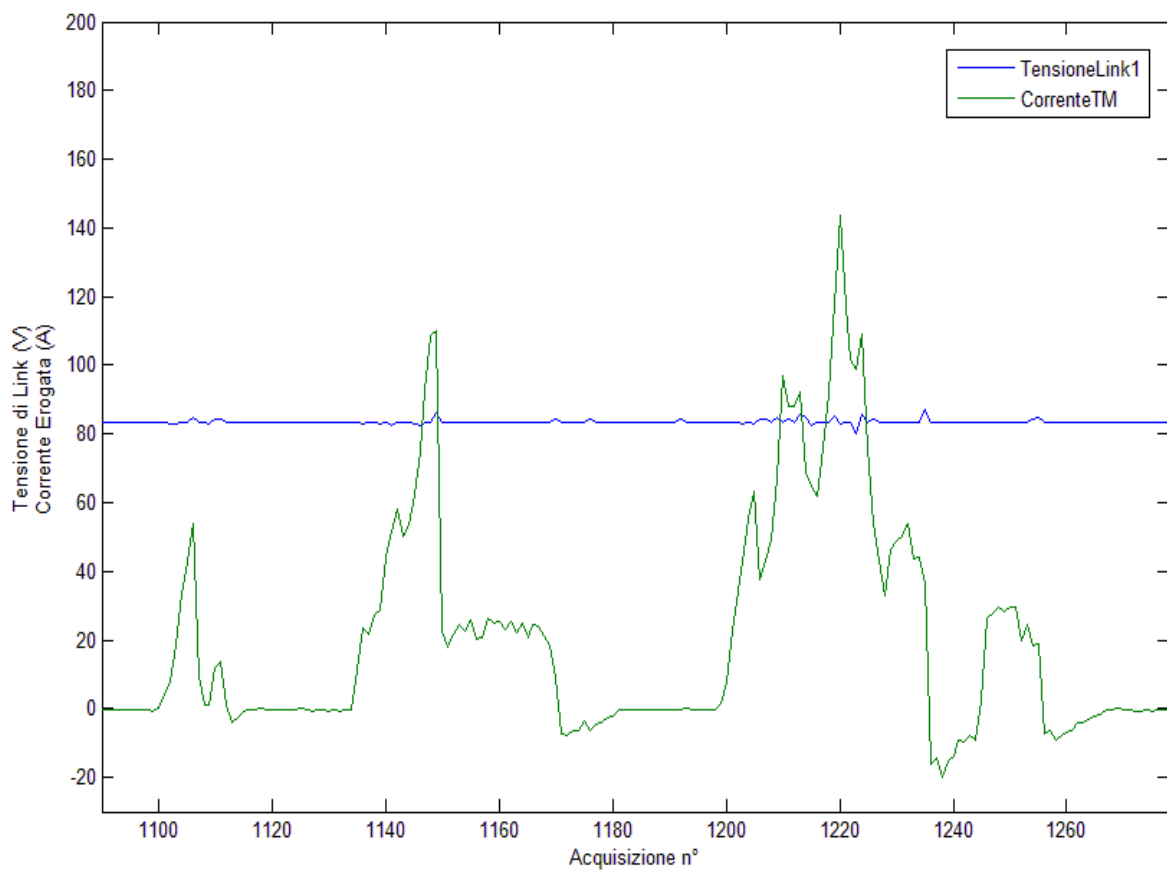


Figura 1.3.17 Tensione di Link - Corrente Erogata (singolo ciclo)

Riguardo alle due precedenti figure che riportano la corrente effettivamente erogata e la tensione di link si nota come quest'ultima riesce mantenersi pressoché costante anche quando la richiesta di corrente, e dunque anche quella erogata, risultano elevate. Questa osservazione, per motivi già illustrati in precedenza, si verifica in correnti desiderate con picchi più piccoli e questo giova al recupero in frenata.

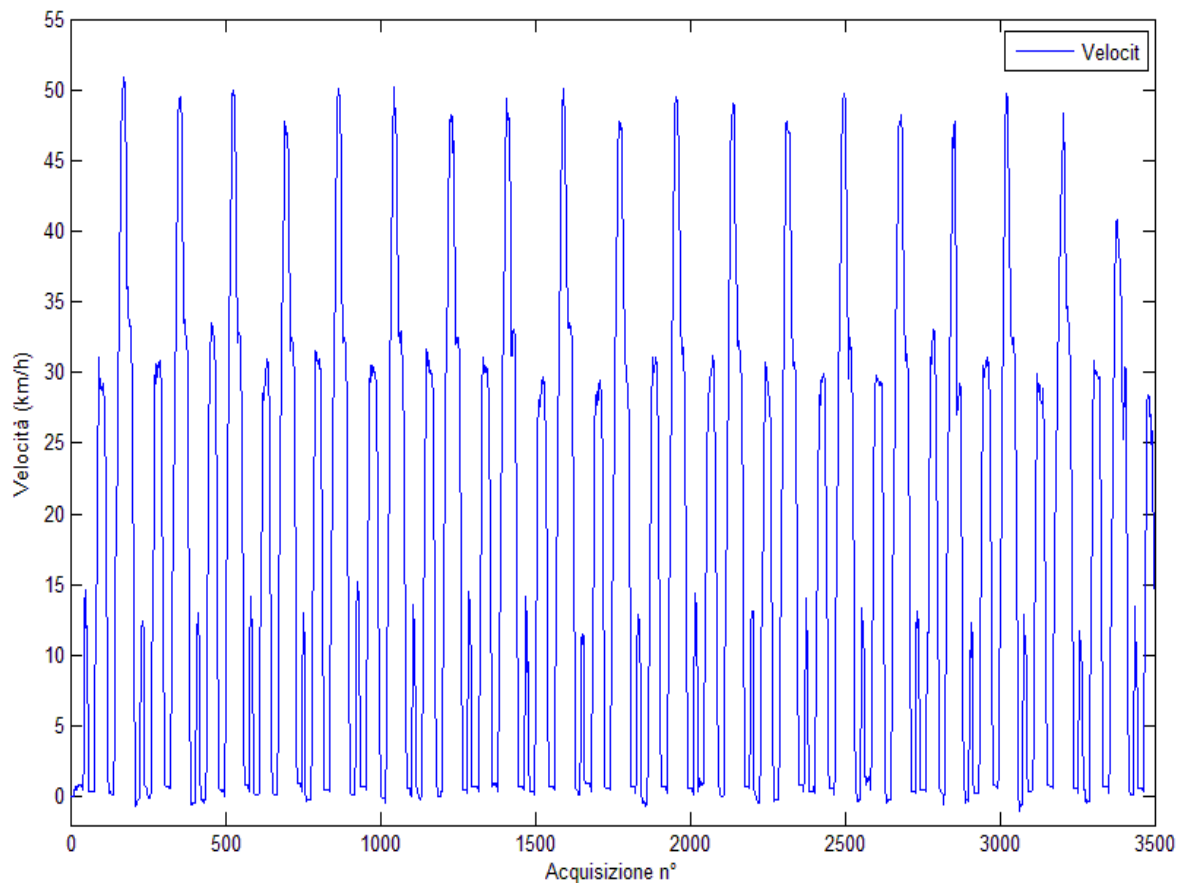


Figura 1.3.18 Velocità della vettura

La vettura ha percorso 22 cicli ECE15, ai quali corrispondono quindi 21.6 km. Anche in questo caso si tratta di una percorrenza modesta considerando le vetture concorrenti alla Urb-e. Il valore della velocità media di percorrenza è di 18km/h mentre la velocità massima raggiunta durante la prova è di 51 km/h.

1.4 Prove al banco a rulli: Confronto dei risultati delle due prove effettuate

Effettuando un confronto diretto tra i dati ottenuti nelle due differenti prove, il risultato più evidente ed interessante è senza dubbio la percorrenza. Infatti la distanza percorsa è quasi raddoppiata passando da 11.4 km con le sole batterie a 21.6 km con l'ausilio dei supercondensatori. Anche osservando il numero di cicli ECE15 portati a termine nelle due prove sul banco a rulli si ha che, nella prima prova il veicolo riesce a completare 12 cicli, mentre nella seconda ne completa 22.

Il miglioramento si può constatare, oltre ovviamente all'esperienza vissuta, in qualsiasi grafico che mette a confronto i dati ottenuti, nei quali infatti si nota una lunghezza diversa delle curve in base al numero delle acquisizioni fatte.

Si riporta nella seguente immagine il confronto tra le tensioni di link.

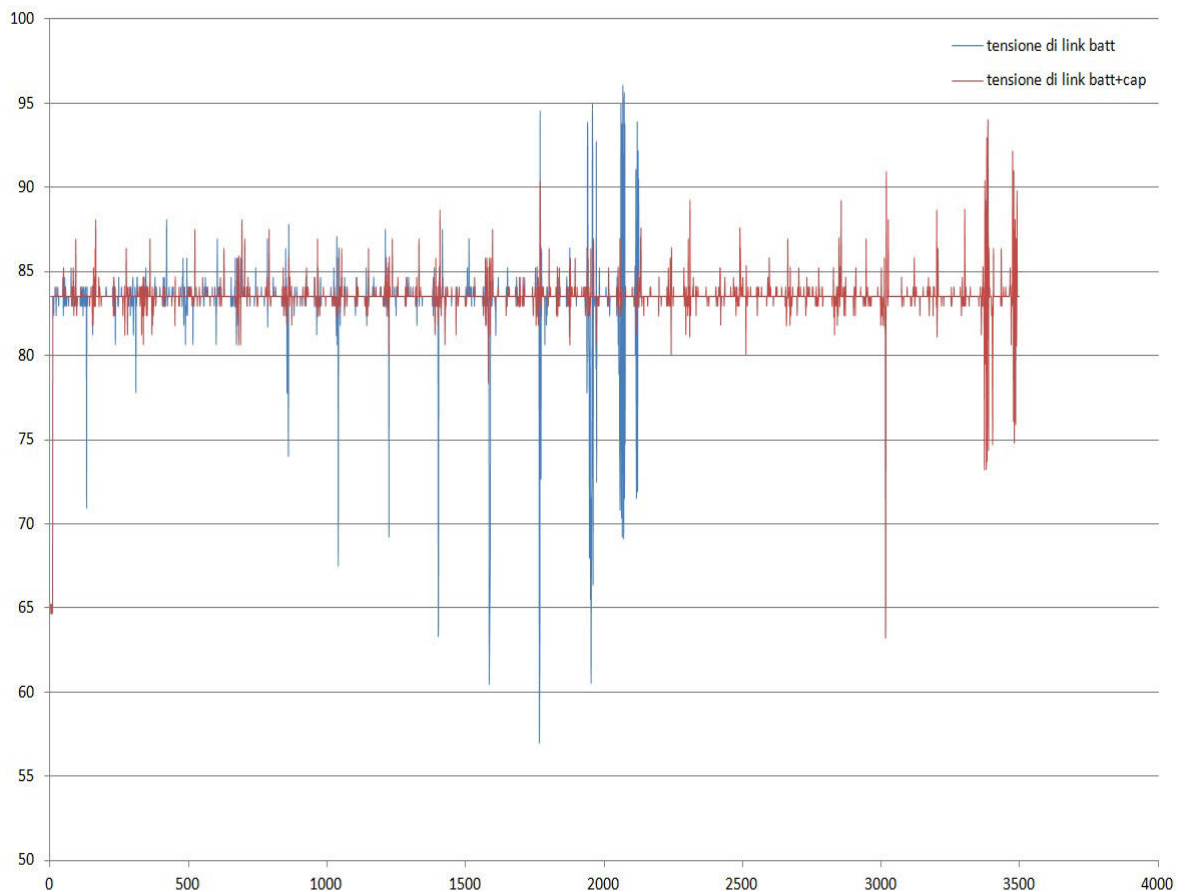


Figura 1.4.1 confronto Tensioni di Link nelle due prove

Come detto in precedenza la prima cosa che risalta agli occhi del Lettore è che la curva blu termina molto prima della curva rossa, infatti per la prova con le sole batterie si è riusciti a fare solo 2161 acquisizioni contro le 3499 della prova con i supercondensatori.

Analizzando ora, proprio la V_{link} , si osserva che con l'ausilio dei supercondensatori si riesce a mantenerla pressoché costante, limitando molto anche il range di oscillamento. Si evidenzia infatti che nel caso di alimentazione a sole batterie la tensione subisce abbassamenti elevati con abbassamenti di circa 15-20 V. Proprio per questo in alcuni tratti si richiede troppa potenza al pacco batterie manifestando quindi picchi di corrente e tensione che danneggiano quest'ultime.

Con l'introduzione dei supercondensatori si hanno invece abbassamenti della tensione molto minori dell'ordine di 5-10 V, tranne un singolo caso di 20 V. Dunque, nonostante le richieste elevate di corrente, la tensione di link in questo caso rimane piuttosto lineare.

Questo miglioramento si può anche verificare, per motivi affrontati nei paragrafi precedenti, osservando le curve relative alle correnti desiderate ed erogate, illustrate nelle prossime figure. Infatti si notano picchi di valore inferiore nella prova con i supercondensatori.

Si fa notare, per chiarezza espositiva, che i prossimi grafici riportati sono uno zoom dei grafici relativi alle prove complessive, sono infatti riferiti ad un singolo ciclo per evidenziare al meglio le differenze. Bisogna però tener presente che molte considerazioni sono effettuate sulle prove complessive, per cui è possibile che nell'ingrandimento di un singolo ciclo non si manifesti il comportamento medio riscontrato ed analizzato. Inoltre, il confronto dei due casi si effettua in particolare per la terza parte del ciclo ECE15 che è la parte più difficile da affrontare per la vettura.

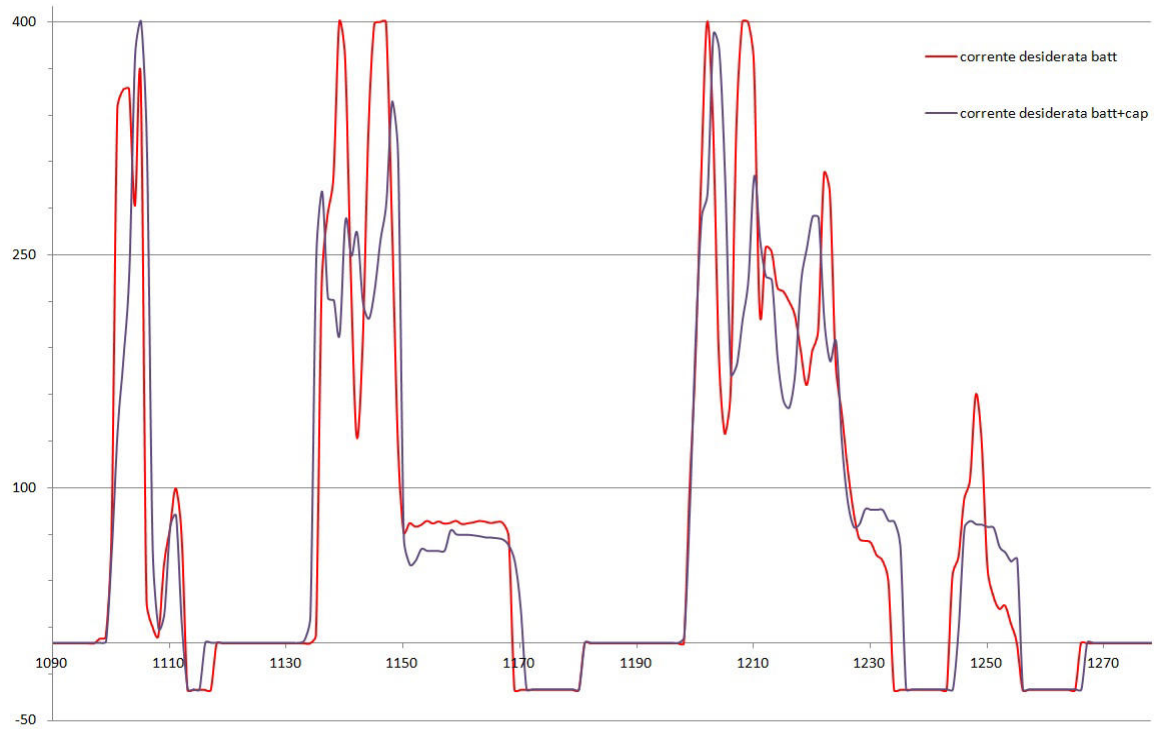


Figura 1.4.2 confronto Correnti Desiderate nelle due prove

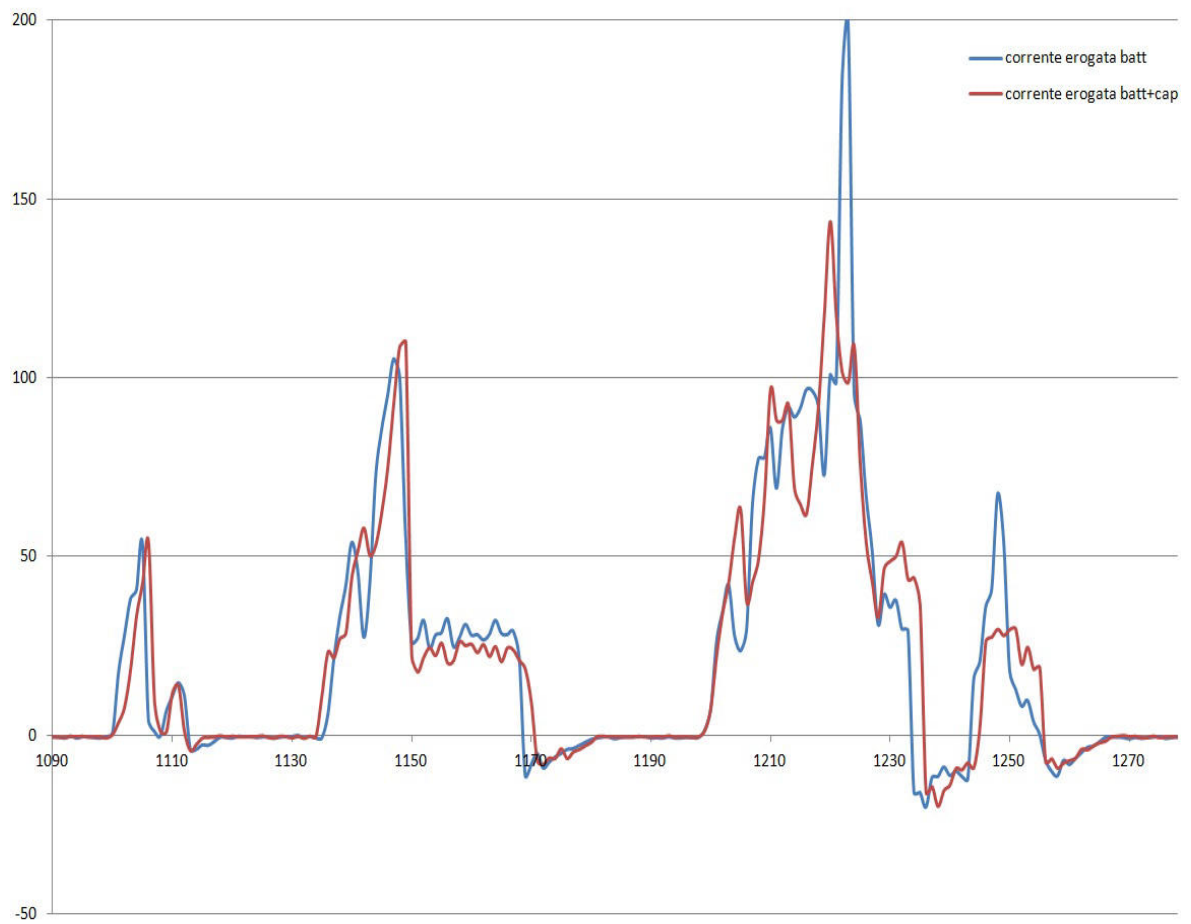


Figura 1.4.3 confronto Correnti Erogate nelle due prove

Per quanto riguarda le correnti, il confronto porta a risultati soddisfacenti. Nel caso di sole batterie abbiamo una corrente erogata che si aggira intorno a valori di 180-200 A, e si hanno picchi di corrente relativi al recupero in frenata di circa 18 A. Nel secondo caso invece la corrente erogata è di circa 150 A, mentre il recupero in frenata è di 30 A. Si ricorda che nella prova con i supercondensatori bisogna considerare l'effetto del parallelo tra questi e il pacco batterie, come descritto nel paragrafo precedente. Infatti dai dati riscontrati, le batterie erogano 150 A, i supercondensatori 100 A, mentre il totale effettivo erogato dalla vettura è di circa 150 A. Per cui si ha un disavanzo di circa 100 A che evidenziano il fatto che le batterie stanno ricaricando i supercondensatori, i quali invece, riuscendo ad erogare corrente più velocemente, si sono occupati del sostentamento della trazione. In questa prova non si è voluto esagerare nel recupero in frenata impostata a 30 A, ma i dati dimostrano che esiste la possibilità di incrementare questo valore. Inoltre l'effetto del parallelo fa sì che le batterie si possano concentrare di più sul mantenimento della tensione di link. Ultima considerazione riguardo le correnti è il miglioramento della velocità di erogazione rispetto al caso con le sole batterie. Infatti le curve si presentano più ripide nel salire a regime e questo è stato riscontrato anche dalla sensazione del pilota di avere un maggior spunto in accelerazione.

Andando a confrontare la potenza, rappresentata nella figura seguente, si evidenzia che nella prova con le sole batterie inizialmente si raggiunge un picco di 16 kW, poi si ha una zona con valori di circa 14 kW e progressivamente vi è un decremento, fino a giungere alla parte finale in cui si ha un valore di 5 kW. Con i supercondensatori invece si ha mediamente per l'intera prova un valore di circa 12 kW, tranne nell'ultimo ciclo in cui si ha un valore di 7 kW.

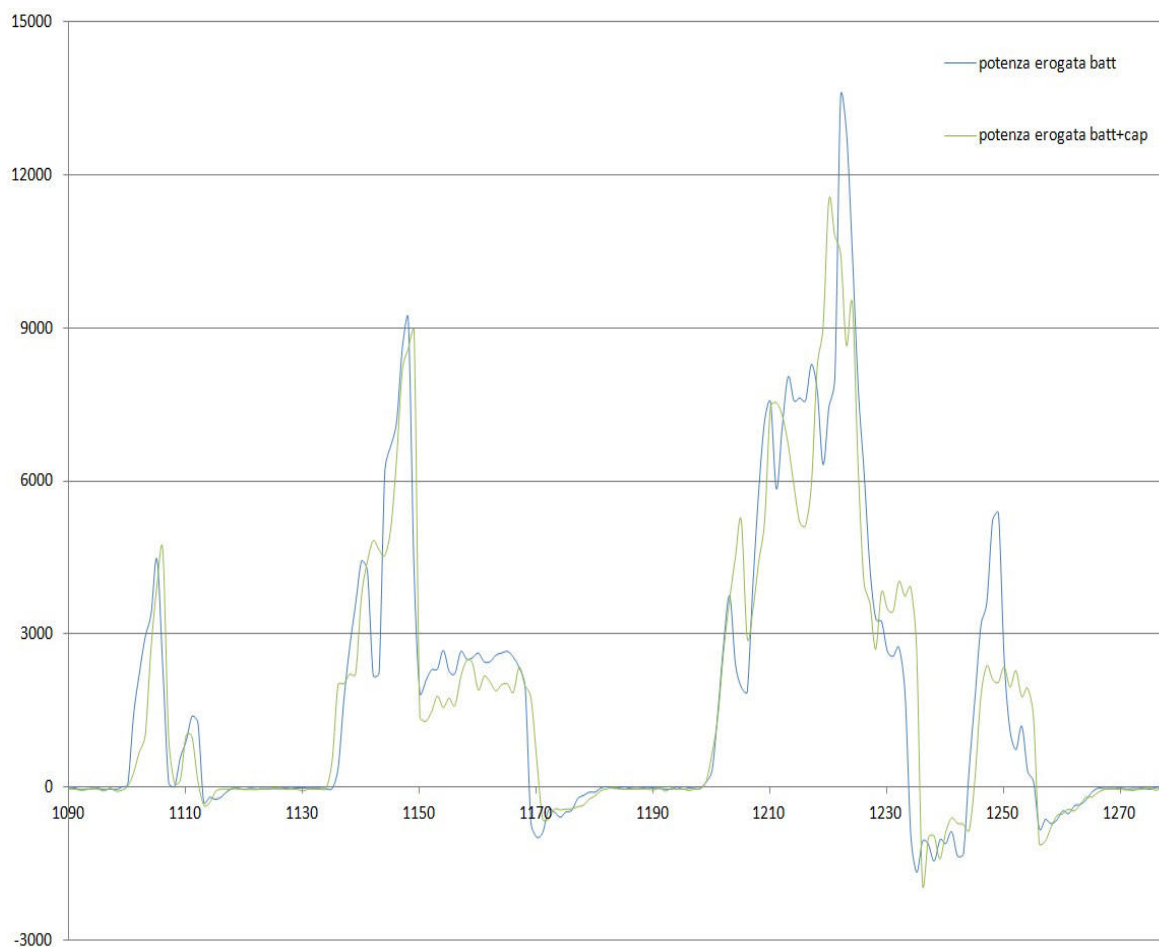


Figura 1.4.4 confronto Potenze Erogate nelle due prove

Per quanto riguarda la tensione, del pacco batterie e dei supercondensatori, purtroppo i dati rilevati non sono direttamente confrontabili in uno stesso grafico perché la misurazione è stata effettuata con strumenti differenti. Infatti nella prova con i supercondensatori, essendo essi in parallelo con le batterie, si è utilizzato un oscilloscopio collegato ad una singola batteria e ad un singolo supercondensatore.

Nella prova con le sole batterie si ha che la tensione di quest'ultime si abbassa notevolmente nei momenti di maggiore richiesta di corrente. Nelle fasi a vuoto la tensione passa progressivamente da 65 V a 58 V, mentre quando è presente il carico si hanno variazioni di tensione dell'ordine di 15-20 V fino a $\frac{3}{4}$ della prova, per poi arrivare a variazioni di circa 30 V.

Nella prova con il pacco batterie affiancato dai supercondensatori bisogna considerare le tensioni di entrambe. Si ha dunque che: il pacco batterie a vuoto segna progressivamente un valore che passa da 65 V a 55 V, affrontando sotto carico variazioni al massimo di 8 V;

i supercondensatori, invece, nel funzionamento a vuoto passano da 64 V a 50.8 V, mentre sotto carico subiscono variazioni che progressivamente aumentano da 10.8 V a 16.4 V.

Si nota quindi un effetto molto benefico dei supercondensatori, infatti nella seconda prova le batterie sono molto meno soffocate e soggette a carichi meno pesanti. La variazione di tensione del pacco batterie è piuttosto contenuta, questo implica sia una durata migliore, come dimostrato dalla percorrenza, sia un effetto benefico sulla vita utile del pacco batterie stesso. E' chiaro infatti che, se le batterie sono uno strumento valido per l'erogazione della potenza media durante un normale ciclo di guida, il supercondensatore, proprio per la sua rapidità nel ricaricarsi e nell'erogare energia, costituisce lo strumento più valido per rispondere ai picchi di potenza che si verificano tipicamente nel contesto urbano. Risulta quindi chiaro il motivo che spinge ad affiancare alle batterie i supercondensatori: eliminare o quantomeno ridurre le cadute di tensione che si sono riscontrate sul pacco batterie e quindi sulla V_{link} in corrispondenza alle massime erogazioni di corrente.