

**POLITECNICO DI TORINO**

SCUOLA DI DOTTORATO  
Dottorato in Meccatronica - XXV ciclo

**Tesi di Dottorato**

**Powertrain ibride da competizione:  
sicurezza, controllo e automatizzazione**



**Massimiliano Turco**

**Coordinatore del corso di dottorato**  
Prof. Giancarlo Genta

**Tutore**  
Prof. Marcello Chiaberge

Marzo 2013



# Ringraziamenti

Un primo ringraziamento va indubbiamente ai colleghi del Laboratorio Interdipartimentale di Meccatronica del Politecnico di Torino, dove ho trovato un ottimo ambiente di lavoro, ideale per maturare sia a livello professionale che personale. Un grazie particolare va rivolto al professor Marcello Chiaberge, mio tutor, per la guida e il supporto offertomi.

Infine tengo a ringraziare Cinzia, la mia famiglia e i miei amici che mi hanno supportato e sopportato durante i periodi più complicati della realizzazione del progetto.



# Sommario

<b>1</b>	<b>Introduzione .....</b>	<b>1</b>
1.1	Contesto e motivazioni.....	2
1.2	Obiettivi e contributo scientifico.....	3
1.3	Analisi dei capitoli seguenti .....	4
<b>2</b>	<b>L'ibrido nel motorsport.....</b>	<b>5</b>
2.1	Introduzione ai sistemi ibridi .....	6
2.1.1	Archetipi .....	6
2.1.2	Sistemi di accumulo di energia.....	10
2.2	La situazione attuale e scenari futuri.....	15
<b>3</b>	<b>Il progetto Sc08h .....</b>	<b>17</b>
3.1	Progetto e sviluppo di una piccola vettura ibrida da competizione modello Formula .....	18
3.1.1	Introduzione: la Formula Hybrid e il progetto Sc08h.....	18
3.1.2	Analisi regolamentare.....	19
3.2	Vincoli obiettivi e metodologie.....	22
<b>4</b>	<b>Powertrain SC08h .....</b>	<b>25</b>
4.1	Il progetto .....	26
4.2	Descrizione.....	28
4.3	Prestazioni della powertrain .....	37
4.4	Sicurezze, monitoraggio e controllo .....	39
4.4.1	Il Battery Management System .....	39
4.4.2	Controllo delle due powertrain .....	45
<b>5</b>	<b>Il progetto P4/5 Competizione .....</b>	<b>47</b>
5.1	Breve introduzione e risultati agonistici.....	48
5.2	La vettura .....	49
5.2.1	Versione 2011.....	49
5.2.2	Versione 2012, "Modificata" .....	53
5.3	La 24 ore del Nurburgring.....	58

5.3.1	La gara e il tracciato.....	58
5.3.2	Il regolamento tecnico .....	60
5.3.3	Sicurezza e omologazione del sistema KERS .....	61
<b>6</b>	<b>Powertrain P4/5 Competizione .....</b>	<b>65</b>
6.1	Descrizione .....	66
6.1.1	La struttura di partenza .....	66
6.1.2	Il sistema KERS.....	67
6.1.3	La comunicazione CAN.....	73
6.1.4	Le alimentazioni .....	75
6.2	Progetto del controllo .....	77
6.3	Strategie di controllo automatico.....	79
6.3.1	Algoritmo di automatizzazione.....	80
6.3.2	Il banco prova celle.....	84
6.3.2.1	Modellizzazione delle celle al litio.....	85
6.3.2.2	Andamento delle temperature.....	89
6.3.2.3	Andamento della tensione .....	93
6.3.3	Stabilità del sistema .....	94
6.3.3.1	Stabilità del codice .....	94
6.3.3.2	Stabilità energetica e termica.....	96
<b>7</b>	<b>Conclusioni e possibilità di sviluppo.....</b>	<b>99</b>
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>i</b>

# Indice delle figure

Figura 2.1: Layout funzionale veicolo ibrido.....	7
Figura 2.2: schema ibrido serie .....	8
Figura 2.3: schema funzionale ibrido parallelo.....	9
Figura 2.4: confronto delle tecnologie di celle al litio .....	14
Figura 2.5: ciclo di vita di un pacco batterie.....	15
Figura 3.1: Sc08h .....	18
Figura 4.1: retrotreno della Sc08h.....	27
Figura 4.2: schema della struttura della powertrain della Sc08h .....	28
Figura 4.3: accoppiamento del motore elettrico al motore termico .....	29
Figura 4.4: confronto tra i tre motori termici valutati .....	30
Figura 4.5: curve di coppia e di potenza del motore Kawasaki Ninja 250R.....	31
Figura 4.6: nuovo impianto di raffreddamento e scarico su misura.....	32
Figura 4.7: motore elettrico Perm PMS 150S .....	35
Figura 4.8: previsione delle prestazioni della vettura sulla distanza di 75m .....	37
Figura 4.9: curve di coppia di motore termico e motore elettrico.....	38
Figura 4.10: curve di coppia della powertrain ibrida .....	38
Figura 4.11: curve di carica CC-CV .....	41
Figura 4.12: BMS centralizzato .....	43
Figura 4.13: BMS modulare.....	43
Figura 4.14: BMS master-slave .....	44
Figura 4.15: BMS distribuito .....	44
Figura 4.16: installazione del potenziometro lineare sul pedale dell'acceleratore ...	46
Figura 5.1: P4/5 Competizione Modificata sulla Nordschleife durante la 24h del Nurburgring.....	48
Figura 5.2: parte del telaio della Ferrari F430 mantenuta sulla P4/5 Competizione	50
Figura 5.3: splitter e dive planes della P4/5 Competizione.....	51
Figura 5.4: diffusore posteriore della P4/5 Competizione .....	51
Figura 5.5: diagramma G-G delle accelerazioni laterali e longitudinali della vettura .....	53
Figura 5.6: riduzione del tempo sul giro in funzione dell'aumento di potenza del motore .....	54
Figura 5.7: generico grafico di aderenza degli pneumatici di una vettura.....	55
Figura 5.8: riduzione del tempo sul giro in funzione dell'aumento di potenza massima del motore.....	56
Figura 5.9: riduzione del tempo sul giro in funzione della riduzione di Cx .....	57
Figura 5.10: configurazione del tracciato del Nurburgring durante la 24 ore.....	58
Figura 5.11: schema funzionale del pacco batterie .....	62
Figura 5.12: risposta del sistema ai comandi plancia.....	64

Figura 6.1: curve di potenza motore in configurazione 2011 e 2012.....	66
Figura 6.2: schema semplificato del sistema KERS.....	67
Figura 6.3: lay-out della powertrain del P4/5 Competizione Modificata.....	72
Figura 6.4: schema dei 4 CAN bus in vettura .....	74
Figura 6.5: schema delle alimentazioni del sistema KERS.....	75
Figura 6.6: diagramma degli stati.....	77
Figura 6.7: andamento delle attuazioni durante 4 giri del tracciato presi a campione .....	80
Figura 6.8: punti di attuazione della strategia automatica.....	81
Figura 6.9: tempistiche delle attuazioni automatiche .....	83
Figura 6.10: riconoscimento della posizione e attuazione automatica.....	84
Figura 6.11: schema del banco prova celle .....	85
Figura 6.12: modello semplificato di una cella .....	86
Figura 6.13: modello di una cella con costante di tempo dell'ordine del minuto ....	87
Figura 6.14: modello di una cella con costante di tempo dell'ordine del millisecondo .....	87
Figura 6.15: modello di una cella con entrambe le costanti di tempo.....	88
Figura 6.16: curve di scarica a differenti valori di corrente .....	88
Figura 6.17: andamento delle temperature di cella durante una gara di 4 <i>stint</i> intervallati da 2min di pit stop.....	90
Figura 6.18: andamento delle temperature di cella durante 2 primi <i>stint</i> di una gara con differenti temperature ambiente.....	91
Figura 6.19: curve di scarica in funzione della temperatura di cella.....	92
Figura 6.20: andamento delle tensioni di cella durante due primi <i>stint</i> di una gara a differenti temperature ambiente .....	93
Figura 6.21: simulazione di un giro del tracciato con attuazione automatica .....	95
Figura 6.22: riconoscimento errato dei gate .....	96

# Indice delle tabelle

Tabella 2.1: modalità di funzionamento ibrido serie .....	9
Tabella 2.2: modalità di funzionamento ibrido parallelo .....	10
Tabella 4.1: principali caratteristiche del motore Kawasaki Ninja 250R .....	33
Tabella 4.2: specifiche Perm PMS 150S .....	35
Tabella 4.3: Specifiche delle celle Kokam .....	36
Tabella 5.1: principali dati tecnici della P4/5 Competizione .....	52
Tabella 5.2: obiettivi di progetto per la riduzione del tempo sul giro .....	57
Tabella 5.3: limiti di capacità del serbatoio in funzione del peso vettura .....	60
Tabella 5.4: dimensione delle restrizioni all'aspirazione in funzione del peso vettura e della cilindrata del motore .....	61
Tabella 5.5: risposte del sistema ai possibili guasti .....	63
Tabella 5.6: stati del sistema attivi in funzione dei comandi plancia .....	64
Tabella 6.1: componenti principali del sistema KERS .....	67
Tabella 6.2: parametri del motore elettrico .....	68
Tabella 6.3: parametri principali dell'inverter .....	69
Tabella 6.4: specifiche delle celle usate nel pacco batterie .....	70
Tabella 6.5: specifiche della centralina di controllo del KERS .....	71



# **Capitolo 1**

## **1. Introduzione**

## 1.1 Contesto e motivazioni

L'applicazione di nuove tecnologie, legate alla ricerca di una riduzione dei problemi riguardo l'impatto ambientale, è un tema ricorrente in diversi ambiti tecnici. Nel campo dei veicoli gli studi volti all'aumento dell'efficienza dei sistemi propulsivi rappresentano uno dei settori di maggiore fermento.

La costante crescita del parco circolante mondiale rende sempre più necessaria la ricerca di una soluzione in grado di diminuire l'impatto ambientale delle vetture e, conseguentemente, i consumi di derivati del petrolio, le cui riserve vanno via via esaurendosi.

Tra le tecnologie più promettenti vi sono sicuramente i veicoli elettrici e ibridi. La diffusione di massa dei primi è legata a problemi economici e infrastrutturali, non sarà infatti possibile costruire veicoli elettrici competitivi finché il prezzo delle batterie non scenderà almeno fino a 500\$ al kWh dagli attuali circa 800\$. Una volta raggiunta questa soglia, per la quale gli studi di importanti società di consulenza, quali il Boston Consulting Group e Rolland Berger, danno orizzonti temporali di circa 5-7 anni, sarà poi necessario costruire infrastrutture in grado di garantire la ricarica rapida dei pacchi batteria ad alta capacità.

La tecnologia dei sistemi ibridi basati su batterie al litio, rappresenta invece una soluzione attuale, che si avvicina sempre più alla maturità tecnica. I motori elettrici possono raggiungere efficienze nell'ordine del 90% nell'intero range di utilizzo, possono recuperare energia attraverso la funzione di frenata rigenerativa ed essere utilizzati per implementare strategie di *power splitting*, utili a limitare il consumo di carburante dei motori a combustione interna.

Il settore delle competizioni, per tradizione, ha il ruolo di porsi come avanguardia del settore automobilistico nell'utilizzo delle nuove tecnologie e questa tesi rappresenta la sintesi di un percorso di ricerca e sperimentazione nel campo delle motorizzazioni ibride applicate alle competizioni automobilistiche. Come noto, il settore *automotive* è contraddistinto da una forte multidisciplinarietà e questo aspetto risulta enfatizzato nelle applicazioni trattate all'interno di questo documento. Installare una *powertrain* ibrida a bordo di una vettura da competizione comporta, infatti, competenze nel campo dell'elettronica e del progetto di controlli, competenze di dinamica del veicolo, di progettazione meccanica e di costruzione dei veicoli terrestri. L'applicazione ai prototipi da competizione accentua ulteriormente la necessità di integrare le competenze del gruppo progettuale, che deve forzatamente fare efficienza per raggiungere risultati rilevanti con budget, tempistiche e organico spesso sottodimensionati.

La trasversalità degli argomenti trattati rappresenta uno degli aspetti fondanti della mecatronica e, per questo motivo, lo studio di *powertrain* ibride è stato scelto come argomento di ricerca per lo svolgimento di tre percorsi di dottorato e per la stesura delle relative tesi. I tre documenti trattano tre diversi aspetti dello studio e della progettazione dei sistemi ibridi, il primo è dedicato al dimensionamento

meccanico ed elettrico dei sistemi con particolare attenzione al progetto di pacchi batterie ad alte prestazioni, il secondo si concentra sulla modellistica necessaria al progetto di un sistema ibrido, sul lavoro di calibrazione e validazione dei modelli e sulle attività di sperimentazione e sviluppo degli stessi. Questo documento è invece dedicato all'elettronica necessaria alla gestione del sistema e al progetto di un controllo che ne automatizzi il funzionamento e ne garantisca la sicurezza.

Al fine di contestualizzare e introdurre i progetti trattati, sono stati redatti dei capitoli comuni ai tre documenti che riassumono i risultati congiunti del lavoro dei tre autori attraverso la descrizione dei sistemi realizzati e dei risultati raggiunti.

Per necessità di sintesi si è, infatti, deciso di focalizzare l'attenzione su due applicazioni pratiche, una piccola monoposto per competizioni studentesche di Formula Hybrid, la Sc08h, e una vettura gran Turismo su base Ferrari progettata per concorrere alla 24 ore del Nurburgring, la P4/5 Competizione.

Il campo di applicazione descritto pone delle limitazioni alla divulgazione di alcune informazioni come, ad esempio, le caratteristiche di alcuni componenti sperimentali ma, allo stesso tempo, consente l'opportunità di vedere realizzato il risultato del lavoro di ricerca ed il privilegio di validare e verificare le ipotesi e le assunzioni formulate in fase progettuale.

## 1.2 Obiettivi e contributo scientifico

Il profondo connotato applicativo del lavoro di ricerca rende molto semplice evidenziarne gli obiettivi:

- Indagare e consolidare le migliori pratiche relative alla progettazione di veicoli ibridi;
- Realizzazione e validazione della modellistica atta a guidare il dimensionamento di *powertrain* ibride;
- Valutare le effettive prestazioni delle tecnologie oggi disponibili sul mercato.

Il contributo scientifico di questo lavoro è trasversale a tutti gli obiettivi appena elencati e può essere riassunto nell'intenzione di creare cultura ingegneristica nel campo della progettazione di sistemi ibridi. Come avviene per molte tecnologie giovani, i riferimenti bibliografici relativi alla progettazione pratica di sistemi propulsivi che accoppino motori a combustione interna e motori elettrici sono, a oggi, molto carenti. I tre lavori di tesi presentati vogliono cercare di sopperire alla carenza appena citata attraverso la descrizione approfondita del processo progettuale seguito per realizzare i due sistemi ibridi. La descrizione approfondita della modellistica utilizzata, delle soluzioni tecniche adottate e il processo di validazione e sviluppo possono costituire un punto di partenza interessante per chi

debba approcciarsi allo sviluppo di un sistema ibrido. Al fine di rendere effettivamente utilizzabile e migliorabile la strategia progettuale adottata, è stata riservata molta attenzione a particolari pratico-realizzativi che, anche se non strettamente definibili scientificamente rilevanti, rappresentano un importante bagaglio di competenze necessarie all'utilizzo delle tecnologie ibride.

## **1.3 Analisi dei capitoli seguenti**

Tralasciando i contenuti del presente capitolo, è possibile elencare brevemente gli argomenti trattati all'interno dei capitoli successivi al fine di rendere chiara e comprensibile la struttura del documento. Il capitolo due descrive le tecnologie utilizzate nel settore delle propulsioni ibride e descrive brevemente le applicazioni nel settore delle competizioni automobilistiche. I capitoli tre e quattro sono dedicati al progetto Sc08h del quale viene dato un approfondito resoconto per lo più orientato alla sicurezza e al controllo. I capitoli cinque e sei parlano del progetto P4/5 Competizione, ne descrivono le caratteristiche e i risultati. È possibile evidenziare una sostanziale continuità tra i capitoli tre, quattro, cinque e sei all'interno dei quali vengono trattati gli stessi argomenti su due progetti diversi e che testimoniano la crescita di competenze nell'arco dei tre anni dedicati alla ricerca nel campo delle trazioni ibride.

# **Capitolo 2**

## **2. L'ibrido nel motorsport**

## 2.1 Introduzione ai sistemi ibridi

Il mondo dei sistemi di autotrazione ibridi ed elettrici rappresenta un settore caratterizzato da un forte tasso di crescita, tra i più promettenti nel panorama delle tecnologie relative all'automobile. La sezione corrente è focalizzata sulla descrizione tecnica del settore con particolare attenzione ai sistemi, ai sottosistemi e alle tecnologie disponibili.

### 2.1.1 Archetipi

La via che sta portando alla diffusione di tecnologie di moto-propulsione diverse dai motori a combustione interna vede nel ruolo di protagoniste due tecnologie: quella dei sistemi ibridi e quella dei sistemi elettrici. Soluzioni diverse nei dettagli progettuali, ma caratterizzate da grosse affinità soprattutto nella componentistica di base.

L'introduzione di un motore elettrico nello schema meccanico di un veicolo ha portato alla nascita di diverse famiglie di propulsori, che con massima sintesi si possono distinguere in:

1. Veicoli elettrici: il sistema propulsore è costituito da un motore elettrico
2. Veicoli ibridi: sono caratterizzati dalla combinazione di un motore elettrico con relativi accessori e di un motore termico.
3. Veicoli ibridi plug-in: sono veicoli ibridi, caratterizzati da sistemi di accumulo ad alta capacità, hanno quindi la possibilità di essere ricaricati attraverso la rete elettrica durante le soste e di utilizzare il motore termico per aumentare l'autonomia della vettura.

Entrando più nello specifico, i veicoli ibridi di nostro interesse, dedicati al trasporto di persone e di merci, fanno parte della categoria degli ibridi elettrici (HEV) che utilizzano componenti provenienti da normali vetture a combustione interna e da vetture elettriche. Questo concetto è espresso in maniera schematica all'interno della Figura 2.1.

## 2 - L'ibrido nel motorsport

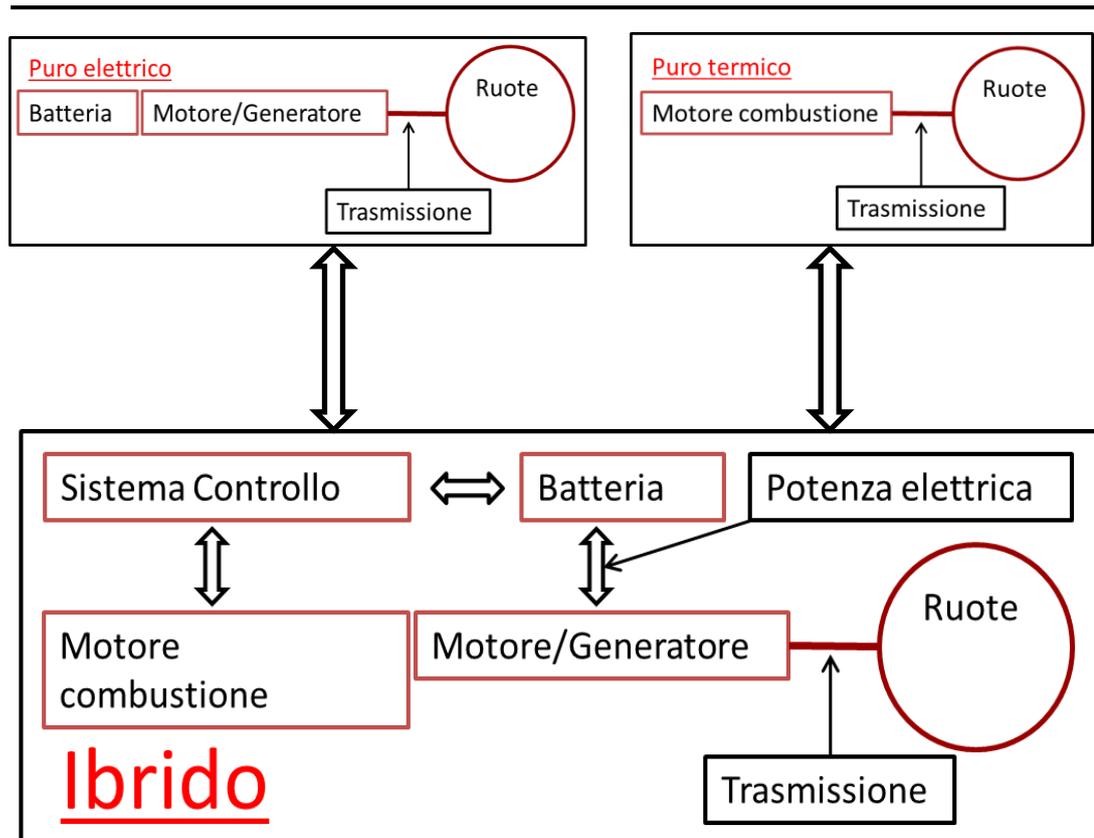


Figura 2.1: Layout funzionale veicolo ibrido

I vantaggi delle soluzioni ibride sono da ricercare nello sfruttamento delle due tipologie di propulsore e più precisamente nell'ottimizzazione della loro interazione volta a enfatizzare i punti di forza delle due architetture. Nel caso degli ibridi si possono evidenziare due vie di sviluppo: riduzione dei consumi e miglioramento delle prestazioni dinamiche. I due obiettivi non devono essere considerati forzatamente alternativi, al contrario, in molti casi la presenza di una propulsione ibrida comporta miglioramenti su entrambi i fronti. È comunque necessario tener conto che determinate architetture rispondono meglio all'uno o all'altro obiettivo.

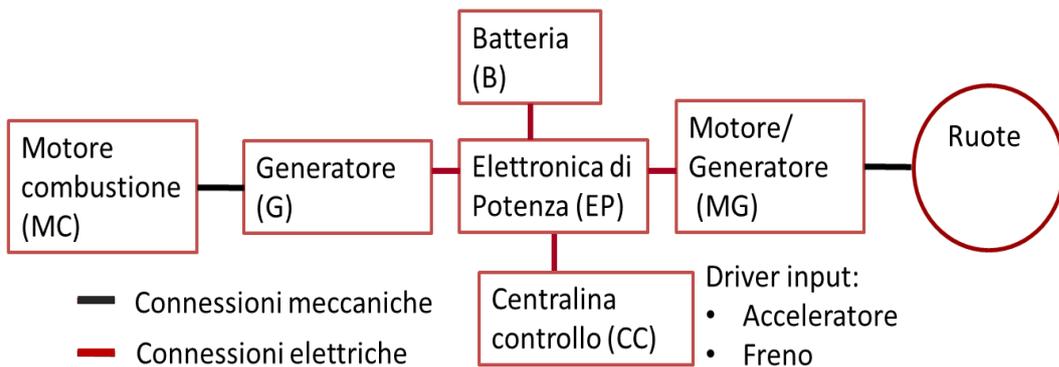
In generale, è possibile affermare che i sistemi ibridi ottimizzati per la riduzione dei consumi consentono di installare propulsori termici di taglia inferiore e di gestirne in maniera più flessibile l'erogazione di potenza, con una conseguente riduzione delle emissioni. Nel caso di ottimizzazioni prestazionali, è possibile mantenere inalterata la tipologia di motore termico e i relativi consumi, sfruttando il contributo elettrico per aumentare le prestazioni dinamiche del veicolo.

Riguardo alle architetture è possibile individuare tre famiglie distinte:

- ibridi serie,

- ibridi paralleli,
- ibridi misti.

All'interno della Figura 2.2 è rappresentato lo schema funzionale dei sistemi ibridi serie.



**Figura 2.2: schema ibrido serie**

Com'è possibile evincere dallo schema, gli ibridi serie sono privi di un collegamento meccanico tra le ruote e il motore termico. A quest'ultimo viene affidata la funzione di fornire potenza al generatore e di caricare le batterie. Questa impostazione consente di mantenere il motore termico costantemente nel *range* di giri più prossimo ai valori di massimo rendimento. Per contro, il sistema risente della lunga catena di rendimenti che vede in serie il motore termico, il generatore, l'inverter, la batteria e il motore elettrico.

Si possono evidenziare diverse modalità di funzionamento riassunte all'interno della Tabella 2.1.

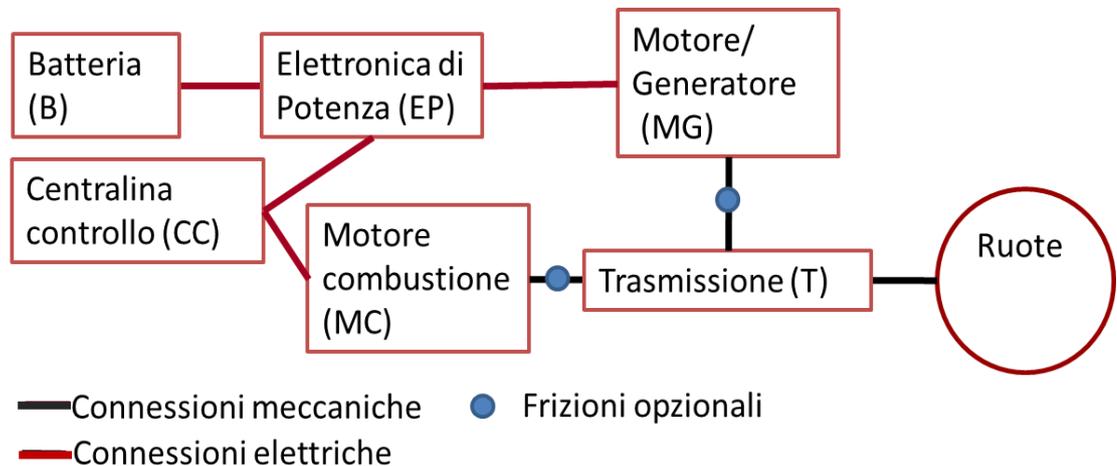
## 2 - L'ibrido nel motorsport

Modalità	Attività	Flussi
Accelerazione, salita	MC on - B connessa	MG viene alimentato da tutte le fonti per avere massima potenza
Normale marcia	MC on - B disconnessa	MG viene alimentato da MC che lavora in condizioni di alto rendimento
Ricarica batterie	MC on - B connessa	MC ha potenza in esubero viene utilizzato per alimentare MG e per caricare B
Frenata rigenerativa	G e EP disconnessi - B connessa	MG, trascinato dalle ruote, ricarica B.

**Tabella 2.1: modalità di funzionamento ibrido serie**

La soluzione in serie è solitamente utilizzata al fine di ridurre i consumi ed è tipica dei sistemi ibridi plug-in.

In Figura 2.3 è invece riportato lo schema funzionale di un sistema ibrido parallelo. Con questa soluzione sia il motore termico che quello elettrico vengono connessi alle ruote. Quest'architettura consente l'utilizzo congiunto dei sistemi e la compensazione delle curve di coppia degli stessi al fine di raggiungere elevate prestazioni dinamiche. La catena di rendimenti più snella, unita a una maggior semplicità e leggerezza rende questa struttura la più indicata per l'utilizzo in campo sportivo.



**Figura 2.3: schema funzionale ibrido parallelo**

Le modalità di funzionamento vengono brevemente elencate all'interno della Tabella 2.2.

Modalità	Attività	Flussi
<b>Accelerazione, salita</b>	MC on – MG on	Configurazione di potenza massima nella quale MG e MC forniscono coppia alle ruote
<b>Normale marcia</b>	MC on – MG off	Solo MC è connesso alle ruote
<b>Puro elettrico</b>	MC off –MG on	Modalità ad autonomia e prestazioni ridotte, in cui la coppia è fornita solo da MG
<b>Frenata rigenerativa</b>	MC off- MG on	MG, trascinato dalle ruote, ricarica B

**Tabella 2.2: modalità di funzionamento ibrido parallelo**

Come prevedibile, entrambe le soluzioni hanno pro e contro complessi caratterizzati da sfumature che dipendono da molteplici fattori, quali, ad esempio, la funzione del veicolo (trasporto persone, merci, etc.) e la missione dello stesso (percorsi urbani, extra-urbani, competizioni, etc.).

La terza famiglia di sistemi ibridi, gli ibridi misti, è invece in grado di unire i vantaggi di entrambe le tecnologie, pagando il prezzo di una maggior complicazione meccanica e di maggiori costi di realizzazione.

## 2.1.2 Sistemi di accumulo di energia

Una delle costanti degli schemi proposti è la presenza del blocco “batteria”. Questa assunzione è sicuramente vera per i sistemi elettrici, ma rappresenta una semplificazione per le autotrazioni ibride. I sistemi a batteria rappresentano infatti soltanto una delle principali tipologie dei sistemi di accumulo di energia che sono le seguenti:

- Volani,
- Supercondensatori,
- Batterie.

I volani rappresentano una soluzione valida per tutte le applicazioni che richiedono elevati valori di densità di potenza. Risultano però limitati da una serie di fattori quali:

- La scarsa densità di energia, i sistemi a volano hanno densità energetiche molto ridotte se confrontati con le batterie agli ioni di litio;

- Complessità meccanica del sistema volante;
- Costi e peso per le soluzioni che adottano doppia macchina elettrica e doppia elettronica di potenza (una connessa alla trasmissione e una dedicata ad accelerare e frenare il volante);
- Scarsa flessibilità di controllo e di lay-out nelle soluzioni puramente meccaniche;
- Scarsa prospettiva di crescita: questi sistemi hanno oggi raggiunto lo stato dell'arte della loro applicazione e non si prevedono sostanziali evoluzioni nei prossimi anni, prospettiva assai probabile per le batterie agli ioni di litio.

I condensatori elettrochimici sono dispositivi dotati di capacità specifica dell'ordine dei Farad/grammo oppure Farad/cm<sup>3</sup>, estremamente elevata se confrontata con i più comuni condensatori elettrostatici, la cui capacità è dell'ordine di grandezza dei pico, nano o micro-farad per unità di massa e di volume. Per tale motivo vengono chiamati “supercapacitori” o “supercondensatori”.

Il condensatore elettrochimico è caratterizzato da una struttura molto simile a quella di una cella al litio: è infatti costituito da due elettrodi e da un separatore permeabile agli ioni, posto tra gli elettrodi, che contiene l'elettrolita. I supercondensatori presentano elevati valori di densità di potenza che ne hanno reso molto comune l'uso per sistemi di trasporto urbano ad alta potenza (Autobus Vossloh Kiepe (Germania), Scania Hybrid Bus (Svezia), KAM (Cina) e ISE (USA)), ma sono fortemente penalizzati da ridotti valori di densità di energia (minori dei sistemi a volante), caratteristica che comporta un'autonomia molto ridotta in puro elettrico. In campo automotive l'impiego di sistemi di accumulo a supercondensatore rappresenta quindi una valida soluzione, soprattutto se dedicato all'accumulo ad alta dinamica (funzione di *peak-shaving*) e accoppiato a un sistema di accumulo primario (batteria). L'utilizzo dei sistemi a supercapacitori è comunque una soluzione molto credibile per applicazioni ad alta potenza ed è stata sperimentata con successo (Toyota TS030 Hybrid-24h di Le Mans 2012).

Per orientarsi all'interno dell'ampio panorama delle diverse tipologie di batterie disponibili è utile ricorrere a una classificazione basata sulla chimica di funzionamento:

- Batterie Piombo-Acido: sono le batterie maggiormente disponibili sul mercato, rappresentano una soluzione tecnicamente consolidata sia per applicazioni di trazione sia stazionarie. Diverse batterie al piombo-acido sono state studiate appositamente per applicazioni di trazione elettrica o ibrida e, in particolare, la ricerca si è orientata verso lo sviluppo di tecniche utili a incrementare la superficie degli elettrodi, come, ad esempio, l'utilizzo di fibre di vetro rinforzate con griglie di piombo e strati di metallo sottili. Sono inoltre stati studiati diversi

metodi per garantire un'efficace carica veloce. Nonostante tali batterie siano poco prestazionali, risultano ancora la soluzione più facilmente implementabile sia in termini di disponibilità e costo, sia in termini di stabilità e semplicità di gestione nel caso di connessione di svariate celle in configurazione serie/parallelo .

- Batterie Nichel: a fronte di costi molto elevati, le batterie Nichel Cadmio offrono maggiori prestazioni se comparate alle tradizionali piombo-acido. Nello specifico, si possono evidenziare densità di potenza ed energia superiori, minor necessità di manutenzione, esteso *range* di temperature di esercizio, elevato numero di cicli di vita e possibilità di ricarica rapida. Lo sviluppo futuro di questa tecnologia sarà basato sull'utilizzo di nuovi elettrodi composti di plastiche legate, che permetteranno di ridurre i costi e incrementarne le prestazioni. Un primo importante passo nell'evoluzione di questa tecnologia è stato fatto attraverso lo sviluppo delle batterie Nichel-metalli idruri che permettono in primo luogo di eliminare l'uso del cadmio e dei problemi ambientali a esso connessi. Allo stesso tempo questa tecnologia consente di incrementare le prestazioni in termini di densità di energia (circa il doppio rispetto le tradizionali Nichel-Cadmio). Principale svantaggio sono, invece, le cadute di tensione ai terminali dovute alle richieste di correnti elevate e la necessità di un sistema di gestione delle batterie al fine di prevenire la sovratensione e il surriscaldamento delle celle.
- Batterie al litio: le batterie al litio rappresentano la tecnologia di accumulo elettrochimica sulla quale si stanno concentrando i maggiori investimenti. La loro attrattività per applicazioni *electronic consumer*, *automotive* e aerospaziali risiede nella notevole densità di energia e potenza, superiore a tutte le tecnologie fin qui descritte.

A seconda della tecnologia costruttiva le batterie al litio presentano diverse caratteristiche.

La famiglia delle batterie litio-ione, fortemente diffuse per le applicazioni portatili, utilizza al posto del litio metallico, presente nelle prime applicazioni, un materiale a base di carbonio trattato con il litio. Poiché il litio metallico non è presente, le batterie litio-ione risultano chimicamente meno reattive, più sicure e con una vita utile superiore. Anche per queste famiglie di batterie il circuito di gestione delle celle (BMS) è indispensabile al fine di prevenire la sovra carica e sovra scarica e di realizzare il bilanciamento delle diverse celle e il monitoraggio dello stato di temperatura e salute. Come accennato, le celle litio-ione rappresentano una famiglia molto ampia di tecnologie ognuna delle quali ha caratteristiche diverse, le più diffuse e utilizzate sono le Litio-Nichel-Cobalto-Alluminio (NCA), le

## 2 - L'ibrido nel motorsport

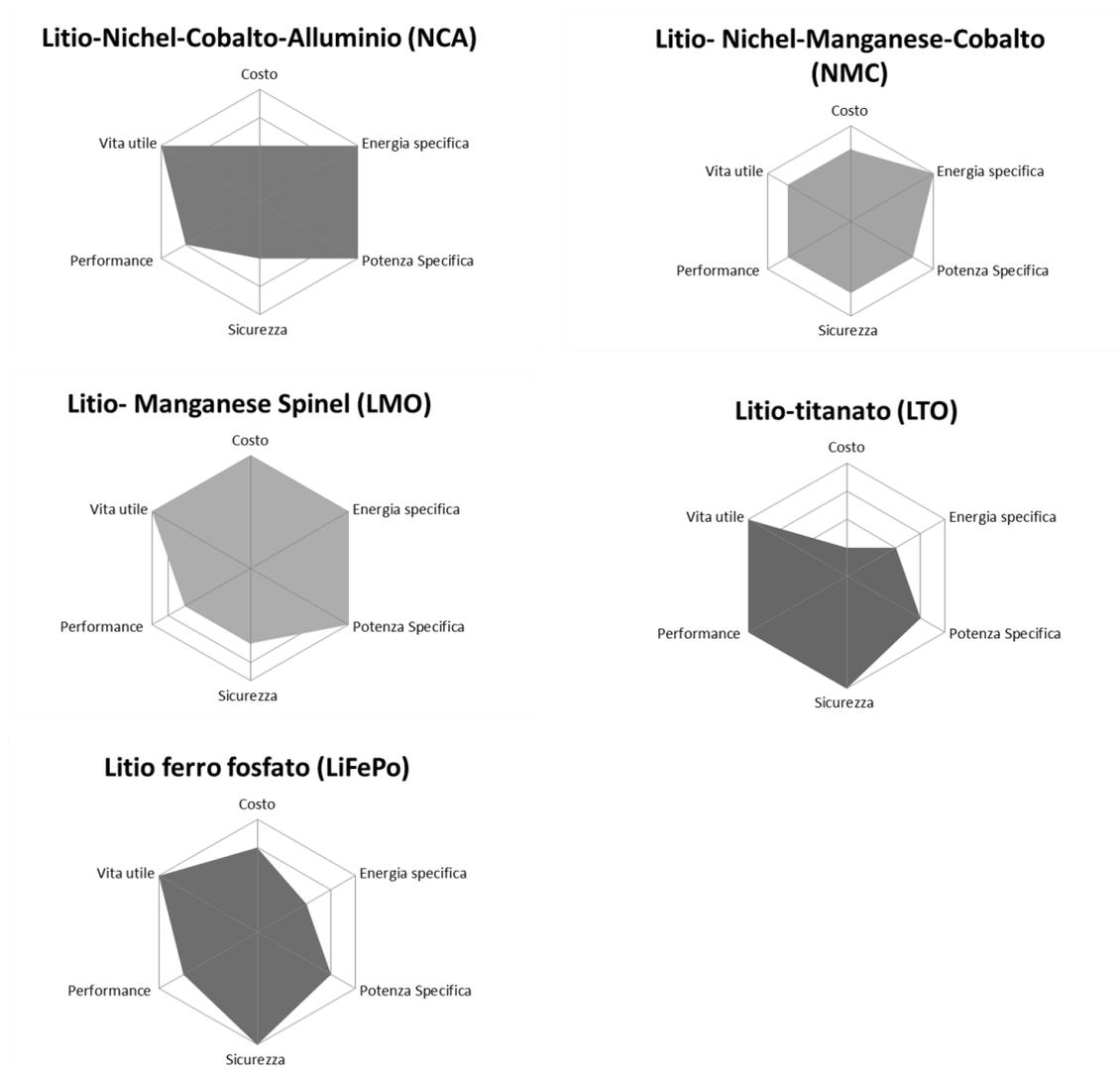
---

Litio-Nichel-Manganese-Cobalto (NMC), le Litio-Manganese Spinel (LMO), le Litio-Titanato (LTO) e le Litio Ferro Fosfato (LiFePo).

Al fine di mettere ordine e classificare l'ampia offerta del mercato si possono evidenziare 5 parametri di valutazione:

- *Sicurezza*: è il parametro fondamentale e più importante. Per quanto prestazionale un sistema che non rispetti precisi criteri di sicurezza non avrà sicuramente un futuro commerciale.
- *Vita utile*: viene valutata attraverso due indicatori, la stabilità prestazionale e l'invecchiamento. La stabilità prestazionale è il numero di cicli completi di carica e scarica che una cella può sopportare prima che la sua capacità venga ridotta fino all'80% della capacità nominale di partenza. L'invecchiamento della cella indica, invece, il numero di anni durante i quali una cella rimane funzionante.
- *Performance*: intesa principalmente come stabilità di prestazioni in funzione di fattori esterni, primo fra tutti la temperatura di esercizio;
- *Energia e potenza specifica*: rispettivamente la capacità di accumulare energia per ogni chilogrammo, direttamente connessa all'autonomia dei veicoli elettrici, e la capacità di fornire potenza per ogni chilogrammo, parametro che risulta fondamentale nel dimensionamento di pacchi batterie per applicazioni ibride.
- *Tempi di carica*: rappresentano uno dei limiti più importanti nella diffusione delle vetture elettriche. Per quanto oggi il problema sia più legato alle capacità distributive delle infrastrutture che agli effettivi limiti fisici delle batterie, questo fattore risulta comunque indicativo della capacità delle diverse celle di ricevere correnti di ricarica.

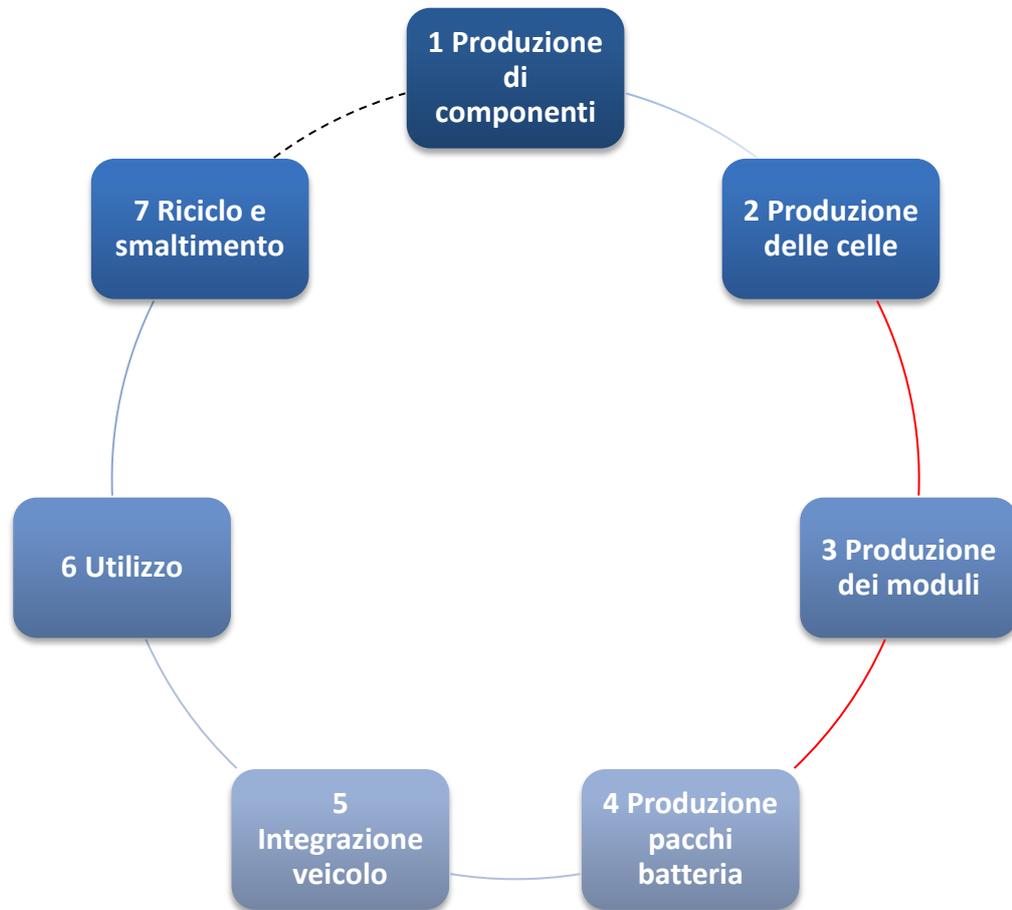
I risultati di questo studio sono riportati all'interno della Figura 2.4.



**Figura 2.4: confronto delle tecnologie di celle al litio**

In sintesi si può affermare che i sistemi di accumulo più promettenti possono essere basati, a seconda delle applicazioni, su tecnologia LiFePo per via delle buone prestazioni in quasi tutti gli indicatori con particolare riguardo per sicurezza e vita utile o, nei casi in cui l'obiettivo principale siano le prestazioni, su celle NMC.

Il processo che porta dalle celle all'effettiva installazione in vettura di una batteria funzionante passa attraverso diverse fasi, ognuna delle quali è legata al progetto e alla realizzazione di componenti per i quali sono necessarie competenze specifiche.



**Figura 2.5: ciclo di vita di un pacco batterie**

La Figura 2.5 rappresenta in maniera schematica il ciclo di vita completo di un sistema batterie.

## **2.2 La situazione attuale e scenari futuri**

L'interesse delle principali serie motorsport, a livello dei Campionati Mondiali, verso le tecnologie ibride/elettriche è in forte espansione, grazie anche alla crescente pressione su temi di sostenibilità ambientale e all'apertura dei principali OEM verso queste tecnologie.

In seguito all'introduzione del sistema di recupero di energia cinetica in frenata (Kinetic Energy Recovery System – KERS) avvenuto in Formula 1 nel 2009, queste tecnologie sono state oggetto di studio e analisi in applicazioni sia su pista che su *off-road*.

Nel 2010 la Citroen ha allestito un prototipo di vettura WRC ibrida con la possibilità di fare trasferimenti in elettrico da uno stage all'altro. Nel 2010 è partito il progetto Formulec per una formula full-electric, e dal 2011 ACO (ente organizzatore della 24h di Le Mans) ha pubblicato informazioni relative al regolamento 2014, che renderà obbligatorio l'utilizzo di propulsori ibridi per le vetture presentate dalle case costruttrici nella classe regina LMP1. Anche negli USA sono in corso di valutazione applicazioni in Indy Car e America Le Mans Series. In Australia la Serie V8 Supercar sta valutando l'introduzione di un KERS nel proprio campionato, mentre in Giappone nel Super GT è avvenuto già il debutto di soluzioni ibride, supportato dalle principali case costruttrici nipponiche. La stessa Formula 1 ha definito uno sviluppo ulteriore dei regolamenti per il 2014, prevedendo anche l'inserimento di un sistema di recupero dell'energia dei gas di scarico (Heat Energy Recovery System - HERS) da accoppiare ad una soluzione KERS più potente. In questo modo hanno dato spazio ulteriore alle tecnologie elettriche per l'ibridizzazione della powertrain, facendo così da apripista a soluzioni che permettono un significativo aumento dell'efficienza dei propulsori.

# **Capitolo 3**

## **3. Il progetto Sc08h**

## 3.1 Progetto e sviluppo di una piccola vettura ibrida da competizione modello Formula

### 3.1.1 Introduzione: la Formula Hybrid e il progetto Sc08h

La SAE (Society of Automotive Engineering) organizza fin dagli anni ottanta una serie di competizioni rivolte alle diverse università, allo scopo di formare i giovani ingegneri. La missione dei partecipanti è progettare, costruire, testare e condurre in gara piccole monoposto a ruote scoperte. La formula Hybrid raccoglie la ventennale esperienza della formula SAE e si struttura in una serie di gare internazionali la più importante delle quali si svolge in New Hampshire, USA. La categoria nasce per portare avanti ed evolvere l'ideale formativo della formula di partenza, cercando di rispondere alla crescente richiesta di innovazione tecnologica attraverso la formazione di giovani ingegneri capaci di gestire la complessità delle moderne vetture ibride ed elettriche.

La vettura che verrà descritta nelle pagine di questo capitolo e del seguente, la Sc08h, è stata costruita tra giugno e settembre del 2009, sulla base della Sc08, vettura da formula SAE costruita nel 2008 dal team studentesco del Politecnico di Torino. La vettura si è dimostrata vincente sotto tutti i punti di vista, piazzandosi al primo posto di tutte le competizioni cui ha preso parte, ivi compresa la Formula Hybrid Usa 2010.



Figura 3.1: Sc08h

Le vittorie della vettura possono essere attribuite a diversi fattori:

1. Le capacità del team progettuale di effettuare la scelta delle soluzioni più adeguate, in relazione ai vincoli di carattere tecnico, economico e organizzativo;
2. L'esperienza del team nella preparazione e nella gestione delle competizioni di formula SAE, unita alla scelta delle giuste soluzioni per migliorare e facilitare la gestione strategica delle prove più importanti;
3. Le ottime prestazioni dinamiche della vettura unite all'affidabilità e alla stabilità di prestazione della powertrain ibrida;
4. Uno scrupoloso lavoro di sviluppo del progetto basato su numerose sessioni di test in pista.

I punti sopra indicati verranno trattati al fine di mostrare il processo di sviluppo della vettura, la modellistica utilizzata, le tecniche di analisi delle prestazioni, le strategie e le soluzioni tecniche scelte per ottimizzare la powertrain, il comportamento generale e rendere competitiva la Sc08h.

#### **3.1.2 Analisi regolamentare**

La preparazione di una competizione sportiva inizia necessariamente con un'ampia e approfondita analisi del regolamento tecnico e sportivo. La Formula Hybrid propone una serie di regole e vincoli molto stringenti soprattutto per tutti gli aspetti che concernono la sicurezza della vettura. Questo atteggiamento è sicuramente legato alla necessità di porre un limite agli errori che l'inesperienza dei partecipanti potrebbe facilmente causare.

Fatta questa premessa, una descrizione puntuale del regolamento tecnico delle diverse competizioni, esula dagli obiettivi di questo documento. Risulta però interessante un'analisi di alcuni passaggi, al fine di spiegare e giustificare alcune scelte di progetto.

L'obiettivo della competizione è formare i giovani ingegneri sotto diversi aspetti, non soltanto in campo puramente tecnico. Alle squadre è richiesto di immaginare che un'azienda manifatturiera abbia loro richiesto di progettare, costruire e vendere un piccolo prototipo da competizione dedicato ad un pubblico di piloti non professionisti. Per questo motivo la vettura deve avere ottime performance in accelerazione, frenata e handling e, contemporaneamente, essere affidabile, sicura e mantenere contenuti costi di costruzione e di manutenzione. L'abitacolo deve avere dimensioni adeguate ad accogliere piloti di diversa statura che, precisamente, vadano dal 5° percentile femminile al 95° percentile maschile. L'azienda deve poter costruire quattro vetture al giorno e queste ultime devono presentare caratteristiche estetiche, di finitura e di confort del più alto livello possibile, per essere attrattive nei riguardi di un ipotetico mercato. Il team deve quindi compiere un lavoro atto a rispettare tutti gli obiettivi progettuali appena

elencati, considerando che le prove delle competizioni sono organizzate in maniera tale da verificarne l'effettivo raggiungimento.

La vettura viene, infatti, giudicata attraverso tre eventi statici:

1. **Business Plan Presentation:** il progetto viene giudicato sotto diversi aspetti utili a valutarne l'effettiva possibilità di primeggiare sul mercato rispetto alle vetture progettate e presentate dagli altri team partecipanti.
2. **Cost Report:** costituito da una distinta base completa della vettura, attribuisce, attraverso precise regole, un costo di costruzione per ognuno dei componenti della vettura, al fine di stimarne il costo totale del prototipo. Il punteggio viene attribuito attraverso diversi fattori di valutazione che tengono conto del minor prezzo di costruzione, della precisione e veridicità del report e della competenza del team negli aspetti legati alla costruzione della vettura.
3. **Engineering Design:** è l'evento statico più importante. Una giuria di esperti del settore analizza la vettura e chiede conto di tutte le scelte progettuali prese dalla squadra.

Prima di poter prendere parte alle prove dinamiche della competizione, la vettura deve passare un'approfondita verifica tecnica. Oltre a tutti gli aspetti legati alla sicurezza, in questa fase viene valutata anche l'abitabilità del prototipo e, in caso di violazione delle regole, viene attribuita una penalità sul punteggio dell'*engineering design*.

Come anticipato, gli eventi dinamici hanno l'obiettivo di valutare nella maniera più precisa possibile le prestazioni della vettura, a tal fine vengono eseguite le seguenti prove:

1. **Acceleration Hybrid Mode:** la vettura, utilizzando tutta la potenza disponibile, compie un'accelerazione con partenza da ferma sulla distanza di 75m. Il miglior punteggio è attribuito al minor tempo.
2. **Acceleration Electric Mode:** si svolge come la prova precedente con il vincolo di percorrere i 75m in modalità elettrica.
3. **Skid Pad:** ha l'obiettivo di valutare le accelerazioni laterali che la vettura è in grado di sviluppare. La prova si svolge cronometrando il tempo impiegato dalla vettura a percorrere un percorso a forma di "8" tracciato attraverso due file di birilli. Viene attribuita una penalità di due secondi per ogni birillo abbattuto e il punteggio massimo è assegnato alla vettura che impiega il minor tempo a chiudere il percorso.
4. **Autocross:** è una prova di sprint in cui la vettura deve percorrere nel minor tempo possibile una pista di handling tracciata attraverso l'uso di birilli colorati. Anche in questo caso vengono assegnati due secondi di penalità per ogni cono abbattuto e il massimo punteggio è attribuito alla vettura che percorre il tracciato nel minor tempo.

5. *Endurance*: si corre su una pista molto simile a quella utilizzata per la prova di autocross. Le vetture devono percorrere 22 km divisi in due *stint* da 11km ciascuno, tra i quali è obbligatorio eseguire un cambio pilota.

Per quanto riguarda la vettura oltre alle già citate norme di abitabilità, il regolamento richiede che essa abbia ruote scoperte e abitacolo aperto. Sono inoltre previste limitazioni concernenti:

- dimensioni di passo e carreggiata,
- struttura e corsa delle sospensioni,
- misura e tipologia degli pneumatici,
- sistema frenante.

Inoltre, sono normate diverse caratteristiche del telaio per motivi di sicurezza:

- sezioni e materiali,
- caratteristiche della struttura di assorbimento degli urti,
- sistema di ritenuta del pilota,
- sistema di sterzo.

Nel 2010 l'armonizzazione delle regole delle diverse competizioni internazionali non aveva ancora raggiunto il livello che oggi permette ad una vettura di prendere parte a qualsiasi gara senza particolari problemi. Per questo motivo la vettura è stata modificata dopo la prima gara, per prendere parte alla competizione americana.

Poiché la competizione avviene tra veicoli ibridi, molta attenzione è riservata alle regole legate alla powertrain. Il regolamento definisce ibrido un veicolo che utilizza un sistema propulsivo formato dall'unione di un motore a combustione interna a quattro tempi e un motore elettrico alimentato da un sistema di accumulo. Non viene data rilevanza alla scelta di una configurazione serie o parallelo e l'accoppiamento delle due powertrain attraverso la superficie stradale è permesso, ma il sistema deve essere dimensionato in modo di garantire la percorrenza della prova di accelerazione in modalità elettrica in un tempo inferiore ai 10 secondi.

Il motore a combustione deve essere a quattro tempi e di cilindrata massima pari a 250cc. Le regole consentono l'utilizzo di qualsiasi tipo di architettura, monocilindrico o bicilindrico, purché derivato da motociclette con regolare permesso di circolazione o derivato da motori utilizzati in ambito industriale e disponibili sul mercato. Sono permesse le seguenti modifiche:

- modifiche alla trasmissione e alla frizione,
- rimappatura della centralina elettronica,

- modifica o sostituzione del sistema di scarico che deve comunque garantire livelli di rumorosità inferiori ai 110dB in una prova standardizzata,
- modifica o sostituzione del sistema di aspirazione fino all'ingresso della testa motore che invece non può essere modificata,
- modifiche al basamento ma non nella zona dei cilindri e dell'albero motore.

Altre regole, più legate alla sicurezza del veicolo, normano la componentistica relativa al sistema carburante e il funzionamento del comando acceleratore.

Come definito in precedenza, rientrano all'interno della powertrain anche il sistema di accumulo dell'energia e il motore elettrico. Il regolamento stabilisce che la tensione massima del sistema non debba eccedere i 400V e la capacità degli accumulatori non deve essere superiore ai 4,449 kWh. Riguardo questi ultimi è anche presente un limite relativo al costo standardizzato (definito dal regolamento stesso) di 6.000 \$. Il veicolo deve essere equipaggiato con un Ground Fault Detector, connesso in modo da isolare il sistema ad alta tensione e spegnere il sistema a bassa tensione in caso di guasto. Il circuito High Voltage e quello Low Voltage devono inoltre essere fisicamente separati all'interno di ambienti, in cui siano presenti entrambi, come ad esempio il pacco batterie. L'intero sistema ad alta tensione deve essere completamente isolato, le connessioni devono rispettare standard qualitativi di alto livello ed è necessario dimostrare il corretto dimensionamento dei cavi, dei connettori e del fusibile. In caso di pioggia le vetture devono sostenere un'ulteriore verifica che ne certifichi la sicurezza in presenza di grosse quantità di acqua.

## 3.2 Vincoli obiettivi e metodologie

Oltre agli appena citati vincoli imposti dal regolamento, il progetto della Sc08h ha dovuto convivere con altre limitazioni, principalmente legate al fatto che la vettura è stata costruita sulla base di una già esistente. Al fine di ottimizzare tempi e costi, la vettura ibrida è stata allestita sull'autotelaio Sc08 progettato e costruito per gareggiare a competizioni di Formula SAE. Alla luce di ciò i principali obiettivi del progetto possono essere riassunti attraverso i seguenti punti:

- progettare, realizzare e testare una powertrain ibrida su una vettura Formula SAE,
- rilevare dati sperimentali e creare delle competenze nella gestione di una vettura ibrida,
- validare sperimentalmente i risultati di un modello di veicolo ibrido.

### 3 - Il progetto Sc08h

---

Per raggiungere questi obiettivi il progetto è stato impostato secondo la seguente filosofia:

- non correre rischi maggiori di quelli di una normale Formula SAE,
- raggiungere un rapporto peso-potenza più simile possibile a quello di una normale Formula SAE, anche al fine di non impattare troppo sulle ottime prestazioni dell'autotelaio di partenza,
- realizzare uno schema di powertrain orientato alla semplicità, alla leggerezza e all'affidabilità

Il tempo a disposizione del team progettuale per passare dal foglio bianco al progetto marciante, unito ai vincoli di budget hanno reso necessaria la progettazione di un sistema ibrido installabile senza alcuna modifica sul telaio di partenza e composto totalmente di elementi commerciali disponibili sul mercato in tempi e quantità ridotti.

Il processo seguito per la realizzazione del progetto è il seguente:

- definizione dei vincoli e delle specifiche di progetto,
- progetto introduttivo e verifica di fattibilità,
- progetto di dettaglio,
- analisi e verifica sperimentale,
- validazione della modellistica di progetto.

Il processo ha consentito sia di sviluppare in tempi brevi la vettura sia di mantenere il necessario livello di cura per il peso, per la compattezza e per l'affidabilità dei sottosistemi necessari per costruire un veicolo competitivo.



# **Capitolo 4**

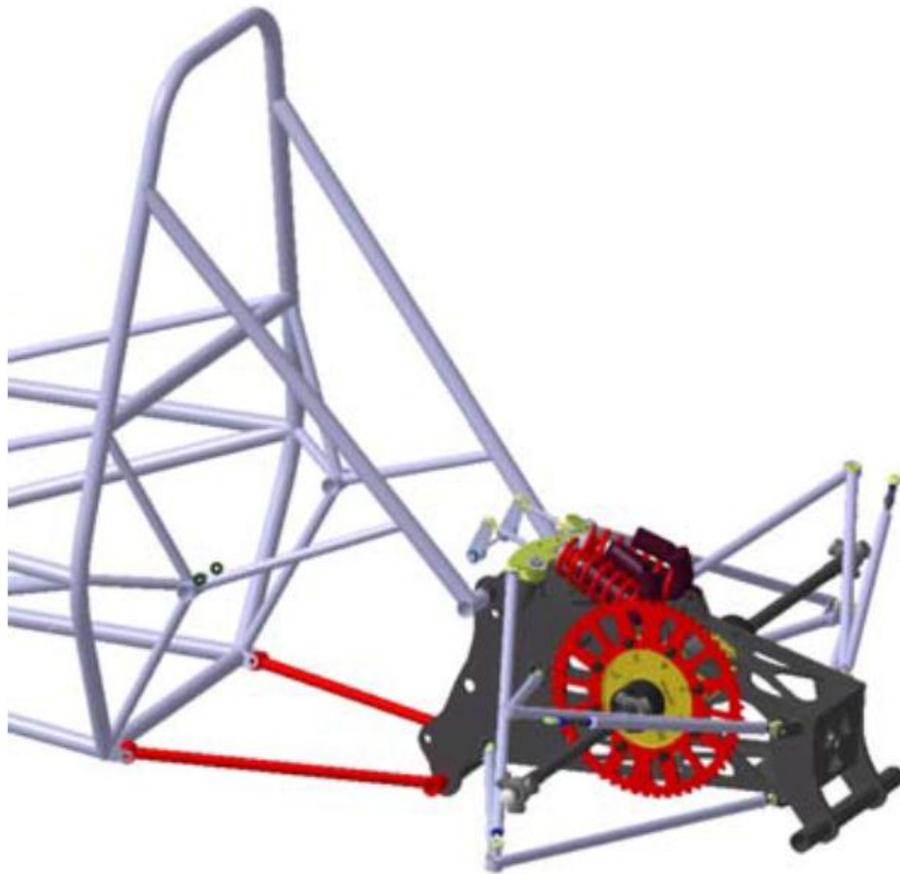
## **4. Powertrain SC08h**

## 4.1 Il progetto

L'obiettivo principale della powertrain di un veicolo è fornire la potenza necessaria a garantire le prestazioni decise in fase di impostazione progettuale. Nel caso della Sc08h, il team ha fissato come parametro di riferimento le prestazioni di una vettura di Formula SAE, normalmente equipaggiata con un motore termico da 600cc. Come anticipato, la competizione non è soltanto focalizzata alla valutazione delle prestazioni pure, ma pone molta attenzione al concetto di efficienza generale del veicolo. Nella ricerca del miglior equilibrio tra prestazione e limitazione dei consumi si è scelto di adottare una struttura ibrida parallela. I fattori fondamentali per la scelta sono stati i seguenti:

- Miglior rapporto peso/potenza: con questa struttura entrambe i propulsori sono impiegati per fornire direttamente potenza alle ruote e il sistema risulta più semplice, compatto e con un minor numero di componenti, il cui peso influirebbe in modo sostanziale su quello della vettura completa (generatore accoppiato al motore termico).
- Limitata autonomia necessaria: le percorrenze necessarie a terminare la gara, unite alla limitata potenza espressa dal motore elettrico consentono di utilizzare batterie di trazione di capacità e pesi limitati che possano essere utilizzate nelle modalità di un ibrido plug-in, caricate da rete fissa e scaricate durante l'utilizzo.
- Flessibilità e affidabilità del sistema: principalmente legati alla possibilità di utilizzare la vettura in tre distinte modalità, ovvero elettrica, termica e ibrida.

Il fatto che la vettura fosse basata su di un telaio già esistente ha costituito uno dei fattori di maggior rilevanza nell'approcciarsi al progetto della powertrain. I prototipi da Formula SAE sono caratterizzati da una forte integrazione dei componenti della trasmissione e di quelli dell'autotelaio al retrotreno.

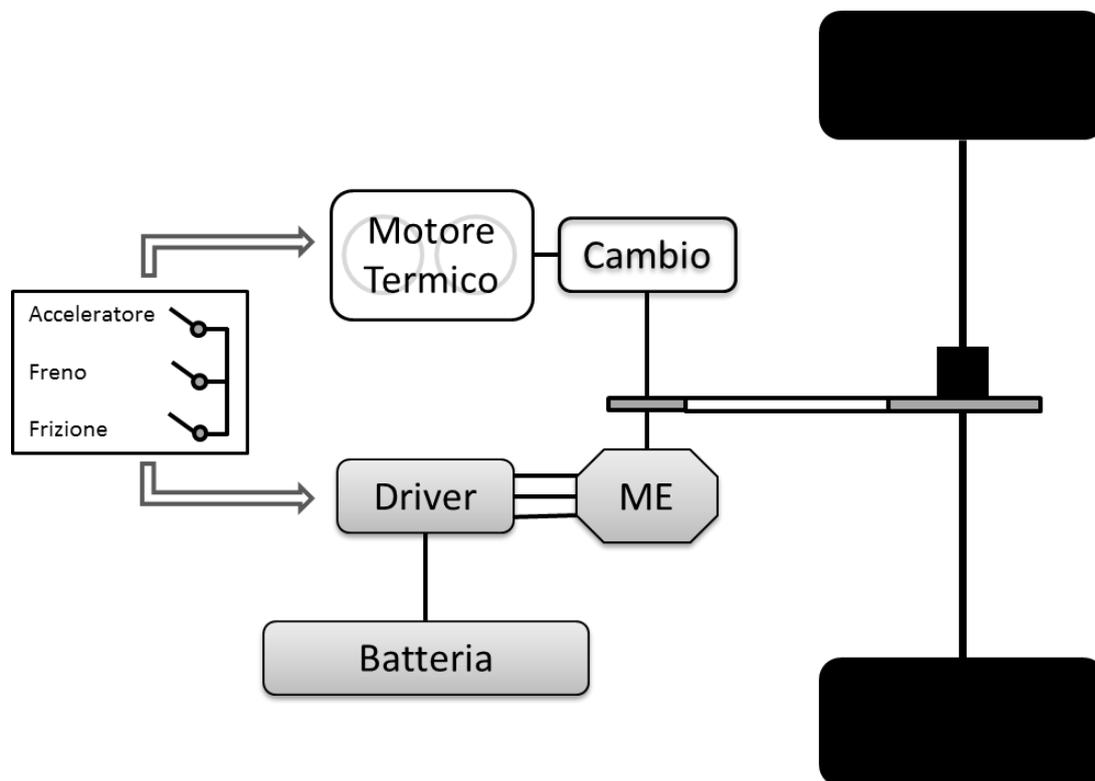


**Figura 4.1: retrotreno della Sc08h**

Com'è possibile notare all'interno della Figura 4.1 il retrotreno della Sc08h si basa su una struttura saldata in pannelli di alluminio, caratterizzata da una forte integrazione tra il sistema sospensioni (attacchi dei bracci, supporto dei perni rocker e attacchi ammortizzatori) e il sistema di trasmissione. In particolare il sistema di trasmissione a catena e il montaggio del differenziale autobloccante "*Quife*", realizzato con componenti custom, rappresentano un ottimo risultato progettuale, che è stato scelto di mantenere invariato nella realizzazione della powertrain ibrida e che ha quindi costituito un ulteriore vincolo progettuale.

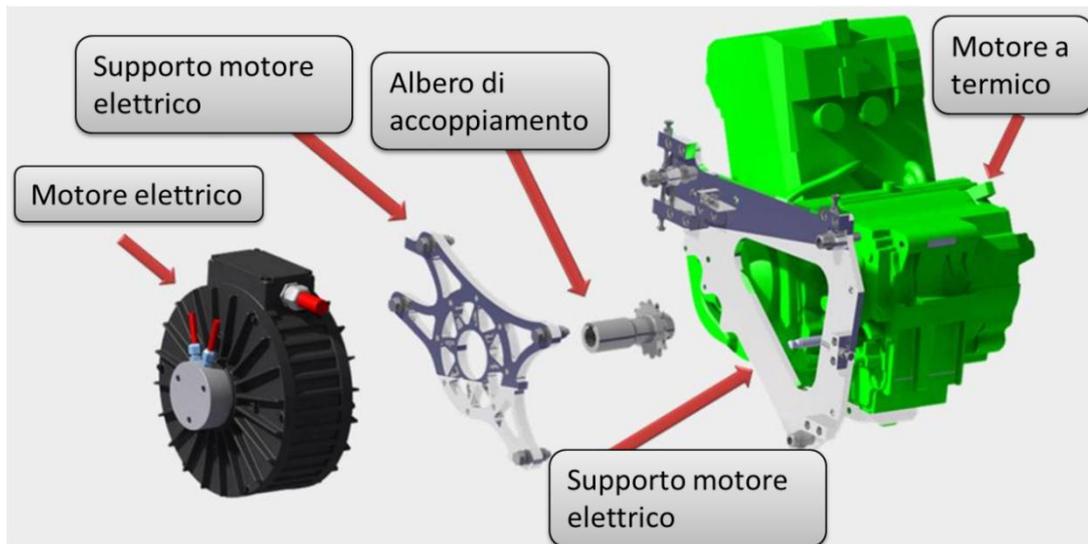
## 4.2 Descrizione

La struttura della powertrain della Sc08h è rappresentata schematicamente all'interno della Figura 4.2.



**Figura 4.2:** schema della struttura della powertrain della Sc08h

Partendo dalle ruote posteriori, si può riconoscere il differenziale che attraverso la catena e un opportuno rapporto di riduzione di 3,85 viene collegato all'elemento che accoppia l'albero del motore elettrico al secondario del cambio del motore termico. Il particolare di questo componente è mostrato all'interno della Figura 4.3. Connesso al motore elettrico è possibile osservare il driver di potenza (inverter) che è a sua volta connesso al pacco batteria. I due sistemi si riuniscono all'acceleratore che fornisce il comando a entrambe: la connessione al motore termico è realizzata meccanicamente, mentre un potenziometro lineare piazzato sul pedale fornisce il riferimento all'inverter, tramite un segnale optoisolato.



**Figura 4.3: accoppiamento del motore elettrico al motore termico**

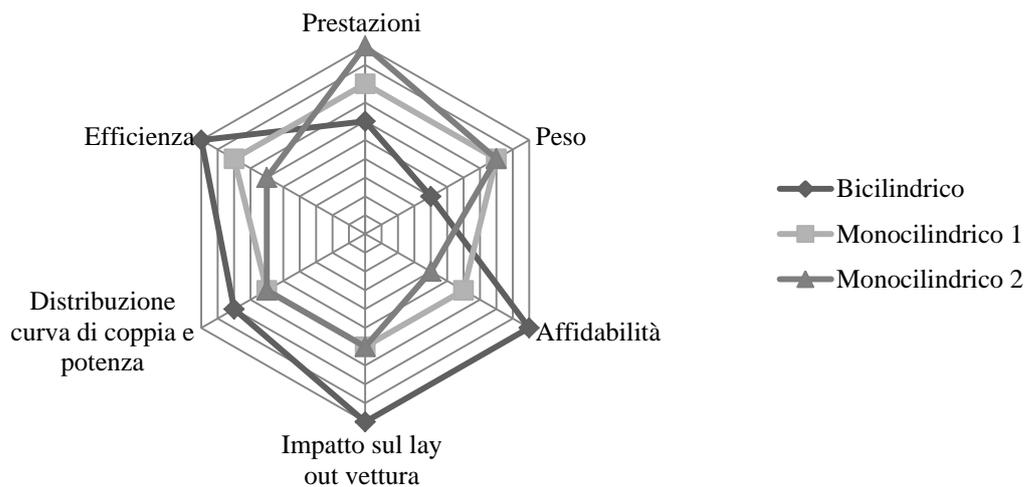
Volendo entrare maggiormente nel dettaglio, si può dividere la powertrain in due macro aree, quella elettrica e quella termica, delle quali è possibile fornire una descrizione più dettagliata.

Come anticipato, il regolamento tecnico prevede l'utilizzo di uno *stock engine*, cioè di un motore termico che, fatta eccezione per la mappatura, sia uguale alla versione disponibile sul mercato. Per facilità costruttiva si è scelto di circoscrivere il campo a unità motociclistiche con cambio in blocco. Un'approfondita analisi di mercato ha portato all'individuazione di tre propulsori, un bicilindrico e due monocilindrici. I criteri di valutazione utilizzati per la scelta definitiva sono i seguenti:

1. Prestazioni: valori di coppia e potenza massima;
2. Peso: peso dell'unità completa;
3. Affidabilità: alcuni motori di questa categoria vengono garantiti per percorrenze ridotte, nell'ordine dei 5000 km. Sebbene le percorrenze di una vettura da Formula SAE siano assolutamente inferiori, stimabili in circa 1000 km a stagione, le condizioni di uso risultano particolarmente gravose. Le basse velocità medie e le forti accelerazioni si traducono infatti in alte temperature di esercizio e problemi di lubrificazione che possono ridurre sensibilmente l'affidabilità del motore;
4. Impatto su lay-out vettura: questo parametro è stato utilizzato al fine di stimare le modifiche necessarie sul telaio per alloggiare il nuovo motore;

5. Distribuzione delle curve di coppia e potenza: fissato il raggio di rotolamento degli pneumatici e la velocità massima obiettivo del veicolo, è necessario verificare che la trasmissione a catena e la scalatura del cambio possano realizzare una rapportatura adeguata e come questa si armonizzi con le curve di coppia e di potenza;
6. Efficienza: la competizione di Formula Hybrid pone molta importanza all'efficienza energetica della powertrain e conseguentemente nell'impostazione della vettura è necessario tenere conto di questo fattore.

I risultati dell'analisi sono riassunti all'interno della **Error! Reference source not found.**



**Figura 4.4: confronto tra i tre motori termici valutati**

La scelta finale è ricaduta sul bicilindrico, nello specifico il motore che equipaggia la Kawasaki Ninja 250R. Si tratta di un 250cc due cilindri, quattro tempi a sei marce. I motivi di questa scelta sono da ricercare nell'equilibrio generale del

propulsore che per quanto più pesante e meno prestazionale in termini assoluti è in grado compensare attraverso una più adeguata forma delle curve di coppia e potenza, performance di affidabilità di primo ordine e di ridurre il numero di modifiche necessarie all'installazione a bordo veicolo. La Figura 4.5 riporta le curve di coppia e potenza del propulsore.

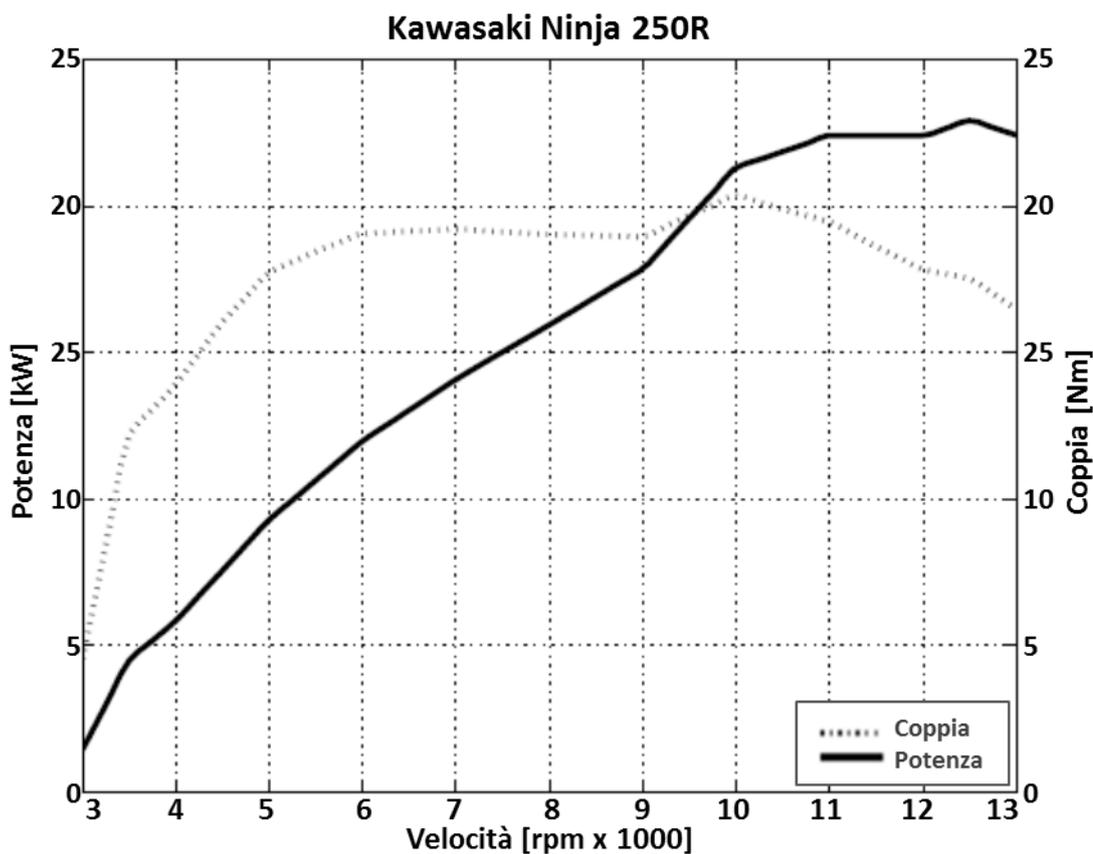
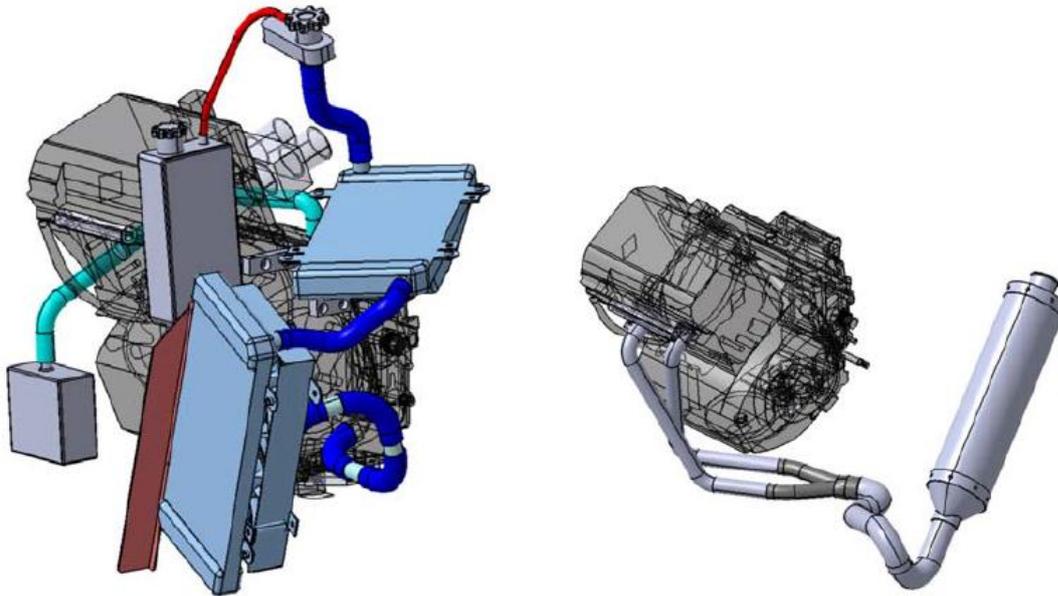


Figura 4.5: curve di coppia e di potenza del motore Kawasaki Ninja 250R

Per adattare il motore alla vettura è stato necessario produrre appositi supporti, abbassare la coppa dell'olio e costruire un impianto di raffreddamento ad hoc e un sistema di scarico su misura visibili in Figura 4.6.



**Figura 4.6: nuovo impianto di raffreddamento e scarico su misura**

L'impianto elettrico del motore è rimasto originale, così come la centralina di controllo motore alla quale è stato aggiunto un modulo aggiuntivo in grado di modificare la dosatura del motore termico.

La Tabella 4.1 riporta le principali caratteristiche del propulsore.

#### 4 - Powertrain SC08h

<b>Caratteristiche del motore termico</b>	
<b>Tipo di motore</b>	Due cilindri quattro tempi raffreddato ad acqua
<b>Cilindrata</b>	249 cm <sup>3</sup>
<b>Corsa x Alesaggio</b>	62,0 x 41,2 mm
<b>Rapporto di compressione</b>	11.6:1
<b>Potenza massima</b>	22,2 kW @ 10500 rpm
<b>Coppia massima</b>	21.0 Nm @ 8500 rpm
<b>Sistema di aspirazione</b>	2 valvole a farfalla, ø28 mm
<b>Iniezione</b>	Digitale
<b>Accensione</b>	Elettrica
<b>Lubrificazione</b>	Lubrificazione forzata
<b>Trasmissione</b>	Sequenziale a 6 marce
<b>Rapporto di riduzione primario</b>	3.087 (71/23)
<b>Rapporto del cambio: prima</b>	2.600 (39/15)
<b>Rapporto del cambio: seconda</b>	1.789 (34/19)
<b>Rapporto del cambio: terza</b>	1.409 (31/22)
<b>Rapporto del cambio: quarta</b>	1.160 (29/25)
<b>Rapporto del cambio: quinta</b>	1.000 (27/27)
<b>Rapporto del cambio: sesta</b>	0.893 (25/28)
<b>Rapporto di riduzione finale</b>	3.071 (43/14)
<b>Frizione</b>	Multidisco

**Tabella 4.1: principali caratteristiche del motore Kawasaki Ninja 250R**

I tre componenti principali della parte elettrica della powertrain sono i seguenti:

- Inverter a quattro quadranti per il controllo di motori brushless a magneti permanenti potenza massima di 25kW;
- Motore elettrico brushless a magneti permanenti, 12 kW di potenza massima 80Nm di coppia massima
- Pacco batterie realizzato con celle litio-polimero, tensione nominale di 100V

L'inverter ha la funzione di controllare il flusso di energia dal pacco batterie al motore. Il sistema implementato sulla Sc08h è caratterizzato da una logica di controllo molto semplice in cui la quantità di coppia erogata dal motore elettrico è

proporzionale alla posizione del pedale acceleratore. Il dispositivo utilizzato è di tipo commerciale, prodotto della Digital Motor Control GmbH e denominato Sigmadrive. Si tratta di un dispositivo a quattro quadranti per il controllo di motori di tipo brushless e realizzato appositamente per applicazioni automotive. Il sistema ha implementati al suo interno algoritmi avanzati in grado di garantire un controllo accurato, prevedibile, graduale ed efficiente e può realizzare la funzione retromarcia e di frenata rigenerativa.

Questo dispositivo è basato sulla tecnologia IMS (Insulated Metal Substrate), ovvero realizzata su di un PCB composto da uno strato di metallo isolato tramite uno dielettrico dal layer di rame dove sono saldati i componenti. Tale tecnologia consente di dissipare in modo efficace il calore e, grazie all'efficienza nel raffreddamento, è in grado di garantire ottimi livelli di affidabilità uniti alla capacità di erogare ragguardevoli potenze continue.

Al fine di adattare le prestazioni della powertrain elettrica a diverse tipologie di veicolo, il Sigmadrive consente la regolazione dei seguenti parametri:

- Mappatura dell'acceleratore: consente la regolazione della coppia fornita dal motore elettrico in rapporto a quella fornita dal motore termico;
- Rampe di accelerazione e decelerazione che determinano la velocità di risposta del sistema rispetto alla variazione di posizione del comando dell'acceleratore.

Il motore, prodotto dall'azienda tedesca Perm GmbH, è identificato dalla sigla PMG 150S ed è di tipo brushless a magneti permanenti. Come per l'inverter il raffreddamento è ad aria, soluzione che a fronte di potenze specifiche inferiori consente notevoli semplificazioni in termini di lay-out generale del sistema. Il design compatto, visibile in Figura 4.7, ha consentito un'installazione semplice, a lato del motore a combustione interna, con l'albero direttamente connesso sul secondario del cambio. In Tabella 4.2 sono raccolti i parametri principali del motore elettrico.

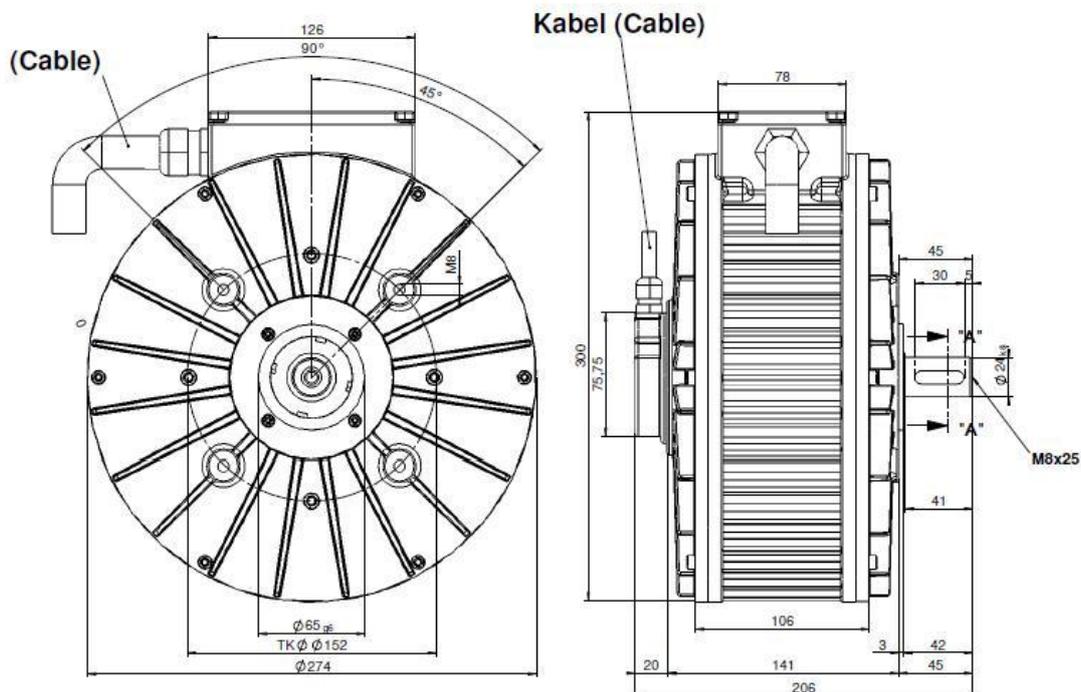


Figura 4.7: motore elettrico Perm PMS 150S

Motore elettrico Perm PMS 150S	
Potenza nominale	12 kW
Velocità nominale	4500 rpm
Coppia nominale	25,50 Nm
Coppia di picco	80,00 Nm
Tensione di fase	63,90 V AC
Corrente di fase	137,30 A rms
Peso	21,3 kg

Tabella 4.2: specifiche Perm PMS 150S

Il motore è alimentato a 100V perché al fine di semplificare lo schema del sistema è stato deciso di non utilizzare DC-DC converter per aumentare la tensione del DC-bus e per questioni di sicurezza si è evitato di aumentare il numero di celle in serie del pacco batterie. Oltre a questo criterio, il dimensionamento del pacco batterie è stato basato sulla capacità necessaria a coprire una prova di endurance di Formula SAE. Partendo dall'acquisizione dati di un'endurance della Sc08, è stato possibile quantificare in 13,75kW la potenza media richiesta dalla vettura, che sul totale della prova di endurance comporta la necessità di 5,1 kWh. Se si considera di

affidare alla trazione elettrica la sola parte dinamica necessaria a coprire i picchi oltre la potenza media, la capacità necessaria viene ridotta che a 2.9 kWh. A una tensione nominale di 96V si ottiene una capacità delle celle di 29Ah, che viene correte ad un valore compreso tra 35Ah e 40Ah considerando:

- efficienza del motore e dell'inverter,
- efficienza della trasmissione,
- l'energia immagazzinata nella cella non è tutta disponibile (per evitare danni alle celle si evita di scendere sotto i 3V di tensione),
- coefficiente di sicurezza dovuto all'incertezza di alcuni parametri utilizzati nei modelli di riferimento

La ricerca delle celle disponibili sul mercato ha portato a scegliere un prodotto della Kokam le cui caratteristiche sono riportate all'interno della Tabella 4.3.

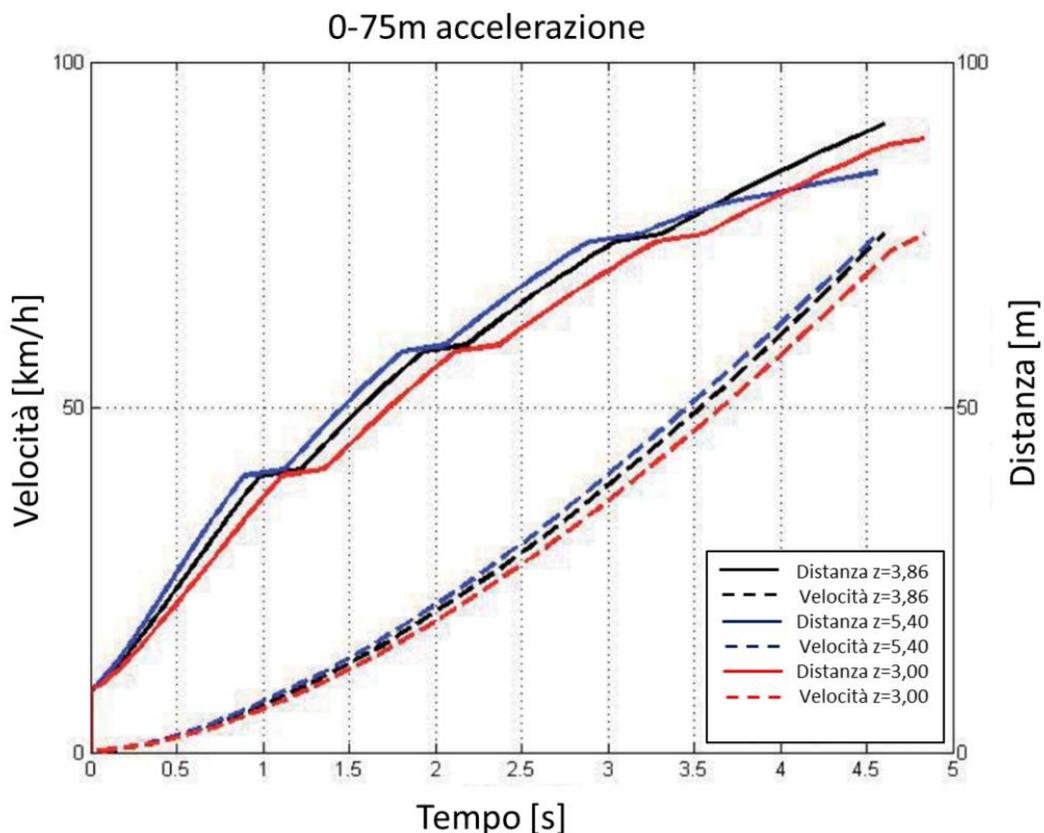
Il pacco batterie è quindi costituito da tre moduli, ciascuno composto da 9 celle connesse in serie. La tensione delle celle varia da un minimo di 2,7V ad un massimo di 4,2V, con tensione nominale di 3,7V. Conseguentemente la tensione massima dei moduli è di 37,8V, mentre quella del pacco è di circa 113V.

<b>Specifiche Kokam</b>	
<b>Capacità</b>	40Ah
<b>Tensione nominale</b>	3,7V
<b>Massima corrente di carica</b>	80A
<b>Massima tensione di carica</b>	4,2V $\pm$ 0,03V
<b>Massima corrente di picco di scarica</b>	200A
<b>Massima corrente continua di scarica</b>	400A
<b>Cicli di vita [@80% DOD]</b>	>800 cicli
<b>Temperature di utilizzo in carica</b>	0 $\div$ 40°C
<b>Temperature di utilizzo in scarica</b>	-20 $\div$ 60°C
<b>Spessore</b>	10,7 $\div$ 0,5mm
<b>Larghezza</b>	215 $\div$ 2mm
<b>Lunghezza</b>	220 $\div$ 2mm
<b>Peso</b>	1100 $\div$ 40g

**Tabella 4.3: Specifiche delle celle Kokam**

### 4.3 Prestazioni della powertrain

Le prestazioni previste per la powertrain possono essere riassunte attraverso il grafico proposto in Figura 4.8 che riporta le prestazioni previste per la vettura sulla distanza di 75m con partenza da fermo al variare del rapporto finale. Sulla base di questo grafico è stato impostato un rapporto pari a 3,86 in virtù della maggior velocità nel tratto finale della prova. Questo aspetto consente prestazioni migliori nelle prove di autocross ed endurance, durante i quali si raggiungono velocità superiori ai 100 km/h e per le quali non è possibile sostituire la rapportatura.



**Figura 4.8:** previsione delle prestazioni della vettura sulla distanza di 75m

Le curve di coppia e potenza alla ruota sono invece riportate all'interno delle seguenti figure. In particolare la Figura 4.9 riporta separatamente la coppia alla ruota del motore elettrico e di quello termico in funzione della velocità del veicolo.

La Figura 4.10 riporta invece la coppia totale disponibile, data dalla somma dei contributi delle due parti della powertrain ibrida.

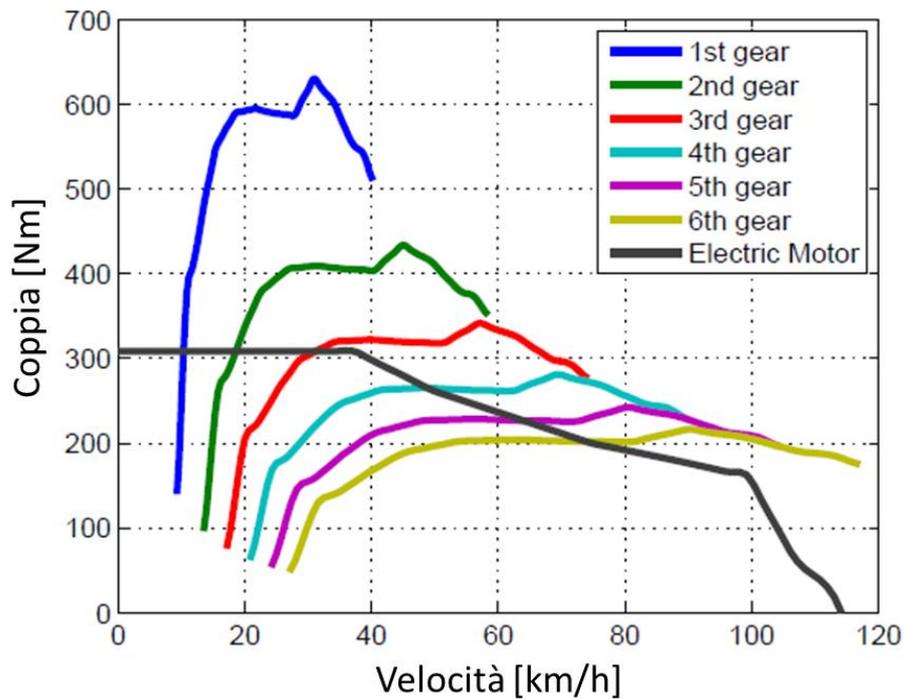


Figura 4.9: curve di coppia di motore termico e motore elettrico

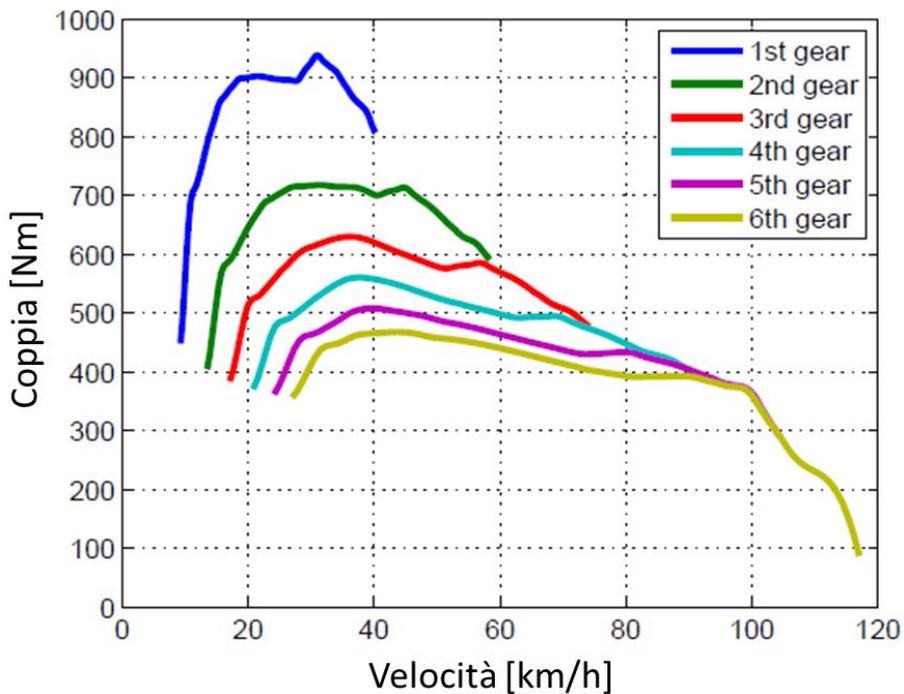


Figura 4.10: curve di coppia della powertrain ibrida

## 4.4 Sicurezze, monitoraggio e controllo

L'introduzione sulle vetture di pacchi batterie e linee ad alta tensione ha imposto la necessità di un severo regolamento, che garantisca la sicurezza di piloti e operatori. Secondo le normative *ISO/DIS 6469-3.2:2010* la soglia di tensione sopra la quale si ha un rischio per la vita umana è di 60V DC e 30V AC e i circuiti che superano tali valori sono considerati circuiti "High Voltage" (HV). Tali circuiti devono obbligatoriamente essere controllati da sistemi di monitoraggio, che ne garantiscano la sicurezza, e devono mostrare segnali che ne indichino la pericolosità.

Uno dei punti principali è l'isolamento delle linee HV rispetto allo chassis della vettura, che, secondo le normative, deve mantenersi sopra i 500 $\Omega$ /V. Per garantirlo si utilizzano dei dispositivi specifici denominati GFD (Ground Fault Detector) o IMD (Insulation Monitor Device). Molti regolamenti impongono di utilizzare componenti commerciali e spesso ne consigliano uno in particolare.

Il GFD deve essere in grado di scollegare il sistema di accumulo dal resto del circuito HV in modo da isolare l'alta tensione in caso di problemi sulla linea. Questo viene fatto inserendo due contactor (relè in grado di sopportare alte correnti e tensioni) sui due poli del pacco batterie e garantendo l'impossibilità di un contatto accidentale con una parte conduttiva del circuito HV.

Altre sicurezze in grado di aprire i contactor sono l'interruttore inerziale, per garantire lo spegnimento del sistema in caso di incidente, e interruttori di sicurezza, uno sulla plancia attivabile dal pilota e almeno uno per lato attivabile da un operatore all'esterno. Sempre sull'esterno deve essere collocata una luce di segnalazione che consenta di capire se il circuito HV è attivo o meno.

Per poter gestire facilmente il pacco in fase di assemblaggio è normale prassi suddividerlo in più moduli a tensione più bassa, che verranno poi collegati in serie. Per queste ragioni i moduli in cui si suddivide il pacco devono essere di tensione inferiore a tale valore.

Il sistema da noi realizzato sottostà a tutte queste regole e il pacco batterie è stato suddiviso in tre moduli, ciascuno composto da 9 celle connesse in serie. Come indicato in Tabella 4.3, la tensione di queste celle passa da un minimo di 2,7V ad un massimo di 4,2V, con tensione nominale di 3,7V. La tensione massima dei moduli è quindi di 37,8V, mentre quella del pacco è di circa 113V, con la nominale a 100V.

### 4.4.1 Il Battery Management System

Le celle litio-polimero sono componenti molto sensibili, la cui gestione è argomento delicato e che necessitano di un sistema di monitoraggio che ne assicuri il corretto utilizzo. Questo tipo di cella, se caricato o scaricato eccessivamente, perde di caratteristica e tende a gonfiare, fino ad arrivare a esplodere e, in casi

estremi, a incendiarsi. Per queste ragioni è necessario installare un BMS (Battery Management System) che controlla costantemente tensione, corrente e temperatura delle celle. Inoltre ne assicura il perfetto bilanciamento, per consentire di poter usare tutta l'energia presente in una cella. Infatti, se nel momento in cui una cella è al 100% del suo stato di carica (SOC) una seconda è solo al 90%, si avrà che quando la seconda sarà completamente scarica la prima avrà ancora il 10%. La scarica dovrà comunque essere interrotta con conseguente perdita di parte dell'energia accumulata. Stesso comportamento si ottiene per la fase di carica.

Per meglio comprendere l'argomento, nel proseguo del paragrafo verranno introdotti i vari tipi di BMS, cercando di evidenziarne le differenze.

I sistemi di monitoraggio possono essere più o meno sofisticati a seconda delle necessità dell'applicazione. In letteratura vengono spesso divisi in varie categorie in base alle loro funzioni:

- CC-CV
- Regulator
- Meter
- Monitor
- Balancer
- Protector

CC-CV è l'acronimo di *Constant Current–Constant Voltage* e indica il metodo di carica utilizzato. I sistemi di questo tipo si occupano solo di monitorare la carica delle batterie, assicurando una prima fase a corrente costante seguita da una fase a tensione costante. Essi sono solitamente integrati in un caricatore o sono a essi connessi, ma il livello di protezione e di controllo è molto basso. In Figura 4.11 si possono vedere le curve di carica di una generica cella litio-polimero, realizzate con differenti correnti durante la fase CC. Si può notare come le curve di corrente si mantengano costanti sino all'istante in cui la tensione raggiunge il valore massimo di 4,2V. Da tale istante in poi le correnti scendono di valore in modo da mantenere costante la tensione.

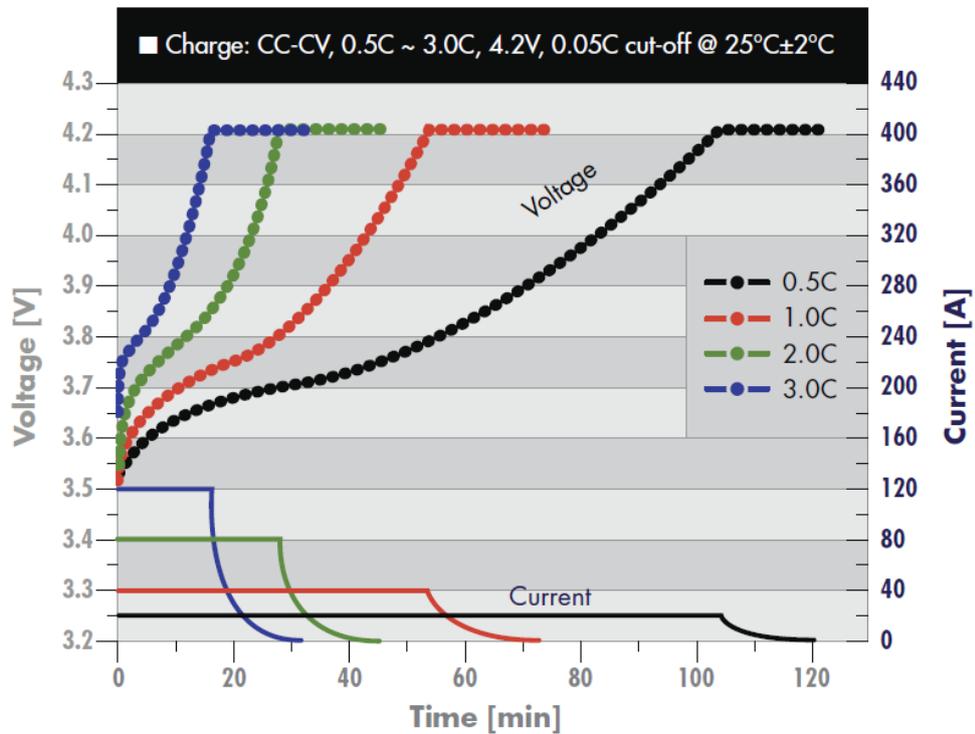


Figura 4.11: curve di carica CC-CV

I *regulator* aggiungono un primo livello di sofisticazione ovvero il controllo della tensione della singola cella. Si tratta di bilanciamento delle celle fatto in fase di carica: raggiunta la tensione massima, il regolatore devia il flusso della corrente in modo da non farlo passare nella cella. Questo comporta un corretto dimensionamento del dispositivo in base alla corrente di carica del carica-batterie, che se troppo elevata può portare al suo danneggiamento o alla sovraccarica della cella.

I *meter* si occupano semplicemente di monitorare la tensione delle celle senza compiere nessuna operazione: i dati sono forniti all'operatore che dovrà eventualmente agire manualmente. Solitamente questi dispositivi vengono utilizzati da ricercatori o hobbisti che ricercano prodotti a basso costo che gli permettano di conoscere le condizioni delle singole celle, per poi poter operare manualmente in caso di necessità.

I *monitor* aggiungono la chiusura dell'anello e l'interazione con dispositivi esterni, senza però attuare direttamente operazioni sul pacco batterie e senza bilanciamento delle celle. Essi leggono la tensione delle singole celle, valutano le condizioni del pacco e comunicano a caricabatterie o carico le operazioni da intraprendere. Possono quindi comandare carica e scarica, limitando le correnti o impedendo di effettuare una o l'altra delle operazioni.

I *balancer* presentano le stesse caratteristiche dei monitor, ma possono agire direttamente sul pacco. Questo significa in particolare bilanciare le celle in modo passivo o attiva a seconda del livello del dispositivo. Alcuni *balancer* hanno poi la possibilità di comandare dispositivi esterni per scollegare il pacco batterie dal sistema.

Quest'ultima opzione caratterizza anche l'ultima categoria, i *protector*. Questi ultimi hanno però degli switch integrati nel dispositivo, solitamente allo stato solido, che permettono di isolare il pacco batterie dal sistema. Questi dispositivi vengono spesso utilizzati per pacchi batterie di piccole dimensioni con correnti e tensioni non troppo elevate, quando si passa a valori più elevati si utilizzano solitamente i *balancer*.

Oltre a questa catalogazione in base alle funzionalità, i BMS possono essere divisi in due tipologie: analogici e digitali. Questa divisione viene fatta sulla base del metodo di processo delle tensioni di cella.

I primi utilizzano circuiti analogici solitamente con amplificatori operazionali o differenziali per processare le tensioni di cella. Nella maggior parte dei casi si tratta di dispositivi più semplici con minor funzionalità, che possono controllare la tensione delle singole celle, riconoscere che una di esse ha un valore troppo basso ma senza sapere quale essa sia.

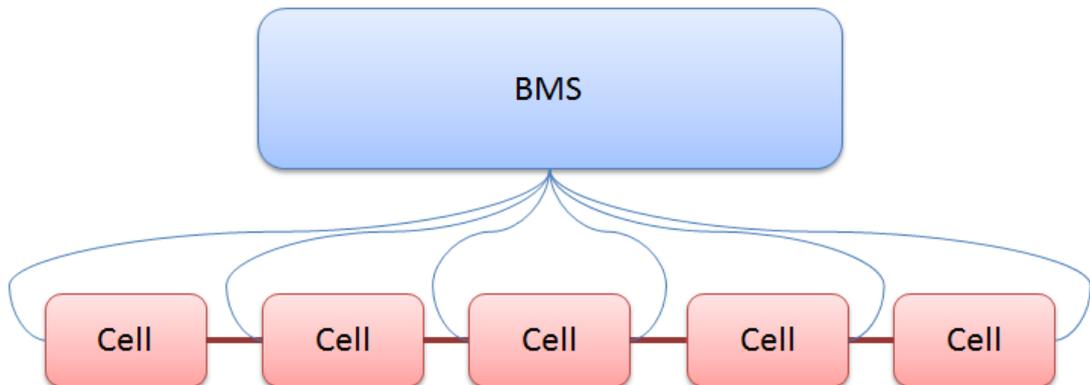
I BMS digitali sono solitamente più complessi dei precedenti e offrono un maggior numero di funzionalità. Possono individuare le celle con tensioni differenti oltre che conoscerne la temperatura, calcolarne stato di carica e altro ancora.

Un'ulteriore distinzione viene fatta sulla base della struttura del sistema, distinguendo 4 tipi di BMS:

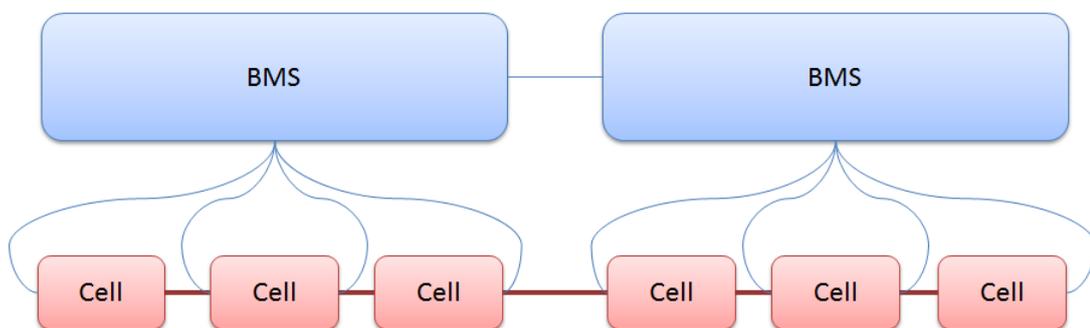
- Centralizzato (Figura 4.12)
- Modulare (Figura 4.13)
- Master-slave (Figura 4.14)
- Distribuito (Figura 4.15)

Ognuna di queste topologie ha i suoi pregi e i suoi difetti che non permettono di fare una scelta assoluta di quale sia la soluzione migliore.

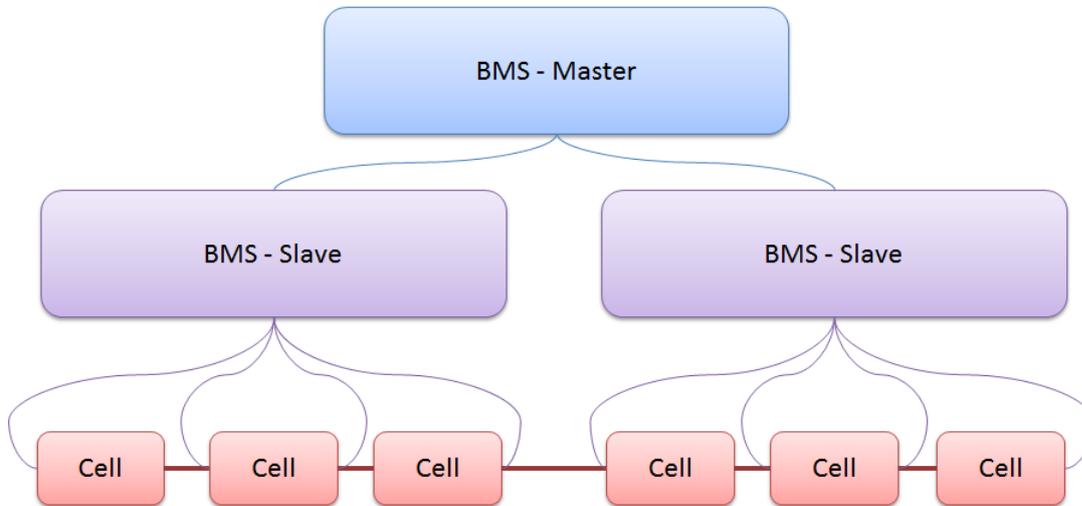
I primi sono composti di un'unica unità che si occupa di tutta la gestione del pacco batterie. Da essa partono  $N+1$  fili, dove  $N$  è il numero di celle, che vanno a collegarsi su tutti i poli in modo da misurare tutte le tensioni. In alcuni casi possono essere presenti anche sensori di temperatura e di corrente. Tale soluzione ha il pregio di essere molto compatta e, in caso di problemi hardware, basta sostituire l'unità. Dall'altro lato si ha la presenza di molti cavi che corrono all'interno del pacco batterie per raggiungere un unico punto.

**Figura 4.12: BMS centralizzato**

I sistemi di tipo modulare sono costituiti da una serie di unità centralizzate che possono comunicare tra loro in modo da formare un unico BMS. Una sola di queste unità si occupa di gestire il pacco batterie calcolando i parametri totali e colloquiando con i sistemi esterni quali carico e charger. Essendo tutti i dispositivi uguali a livello hardware si ha che molti di essi hanno parti non utilizzate e funzionalità inibite.

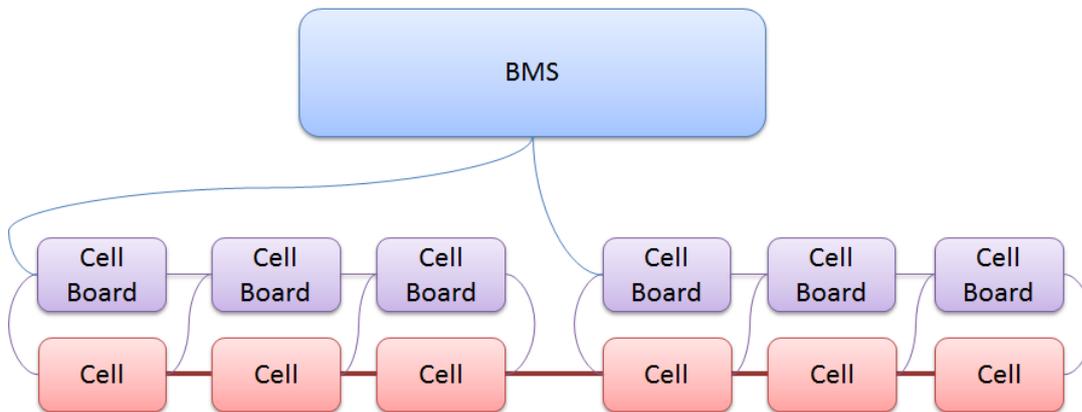
**Figura 4.13: BMS modulare**

I sistemi master-slave sono costituiti da una serie di unità slave controllate da un master. La struttura è molto simile a quella dei sistemi modulari con le unità slave che si interfacciano con le celle ma non hanno la parte di logica di controllo del pacco, con il calcolo dei parametri totali e l'interfacciamento con i dispositivi esterni. Questa parte è demandata interamente al master che non si interfaccia invece direttamente con le celle ma ottiene i dati da elaborare dagli slave.



**Figura 4.14: BMS master-slave**

L'ultima topologia è poi quella distribuita, caratterizzata dalla presenza di uno schedino su ogni singola cella. Queste board vengono alimentate direttamente dalle celle a cui sono connesse, ne misurano la tensione in alcuni casi la temperatura e si occupano del bilanciamento. Comunicano poi tra loro solitamente suddivisi in gruppi che vengono definiti banchi e che comunicano i dati ad un'unità centrale. Ogni banco si comporta come se fosse uno slave della topologia precedente che comunica le informazioni all'unità centrale ovvero il master.



**Figura 4.15: BMS distribuito**

Il BMS da noi utilizzato è di topologia distribuita, di tipo digitale e con funzionalità di balancer. Questo significa che su ogni cella è installato uno schedino che ne misura la tensione, la temperatura e che può effettuare un bilanciamento

passivo, ovvero scaricando le celle più cariche dissipando energia su di una resistenza.

L'unità centrale si occupa invece di chiudere gli anelli di controllo, di interfacciarsi con i sistemi esterni attraverso una comunicazione basata sul protocollo CAN e di controllare i contactor. In questo modo invia lo stato delle celle e del sistema e i parametri del pacco batterie, riceve i comandi come la richiesta di chiusura dei contactor e controlla il caricabatterie.

La misura dei tre parametri principali (tensione, temperatura e corrente) consente al BMS di elaborare strategie di controllo che consentano mantenere le celle all'interno dei range di sicurezza. Può inoltre comandare il sistema di riscaldamento e l'eventuale sistema di riscaldamento, oltre che aprire i contactor in caso di necessità.

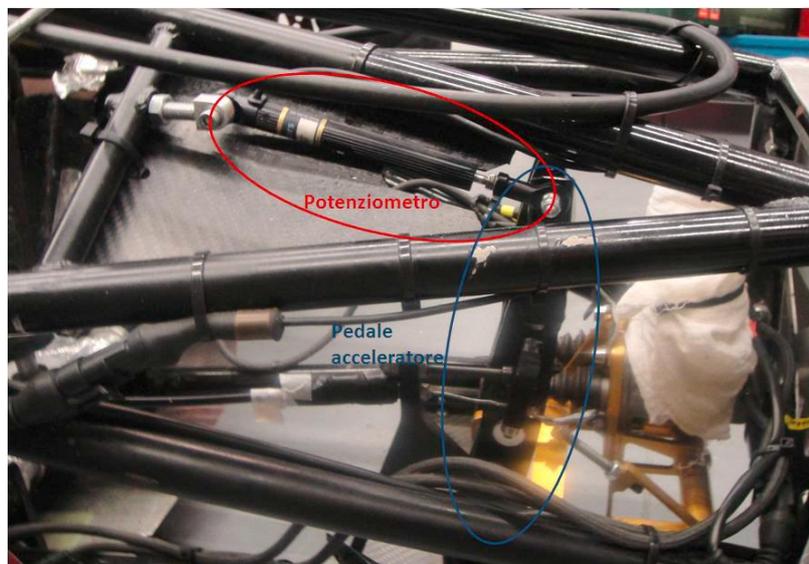
Inoltre attiva il bilanciamento delle celle controllando gli schedini connessi su di esse. Nel caso di veicoli elettrici o ibridi plug-in dove è obbligatoria la ricarica del sistema di accumulo a fine missione, il bilanciamento viene solitamente disattivato durante l'uso per attivarlo solo quando il pacco batterie è collegato al charger. In ogni caso esso viene solitamente attivo solo sopra un certo livello di carica del pacco in modo da limitare l'energia dispersa.

Infine il BMS si occupa di valutare parametri quali lo stato di carica (SOC), la resistenza interna delle celle e lo stato di salute del pacco batterie.

### **4.4.2 Controllo delle due powertrain**

L'introduzione di una powertrain ibrida non deve comportare cambi nel metodo di guida della vettura. Bisogna quindi tener conto di non poter modificare i comandi base di una classica macchina, adattando quindi il progetto allo stile di guida ampiamente collaudato del pilota e non viceversa. Appare dunque evidente che le due powertrain debbano usufruire di un solo comando.

Nell'ottica di voler mantenere il sistema il più semplice possibile si è quindi scelto di mantenere invariata il motore termico, con l'acceleratore che agisce meccanicamente sulla farfalla, e di aggiungere un sensore su tale pedale per dare il comando alla seconda powertrain. In prima battuta si era pensato di utilizzare il segnale del potenziometro piazzato sulla farfalla per dare il comando all'inverter, ma questo avrebbe impedito l'utilizzo della vettura in modalità puramente elettrica. Indubbiamente l'aggiunta di una centralina che riceva il segnale dall'acceleratore e impartisca i comandi a entrambe i motori, avrebbe aiutato in fase di calibrazione del sistema, ma avrebbe complicato notevolmente il progetto.



**Figura 4.16: installazione del potenziometro lineare sul pedale dell'acceleratore**

Il segnale di comando dell'inverter da noi utilizzato deve essere riferito alla negativo della batteria HV. Si è quindi realizzata una scheda per optoisolare il segnale, in modo da non dover portare una linea HV fino sul pedale dell'acceleratore (cosa vietata dal regolamento).

La console di programmazione dell'inverter ci consente di settare i valori di tensione corrispondenti rispettivamente allo 0% e al 100% dell'acceleratore. Questo ci permette, oltre ad impostare il range di uscita del circuito, di gestire l'utilizzo del motore elettrico in rapporto al termico. Per esempio impostando il valore di tensione corrispondente al 50% della corsa del potenziometro come valore corrispondente al 100% nell'inverter, si ottiene che il motore elettrico fornisca il massimo della potenza già a metà acceleratore.

Un'impostazione simile è stata utilizzata durante la competizione per permettere il cambio marcia sul motore termico senza ridurre la coppia fornita dall'elettrico. Questo ha permesso di non perdere trazione in questa fase e di portare più velocemente il motore termico ad un numero di giri che consente un rendimento migliore, con conseguente riduzione dei consumi.

Per la competizione di Formula Hybrid USA 2010 si è deciso di poter modificare in corsa il rapporto di coppia fornito dalle due powertrain. Si è quindi aggiunto un potenziometro rotativo sul volante in grado di ridurre di tensione il comando dell'inverter. In questo modo si è potuto limitare la potenza del motore elettrico secondo le necessità. Si ricorda infatti che la competizione attribuisce molta importanza ai consumi, di conseguenza utilizzare il sistema sempre a massima potenza potrebbe rivelarsi un strategia non vincente.

# **Capitolo 5**

## **5. Il progetto P4/5 Competizione**

## 5.1 Breve introduzione e risultati agonistici

La P4/5 Competizione è una vettura progettata e costruita per correre gare di durata presso il circuito tedesco del Nurburgring. Nata per volontà di James Glickenhaus famoso collezionista americano di automobili da competizione, la vettura è stata completamente realizzata a Torino presso l'azienda LM Gianetti. La P4/5 Competizione ha preso parte a due stagioni di gare, 2011 e 2012. Tra il primo e il secondo anno di attività è stata profondamente rivista in molti dei suoi componenti e ha assunto la denominazione di P4/5 Competizione Modificata.



**Figura 5.1: P4/5 Competizione Modificata sulla Nordschleife durante la 24h del Nurburgring**

La vettura è nata con il preciso scopo di gareggiare alla 24 ore del Nurburgring e vi ha partecipato due volte raggiungendo rispettivamente il 39° posto assoluto e 2° posto di categoria nel 2011 e il 12° posto assoluto con vittoria di categoria nel 2012. Quest'ultimo piazzamento è a oggi il miglior risultato mai raggiunto da una vettura ibrida in una 24 ore omologata dalla FIA (Federazione Internazionale dell'Automobile). Poiché la gara tedesca è tra le poche ad accettare iscrizioni di veicoli gran turismo ibride altre grandi case hanno preso parte alla competizione, il

tentativo più eclatante è stato fatto da Porsche e Williams nel 2011 con un 27° piazzamento finale. Le altre grandi gare di durata che accettano la partecipazione di vetture ibride come, ad esempio la 24 ore di Le Mans, riservano questa possibilità ai soli prototipi.

La P4/5 Competizione ha riscosso nei suoi due anni di attività un notevole successo di pubblico arrivando ad attrarre folle di supporter sia durante le partecipazioni alla 24 ore del Nurburgring sia durante le gare preparatorie presso il circuito tedesco. Parte di questo successo è sicuramente da attribuirsi all'immagine romantica di un piccolo team privato che si è posto l'obiettivo di concorrere contro le grandi squadre ufficiali delle case tedesche. Altro ingrediente di successo è da ricercare nel forte contenuto divulgativo del progetto che attraverso riviste specializzate e social network è riuscito a condividere i contenuti tecnici della vettura e a creare una vera e propria comunità di appassionati che hanno seguito passo dopo passo la nascita e l'evoluzione della P4/5 Competizione Modificata.

Ultimo importante fattore da considerare è il coinvolgimento di diversi professionisti del volante, primi fra tutti Fabrizio Giovanardi e Nicola Larini, in grado di donare al progetto credibilità agonistica e di contribuire in maniera sostanziale allo sviluppo della vettura grazie ad un bagaglio di esperienza sviluppato in molti anni di attività nel campo delle competizioni.

Il coinvolgimento dell'autore di questo documento all'interno del progetto P4/5 è iniziato al secondo anno di attività, precisamente all'interno dell'evoluzione che ha portato alla nascita della P4/5 Competizione Modificata, che verrà descritta nel prossimo paragrafo. L'autore si è occupato principalmente della parte elettronica e di controllo, ovvero del progetto dello schema elettrico del sistema e del suo interfacciamento con i dispositivi presenti in vettura, del circuito interno al pacco batterie e del controllo implementato sulla centralina, con l'evoluzione che ha portato al controllo automatico delle attuazioni.

## 5.2 La vettura

Al fine di comprendere a fondo la natura del lavoro di ricerca e sviluppo svolto sulla vettura, si è ritenuto necessario introdurre brevemente il contesto in cui è stata svolta l'attività. Utile e funzionale a questo scopo è la breve descrizione tecnica della vettura presentata all'interno dei prossimi paragrafi.

### 5.2.1 Versione 2011

La P4/5 Competizione nasce su base meccanica Ferrari F430 GT2. Della vettura di Maranello mantiene il pianale completo di attacchi sospensione, il sistema sospensione e il gruppo motopropulsore. In maniera molto grossolana è possibile

attribuire alla vettura di partenza tutti i componenti racchiusi all'interno del contorno arancione rappresentato in Figura 5.2.

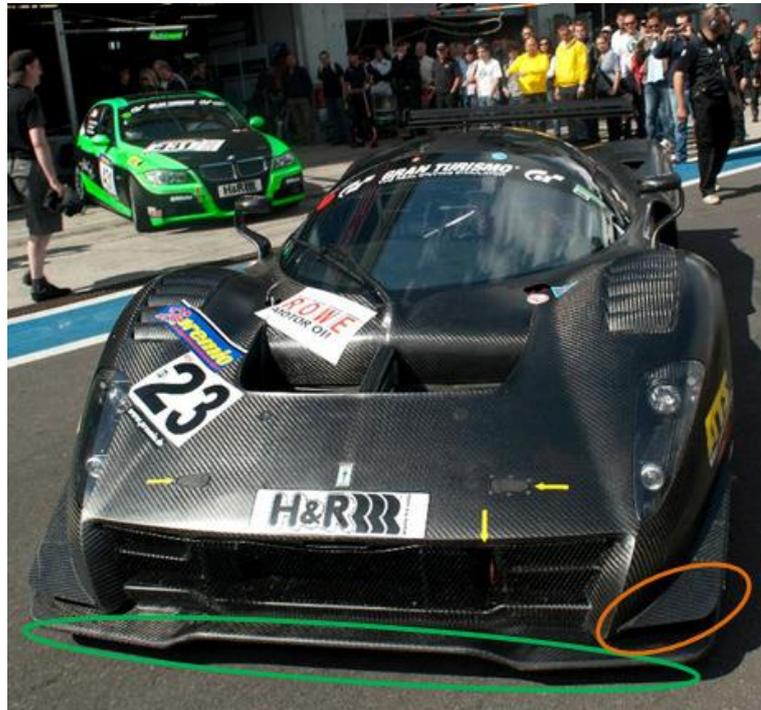


**Figura 5.2: parte del telaio della Ferrari F430 mantenuta sulla P4/5 Competizione**

Il telaio è stato integrato con una nuova cellula centrale costituita da componenti in carbonio strutturale unito ad un roll-bar in tubi di acciaio realizzato secondo gli standard omologativi FIA.

La vettura viene dotata di un pacchetto aerodinamico molto completo e decisamente orientato allo sviluppo di carichi consistenti. In Figura 5.3 è possibile osservare le generose dimensioni delle appendici aerodinamiche anteriori, in particolari il front splitter (cerchiato in verde) e i dive planes (cerchiati in arancione).

## 5 - Il progetto P4/5 Competizione



**Figura 5.3: splitter e dive planes della P4/5 Competizione**

La Figura 5.4 mostra invece le appendici posteriori, da questa angolazione è possibile osservare le importanti dimensioni dell'ala biplana posteriore e l'estensione delle sezioni di uscita del diffusore posteriore (cerchiato in arancione) che copre praticamente l'intera larghezza disponibile tra le ruote posteriori.



**Figura 5.4: diffusore posteriore della P4/5 Competizione**

Come anticipato il gruppo sospensioni è interamente ricavato dalla vettura di partenza ed è caratterizzato da una struttura a quadrilatero deformabile all'avantreno e al retrotreno. Elementi distintivi in questo ambito sono gli ammortizzatori e i cerchi in magnesio sviluppati su misura per la P4/5 Competizione.

Il gruppo motopropulsore utilizza come punto di partenza il V8 4000cc della F430 in versione GT2, con cambio sequenziale Hewland a sei rapporti. A causa delle restrizioni sui condotti di aspirazione imposte dal regolamento sportivo, il motore è stato ampiamente rivisto nella fluidodinamica per ottimizzare le curve di coppia e potenza.

I principali dati tecnici della vettura sono riassunti all'interno della Tabella 5.1.

<b>Caratteristica</b>	<b>Misura</b>
<b>Lunghezza</b>	4676 mm
<b>Larghezza</b>	1995 mm
<b>Altezza</b>	1190 mm
<b>Passo</b>	2600 mm
<b>Peso</b>	1200 kg
<b>Pneumatici anteriori</b>	325/650 R18
<b>Pneumatici posteriori</b>	325/705 R18
<b>Dischi freno anteriori</b>	380 x 35mm Steel
<b>Dischi freno posteriori</b>	330 x 32 mm Steel
<b>Pinze</b>	Brembo Racing
<b>Sospensioni</b>	Triangoli sovrapposti anteriori e posteriori
<b>Ammortizzatori</b>	Extrimetech regolabili, 3 vie
<b>Cambio</b>	Hewland sequenziale 6 rapporti
<b>Differenziale</b>	Meccanico, autobloccante, raffreddato ad olio
<b>Motore</b>	Ferrari 430 GT2 - 8 V 90°
<b>Cilindrata</b>	4000 cm <sup>3</sup>
<b>Potenza Massima</b>	470 HP
<b>Coppia Massima</b>	480 Nm
<b>Carrozzeria</b>	Fibra di carbonio

**Tabella 5.1: principali dati tecnici della P4/5 Competizione**

## 5.2.2 Versione 2012, “Modificata”.

Lo sviluppo della versione 2012 è stato guidato da due fattori fondamentali:

1. Analisi dati stagioni 2011: analisi acquisizione dati e dati cronometrici rilevati durante le gare, analisi dei test report del team 2011 e raccolta dei feed-back dei piloti;
2. Impostazione della modellistica di riferimento: attività utile a valutare l’influenza delle modifiche tecniche sulle prestazioni della vettura e a fissare gli obiettivi progettuali.

Le analisi cronometriche unite alle impressioni dei piloti hanno sottolineato una sostanziale carenza di velocità di punta compensata da ottime prestazioni di dinamica laterale. A titolo esemplificativo si riporta in Figura 5.5 il diagramma G-G delle accelerazioni laterali e longitudinali della vettura che mostra una disponibilità di grip longitudinale da parte degli pneumatici che la vettura non sfrutta.

L’andamento che ci si aspetterebbe è rappresentato in maniera qualitativa dalla curva rossa la cui forma è indicata da Claude Roelle nelle lezioni dei suoi seminari di dinamica del veicolo.

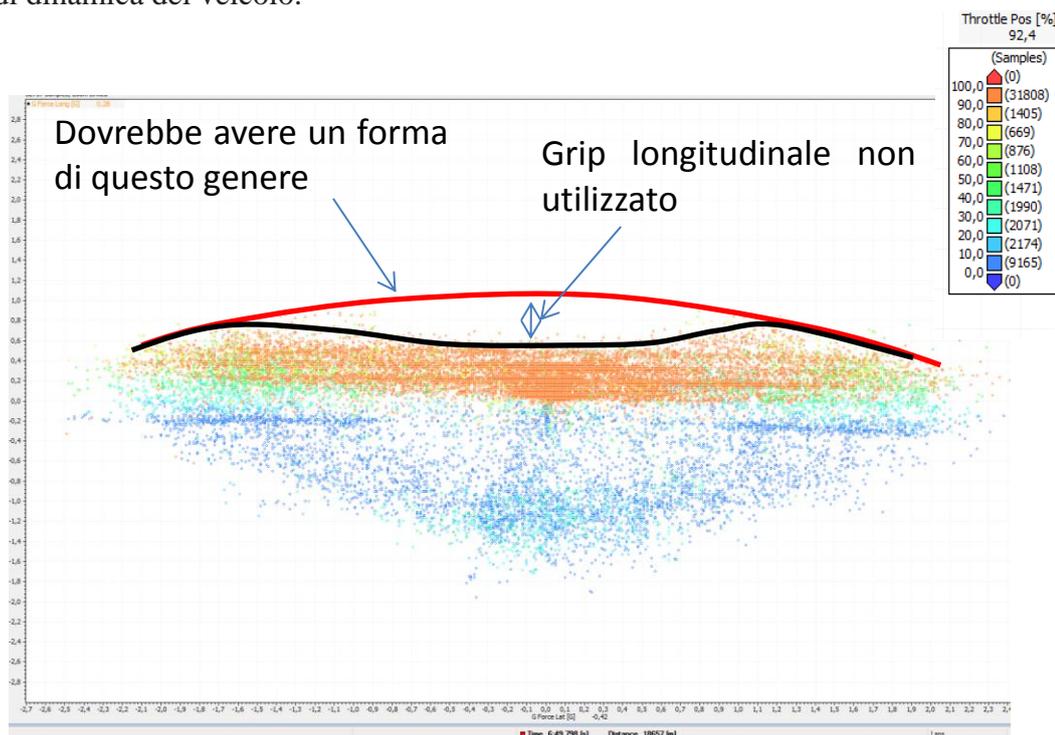


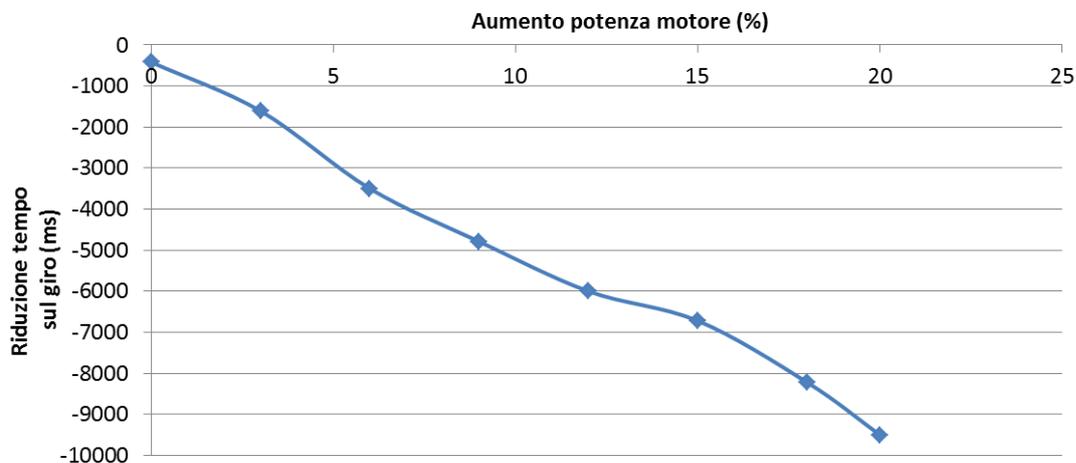
Figura 5.5: diagramma G-G delle accelerazioni laterali e longitudinali della vettura

L'analisi dei dati ha portato alla decisione di lavorare sui seguenti aspetti della vettura:

1. Sistema di aspirazione aria con air scoop sul tetto della vettura e sviluppo motore per un aumento di potenza
2. Nuovo pacchetto aerodinamico ad efficienza ottimizzata, con riduzione della resistenza all'avanzamento anche a discapito del valore di *downforce*
3. Sistema KERS per un aumento di potenza motore
4. Progetto del nuovo sistema sospensioni
5. Sostituzione del tipo di pneumatici e degli ammortizzatori

Il progetto del sistema KERS è stato condotto attraverso l'utilizzo di un modello di dinamica longitudinale della vettura, approfonditamente descritto all'interno della tesi del collega Luca Ciancetti. Poiché lo strumento si è reso disponibile fin dalle prime fasi di impostazione progettuale delle soluzioni per la stagione 2012, esso è stato utilizzato per fissare degli obiettivi prestazionali anche per il motore termico e per il pacchetto aerodinamico.

I risultati ottenuti per il motore termico sono riportati all'interno del grafico di Figura 5.6.



**Figura 5.6: riduzione del tempo sul giro in funzione dell'aumento di potenza del motore**

E' possibile notare come l'aumento della potenza comporti una riduzione di tempo sul giro quasi lineare. Le variazioni delle pendenze sono probabilmente da imputare alle non ottimali scalature del cambio di velocità che possono variare solo a passi discreti corrispondenti ai rapporti disponibili presso il produttore inglese. La simulazione realizzata ha al suo interno almeno due imprecisioni concettuali:

1. Il modello non tiene conto dell'allungamento degli spazi di frenata legati all'aumento della velocità. Maggiori coppie e potenze consentono di raggiungere velocità superiori a parità di spazio percorso e la vettura che non può aumentare le prestazioni in frenatura deve per forza aumentare gli spazi di frenata.
2. La Figura 5.7 riporta il grafico di aderenza degli pneumatici di una vettura. La forma del grafico è da ritenersi puramente qualitativa in quanto non legata ai pneumatici specifici della P4/5 Competizione. L'ellisse stabilisce la regola secondo la quale un pneumatico scambia forze con il terreno. Nello specifico è possibile evincere che nel momento in cui si richiede allo pneumatico di scambiare forze consistenti in senso longitudinale si ha un drastico calo delle forze che possono essere scambiate in senso longitudinale. Lo stile di guida di un pilota professionista è orientato all'utilizzo dell'intera ellisse. Per questo motivo un incremento di coppia comporterebbe necessariamente una maggiore parzializzazione della richiesta di coppia e un conseguente ritardo nell'applicazione della stessa che il modello non è in grado di replicare.

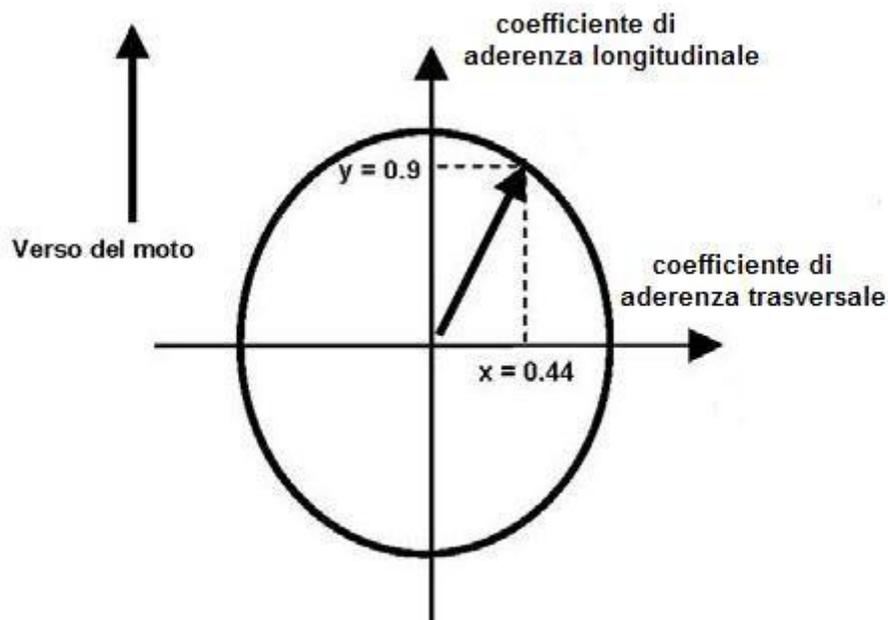
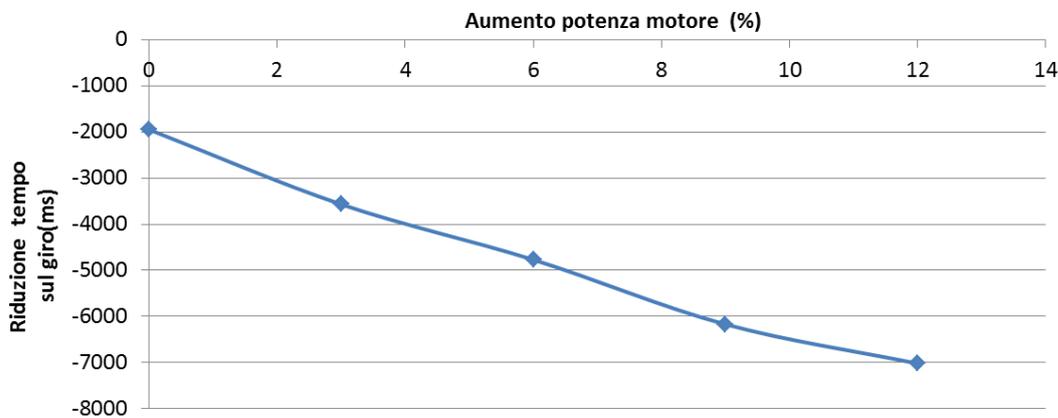


Figura 5.7: generico grafico di aderenza degli pneumatici di una vettura

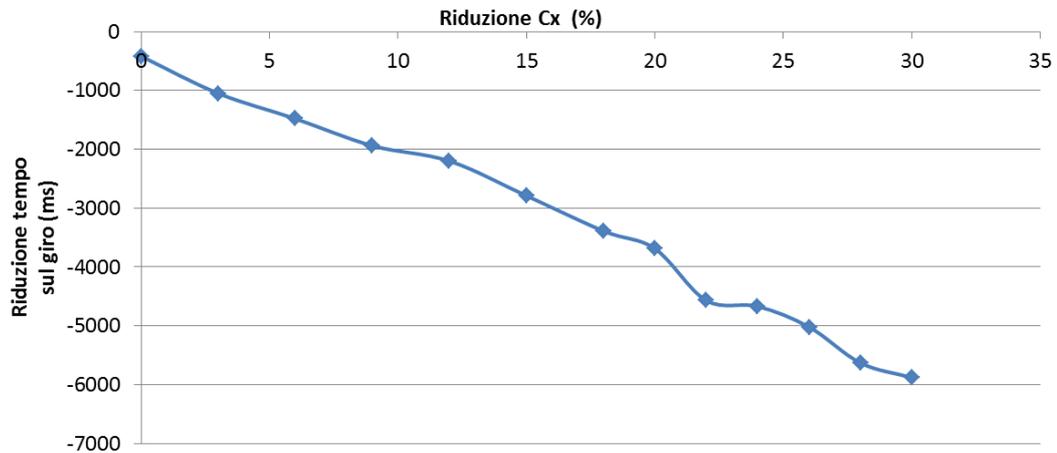
Al fine di considerare lo spettro di parametri più ampio possibile, è stato studiato anche l'effetto della forma della curva di coppia del motore termico. In particolare, poiché la curva motore della P4/5 Competizione 2011 era caratterizzata da un picco di potenza massima molto puntuale, si è valutato l'effetto sul tempo sul giro della variazione di potenza massima, mantenendo la forma della curva di coppia simile a quella del motore Ferrari originale. Il risultato, rappresentato all'interno della Figura 5.8, dimostra come, una riduzione di circa 5 secondi possa essere ottenuta con un aumento di potenza pari al 6% che, nel caso precedente, si traduceva in un risparmio di soli 3,5 secondi.



**Figura 5.8: riduzione del tempo sul giro in funzione dell'aumento di potenza massima del motore**

Lo studio degli effetti della riduzione di  $C_x$  ha invece portato ai risultati espressi dal grafico di Figura 5.9. Anche in questo caso l'andamento è da ritenersi puramente indicativo in quanto non vi è alcuna garanzia che la riduzione di  $C_x$  sia ricavata soltanto attraverso l'aumento dell'efficienza aerodinamica che garantirebbe un valore di  $C_z$  invariato. Nella realtà, la variazione di  $C_z$  è da considerarsi assolutamente plausibile. Questo aspetto rende i risultati di queste simulazioni poco affidabili in quanto la mancanza di un modello di dinamica laterale non consente di adeguare le velocità di percorrenza delle curve ai nuovi carichi verticali.

## 5 - Il progetto P4/5 Competizione



**Figura 5.9:** riduzione del tempo sul giro in funzione della riduzione di Cx

Nonostante tutti i limiti sottolineati, le simulazioni eseguite hanno contribuito a fissare degli obiettivi per i sottosistemi analizzati. Gli obiettivi sono riportati all'interno della Tabella 5.2.

Sottosistema	Obiettivo	Risultato atteso
<b>Potenza Motore</b>	+5-8 % (intervallo funzione della forma della curva di coppia)	-4,5s
<b>Aerodinamica</b>	- 10%	-2s

**Tabella 5.2:** obiettivi di progetto per la riduzione del tempo sul giro

Non è stato possibile rilevare un effettivo riscontro cronometrico dei valori appena citati in quanto la vettura è stata provata una volta ultimate tutte le modifiche ivi comprese modifiche alle sospensioni e la sostituzione di pneumatici e ammortizzatori. Un approccio più rigoroso è stato possibile in relazione all'utilizzo del sistema KERS che verrà trattato all'interno del capitolo successivo.

## 5.3 La 24 ore del Nurburgring

### 5.3.1 La gara e il tracciato

Il Nürburgring è un complesso di circuiti per competizioni automobilistiche e motociclistiche che si snoda intorno al castello di Nürburg in Germania.

Costruita nel 1927, la pista si componeva in origine di due circuiti: la Nordschleife (anello nord), da 22,834 km e la Südschleife (anello sud), da 7,747 km che venivano anche utilizzate in configurazione unica chiamata con il nome di Gesamtstrecke la cui lunghezza raggiungeva 28,265 km. La configurazione odierna è formata dall'unione del tracciato realizzato per ospitare le gare di Formula 1 chiamato GP-Strecke (5,1 km di cui in alcune occasioni ne vengono utilizzati solo 4,2 km) e di una parte dell'originale Nordschleife (20,8 km) per un totale compreso tra 25 e 25,9 km. La Figura 5.10 riporta la configurazione odierna della pista.

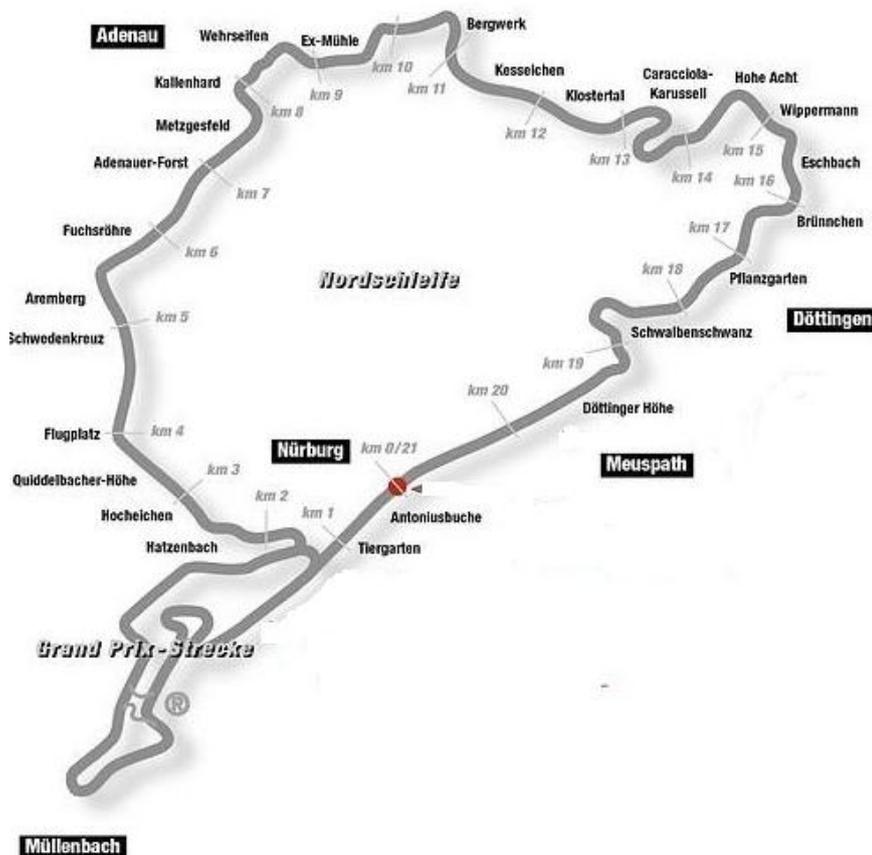


Figura 5.10: configurazione del tracciato del Nurburgring durante la 24 ore

Il circuito è oggi considerato il tracciato più selettivo a livello mondiale. Oltre alla lunghezza fuori dalla norma, il Nurburgring presenta tratti di curve molto veloci e lunghi rettilinei, carreggiata stretta e curve dal disegno e dalle asperità molto simili a normali tracciati stradali. L'insieme di queste caratteristiche rende molto complicata la ricerca della vettura più prestazionale sul circuito. Infatti gli alti carichi aerodinamici necessari per percorrere i tratti ad alta velocità si scontrano con la necessità di velocità di punta sui lunghi rettilinei. L'altezza da terra e le ridotte rigidità a terra necessarie ad assorbire le asperità del tracciato si scontrano con la necessità di ottimizzare il comportamento aerodinamico della vettura.

La 24 ore del Nurburgring è una corsa endurance per auto Turismo e Gran Turismo.

Voluta dall'ADAC (Allgemeiner Deutscher Automobil-Club), nasce come alternativa a basso costo della prestigiosa 1000 Km del Nurburgring (gara attualmente valevole per il Campionato Le Mans Series, in passato inserita nel Calendario prima del Campionato Mondiale Marche e quindi del Campionato Mondiale Sport-Prototipi).

Si corre quasi ininterrottamente dal 1970 con soli due stop nel 1975 e nel 1976.

Alla 24h partecipano una folta schiera di piloti amatoriali (spesso con auto strettamente derivate dalla produzione), insieme a professionisti, normalmente schierati a bordo delle vetture più prestazionali che si contendono le prime quaranta posizioni. Partecipano principalmente squadre tedesche, ma è sempre meno raro vedere anche teams provenienti da tutta Europa (Italia compresa) e ultimamente dal mondo intero.

Sono ammesse di norma 230 auto (nel 2008 erano 270), ma se ne possono qualificare per la corsa 220. Il fattore traffico influenza fortemente l'andamento della gara delle vetture più prestazionali che si trovano continuamente nella condizione di superare i concorrenti più lenti. Questo aspetto si è rivelato importantissimo nello sviluppo del sistema KERS che ha consentito di diminuire sensibilmente gli spazi necessari per realizzare i sorpassi.

Ogni equipaggio può essere formato da un minimo di 2 ad un massimo di 4 piloti. Un pilota può anche far parte di due diversi equipaggi, ma è comunque obbligato a rispettare un periodo di riposo minimo di due ore tra un turno di guida e quello successivo e un periodo massimo di guida per ogni turno di due ore e mezza (compresi Pit Stop e rifornimenti).

La gara è uno degli avvenimenti sportivi più importanti in Germania, ogni anno conta all'incirca 25000 visitatori e viene trasmessa in diretta televisiva in tutta Europa.

### 5.3.2 Il regolamento tecnico

La 24 ore del Nurburgring ha un regolamento tecnico molto stringente che prevede omologazioni molto rigorose per tutte le vetture che prendono parte alla competizione. Rappresentano un'eccezione le vetture omologate in categoria E1-Xp, la categoria a cui appartiene la P4/5 Competizione.

La classe E1-Xp viene definita dal regolamento come un gruppo separato con un differente regolamento tecnico, indipendente rispetto a tutti gli altri gruppi che prendono parte alla competizione. Ogni vettura E1-Xp viene omologata singolarmente, ma esistono delle regole generali che valgono per tutte come, ad esempio, la libertà nell'utilizzo di controlli elettronici (ABS; traction control e ESP) e nella scelta di cerchi e pneumatici e il divieto di utilizzare cambi e farfalle motore attuate elettronicamente.

L'aspetto più interessante dal punto di vista ingegneristico riguarda la divisione in classi di peso/capacità, serbatoi/misura della strozzatura di aspirazione. Questo criterio è riportato all'interno delle tabelle a seguire.

La Tabella 5.3 riporta la dipendenza tra peso vettura e la capacità del serbatoio.

<b>Peso [kg]</b>	1200	1250	1300	1350	1400
<b>Capacità [l]</b>	90	100	110	120	120

**Tabella 5.3: limiti di capacità del serbatoio in funzione del peso vettura**

All'interno della Tabella 5.4 è invece riportata la regola che lega la dimensione delle restrizioni all'aspirazione al peso della vettura e alla cilindrata del motore. Esistono due versioni di questa tabella, una dedicata alle vetture con singola restrizione e una per vetture a doppia restrizione. Poiché la P4/5 Competizione utilizza un sistema a doppia restrizione, una per bancata, si riporta esclusivamente la tabella corrispondente a questa configurazione.

## 5 - Il progetto P4/5 Competizione

	Peso minimo [kg]			
	1200	1250	1300	1350
Cilindrata [cm <sup>3</sup> ]	Misure in mm per il diametro di ognuna delle due restrizioni			
fino a 3250	29	29,9	30,9	32
fino a 3500	28,8	29,7	30,7	31,8
fino a 4000	28,6	29,5	30,5	31,6
fino a 4500	28,4	29,3	30,3	31,4
fino a 5000	28,3	29,2	30,2	31,3
fino a 5500	28,1	29	30	31,1
fino a 6000	28	28,9	29,9	31
fino a 6250	28	28,8	29,8	30,9

**Tabella 5.4: dimensione delle restrizioni all'aspirazione in funzione del peso vettura e della cilindrata del motore**

L'adozione di una powertrain ibrida comporta delle ulteriori limitazioni, in particolare per la categoria Mild Hybrid, riservata a sistemi con potenze di picco limitate a 50 kW come quello montato a bordo della P4/5 Competizione Modificata, il regolamento prevede una riduzione di 0,1mm di diametro per ognuna delle restrizioni. Per sistemi più potenti, categoria Hybrid, l'organizzatore si riserva la possibilità di decidere la misura della restrizione in base alle prestazioni raggiunte.

La scelta della classe di peso è stata oggetto di un approfondito studio che è partito da un'analisi di sensibilità condotta attraverso il modello di dinamica longitudinale. I risultati hanno evidenziato che l'aggravio di peso, entro certi limiti, può essere ampiamente compensato dall'aumento di potenza del propulsore dovuto all'utilizzo di una strozzatura di diametro superiore. Una serie di test in circuito ha confermato i risultati evidenziando prestazioni costanti anche in termini di frenata, handling e velocità di percorrenza. Alla luce di questi risultati la P4/5 Competizione Modificata è stata zavorrata fino a raggiungere la classe corrispondente a 1350 kg.

### 5.3.3 Sicurezza e omologazione del sistema KERS

Come osservato all'interno del paragrafo precedente, all'interno del regolamento tecnico manca una normativa riguardo l'utilizzo dei sistemi ad alta tensione. Per questo motivo, ogni vettura che voglia utilizzare un sistema di questo genere viene omologata singolarmente da una commissione ad hoc. Questo iter è stato seguito anche dalla P4/5. In mancanza di un vero regolamento di sicurezza il

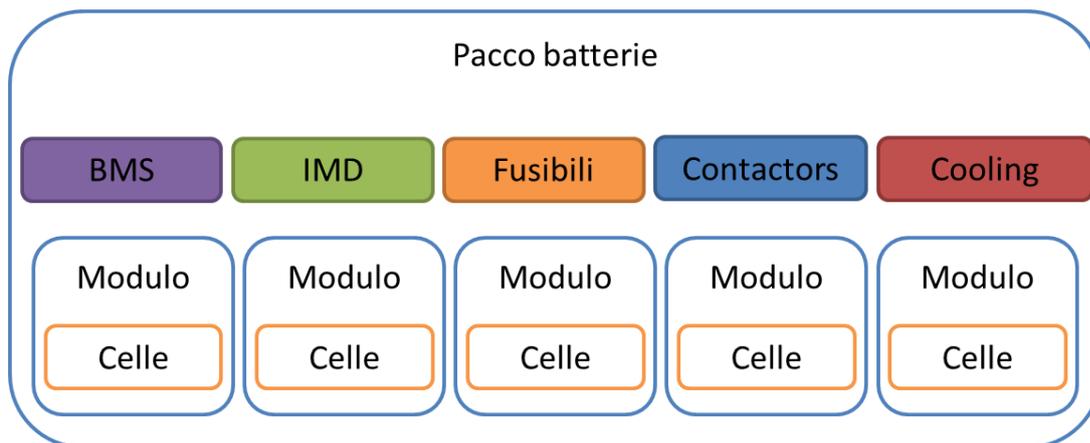
team progettuale ha deciso di applicare i più elevati standard di sicurezza presenti nel panorama automotive.

Il progetto dei sistemi di sicurezza può essere diviso in 3 fasi distinte:

1. Scelta e dimensionamento di tutti i componenti necessari a garantire la sicurezza del sistema
2. Analisi dei guasti possibili e valutazione delle risposte del sistema
3. Procedure di emergenza e sequenza comandi per abilitazione del sistema

La scelta e il dimensionamento dei dispositivi di sicurezza si è principalmente concentrata nel progetto del pacco batterie. La Figura 5.11 riporta uno schema funzionale del pacco installato a bordo della P4/5 Competizione.

Il pacco batterie è dotato di una sua autonomia funzionale e delle interfacce necessarie a realizzare la sua funzione nel sistema autoveicolo. Le interfacce sono meccaniche, ancoraggi e sistemi di ventilazione/raffreddamento, elettronica per la comunicazione con la centralina di controllo e di potenza per la connessione del DC-Bus, la linea ad alta tensione che porta all'Elettronica di Potenza (Inverter).



**Figura 5.11: schema funzionale del pacco batterie**

Oltre a celle e moduli precedentemente descritti all'interno dello schema si possono riconoscere i seguenti componenti:

- *Contactors*: sono interruttori in grado di isolare elettricamente il pacco dal resto della vettura. Vengono pilotati dal BMS, dall' IMD e dalla centralina di controllo del sistema.
- *BMS (Battery Management System)*: controlla e bilancia le celle al fine di massimizzarne le prestazioni e assicurarne la sicurezza di

## 5 - Il progetto P4/5 Competizione

funzionamento. Il sistema monitora tutte le celle attraverso sensori posizionati sui diversi moduli, in grado di misurare tensioni e temperature. Il BMS si occupa della misura delle correnti in ingresso e uscita dal pacco, di pilotare le aperture dei contactors in caso di problemi di sicurezza quali sovra correnti, sovra e sotto tensioni e sovra temperatura.

- **IMD (Insulation Monitor Device):** misura la resistenza che isola il sistema High Voltage dal resto del veicolo.
- **Fusibili:** Fusibili per proteggere il sistema da sovra correnti
- **Cooling:** assicura il raffreddamento delle celle, particolarmente critico in applicazioni ad alta potenza.

L'analisi dei guasti possibili e la valutazione delle risposte del sistema è riassunta all'interno della Tabella 5.5.

<b>Guasto</b>	<b>Azione</b>
<b>Sovra o sotto tensione, surriscaldamento o sovra corrente di una cella</b>	BMS apre i contactors, manda un messaggio CAN alla KCU che apre i contactors via PDM (per ridondanza)
<b>Isolamento tra impianto alta tensione e impianto bassa tensione inferiore a 100 k<math>\Omega</math></b>	PDM apre i contactors, manda un messaggio CAN alla KCU che apre i contactors via PDM (per ridondanza)
<b>Decelerazione superiore ai 15g o pressione di un interruttore di sicurezza</b>	PDM apre i contactors, manda un messaggio CAN alla KCU che apre i contactors via PDM (per ridondanza)
<b>Surriscaldamento dell'inverter o del motore</b>	Inverter limita la sua potenza, se persiste, la KCU controlla l'apertura dei contactors e l'inverter si spegne
<b>Rottura dei cavi di alta tensione</b>	KCU controlla la tensione del DC bus sul pacco batterie e sull'inverter. In caso di differenze apre i contactors via BMS e PDM

**Tabella 5.5: risposte del sistema ai possibili guasti**

La sequenza comandi è stata studiata al fine di evitare l'accidentale connessione del circuito ad alta tensione e facilitare il più possibile l'isolamento dello stesso in caso di emergenza. La Tabella 5.6 e la Figura 5.12 riportano schematicamente le logiche scelte per la procedura di accensione del sistema.

Comandi				Stati		
Main Switch	Ignition Switch	KERS Switch	Kill Switch	12V	Alta tensione	Led di sicurezza
X				X		
X	X			X		
X	X	X		X	X	X
X	X	X	X	X		

Tabella 5.6: stati del sistema attivi in funzione dei comandi plancia

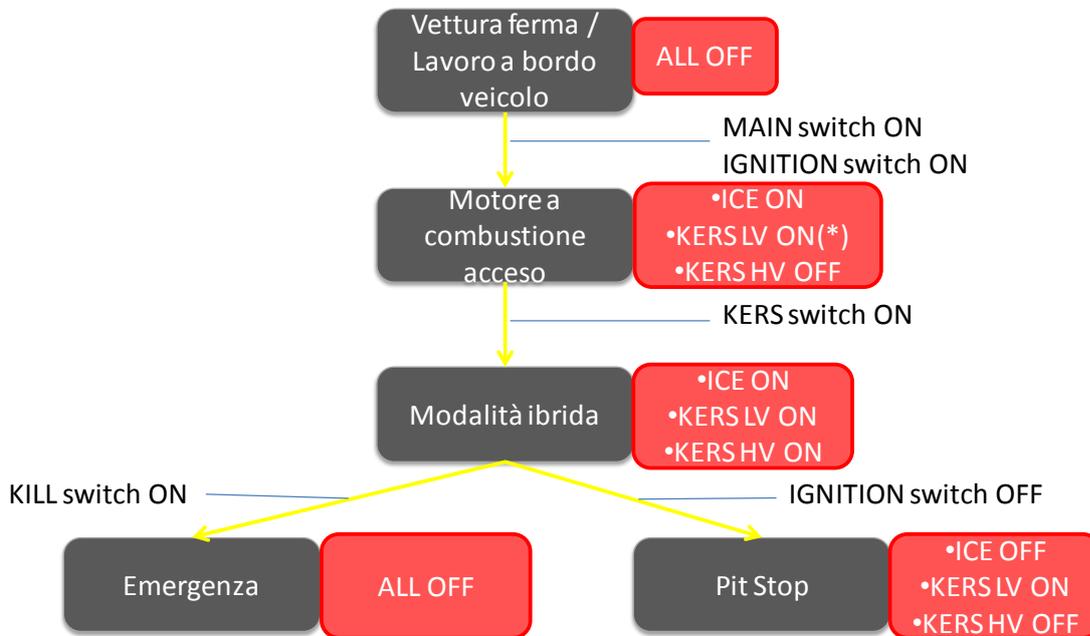


Figura 5.12: risposta del sistema ai comandi plancia

Al fine di garantire la massima sicurezza la vettura è stata equipaggiata con interruttori di sicurezza esterni (KILL switch) e un barra led in grado di segnalare la connessione della linea ad alta tensione.

# **Capitolo 6**

## **6. Powertrain P4/5 Competizione**

## 6.1 Descrizione

### 6.1.1 La struttura di partenza

Come già anticipato, la base meccanica della P4/5 Competizione è stata ricavata dalla Ferrari 430 Gt2. Questa vettura è equipaggiata con un motore V8 4000cc accoppiato ad un cambio sequenziale prodotto dalla Hewland, che incorpora al suo interno un differenziale autobloccante. La presenza della restrizione all'aspirazione ha reso necessario una profonda riprogettazione della fluidodinamica e della meccanica interna al propulsore. Lo sviluppo maggiore è stato realizzato tra le stagioni 2011 e 2012. Inoltre, al fine di migliorare la gestione del propulsore l'elettronica della vettura è stata completamente sostituita con un prodotto open fornito dall'australiana MoTec. Il risultato dell'operazione è evidenziato dalle curve di potenza riportate all'interno della Figura 6.1. In particolare in questa immagine è possibile notare il profondo lavoro di accordatura eseguito per riempire i vuoti della curva 2011 e l'effetto congiunto della nuova configurazione motore e della restrizione di diametro maggiore (aumento di potenza).

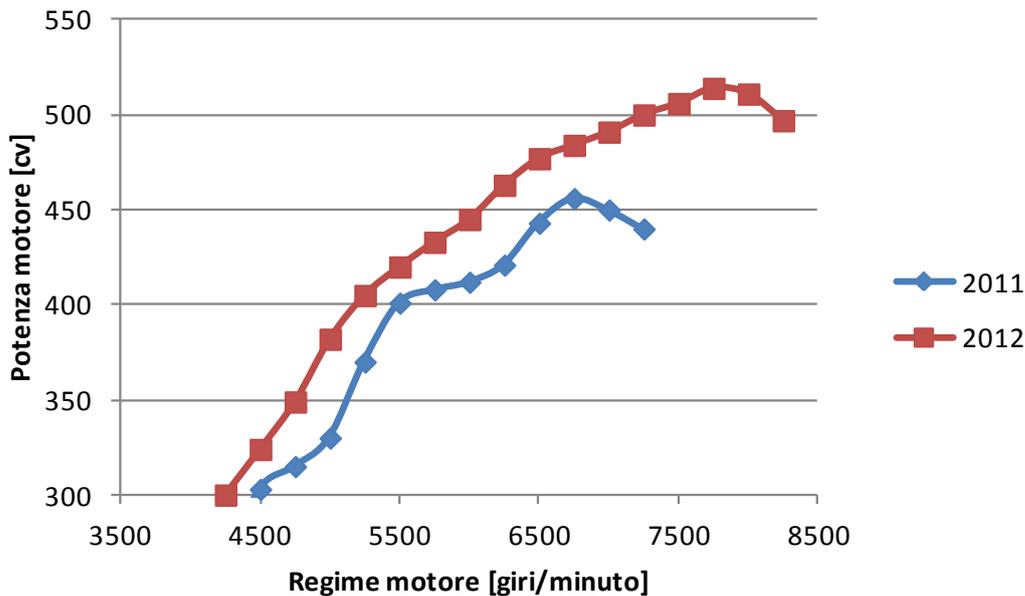


Figura 6.1: curve di potenza motore in configurazione 2011 e 2012

## 6.1.2 Il sistema KERS

Per descrivere a fondo il sistema è sicuramente utile elencare le caratteristiche dei componenti principali e descrivere il lay-out della soluzione finale.

La Figura 6.2 riporta uno schema funzionale del sistema KERS della P4/5 Competizione, dove è possibile notare le linee CAN dedicate alla comunicazione tra i diversi dispositivi, e, in arancione, il cablaggio di potenza. I componenti principali sono:

- KCU (KERS Control Unit): centralina MicroAutoBoxII, dispositivo real-time per la prototipazione di sistemi di controllo;
- Pacco batterie: unità di stoccaggio dell'energia da 3,3kWh, 420V massimi, realizzato con celle Litio-Polimero;
- Inverter: componente realizzato per il controllo di motori elettrici brushless fino a 120kW di picco;
- Motore elettrico: motore brushless a magneti permanenti da 60kW di picco.

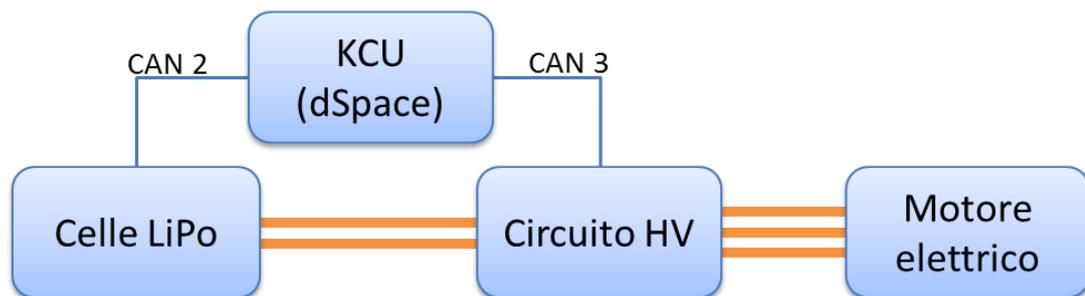


Figura 6.2: schema semplificato del sistema KERS

La Tabella 6.1 riporta per ognuno dei componenti, il produttore e i criteri di dimensionamento.

Componente	Produttore	Criterio di dimensionamento
Motore elettrico	Magneti Marelli	Regolamento: max 50kw
Inverter	Magneti Marelli	Regolamento: max 50kw
Pacco batterie	Inhouse	Risultati da modelli matematici
Centralina di controllo	DSpace	Competenze di programmazione

Tabella 6.1: componenti principali del sistema KERS

Verranno ora riportate le principali caratteristiche di tutti i componenti:

Motore elettrico:

Il motore elettrico utilizzato è un brushless a magneti permanenti. L'unità, raffreddata ad acqua, si contraddistingue per un ottimo rapporto peso/potenza.

Oltre che dalla potenza stabilita dal regolamento, la scelta del motore è stata guidata da precisi vincoli di accoppiamento con il motore termico. Non è possibile riportare le curve di coppia e potenza dell'unità a causa di precisi impegni presi nei confronti del produttore. È però possibile affermare che il motore presenta caratteristiche tali da permettere l'accoppiamento attraverso un rapporto uno a uno con un motore termico che abbia regimi di rotazione massimi intorno agli 8000 giri/minuto.

<b>Specifiche del motore elettrico</b>	
<b>Modello</b>	50 kW
<b>Tipo</b>	Magneti permanenti interni
<b>Potenza continua</b>	30 kw (7000-13000 rpm)
<b>Potenza di picco</b>	50 kw
<b>Coppia continua</b>	44 Nm
<b>Coppia di picco</b>	86 Nm
<b>Velocità massima</b>	16000 rpm
<b>Lunghezza</b>	224 mm
<b>Diametro</b>	203 mm
<b>Peso</b>	25 kg

**Tabella 6.2: parametri del motore elettrico**

Inverter:

L'utilizzo di un motore brushless a magneti permanenti comporta la necessità di un sistema trifase per la sua alimentazione e quindi di un inverter. Quest'ultimo comunica con la KCU, dalla quale riceve il comando di coppia, chiude gli anelli di controllo, gestisce eventuali errori inviando gli allarmi alla centralina e, aprendo le fasi, lascia il motore libero di girare in trascinato.

Seppur il motore sia in grado di erogare fino a 60kW tale potenza è stata limitata a 50kW per ragioni di regolamento.

## 6 - Powertrain P4/5 Competizione

<b>Principali caratteristiche dell'inverter</b>	
<b>Potenza continua</b>	70kW
<b>Potenza di picco</b>	120kW
<b>Tensione minima del DC bus</b>	200V DC
<b>Tensione massima del DC bus</b>	450V DC
<b>Efficienza tipica</b>	94%
<b>Bus di comunicazione</b>	4 canali CAN
<b>Ingressi</b>	Sensori di temperatura Resolver Input digitali
<b>Uscite</b>	Alimentazione dei sensori High/Low side drivers
<b>Dimensioni</b>	Circa 250x130x100
<b>Peso</b>	4kg

**Tabella 6.3: parametri principali dell'inverter**

### Pacco batterie:

Il cuore del sistema è rappresentato dal pacco batterie e dalle celle Li-Po che lo costituiscono. Collegate secondo una logica 100S2P, realizzano un unico sistema di accumulo da 3,3kWh e 420V massimi. Il pacco può essere considerato un sistema a se stante, dotato di tutte i componenti dedicati alla sicurezza. Al suo interno è infatti presente sia un sistema BMS (Battery Management System), sia un GFD (Ground Fault Detector) che garantisce l'isolamento delle linee ad alta tensione rispetto allo chassis della vettura. La Tabella 6.4 riporta le principali caratteristiche delle celle utilizzate.

Parametro	Valore da datasheet	Limiti e valori di utilizzo del sistema
Produttore	Kokam Co. Ltd	-
Tecnologia	Li Po	-
Modello	SLPB 9543140H5	-
Tensione Min/Nom/Max	2,7 V - 3,7 V - 4,2 V	3 V - 4,2 V
Capacità nominale	4 Ah	-
Massima corrente di scarica	120 A	80 A (corrente di picco)
Range di temperatura di utilizzo in carica	0 - 45°C	5 - 45°C
Range di temperatura di utilizzo in scarica	-20 - 55°C	0 - 45°C

Tabella 6.4: specifiche delle celle usate nel pacco batterie

Il pacco è fisicamente diviso in due macro aree distinte: la prima, denominata “circuitto HV”, ospita BMS, GFD, i *contactors* e il circuito di *precharge*, l'altra zona è dedicata ai sei moduli batteria. L'intero sistema è racchiuso all'interno di un contenitore di carbonio realizzato secondo la normativa FIA dedicata agli involucri per serbatoi benzina e vincolato alla vettura attraverso la stessa tipologia di attacchi utilizzati per il vincolo delle cinture di sicurezza.

#### Centralina di controllo:

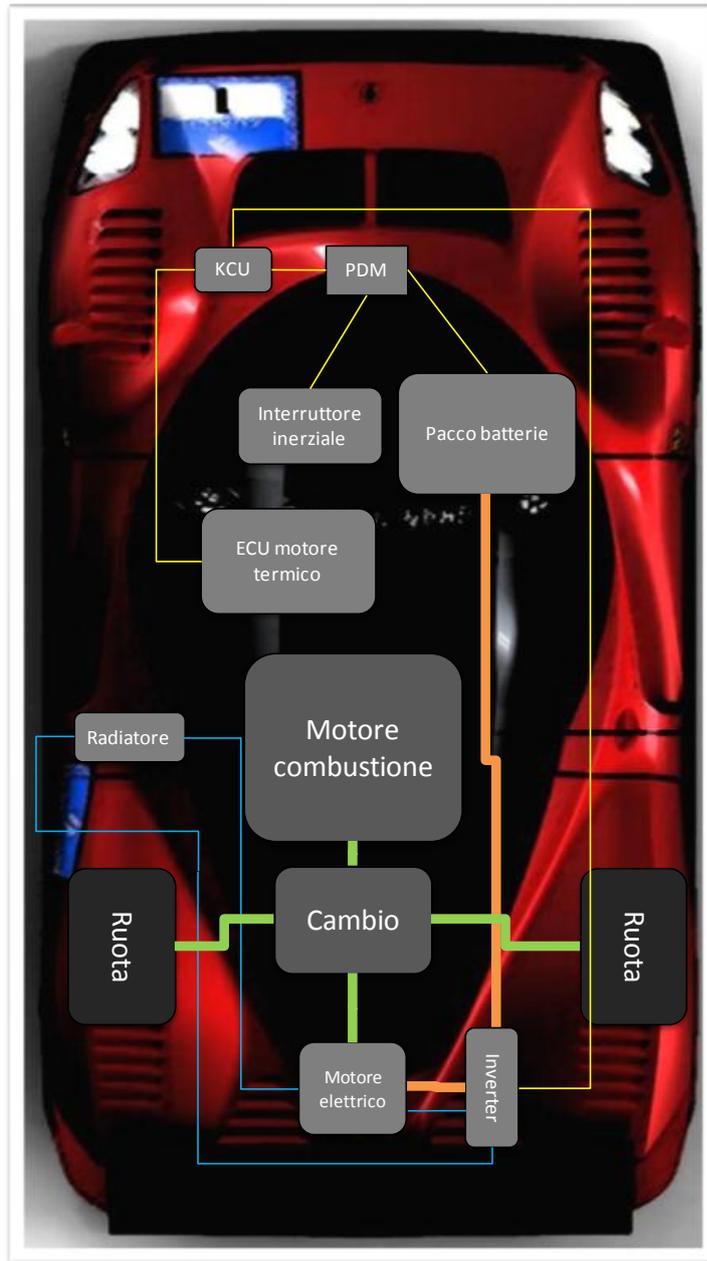
La centralina di controllo utilizzata per il sistema KERS, denominata KCU, è una tipica centralina di sviluppo utilizzata nel settore automotive. Le principali caratteristiche hardware sono riportate all'interno della Tabella 6.5. Essa è in grado di gestire il sistema sulla base delle informazioni reperite dalla rete veicolo con la quale si interfaccia attraverso la linea CAN. Attraverso un software sviluppato in ambiente Matlab-Simulink, la KCU monitora tutti i parametri del sistema, realizza il controllo ed invia la richiesta di coppia all'inverter.

## 6 - Powertrain P4/5 Competizione

<b>Specifiche della centralina di controllo del KERS</b>	
<b>Processore</b>	IBM PPC 750GL, 900 MHz
<b>Memoria</b>	16 MB memoria principale 16 MB memoria flash non volatile 6 MB per la comunicazione con PC/Notebook
<b>Interfacce</b>	Ethernet 10/100 Mbits USB 2.0 per acquisizione dati su memoria esterna 4 canali CAN RS232 e LIN
<b>Ingressi analogici</b>	24 canali 12bit 0-5V
<b>I/O digitali</b>	16 input 10 output (5mA) 16 porte selezionabili come ingresso o uscita 16 canali TPU fino a 16bit di risoluzione 4 input per frequenza o PWM 4 uscite PWM, da 2,5Hz a 100kHz, duty cycle 0-100%
<b>Condizionamento dei segnali</b>	Condizionamento per segnali standard automotive
<b>Conessioni</b>	Connettori ZIF per ingressi uscite e alimentazioni LEMO per le interfacce
<b>Dimensioni</b>	200 x 225 x 50 mm
<b>Temperature</b>	da -40 a +85°C
<b>Alimentazione</b>	da 6 a 40V (protezione per overvoltage)
<b>Consumi</b>	Max. 25W

**Tabella 6.5: specifiche della centralina di controllo del KERS**

Il lay-out generale del sistema è riportato all'interno della figura Figura 6.3.



**Figura 6.3: lay-out della powertrain del P4/5 Competizione Modificata**

In verde sono rappresentate le connessioni meccaniche che rendono possibili i flussi di coppia del sistema ibrido parallelo. In arancione è rappresentato il cablaggio ad alta tensione, mentre in giallo è possibile osservare il cablaggio di segnale. Le connessioni in blu rappresentano il circuito di raffreddamento del

sistema ibrido. Il posizionamento dei blocchi rappresenta in maniera puramente qualitativa l'effettiva posizione dei componenti a bordo della vettura. Rispetto ai componenti precedentemente descritti all'interno di questa immagine è possibile notare:

- il PDM che gestisce l'alimentazione a 12V dei diversi componenti del pacco batterie (ventole, *contactors*, BMS) e che viene comandata dalla KCU;
- l'interruttore inerziale che fa aprire i *contactors* in caso di forti decelerazioni o ribaltamento;
- la ECU che si occupa della gestione del motore termico e che rende disponibili alla KCU i dati necessari per il controllo del sistema KERS.

### 6.1.3 La comunicazione CAN

Lo scambio di informazioni tra i vari componenti del sistema avviene principalmente utilizzando il protocollo CAN.

Prima dell'installazione del KERS, in vettura erano presenti due linee CAN. Il datalogger si occupava di fare da bridge tra le due linee, oltre che di acquisire i dati e inviarli in telemetria.

Come si può vedere in Figura 6.4 tale struttura è stata mantenuta e sono state aggiunte due linee per la gestione del KERS. La KCU è collegata a tutte e 4 le linee, ma comunica solo con inverter, pacco batterie, PDM15 (Power Distribution Module) e datalogger. Può inoltre leggere le comunicazioni tra gli altri componenti per acquisire altri dati, come per esempio il segnale dei giri motore inviati dalla centralina motore al datalogger.

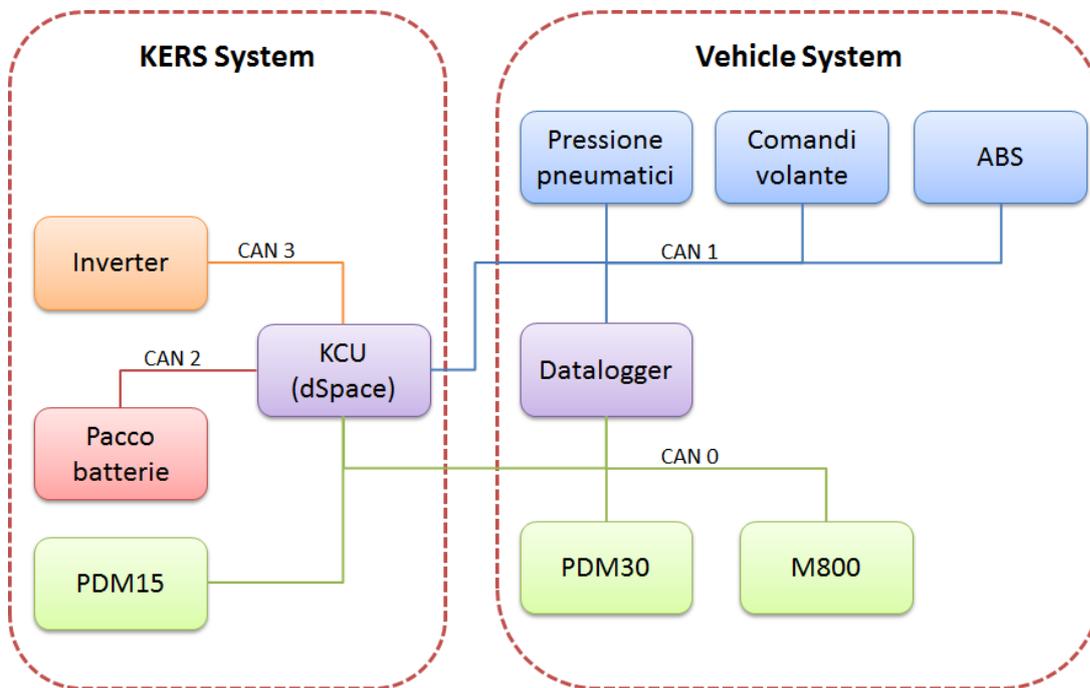


Figura 6.4: schema dei 4 CAN bus in vettura

I CAN bus 2 e 3 sono riservati rispettivamente alla comunicazione con il pacco batterie e l'inverter. La delicatezza dei dati che transitano su queste linee ha portato alla scelta di disattivare il KERS in caso di perdita di comunicazione su una di esse.

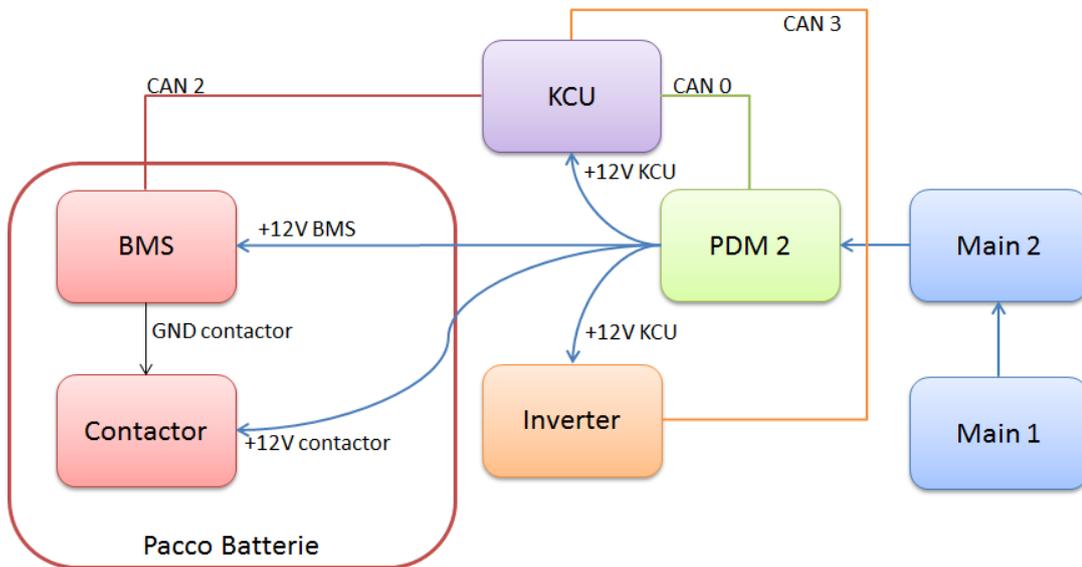
Nel pacco batterie vi sono due componenti che comunicano con la KCU: il BMS e una scheda custom per la lettura di alcuni sensori NTC (Negative Temperature Coefficient) applicati sulle celle. L'importanza del BMS è già stata illustrata nel paragrafo 4.4.1. La perdita di comunicazione con tale componente impedisce al sistema di conoscere le condizioni delle celle, di conseguenza, in tali condizioni, la KCU prima inibisce l'utilizzo del sistema e in seguito scollega il pacco batterie dal circuito HV.

La gestione dell'inverter viene eseguita esclusivamente via CAN bus. Esso comunica alla KCU il suo stato, eventuali *fault* e i valori dei parametri principali, quali corrente e tensione del DC bus e velocità di rotazione del motore. In risposta ottiene il comando di stato ("*motor off*", "*torque mode*",...) e la richiesta di coppia. Al suo interno chiude gli anelli necessari al controllo del motore e attua le logiche di protezione atte a impedire *over-current* e *over-temperature*. L'inverter è in grado di pilotare motori con potenze doppie rispetto a quello da noi utilizzato e per tali ragioni ha sempre lavorato lontano dalle sue condizioni limite.

### 6.1.4 Le alimentazioni

Il controllo delle alimentazioni dei contactor ricopre un ruolo molto importante per la sicurezza del sistema, poiché sono i componenti che scollegano il pacco batterie dalla linea di potenza che porta all'inverter, isolando l'alta tensione dal resto della vettura.

In Figura 6.5 si può vedere uno schema semplificato della gestione delle alimentazioni del sistema KERS, con le linee CAN già evidenziate nel paragrafo precedente.



**Figura 6.5:** schema delle alimentazioni del sistema KERS

I componenti principali sono:

- Main 1 e Main 2: due relè per alte correnti che scollegano la batteria 12V rispettivamente dal circuito vettura e dal circuito KERS
- PDM (Power Distribution Module): una centralina di potenza per il controllo dell'alimentazione dei singoli componenti
- BMS: in grado di controllare il polo negativo della bobina dei contactor.

Il Main 1 è un relè utilizzato sulla maggior parte delle vetture da competizione, che consente di disabilitare tutti i dispositivi presenti e che era presente già prima dell'installazione del KERS. Solitamente è azionabile sia dal pilota che dall'esterno,

per consentire ad un qualunque operatore il completo disarmo della vettura in caso di emergenza.

Il Main 2 è analogo al precedente ma è dedicato esclusivamente al KERS. Esso è stato inserito per consentire di disarmare il sistema lasciando in funzione il resto della macchina. Tale dispositivo è stato collegato in parallelo al precedente, ma subordinato a esso: le linee di potenza dei due componenti si uniscono solo al polo positivo di batteria, ma se il Main 1 viene disattivato si apre anche il 2.

Con l'ausilio della logica all'interno del PDM è stato possibile inserire un ritardo di 1 secondo sull'apertura del Main 2 per consentire alla KCU di eseguire la procedura di spegnimento del KERS, che verrà spiegata nel proseguo della trattazione.

La chiusura di questi due relè porta l'alimentazione a due PDM, uno dedicato al circuito vettura e l'altro dedicato al KERS. Si tratta di moduli di potenza programmabili dotati di linea CAN e ingressi digitali e analogici. Il software di programmazione consente di implementare funzioni logiche tra gli ingressi per abilitare le uscite e consente di impostare valori di soglia per le correnti, in modo da eliminare la necessità di inserire dei fusibili. Da qui partono le alimentazioni per i singoli componenti.

La KCU e il BMS vengono alimentati all'accensione della vettura, con la chiusura dei due Main, il resto del KERS attende la richiesta di accensione del sistema, attuata da un interruttore sulla plancia.

I contactor vengono comandati direttamente dal BMS, che chiude il collegamento di massa (GND Contactor) e dal PDM 2 che fornisce l'alimentazione (+12V Contactor). In caso di problemi al pacco batterie e in particolare alle celle è il BMS ad aprire i contactor e comunicare alla KCU quanto avvenuto. Il GFD, l'interruttore inerziale e l'interlock piazzato sui connettori di potenza si interfacciano invece con il PDM, che, in caso di problemi da loro rilevati, apre i contactor e ne dà comunicazione alla KCU via CAN.

Apertura e chiusura dei contactor in condizioni normali sono richieste ai due dispositivi sopracitati dalla KCU. Nel primo caso il PDM fornisce i 12V e il BMS realizza la procedura di *pre-charge*: chiude il polo negativo e bypassa il contactor sul polo positivo con una resistenza, caricando così il condensatore presente all'interno dell'inverter in modo controllato. Quando la corrente scende sotto un certo valore il BMS chiude il polo positivo e scollega la resistenza. In fase di apertura i poli vengono sconnessi contemporaneamente e il PDM chiude su una seconda resistenza i due poli del DC bus dell'inverter, in modo da scaricare il condensatore.

## 6.2 Progetto del controllo

Il controllo del sistema KERS è stato implementato sulla KCU, una centralina MicroAutoBoxII, programmata mediante un modello realizzato su Matlab Simulink.

Si tratta di un codice basato su di una macchina a stati: gli input del sistema determinano l'ingresso e l'uscita da stati e sottostati e, di conseguenza, le operazioni da eseguire.

In Figura 6.6 si può vedere uno schema del diagramma a stati realizzato per il controllo del KERS.

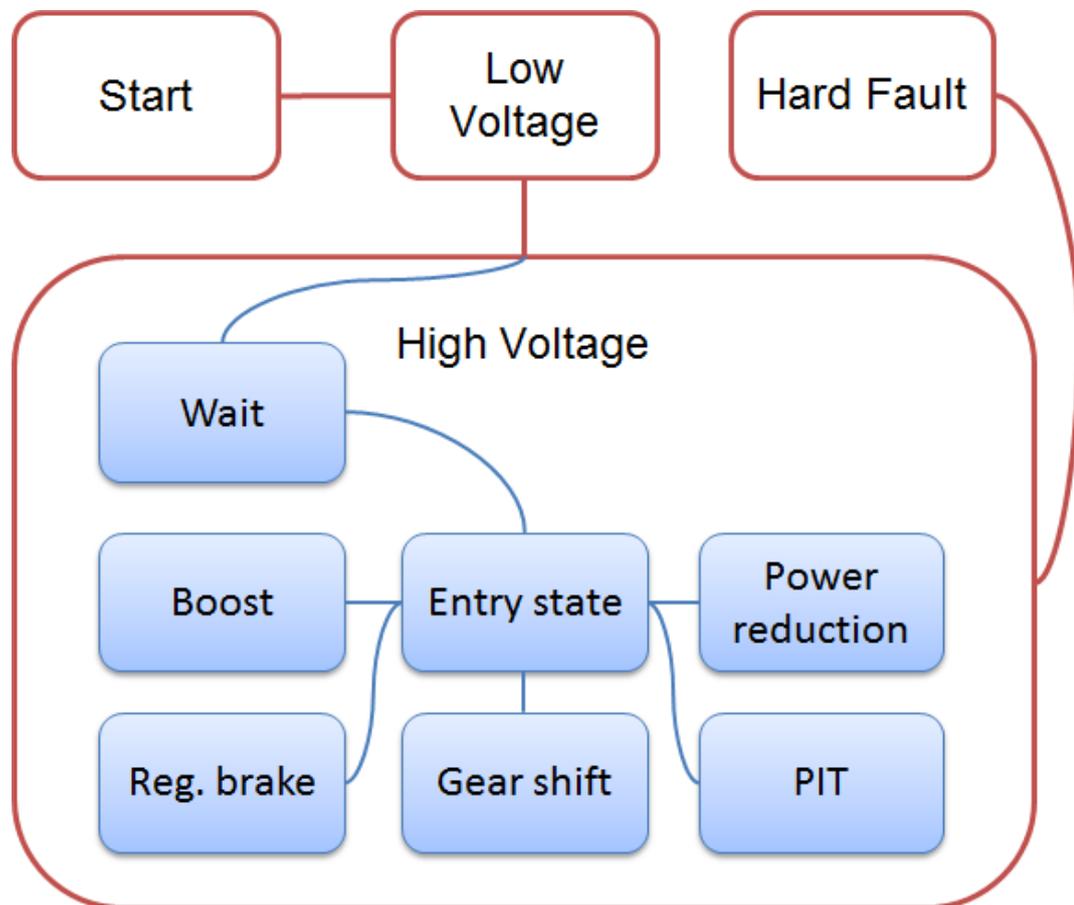


Figura 6.6: diagramma degli stati

Si possono notare 4 stati principali uno dei quali è diviso in sottostati:

- *Start*: il veicolo è acceso ma il KERS è disabilitato;

- *Low Voltage*: quando si abilita il KERS il controllo passa temporaneamente in questo stato, dove vengono effettuati tutti i controlli di sicurezza;
- *High Voltage*: diviso in diversi sottostati, è quello in cui si trova il sistema durante il normale funzionamento
- *Hard Fault*: è uno stato di blocco del sistema, vi si entra solo in caso di un errore di alto livello e serve un reset del sistema per poter ripristinare il funzionamento del KERS

All'accensione della vettura (attivando il Main) il controllo si trova in “*Start*”, dove la centralina non fa altro che inviare i dati relativi al pacco batterie (tensioni e temperature di cella, SOC, etc.) alla telemetria e all'acquisizione. Alcune parti del sistema come l'inverter non sono ancora alimentate.

Quando viene attivato il KERS, il controllo si sposta in “*Low Voltage*”, tutti i componenti vengono alimentati ed inizia la procedura di accensione.

Il passaggio in “*High Voltage*” avviene in modo automatico quando tutte le condizioni di sicurezza sono rispettate e solo se il motore termico è acceso. Questo è lo stato di normale funzionamento del sistema, l'unico con il circuito in alta tensione attivo e quindi i contactor chiusi. Esso è composto di vari sottostati:

- *Wait*: stato di attesa di una richiesta;
- *Entry state*: per la transizione dell'inverter dalla condizione di attesa a quella di funzionamento;
- Stati di funzionamento normale:
  - *Boost*: richiesta di coppia positiva al motore;
  - *Regenerative brake*: frenata rigenerativa attuata automaticamente dal controllo sulla base del segnale di pressione dell'impianto frenante;
  - *Manual brake*: frenata rigenerativa richiesta dal pilota con un apposito comando, utilizzata per ricaricare il sistema di accumulo in particolari frangenti di una gara;
  - *PIT*: strategia di ricarica utilizzata nella pit-lane e inserita con il comando del limitatore di velocità;
  - *Power reduction*: utilizzata per sfruttare l'energia persa con l'intervento del sistema di controllo della trazione;
  - *Gear shift*: strategia utilizzata durante la cambiata con sistema KERS in funzione, per ridurre gli stress meccanici prodotti sull'albero del motore elettrico.

All'ingresso in “*High Voltage*” il controllo si colloca in “*Wait*” dove attende un comando che lo farà passare in uno degli stati di funzionamento normale. La ricezione di uno dei comandi porta il sistema in “*Entry state*”, dove resta per pochi

millisecondi, tempo necessario per settare alcuni parametri fondamentali. Si tratta in particolare di portare l'inverter da *"motor off"* a *"torque mode"* settando inoltre il comando di coppia a zero.

Da qui si passa allo stato di funzionamento richiesto, dove la KCU invierà all'inverter un comando di coppia positiva o negativa da attuare. Ogni stato ha un suo valore di coppia impostato che può variare in base alle condizioni del sistema (es: pacco batterie vicino alla soglia di tensione massima o minima provoca una riduzione della coppia attuabile) e a degli switch rotativi presenti in macchina.

All'uscita da una di queste funzioni si torna sempre in *"Entry state"* dove la coppia viene riportata a zero seguendo rampe preimpostate prima di riportare l'inverter in stato di *"motor off"*.

Se una delle condizioni legate alle procedure di sicurezza del sistema viene a meno, il controllo esce dallo stato di *"High Voltage"* spostandosi o in *"Low voltage"*, dove attende il ripristino delle condizioni necessarie al funzionamento del KERS, o in *"Hard Fault"* dal quale può uscire solo con un reset completo del sistema. Quest'ultima opzione è stata introdotta per impedire che, dopo determinati *fault*, il KERS possa rimettersi in funzione prima di un controllo dell'operatore.

### 6.3 Strategie di controllo automatico

Nelle prime fasi di progetto, si pensava di utilizzare il sistema KERS solo tre volte al giro sui rettilinei principali, con attuazioni che arrivavano fino a 20 secondi. I primi test ci hanno però fatto cambiare strada, passando a una strategia con attuazioni di pochi secondi in uscita di curva, quando il motore termico è più basso di giri. Questo consentiva di sfruttare l'energia in modo più efficiente e di stressare in modo minore il pacco batterie.

Durante le prime gare si è notato che uno dei principali problemi del nostro sistema era il raffreddamento delle celle al litio. In particolare l'eccessivo utilizzo del KERS durante un giro del Nurburgring con conseguente riduzione dello stato di carica, porta il pacco batterie vicino ai valori di soglia termici, compromettendo la possibilità di utilizzo del sistema nelle tornate successive.

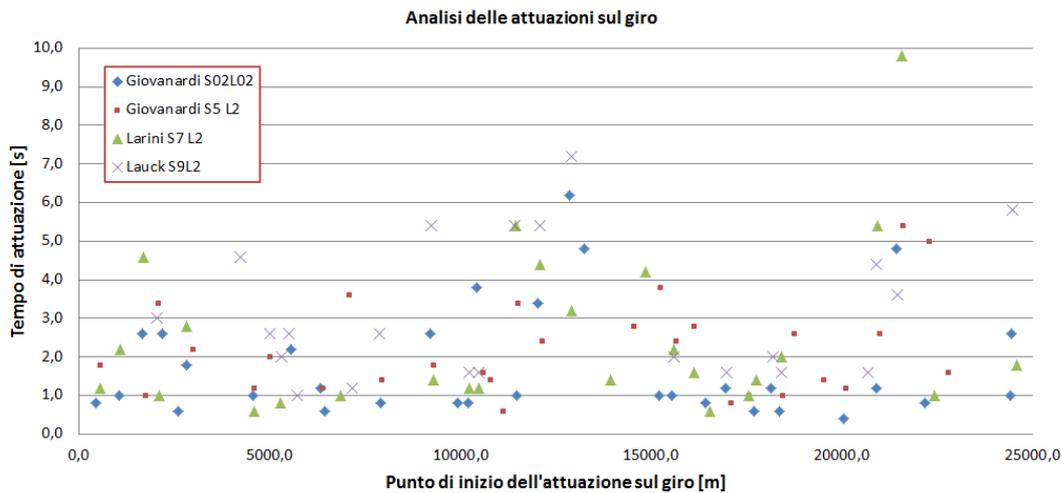
L'analisi di questi fenomeni esula però dagli scopi di questo testo, ma è ampiamente illustrata nella tesi del mio collega Luca Ciancetti. Ci limiteremo a dire che per tali ragioni si sono valutati i punti di massima efficienza del sistema, si è studiato l'utilizzo standard fatto dai piloti e si è giunti a elaborare una possibile strategia di utilizzo del KERS che ne massimizzi le prestazioni.

Tale strategia è stata testata a banco sulle celle per verificarne l'efficacia e implementata nel codice in modo da avere un funzionamento automatico del sistema. Non volendo completamente privare il pilota della possibilità di gestire il KERS e pensando soprattutto alla necessità di utilizzarlo per alcuni sorpassi, si è deciso di non dedicare tutta l'energia accumulata in frenata alla strategia

automatica, ma di permettere limitate attuazioni manuali. Si è giunti così a una strategia “ibrida”, con una parte di controllo automatico ed una manuale.

### 6.3.1 Algoritmo di automatizzazione

Per la definizione della strategia automatica si è partiti dall’analisi dei dati acquisiti nelle gare precedenti, con particolare attenzione all’energia accumulata e all’utilizzo fattone da parte dei piloti. Come già detto in precedenza, il sistema viene utilizzato prevalentemente in uscita di curva, quando il motore termico è più basso di giri e il rapporto tra la coppia dei due motori è più favorevole. Questo tipo di utilizzo è confermato dal grafico in Figura 6.7, che mostra il ripetersi delle attuazioni negli stessi punti in differenti giri con i tre piloti, seppur con durate differenti. Fatte salve alcune eccezioni, si parla però di differenze di piccolo rilievo, considerando inoltre che si ha una maggior concentrazione di punti sotto la linea dei 3 secondi.



**Figura 6.7: andamento delle attuazioni durante 4 giri del tracciato presi a campione**

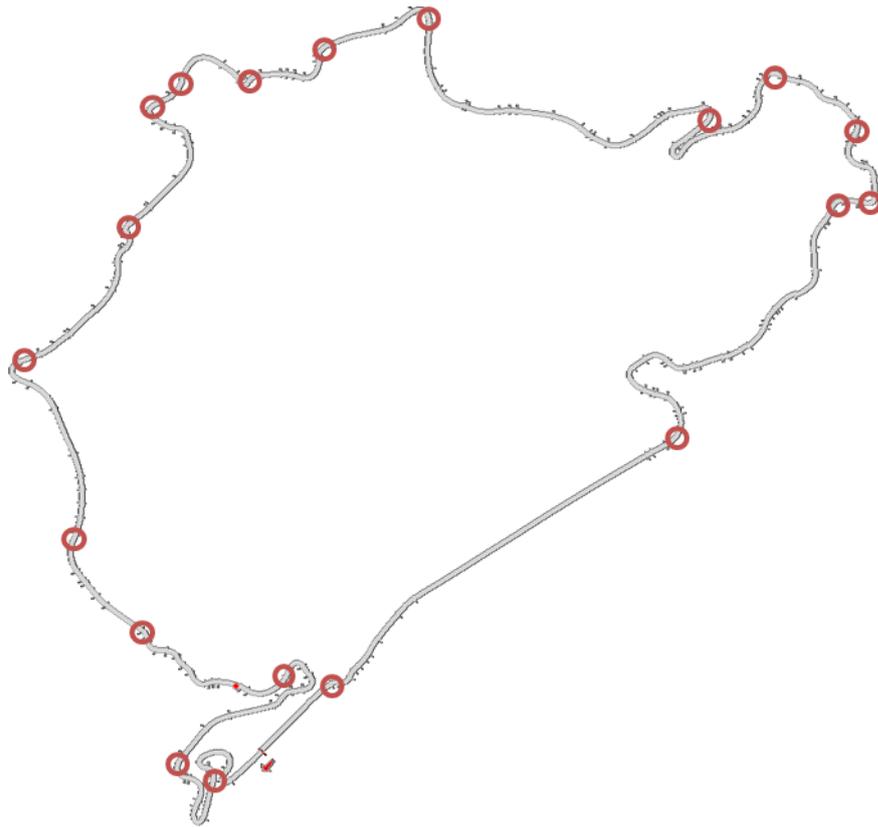
Uno dei problemi maggiori per definire una strategia automatica è però far capire alla centralina quando arrivi il momento di richiedere un’attuazione. Analizzando i dati in acquisizione un operatore può facilmente riconoscere i punti della pista in base al profilo di velocità, ma non è uno strumento facilmente utilizzabile da un controllo.

Il GPS consente di piazzare in modo univoco la vettura sul tracciato ma la precisione non è sufficientemente elevata, in quanto può sbagliare anche di diversi metri. Le nostre attuazioni avvengono però sempre in uscita di curva, la cui

presenza è rivelata dalla staccata che la precede per mezzo del segnale di pressione del freno. Resta però impossibile distinguerne una dall'altra e il nostro sistema non deve attuare su tutte le uscite di curva ma solo su alcune da noi scelte.

Si è quindi pensato di combinare i due dati per ottenere il risultato desiderato ovvero: il GPS posiziona la vettura sul tracciato in modo approssimativo ma con precisione sufficiente da consentire di accoppiare una staccata alla curva che la segue.

L'obiettivo è quindi implementare un codice in grado di accorgersi attraverso il segnale del GPS quando la vettura sta approcciando una delle curve a cui fa seguito un'attuazione. Dall'analisi dei dati si è arrivati a impostare sul codice 19 gate GPS, ovvero 19 coppie di coordinate (latitudine e longitudine) che consentano di riconoscere il passaggio della vettura in determinati punti del tracciato. In particolare se latitudine e longitudine lette dal GPS sono entro uno dei 19 range impostati sul codice, il controllo capisce che la vettura sta per affrontare una determinata curva e si prepara per l'attuazione da eseguire in uscita. Si giunge così a determinare 19 differenti punti di attuazione visibili in Figura 6.8.



**Figura 6.8: punti di attuazione della strategia automatica**

Per meglio comprendere il funzionamento dell'algoritmo possiamo analizzare i seguenti punti, considerando che il codice si muove da un all'altro seguendo l'ordine indicato:

1. Attesa del gate GPS: si attende che i segnali del GPS siano entro uno dei range impostati;
2. Attesa della frenata: una volta passata nel gate, la vettura dovrà affrontare una curva e ci sarà quindi una staccata, leggibile tramite il segnale di pressione del freno;
3. Attesa dell'accelerazione: per riconoscere l'uscita dalla curva, il controllo attende che il segnale di apertura della farfalla superi una determinata percentuale;
4. Attuazione: a curva terminata il KERS entra in funzione per un determinato numero di secondi impostato sul codice, al termine dei quali il controllo ritorna al primo stato.

Nel caso in cui il pilota rilasci l'acceleratore per un qualsiasi problema, il controllo sospende l'attuazione, per riprenderla una volta che le condizioni di utilizzo tornino ad essere soddisfatte.

Ognuna di queste 19 attuazioni ha una sua durata impostata, la più lunga della quali può arrivare a 6 secondi, con una somma massima di 46 secondi. In ottica di avere la maggior elasticità possibile sull'utilizzo del sistema, è stato riservato un quantitativo variabile di energia per le attuazioni manuali, che il pilota può sfruttare a suo piacere. Ovviamente un aumento di energia utilizzabile in strategia manuale comporta una riduzione di quella riservata all'automatica.

In totale si è calcolato di avere circa 51 secondi di attuazione disponibile ad ogni giro, che in configurazione base vuol dire 46 secondi in strategia automatica e 5 in manuale. Come si può vedere in Figura 6.9, sul codice sono stati però impostati 12 differenti set di tempistiche per le attuazioni automatiche che consentono di diminuire la durata complessiva di questa strategia, aumentando di conseguenza quella manuale. Uno switch rotativo a 12 posizioni consente di passare da un set all'altro, dove la prima è una strategia completamente manuale e l'ultima completamente automatica.

## 6 - Powertrain P4/5 Competizione

	Tempistiche delle attuazioni automatiche (in secondi)											
	MAN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	AUTO
<b>1</b>	0	0	1	0	0	2	2	2	2	2	2	2
<b>2</b>	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>3</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>4</b>	0	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3
<b>5</b>	0	2	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4
<b>6</b>	0	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3
<b>7</b>	0	2	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4
<b>8</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<b>9</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>10</b>	0	0	1	0	0	2	2	2	2	2	2	2
<b>11</b>	0	4	4	4	4	4	5	4	5	5	5	5
<b>12</b>	0	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3
<b>13</b>	0	0	1	0	0	0	0	2	2	2	2	2
<b>14</b>	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>15</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<b>16</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<b>17</b>	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>18</b>	0	4	4	4	4	4	5	4	6	6	6	6
<b>19</b>	0	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3
<b>Sec Auto</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>26</b>	<b>26</b>	<b>28</b>	<b>32</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>39</b>	<b>43</b>	<b>46</b>	<b>46</b>
<b>Sec Man</b>	<b>51</b>	<b>31</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>23</b>	<b>19</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>0</b>
<b>DC Auto</b>	<b>0%</b>	<b>4%</b>	<b>5%</b>	<b>5%</b>	<b>5%</b>	<b>6%</b>	<b>7%</b>	<b>7%</b>	<b>8%</b>	<b>8%</b>	<b>9%</b>	<b>9%</b>
<b>DC Man</b>	<b>10%</b>	<b>6%</b>	<b>5%</b>	<b>5%</b>	<b>5%</b>	<b>4%</b>	<b>3%</b>	<b>3%</b>	<b>2%</b>	<b>2%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>

**Figura 6.9: tempistiche delle attuazioni automatiche**

Questi 12 set permettono di adattare il sistema alle condizioni della pista, al tipo di guida del pilota e alle condizioni del sistema stesso.

In Figura 6.10 si possono vedere le attuazioni realizzate in una parte del giro del Nurburgring. Per meglio comprendere il funzionamento della strategia automatica sulle attuazioni 5, 6 e 7 sono stati evidenziati i punti in cui si verificano i tre eventi che generano il passaggio del controllo da uno dei 4 stati prima indicati al successivo.

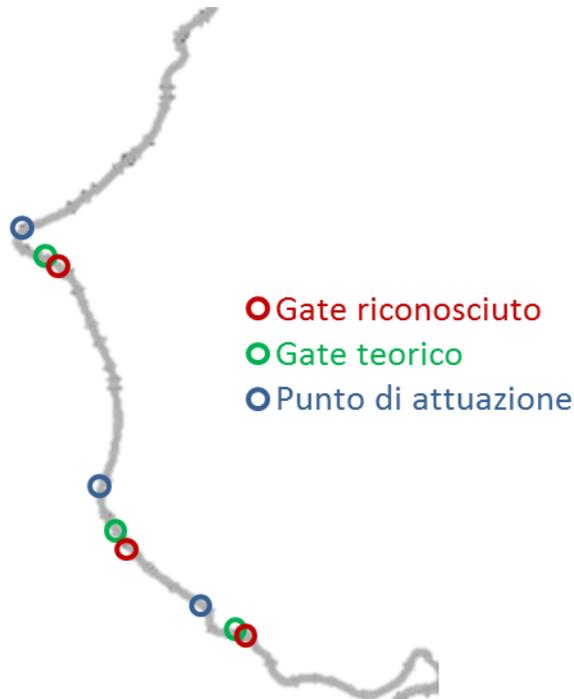


Figura 6.10: riconoscimento della posizione e attuazione automatica

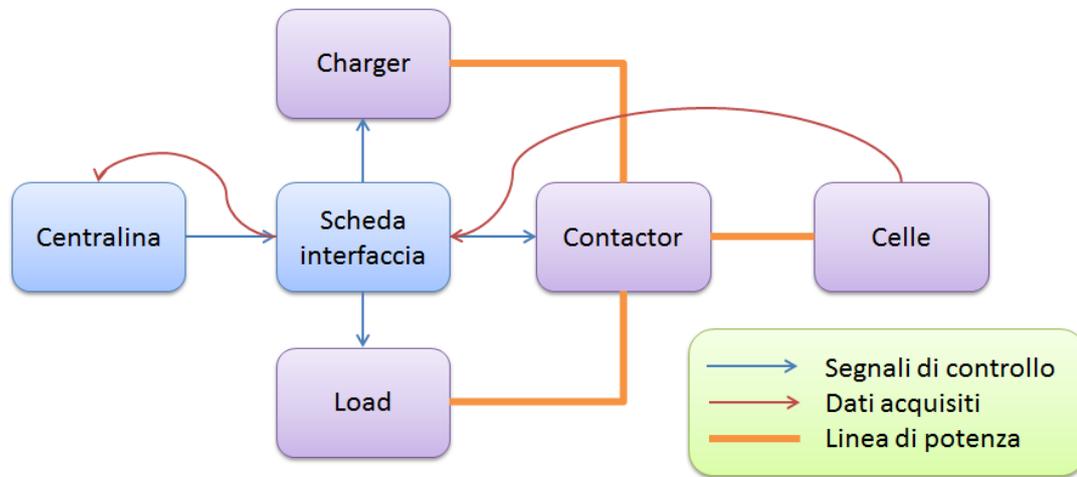
### 6.3.2 Il banco prova celle

Durante i primi mesi del progetto abbiamo realizzato un banco prova, dove testare il comportamento di un campione di celle al litio sottoposte a ipotetici cicli di carica e scarica analoghi a quelli realizzati durante il normale funzionamento in pista.

Il banco è composto da:

- carico elettronico da 1,2kW;
- alimentatore a due canali da 600W ciascuno;
- centralina dSpace per il controllo
- computer per l'interfaccia utente e il salvataggio dei dati;
- scheda custom per il condizionamento dei segnali;
- sensori di temperatura;
- shunt per la misura di corrente.

Un suo schema funzionale è visibile in Figura 6.11.



**Figura 6.11: schema del banco prova celle**

Il controllo del banco è stato realizzato sulla centralina dSpace, collegata ad un PC su cui è stata realizzata l'interfaccia utente. Oltre al tipo di ciclo che si vuole realizzare vengono impostate le correnti e il numero di ripetizioni, si lancia la prova e il controllo procede in modo automatico.

In acquisizione vengono salvate le stringhe dei valori letti dai vari sensori, ovvero temperature celle, tensioni e correnti di carica e scarica. Con questi dati è poi possibile calcolare gli altri parametri di cui si ha bisogno quali SOC (State Of Charge), capacità delle celle e resistenza interna.

Oltre ad alcune prove di carica e scarica completa delle celle, abbiamo realizzato alcuni possibili cicli di utilizzo del KERS su di un giro del Nurburgring, basandoci inizialmente sulle acquisizioni delle gare della stagione 2011 e aggiornando in seguito i dati con quelli accumulati durante test in pista e prime gare. Si sono fatte inoltre prove simulando diverse temperature di ambiente in modo da valutare la variazione di comportamento delle celle.

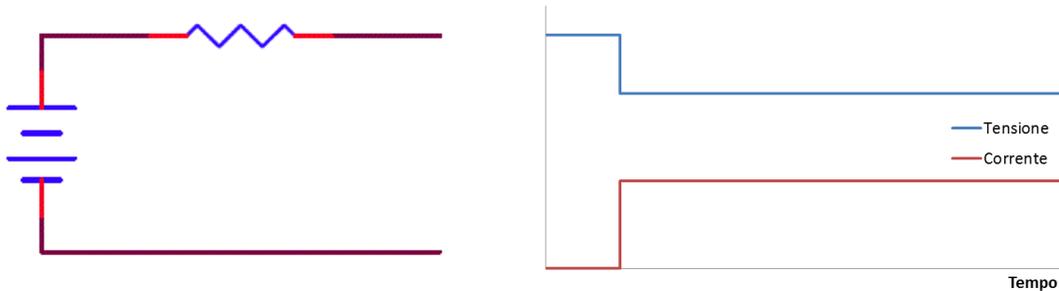
L'introduzione della strategia automatica ha consentito di poter replicare in modo più affidabile il ciclo di funzionamento in pista anche durante i test. Viene infatti ridotta notevolmente la variabilità del suo utilizzo e si riesce maggiormente a notare una regimazione dei parametri di nostro interesse.

### **6.3.2.1 Modellizzazione delle celle al litio**

Per meglio apprezzare i risultati dei test è necessario introdurre alcuni concetti sulle celle analizzate.

Considerando il semplice comportamento durante una scarica con corrente continua, si può individuare un modello elettrico semplificato del comportamento di una cella, costituito da un generatore di tensione con una resistenza in serie, come mostrato in Figura 6.12. Collegando al nostro sistema un carico che assorbe

corrente, si avrà una caduta di tensione sulla resistenza interna e quindi una riduzione della tensione in uscita.



**Figura 6.12: modello semplificato di una cella**

La resistenza di cui stiamo parlando è di tipo dinamico, ovvero misurabile solo attraverso una variazione corrente e di tensione. La formula sarà quindi la seguente:

$$R=\Delta V/\Delta I$$

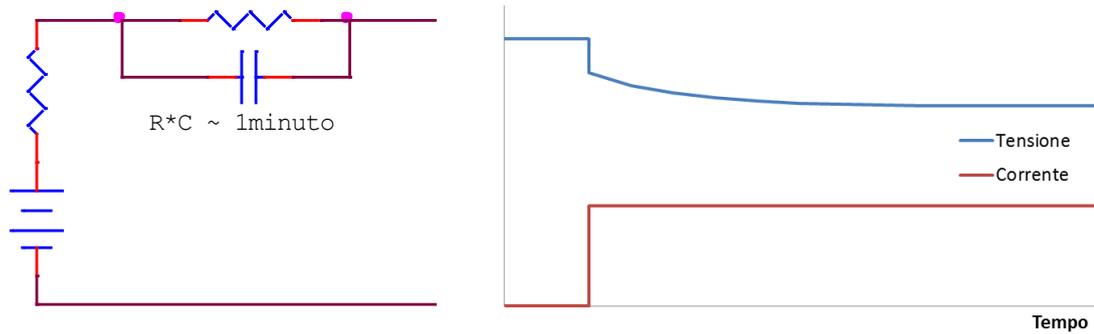
Si può quindi calcolare il valore di tale resistenza realizzando due curve di scarica a differenti correnti, dati solitamente forniti anche dai costruttori.

Tale valore non è però costante ma si modifica al variare di:

- Temperatura della cella: diminuisce al crescere della temperatura;
- SOC: maggiore a cella vicino ai due estremi del SOC;
- Corrente: cresce con l'aumentare della corrente;
- Fase di carica o scarica: in fase di carica il valore è maggiore che in scarica;
- Invecchiamento della cella: con l'utilizzo della cella il valore di resistenza cresce.

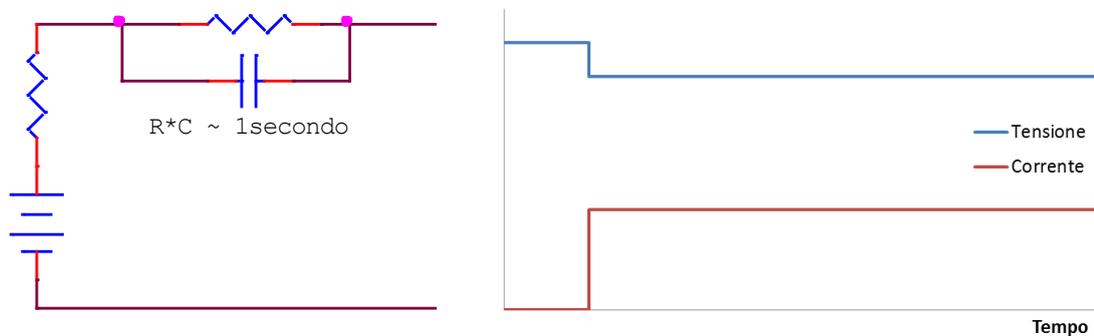
L'influenza di tali parametri sulla resistenza è confermata anche da dati forniti dal costruttore, che non possiamo però mostrare per accordi presi con lo stesso.

Questo è il modello più comunemente utilizzato, ma non ricopre tutti gli aspetti della cella, soprattutto non prende in considerazione i transienti. Un modello più accurato può essere realizzato dividendo tale valore di resistenza in due parti e aggiungendo in parallelo a una di esse un condensatore, tale per cui la costante di tempo  $R \cdot C$  sia dell'ordine del minuto (Figura 6.13).



**Figura 6.13: modello di una cella con costante di tempo dell'ordine del minuto**

I costruttori utilizzano però un modello differente analogo al precedente ma con costante di tempo  $R \cdot C$  dell'ordine del millesimo di secondo (Figura 6.14). Questo serve a simulare il comportamento in AC con frequenza di 1kHz, che corrisponde anche al metodo di test delle celle realizzato dai costruttori. Tale parametro risulta però inutile a chi si accinge a progettare un pacco batterie, in quanto non corrisponde ad un reale utilizzo. Per queste ragioni è sconsigliabile utilizzare il valore di resistenza fornito dal costruttore per realizzare un modello della cella.



**Figura 6.14: modello di una cella con costante di tempo dell'ordine del millisecondo**

Un modello più completo può essere realizzato unendo i due modelli in uno come mostrato in Figura 6.15

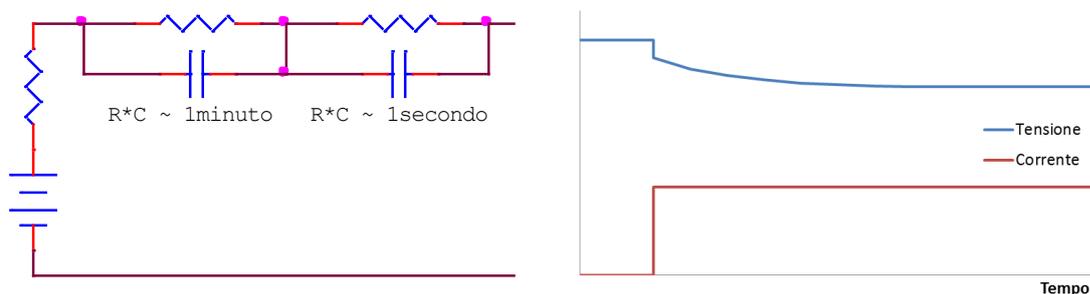


Figura 6.15: modello di una cella con entrambe le costanti di tempo

I produttori di celle forniscono delle curve di scarica realizzate con differenti correnti in uscita, come quelle in Figura 6.16, dove si può notare la riduzione della tensione all'aumentare della corrente. Inoltre vengono forniti range di temperatura di utilizzo e in alcuni casi curve di scarica a differenti temperature di cella.

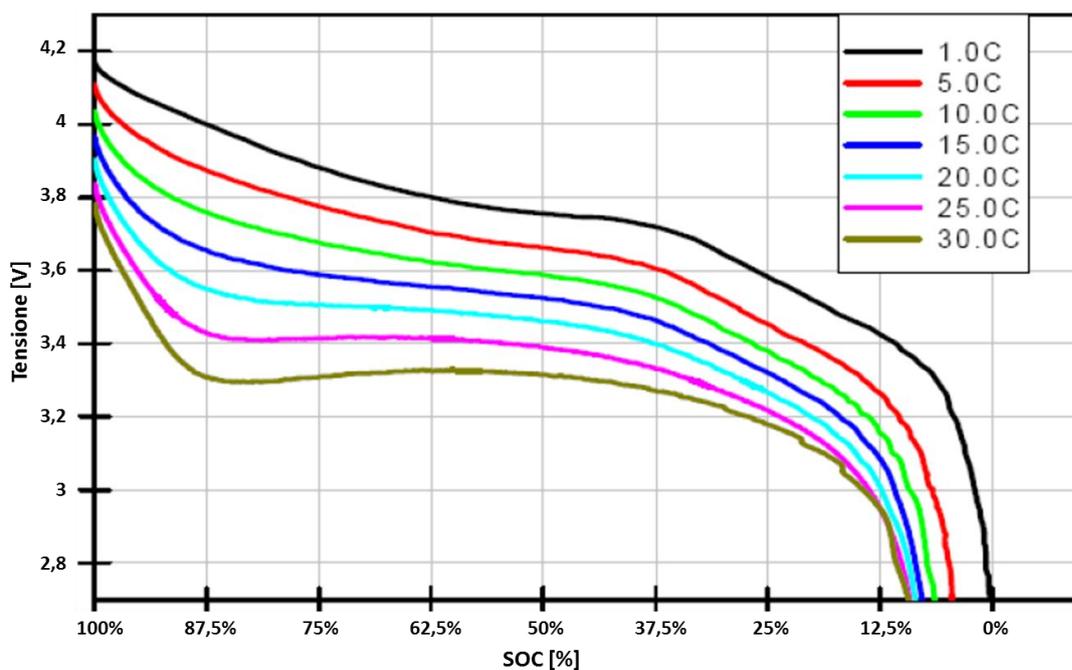


Figura 6.16: curve di scarica a differenti valori di corrente

Una delle problematiche principali per un pacco batterie di un sistema KERS è il rischio di surriscaldamento.

Le celle al litio possono erogare un certo quantitativo di corrente che è funzione della capacità della cella stessa. Solitamente i produttori forniscono i

valori massimi di corrente di picco e continuativa indicando il cosiddetto “C-rate”, ovvero il rapporto tra il limite di corrente e la capacità.

Per fare un esempio possiamo prendere le celle da noi utilizzate che secondo il datasheet hanno una capacità di 4Ah, una corrente massima continuativa di 30C e una corrente massima di picco di 50C. Per arrivare ai valori in ampere basta moltiplicare il fattore per la capacità ovvero:

- $30 \cdot 4 = 120\text{A}$  per la corrente di scarica continuativa e
- $50 \cdot 4 = 200\text{A}$  per la corrente di scarica di picco.

L'utilizzo di un fattore per determinare tale valore mette subito in evidenza il rapporto tra corrente e capacità della cella. Questo dipende soprattutto dalla tecnologia di realizzazione delle celle al litio: realizzare una cella con una certa capacità equivale a metterne in parallelo due di capacità pari alla metà della prima. Questo implica, tornando al modello semplificato di cui si è parlato in precedenza, mettere in parallelo anche le resistenze interne ottenendo un valore complessivo pari alla metà, con una riduzione della caduta di tensione e delle perdite.

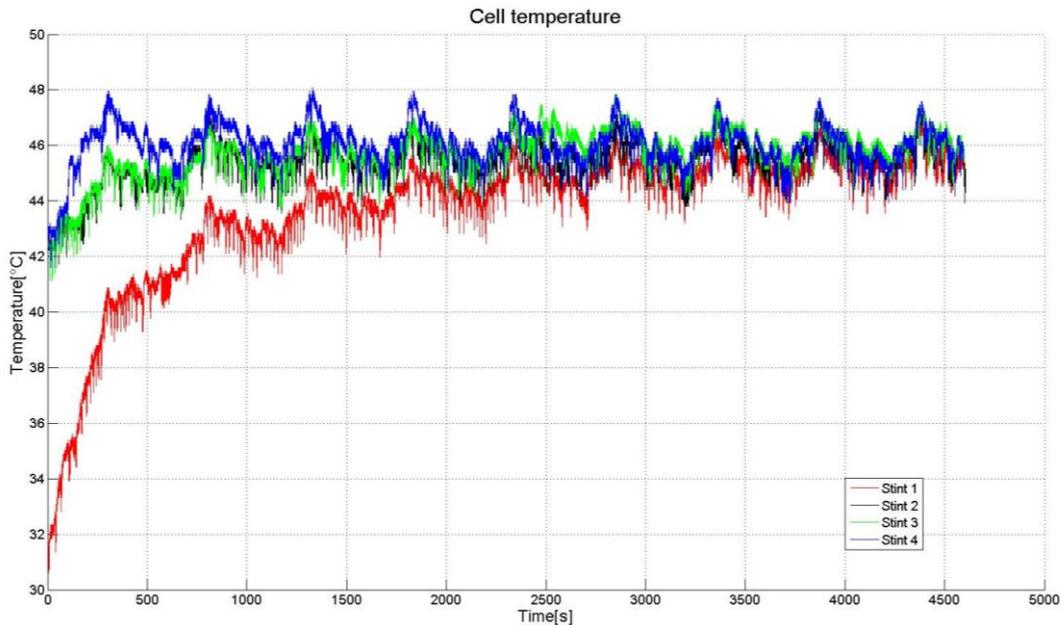
Nel caso di un sistema ibrido la capacità del pacco batterie è molto inferiore rispetto a quella di un veicolo elettrico, per il quale è necessario immagazzinare l'energia sufficiente a completare l'intera gara. Per il sistema KERS le fasi di carica e scarica si susseguono in modo alternato e si bilanciano tra loro e il sistema di accumulo funziona in modo analogo a un buffer: si riempie e svuota in modo rapido.

Normalmente nei sistemi KERS si ha quindi un rapporto tra correnti massime e capacità superiore a quello dei veicoli elettrici e di conseguenza maggiori perdite in calore e maggior rischio di surriscaldamento.

### **6.3.2.2 Andamento delle temperature**

Molti dei nostri test sono serviti a valutare l'impatto delle strategie ideate sull'andamento termico del pacco batterie, cercando di arrivare a una temperatura di regime che restasse all'interno delle specifiche del prodotto.

In Figura 6.17 si può vedere l'andamento delle temperature durante un test della strategia automatica ideata per il ring.



**Figura 6.17: andamento delle temperature di cella durante una gara di 4 *stint* intervallati da 2min di pit stop**

Per meglio comprendere i dati riportati nel grafico, bisogna introdurre alcuni concetti riguardanti il Nurburgring.

Come già detto, tale tracciato è lungo circa 25km e viene percorso dalla P4/5 Competizione in circa 8 minuti e 30 secondi ovvero 510 secondi. Durante una gara di durata la vettura riesce a compiere circa 9 giri prima di rientrare ai box per il rifornimento e il cambio delle gomme. Questo intervallo di 9 giri viene normalmente definito *stint* e dura poco più di 1 ora e 15 minuti, che con l'aggiunta del pit stop arriva a circa 1 ora e 20 minuti.

Nel grafico si può quindi vedere l'andamento delle temperature in un'ipotetica gara composta di 4 *stint*, con 2 minuti di riposo del sistema tra uno e l'altro, per una durata complessiva di oltre 5 ore e 30 minuti.

Come si può vedere alla partenza del primo *stint* (curva rossa) le celle erano ad una temperatura di circa 31°C, valore che si è subito alzato con il funzionamento del sistema per regimare tra i 44 e i 48°C.

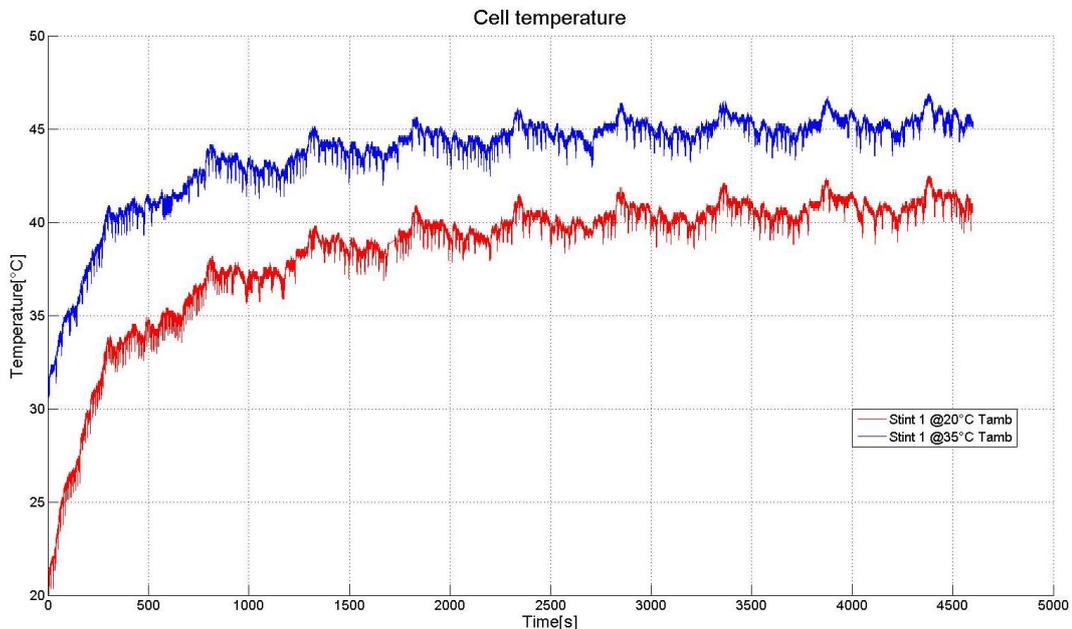
Negli *stint* successivi si possono facilmente riconoscere i 9 giri sul grafico. Si nota infatti un andamento periodico delle temperature.

Gli *stint* 2 e 3 (rispettivamente in nero e verde in figura) sono praticamente uno la coppia dell'altro. Dopo la pausa di due minuti dettata dal pit stop, la temperatura iniziale è di circa 42°C cresce nei primi due giri per poi stabilizzarsi ai valori già visti al termine del primo *stint*.

Il quarto *stint* presenta invece un'anomalia durante il primo giro. Si è infatti deciso di simulare l'aggiunta di un'attuazione manuale di elevata durata (circa 10 secondi) per vedere la risposta in termini di temperature del sistema. Durante il funzionamento in pista un'attuazione di tale durata non è consentita, ma in fase di test questo permette di vedere maggiormente gli effetti dell'operazione.

Il responso della prova è stato positivo, in quanto dopo un primo innalzamento delle temperature che hanno portato ad un picco di 48°C, valore mai raggiunto in precedenza, la curva torna a copiare quelle degli *stint* precedenti. Di conseguenza si può pensare che il sistema sia arrivato a una temperatura di regime per il ciclo di scarica realizzato.

Dai nostri test abbiamo però notato che la temperatura ambiente ha una forte influenza su quella a cui regima il sistema. Tale fenomeno si può notare nella Figura 6.18.



**Figura 6.18: andamento delle temperature di cella durante 2 primi *stint* di una gara con differenti temperature ambiente**

Si tratta di due prove uguali, ovvero il primo *stint* di un'ipotetica gara al Nurburgring con il KERS impostato sulla strategia automatica. La prova dura quindi 9 giri di pista, ovvero poco più di 1 ora e 15 minuti.

L'unica differenza tra le due prove è la temperatura ambiente che nel primo caso (curva rossa) è di circa 20°C, mentre nel secondo caso (curva blu) è di circa 35°C, differenza che si ripercuote anche sulla temperatura iniziale delle celle.

Si può notare come l'andamento delle due curve sia analogo, si differenziano solo per un offset: nella prima prova il sistema regima ad una temperatura di circa 10°C più bassa rispetto alla seconda prova.

Questo fa intuire come un buon sistema di raffreddamento capace di tenere la temperatura ambiente a un valore più basso consenta di aumentare le prestazioni del sistema in termini di potenza o di duty cycle. Il nostro pacco batterie è stato progettato per un raffreddamento ad aria, con l'idea di sfruttare le basse temperature solitamente presenti sul tracciato o in alternativa il sistema d'aria condizionata che è comunque sempre attivo sulla vettura.

Un sistema di raffreddamento a liquido sarebbe probabilmente più efficace ma porterebbe, oltre che a un imponente aumento di peso del pacco batterie, a una notevole complicazione del sistema. Il problema principale è riuscire ad assicurare che non ci possano essere perdite del circuito acqua all'interno del sistema di accumulo dell'energia, che potrebbero causare corto circuiti e distruggere le celle.

Per contro bisogna tener conto della variazione della resistenza interna al variare della temperatura. Come si può vedere in Figura 6.19 tra i 25 e i 60°C le curve di scarica sono molto simili, segno che la resistenza interna della cella non varia di molto. Al contrario se si scende sotto i 25°C la resistenza aumenta rapidamente, di conseguenza ci saranno maggiori perdite e rischio di danneggiamento delle celle, soprattutto in fase di carica. Alcuni test hanno dimostrato come le celle tendano a gonfiarsi se caricate con correnti elevate a temperature intorno agli 0°C.

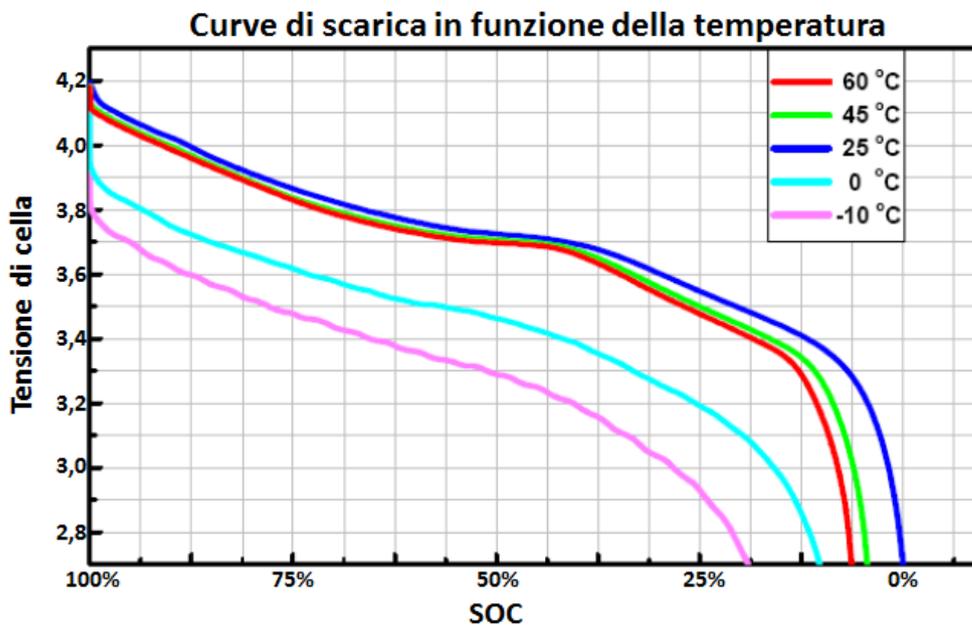
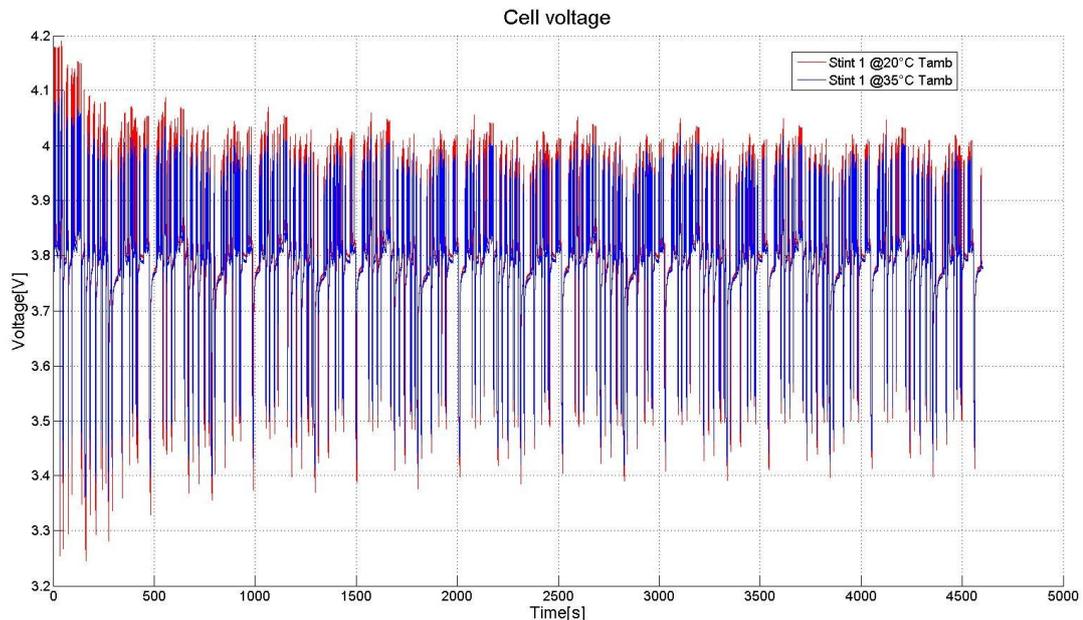


Figura 6.19: curve di scarica in funzione della temperatura di cella

Di conseguenza, come per un motore termico è necessaria una fase di riscaldamento prima dell'inizio di una gara, lo stesso vale per il sistema di accumulo, che nel nostro caso veniva portato intorno ai 25°C. Questa operazione può essere eseguita con un ridotto ciclo di carica o scarica, facendo fluire della corrente relativamente bassa nelle celle, oppure innalzando la temperatura dell'aria all'interno del pacco.

### 6.3.2.3 Andamento della tensione

Nel grafico in Figura 6.20 si può vedere l'andamento della tensione nelle due prove a differente temperatura ambiente già analizzate alla fine del paragrafo precedente: nella prima (curva rossa) si parte con la cella a circa 20°C per arrivare intorno ai 41°C, nella seconda si parte invece da 31°C fino ad arrivare a circa 46°C, con temperatura ambiente rispettivamente di 20 e 35°C.



**Figura 6.20: andamento delle tensioni di cella durante due primi *stint* di una gara a differenti temperature ambiente**

Le due curve presentano dei picchi di tensione verso l'alto e verso il basso, determinati rispettivamente dalle fasi di carica e di scarica del profilo e dovuti alla resistenza interna della cella: un delta di tensione maggiore indica un più alto valore della resistenza e quindi maggiori perdite. Si possono notare due fatti:

- La prima prova realizzata a temperatura più bassa ha dei picchi di tensione verso l'alto e verso il basso più elevati rispetto alla seconda prova.
- In entrambe i casi i picchi di tensione sono più pronunciati nella prima parte delle prove e si riducono con l'aumentare della temperatura

Si può quindi facilmente intuire l'importanza di tenere le celle a una temperatura controllata, in modo da farle lavorare nel punto di massima efficienza.

La variazione della resistenza interna al variare degli altri parametri non è però lineare ed è quindi difficile simularne il comportamento. Si procede quindi con un modello approssimativo del sistema per passare poi a una fase di test per avere dati più vicini al comportamento reale.

### **6.3.3 Stabilità del sistema**

Per quanto riguarda la stabilità del sistema possiamo parlare di due differenti aspetti:

- la stabilità del codice e la capacità di eseguire tutte le attuazioni impostate nella strategia automatica;
- la stabilità a livello energetico e termico, ovvero la capacità di utilizzare lo stesso quantitativo di energia che viene immagazzinato senza superare i limiti di temperatura.

#### **6.3.3.1 Stabilità del codice**

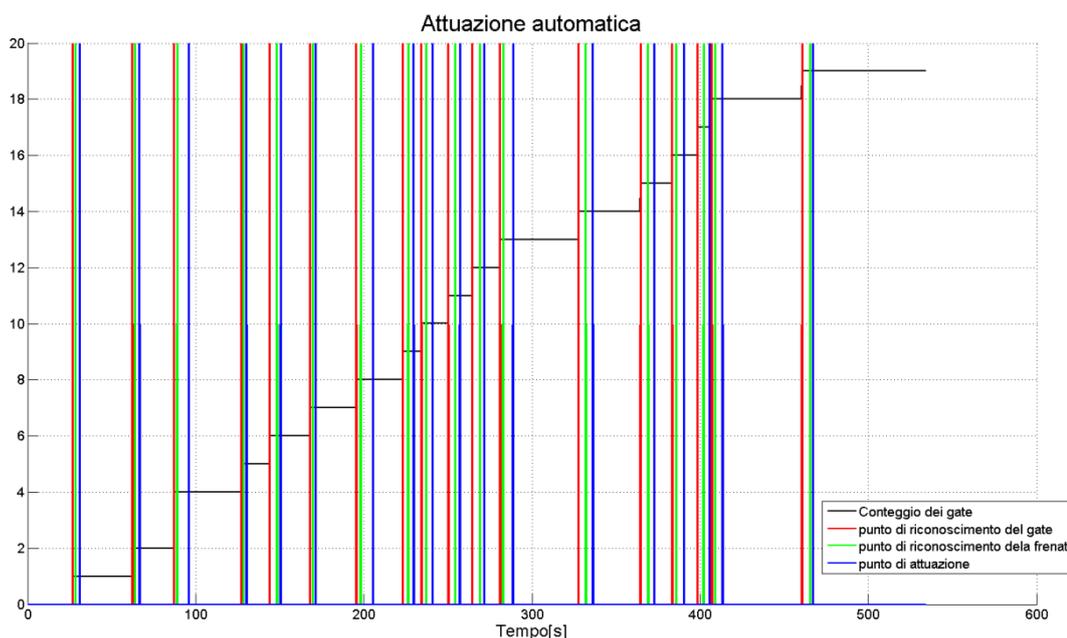
L'utilizzo del GPS come strumento per il riconoscimento del punto di attuazione può non sembrare per alcuni aspetti un'idea azzardata. Si tratta effettivamente di uno strumento con una precisione limitata e soggetto alla ricezione dei satelliti.

Per queste ragioni prima di confermare tale scelta si sono fatti numerosi test utilizzando i dati delle gare precedenti, che constano di più di 60 ore di acquisizione, contando solo le gare e non prove libere e qualifiche. In particolare si è valutata la ripetibilità del segnale sovrapponendo svariati giri di pista e si è controllata l'eventuale perdita del segnale dei satelliti. Dalla nostra parte giocava il fattore della lunghezza del tracciato che permetteva di avere ampio margine tra due attuazioni successive.

Da queste analisi si è notato che il segnale era abbastanza stabile e che la perdita del collegamento con i satelliti avveniva saltuariamente e per brevissimi intervalli, provocando errori di posizione non significativi. Nonostante ciò, è parsa subito ovvia l'impossibilità di utilizzare il GPS per determinare il punto preciso dove attuare, a causa dell'imprecisione del sistema. Da qui si è così giunti all'idea

di riconoscere alcune curve del tracciato, cosa che richiede meno precisione, per poi attuare alla loro fine, quando il pilota porta a fondo il pedale dell'acceleratore.

Per valutare la bontà dell'algoritmo si è sviluppato un modello che simulasse le attuazioni sul tracciato basandosi sulle vecchie acquisizioni. Il modello simula il giro di pista, riconosce i gate in base ai dati del GPS, attende la frenata che identifica la curva monitorando la pressione dell'impianto frenante e simula l'attuazione dopo che il segnale della posizione della farfalla arriva al 100%. In Figura 6.21 si può vedere uno dei grafici di output del modello, che mostra il conteggio dei gate, i punti di riconoscimento dei gate e delle frenate e i punti di attuazione.



**Figura 6.21: simulazione di un giro del tracciato con attuazione automatica**

Dopo una prima fase di definizione dell'algoritmo, il sistema ha funzionato correttamente in simulazione. Si sono riscontrati alcuni piccoli problemi nella parte del tracciato più tortuosa, ovvero i primi chilometri che costituiscono il circuito utilizzato per i GP di Formula 1. Qui sono presenti alcune curve molto strette e l'incertezza del segnale del GPS portava a riconoscere il di gate prima del previsto. Riducendo la zona atta al riconoscimento, si è aumentata la precisione e si è risolto il problema. La problematica è visibile in Figura 6.22, che rappresenta solo la parte di tracciato del GP, solitamente usata per le prime prove libere, la Nordschleife viene aperta solo per le qualifiche e le gare.

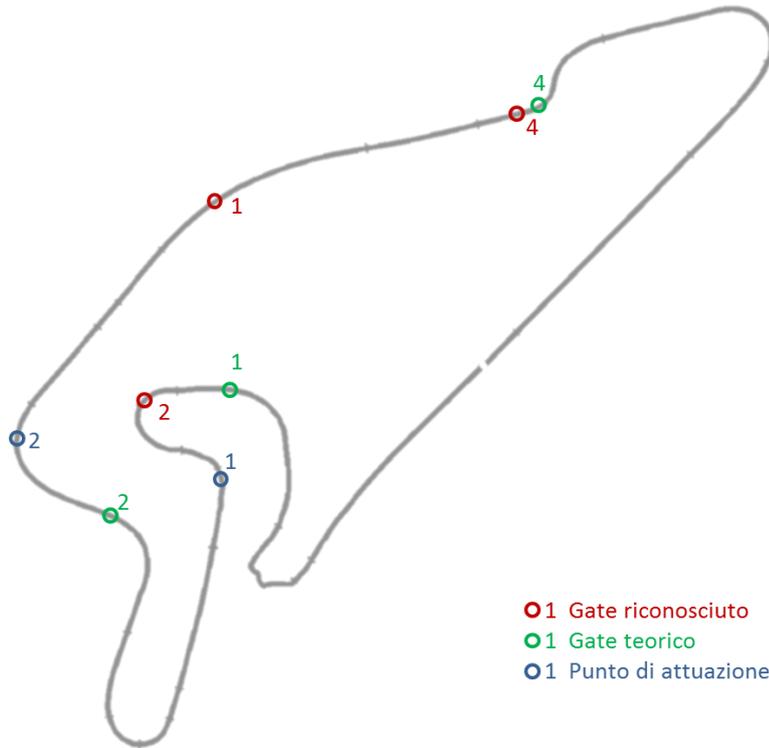


Figura 6.22: riconoscimento errato dei gate

I test effettuati in pista hanno infine confermato i risultati delle simulazioni e il funzionamento del sistema.

### 6.3.3.2 Stabilità energetica e termica

La strategia automatica è stata studiata in modo da permettere di avere un bilancio energetico sulla durata del giro e di giungere a una temperatura di regime all'interno dei limiti indicati per le celle.

La realtà non corrisponde però perfettamente a ciò che si può simulare durante i test e i giri di pista non sono ovviamente tutti uguali. Si deve infatti tenere in considerazione che l'energia recuperata non è perfettamente la stessa ad ogni tornata, ma che traffico e condizioni della pista influenzano il sistema. Per fare un esempio, l'eventuale presenza di un veicolo che rallenta la normale andatura, porta a una staccata ridotta e quindi a una minor energia immagazzinata. D'altro canto bisogna considerare che la potenza fornita in frenata dal motore elettrico è ridotta rispetto a quella necessaria per rallentare la macchina e che quindi un forte contributo è comunque dato dall'impianto frenante. Questo porta a una riduzione della variabilità dell'energia immagazzinata e ci consente di considerare che la frenata rigenerativa venga utilizzata, nella maggior parte dei casi, al massimo livello di potenza impostato.

Il dimensionamento del sistema è stato fatto considerando valori medi presi dalle gare precedenti, ma il sistema deve essere in grado di bilanciarsi nelle varie situazioni. Di conseguenza sono state valutate alcune soluzioni attuabili dal controllo, in modo automatico, o da un operatore, che si basano sulla modifica delle potenze in gioco e delle durate delle attuazioni.

Il primo parametro utilizzato per mantenere il bilancio energetico è la durata delle attuazioni manuali, che il pilota conosce in base ad un'indicazione presente sul volante. Tale tempistica, seppur fissata nel codice, può variare in base al bilancio energetico in modo automatico: se l'energia immagazzinata non è interamente compensata da quella in uscita, il controllo consente attuazioni manuali per un tempo maggiore; un consumo eccessivo produce invece l'operazione opposta.

Tale operazione è fatta in modo semplice sul codice utilizzando come variabile per il conteggio delle attuazioni manuali non il tempo ma l'energia: viene allocato per l'attuazione manuale un certo numero di kilo-joule, al quale si somma il risultato del bilancio. Ovviamente sono stati impostati dei valori massimi e minimi che impediscano una grossa variazione, che andrebbe a surriscaldare il pacco batterie.

Le attuazioni manuali diventano così un forte mezzo di bilancio energetico, che non inficia le performance del sistema, anzi permettono di sfruttarne a pieno le potenzialità. In alcuni casi potrebbe essere necessario aumentarne le proporzioni rispetto alla strategia automatica per massimizzarne quello che potremmo definire come "effetto cuscinetto". In tale ottica si possono sfruttare i 12 set di tempistiche di attuazione analizzati nel paragrafo 6.3.1, che possono portare da una strategia completamente automatica ad una completamente manuale.

Per agire maggiormente su tali equilibri si deve invece giocare sulle potenze. Dalle analisi effettuate, dai calcoli e dalle simulazioni si è arrivati a definire un rapporto tra potenza frenante e potenza in attuazione, impostato sul codice in modo da modificare l'una in funzione dell'altra. Tale rapporto può però essere modificato mediante uno switch rotativo presente in plancia. In tale modo, se per alcune condizioni particolari lo sbilancio energetico è troppo elevato per essere azzerato esclusivamente con la procedura automatica prima descritta, si può agire sul rapporto tra le potenze per ristabilire l'equilibrio.

Trovare un bilancio di tutti i parametri resta comunque un'operazione molto complessa per la quale sarebbero necessari maggiori test. Come caso estremo, nel caso di insuccesso di tutte le strategie, si deve arrivare ad una configurazione che porti ad avere più energia in ingresso che in uscita. Questo porterà alla ricarica completa del pacco, con conseguente riduzione della potenza di frenata effettuata in modo automatico dal controllo e quindi auto-bilanciamento del sistema.

Stesso discorso vale per le temperature. Dopo un primo livello di limitazione di potenza, arrivati alla soglia limite di temperatura, il sistema ridurrà le sue operazioni in modo da tornare a livelli accettabili.



# **Capitolo 7**

## **7. Conclusioni e possibilità di sviluppo**

Il percorso seguito in questi anni di dottorato ha portato a maturare le conoscenze del team nell'ambito delle powertrain ibride ed elettriche, partendo da un sistema relativamente semplice e raggiungendo un livello di complessità e di automatizzazione decisamente superiore.

La Sc08h è stata realizzata con un sistema volutamente semplice, visti i tempi molto ristretti ed essendo la prima vettura ibrida su cui si è lavorato. Le competenze del team in tale ambito erano limitate, ma non hanno impedito di ottenere ottimi risultati. In ogni caso si tratta di un sistema che lascia spazio a numerose evoluzioni, soprattutto per quanto riguarda la powertrain elettrica e il controllo. L'introduzione di un'unità che riceva il comando dall'acceleratore e che gestisca di conseguenza i due motori, porterebbe a miglioramenti sia sulle performance che sull'efficienza del sistema, garantendo una maggior automatizzazione di soluzioni attualmente attuate in modo manuale.

La Sc08h ha costituito comunque un ottimo punto di partenza per la vettura elettrica realizzata dalla Squadra Corse del Politecnico di Torino, oltre ad aver dato al team di progetto le basi necessarie ad affrontare un progetto più complesso, ovvero il sistema KERS della P5/5 Competizione Modificata.

Per quanto riguarda quest'ultimo progetto le possibilità di sviluppo restano notevoli, soprattutto per quello che riguarda l'automatizzazione del sistema. Le basse temperature, accompagnate dalla neve, riscontrate nell'ultimo evento della stagione al Nurburgring, tenutosi a fine ottobre, hanno portato all'annullamento della gara. Di conseguenza i test sulle ultime evoluzioni del sistema non possono considerarsi completi in quanto sono stati realizzati solo durante le prove libere della competizione.

In fase di progetto sono state fatte alcune scelte nell'ottica di mantenere una notevole elasticità nell'utilizzo del sistema, in modo da permettere una modifica delle strategie in qualsiasi istante. La possibilità di testare maggiormente il lavoro fatto consentirebbe di poter escludere alcune opzioni lasciate disponibili e di migliorare il controllo con delle scelte mirate all'ottimizzazione del sistema.

Resta comunque indiscussa la stabilità di un sistema che è stato in grado di svolgere il suo lavoro per l'intera durata della 24 ore, che si è corsa nel mese di maggio 2012, su di un tracciato che ha messo a dura prova la vettura sotto ogni aspetto.

In ultimo resta da considerare il forte apporto di competenze che questo progetto è stato in grado di fornire al team di progetto. Ci si è dovuti scontrare con numerosi problemi, sia sul campo tecnico che organizzativo, che ci hanno consentito di maturare notevolmente in campo professionale. Come la Sc08h era stato un ottimo punto di partenza per arrivare al progetto del sistema KERS della P4/5 Competizione Modificata, così quest'ultimo costituisce una solida base sulla quale far riferimento per possibili progetti futuri.

# Bibliografia

**Andrea, Davide. 2010.** *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Pack.* Norwood : Artech House, 2010.

*Applied Vehicle Dynamics Seminar* . **Roelle, Claude. 2008.** Oxford : s.n., 2008.

*Batteries for Electric Cars.* **The Boston Consulting Group. 2010.** Boston : The Boston Consulting Group, 2010.

**Electric and new energy championships commission. 2012.** *Electric Safety Requirements @ Electric and Hybrid Electric Racing Vehicles.* 2012.

**Fuhs, Allen E. 2009.** *Hybrid Vehicle and the Future of personal transportation.* s.l. : CRC Press, 2009.

**Giancarlo Genta, Lorenzo Morello. 2007.** *L'autotelaio.* Torino : Ata, 2007. Vol. Progetto dei sistemi.

**Glimmerveen, John H. 2004.** *Hands-On Race Car Engineer.* Warrendale : SAE, 2004.

**Katz, Joseph. 1995.** *Race car aerodynamics: Designing for Speed.* Cambridge : Bentley Publisher, 1995.

**Mehrda Ehsani, Yimin Gao, Ali Emadi. 2010.** *Modern Electric, Hybrid Electric and fuel Cell Vehicles, Fundamentals, Theoary and Design. 2nd Edition.* s.l. : CRC Press, 2010.

**Milliken, Wlliam F. Milliken. Douglas L. 1995.** *Race Car Vehicle Dynamics.* Warrendale : SAE, 1995.

**Monti, Francesco. 2010.** *Hybrid and electric vehicles: Powertrain architecture and sizing design.* 2010.

**Rolland Berger. 2012.** *Update to the Rolland Berger study on automotive LI-ION batteries.* Munich/Detroit : Rolland Berger, 2012.

**Ron Hodkinson, John Fenton. 2011.** *Lightweight Electric/Hybrid Vehicle Design*. s.l. : Butterworth Heinemann , 2011.

**Segers, Jorge. 2008.** *Analysis Techniques for Racecar Data Acquisition*. Warrendale : SAE, 2008.

**Smith, Carroll. 1978.** *Tune to win*. Fallbrook : Aero Publisher, 1978.