

UNIVERSITÁ DEGLI STUDI DI PADOVA  
FACOLTÁ DI INGEGNERIA  
DIPARTIMENTO DI ELETTRONICA E INFORMATICA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

# CONTROLLO DI TRAZIONE: METODI PER LO SVILUPPO DI ALGORITMI

A.A. 2010/2011

RELATORE: PROF. ALESSANDRO BEGHI  
CORRELATORE: ING. ALESSANDRO PASCOLI

LAUREANDO: NICOLA FLAUGNATTI 566576



*alla mia famiglia*



# Indice

<b>Sommario</b>	<b>1</b>
<b>I Il problema del controllo</b>	<b>3</b>
<b>1 Introduzione al controllo di trazione</b>	<b>5</b>
1.1 Storia dell'elettronica nei veicoli . . . . .	5
1.2 Perché il controllo di trazione . . . . .	6
1.3 Veicoli stradali e veicoli da competizione . . . . .	7
<b>2 Fisica dei veicoli</b>	<b>9</b>
2.1 Dinamica longitudinale . . . . .	9
2.2 Dinamica in curva . . . . .	11
2.3 Camber e rollio . . . . .	12
2.4 Trasferimenti di carico . . . . .	15
2.5 Sterzo . . . . .	15
2.6 Sistema sospensivo . . . . .	16
2.7 Aerodinamica . . . . .	18
2.8 Dinamica . . . . .	20
2.9 Il motore a benzina . . . . .	22
2.10 Controllo elettronico del motore . . . . .	27
<b>3 Sensori e attuatori</b>	<b>29</b>
3.1 Posizione albero motore . . . . .	29
3.2 Velocità . . . . .	30
3.3 Posizione angolare . . . . .	31
3.4 Accelerazione . . . . .	32
3.5 Velocità angolare . . . . .	33
3.6 Angolo di rollio . . . . .	33
3.7 Grandezze relative agli pneumatici . . . . .	34
3.8 Lambda . . . . .	35
3.9 Pressione . . . . .	36
3.10 Massa e flusso dell'aria . . . . .	37
3.11 Iniettori . . . . .	37
3.12 Candele e trasformatori ad alta tensione . . . . .	38
3.13 ETC . . . . .	39

<b>4</b>	<b>Sistemi di controllo</b>	<b>41</b>
4.1	Eventi da riconoscere . . . . .	41
4.2	Strategie e modalità di intervento . . . . .	46
<b>5</b>	<b>L'esperienza Formula Student</b>	<b>53</b>
5.1	L'evento . . . . .	53
5.2	Vetture realizzate . . . . .	54
5.3	L'esperienza pratica . . . . .	57
<b>II</b>	<b>Progettazione</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>Specifiche di progetto</b>	<b>63</b>
6.1	Obiettivi e vincoli di progetto . . . . .	63
<b>7</b>	<b>Strumenti e loro utilizzo</b>	<b>67</b>
7.1	Software . . . . .	67
7.2	Sistema di acquisizione . . . . .	75
7.3	Uso degli strumenti . . . . .	78
<b>8</b>	<b>Lavoro svolto e risultati ottenuti</b>	<b>81</b>
8.1	Modalità di intervento . . . . .	81
8.2	Evoluzione del modello . . . . .	82
	8.2.1 Blocchi funzionali realizzati . . . . .	83
	8.2.2 Prime simulazioni . . . . .	86
8.3	Controllo sullo slip ratio . . . . .	87
8.4	Controllo DRPM . . . . .	90
<b>9</b>	<b>Acquisizioni e simulazioni</b>	<b>93</b>
9.1	Formula SAE . . . . .	93
	<b>Conclusioni</b>	<b>100</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>103</b>

# Sommario

I mezzi di trasporto al giorno d'oggi sono sempre piú importanti e devono essere sempre piú efficienti e affidabili. Su auto e moto l'elettronica negli ultimi anni ha consentito di sviluppare una grande quantit  di sistemi che permettono di ridurre consumi e aumentare le prestazioni. Molto piú lentamente, ma con richiesta sempre piú alta, si stanno sviluppando sistemi di sicurezza attiva elettronici, ovvero controlli che sono in grado, entro certi limiti, di evitare condizioni di pericolo.

Lo scopo di questa tesi   di presentare il lavoro svolto presso Athena S.p.A., ditta veneta specializzata, tra l'altro, nella realizzazione di sistemi elettronici automotive.

Lo svolgimento della tesi ha riguardato principalmente lo studio della problematica del controllo di trazione e stabilit  in genere.   stata quindi approfondita la conoscenza di fisica dei veicoli e delle parti e sottosistemi che compongono auto e moto, oltre alle procedure di acquisizione ed elaborazione delle grandezze necessarie per le analisi.

Successivamente sono stati studiati una procedura e una base software per lo studio e la simulazione di nuovi sistemi di controllo, utilizzati per lo sviluppo di un controllo della trazione che   stato realizzato e testato su diversi veicoli.

Verr  inoltre fatto riferimento al progetto RaceUP Team, nato nel Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Universit  degli Studi di Padova, che ha permesso di studiare, approfondire e sperimentare in modo attivo le conoscenze di veicoli indispensabili allo svolgimento di questa tesi.

La tesi   divisa in due parti: la prima contiene un'introduzione alla teoria e alle considerazioni che stanno alla base del controllo della trazione, la seconda presenta il lavoro sperimentale svolto.





# Parte I

## Il problema del controllo



# Capitolo 1

## Introduzione al controllo di trazione

In questo capitolo verrà introdotto il concetto di *controllo di trazione* che, a seconda delle diverse applicazioni, può avere diverse configurazioni e significati.

Non è facile definire in modo univoco un “controllo della trazione”, si può comunque affermare in modo generico che è un sistema che interviene in caso di slittamento degli pneumatici e migliora quindi le caratteristiche di trazione di un veicolo. A partire dagli anni '70 quando sono nati i primi sistemi di controllo elettronici, sono stati sviluppati dispositivi con caratteristiche e prestazioni diverse a seconda del veicolo di destinazione, ma anche sulla base di esigenze di mercato. Lo sviluppo della tecnologia degli ultimi anni ha permesso di utilizzare un numero sempre maggiore di sensori e attuatori e di intervenire sempre più rapidamente per cui, molto spesso, non si controlla solo il semplice slittamento delle ruote, ma anche la stabilità dell'intero veicolo.

### 1.1 Storia dell'elettronica nei veicoli

Fino agli anni '50 la totalità dei collegamenti elettrici presenti in un veicolo era utilizzata per le luci e le segnalazioni, per gestire l'accensione delle candele e per il motorino di avviamento. Negli anni successivi sono stati introdotti i primi sistemi per la gestione elettronica della sola accensione e successivamente anche dell'iniezione. Questi sistemi necessitavano di alcuni sensori per il loro funzionamento, in particolare quello per determinare la posizione dell'albero motore. La complessità dei sistemi elettronici e la quantità di sensori utilizzati è cresciuta di pari passo con lo sviluppo delle tecnologie e dei processi produttivi dell'elettronica.

Un altro passo in avanti è stato fatto con l'introduzione di sistemi di comunica-

zione fra le diverse centraline e sottosistemi, inizialmente attraverso semplici linee codificate in PWM e successivamente attraverso complessi e robusti bus come il CAN.

Mentre la gestione elettronica del motore é stata subito adottata molto rapidamente da tutti i produttori di autoveicoli, i sistemi di sicurezza come ABS, TCS, ESP<sup>1</sup> o altri analoghi, iniziano solo in questi anni a prendere piede nella produzione di serie. É solo da una decina di anni che, per esempio, l'ABS é di serie in tutti i veicoli commercializzati in Europa; al giorno d'oggi la maggior parte delle utilitarie non ha come dotazione di serie, e spesso nemmeno come dotazione opzionale, altri sistemi elettronici per migliorare la guidabilit  e la stabilit . Nei motoveicoli l'introduzione di sistemi elettronici di controllo é ancora pi  lenta e quasi totalmente limitata al motorsport.

## 1.2 Perché il controllo di trazione

Lo slittamento degli pneumatici pu  essere controllato per raggiungere principalmente due obiettivi, a volte contrastanti:

- Sicurezza
- Prestazioni

Il controllo ideale é quello che é in grado di raggiungere al meglio entrambi questi obiettivi.

### Sicurezza

É un aspetto fondamentale nei veicoli di serie. Un controllo "sicuro" interviene quando, per distrazione o inesperienza, il guidatore porta il veicolo in condizioni limite o quando, per esempio variazioni improvvise del fondo stradale non possono essere corrette rapidamente nemmeno da un guidatore esperto.

In un'auto a trazione posteriore, per esempio, accelerando in curva, é possibile che le ruote motrici perdano aderenza e l'auto si porti in una condizione di sovrasterzo che, se non corretta, pu  portare a un testacoda. Questa situazione pu  essere corretta togliendo prontamente "potenza" alle ruote motrici in modo da far loro riacquistare aderenza. Questa operazione pu  essere facilmente eseguita da un controllo elettronico, operando per esempio sull'alimentazione del motore. Un controllo pi  complesso pu  anche operare frenando singolarmente le ruote in modo

---

<sup>1</sup>vedi Capitolo 4.2

da far riacquistare stabilità al veicolo eventualmente fermandolo in sicurezza. In un motociclo, una brusca partenza può portare al ribaltamento del veicolo. Diminuendo adeguatamente la coppia alla ruota motrice, è possibile evitare questa situazione.

### **Prestazioni**

Quando l'obiettivo principale del controllo non è di far rimanere il veicolo in sicurezza sulla strada, ma di percorrere, per esempio, una curva nel minore tempo possibile o di guadagnare decimi partendo da fermi, è chiaro che il sistema di controllo debba intervenire in modo sostanzialmente diverso.

## **1.3 Veicoli stradali e veicoli da competizione**

La destinazione d'uso di un veicolo può più facilmente far capire quali siano le effettive caratteristiche di sicurezza e prestazioni richieste da un controllo elettronico di trazione.

### **Veicolo stradale**

Nei veicoli destinati all'uso quotidiano lo scopo di un controllo di trazione è quello di garantire a un qualsiasi guidatore di evitare situazioni di pericolo. Il controllo resta disattivato per la quasi totalità del tempo e interviene solo in situazione di pericolo. Il guidatore può quindi ignorare l'esistenza del controllo e non deve affidarsi al suo intervento durante la guida, ma essere solo consapevole che, in caso di emergenza, potrebbe evitarli un testacoda o una caduta.

Uno degli usi del controllo di trazione nei veicoli stradali è quello di agevolare il movimento su fondi a scarsa aderenza. Anche in questo caso, lo stile di guida non deve essere di norma differente da quello che si terrebbe sullo stesso veicolo in assenza di controlli, il sistema interverrà facendo muovere il veicolo nel modo più efficace e sicuro possibile. Ovviamente e soprattutto nei veicoli a trazione posteriore, solitamente di grossa cilindrata, il controllo della trazione può evitare pericolose sbandate.

In certi veicoli stradali particolarmente sportivi, spesso i controlli di trazione vengono affinati in modo da risultare oltre che sicuri anche prestanti ma con ovvie limitazioni dovute alle regolamentazioni sulla produzione dei veicoli e al fatto che comunque il destinatario del veicolo può non essere un esperto pilota.

Sostanzialmente un controllo di trazione su un veicolo di serie deve essere innanzitutto sicuro, robusto e affidabile e, solo secondariamente prestante.

#### **Veicolo da competizione**

Un controllo progettato per un veicolo da competizione può essere sostanzialmente diverso da quello di serie, in quanto si presuppone che il pilota abbia una certa esperienza di guida e quindi possa sfruttare attivamente il controllo. Infatti, per esempio, in uscita di curva potrebbe aprire a fondo l'acceleratore confidando sul fatto che l'eccesso di coppia venga gestito dall'elettronica. Proprio perché il pilota utilizza attivamente il controllo e può avere uno stile di guida differente da altri piloti, il TC deve essere facilmente e velocemente tarabile anche durante la guida. Questo implica che la stima delle condizioni ambientali che, in un veicolo di serie deve essere svolta automaticamente dal sistema elettronico, viene spesso e quasi totalmente svolta dal pilota e/o dall'ingegnere di pista, che modifica manualmente alcuni parametri di taratura del sistema elettronico.

#### **Motoveicoli**

Quanto sopra esposto è sicuramente valido anche per i motoveicoli ma, in questo caso, le richieste di sicurezza sono maggiori, anche per le competizioni. Un controllo mal funzionante potrebbe infatti essere causa e non prevenzione di una caduta. Inoltre, mentre gli autoveicoli da competizione sono sostanzialmente diversi da quelli di serie, per quanto riguarda i motoveicoli, la maggior parte delle competizioni sono riservate a moto sostanzialmente non modificate o comunque con grosse limitazioni sulle modifiche delle caratteristiche dei sistemi elettronici. Nelle competizioni in cui i regolamenti permettono grosse possibilità di sviluppo dell'elettronica, la complessità e l'uso di sistemi di controllo della trazione è analogo se non superiore a quello degli autoveicoli. Nella produzione di serie invece logiche commerciali ed economiche non hanno ancora permesso una grossa diffusione di questi sistemi.

# Capitolo 2

## Fisica dei veicoli

In questo capitolo verranno descritte le grandezze fisiche e le forze che agiscono sui veicoli, in particolare quelle che coinvolgono la trazione. Verranno presi in considerazione soprattutto auto e moto con motore a iniezione a benzina.

### 2.1 Dinamica longitudinale

Il movimento di un veicolo é il risultato delle forze agenti sul suo centro di gravitá. Si possono banalmente raggruppare le diverse forze in due gruppi, a seconda del loro verso effettivo: quelle concordi al verso del moto come *forze di accelerazione* e quelle opposte come *forze di frenatura*.

L'unica vera forza di accelerazione é quella generata dal motore.

Le forze di frenatura sono invece dovute a diversi fattori:

- Attriti all'interno del motore e negli organi di trasmissione
- Energia dissipata dal pneumatico per attrito e deformazione
- Energia dissipata per la deformazione in tutti gli organi di trasmissione
- Utilizzo dei freni

Esistono poi altre forze che non possono essere incluse a priori in uno dei due gruppi ma il cui verso puó variare e sono dovute a:

- Inerzia dovuta alla massa del veicolo
- Inerzia delle componenti rotanti del veicolo (albero motore, alberi e componenti di trasmissione, ruote)
- Forze aerodinamiche

- Pendenza della strada

É possibile semplificare il sistema considerando solo la coppia motrice, le inerzie e gli attriti fondo stradale/pneumatico e studiando una singola ruota motrice.

In condizione di non slittamento e per una ruota ideale, non deformabile si può scrivere

$$F = \frac{M_t - I\dot{\omega}}{R} \quad (2.1)$$

$F$  é la forza complessiva di trazione a cui, in questo esempio, é sottoposto il centro di gravitá posizionato al centro della ruota. Per restare in condizione di non slittamento  $F < \mu F_N$  con  $F_N$  forza normale applicata alla ruota e  $\mu$  coefficiente di attrito statico fra ruota e fondo.

$M_t$  é la coppia motrice applicata alla ruota corrispondente alla coppia generata dal motore moltiplicata per il rapporto di trasmissione determinato dalle riduzioni del cambio.

Con  $I$  si indicano i momenti di inerzia di tutte le masse rotanti dal motore alla ruota.  $\omega$  é la velocitá angolare della ruota e  $R$  é il suo raggio. La velocitá di avanzamento ( $V$ ) sará quindi pari alla velocitá angolare moltiplicata per il raggio della ruota.

Considerando invece una ruota reale con uno pneumatico di gomma, é necessario considerare anche la sua deformazione. In una ruota ideale infatti, la zona di contatto con il fondo é limitata a una linea, in una ruota reale, lo pneumatico si deforma estendendo la zona di contatto a una superficie. É necessario quindi introdurre una nuova grandezza, il raggio di rotolamento  $R_R$ , definito genericamente dal rapporto  $\frac{V}{\omega}$ . In condizioni di velocitá costante, il raggio di rotolamento ( $R_0$ ) sará banalmente la distanza fra il centro della ruota e il fondo (inferiore quindi al raggio geometrico). Quando viene applicato un momento, di accelerazione o frenante, si verifica che, a causa delle deformazioni, la velocitá dello pneumatico nella zona di contatto é diversa da quella nella periferia. Questo comporta che la velocitá di avanzamento della ruota vari in modo diverso rispetto alla velocitá di rotazione.

Questa differenza di velocitá viene rappresentata dallo *slip ratio longitudinale* che può essere definito come

$$\lambda = -\frac{V - \omega R_0}{V} \quad (2.2)$$

Questo parametro può assumere valori fra  $-1$ ,  $0$  e  $1$  e viene quindi spesso espresso in percentuale.

In generale l'analisi del comportamento di uno pneumatico in condizioni di trazione é molto complessa per cui vengono spesso utilizzati dei modelli macroscopici che



mettono in relazione il coefficiente di attrito fra ruota e fondo con lo slip ratio. Sebbene il comportamento dello pneumatico sia influenzato da moltissimi parametri, spesso dipendenti dalle condizioni a contorno, si possono generalmente distinguere tre regioni di lavoro dello pneumatico: non slittamento, transizione e instabilità.

Dal grafico in Figura 2.1 si può notare che c'è un massimo della curva che corrisponde approssimativamente al valore di coefficiente di attrito statico. All'aumentare dello slip ratio il coefficiente di attrito aumenta inizialmente linearmente; in questa zona lo pneumatico rotola senza slittamento. Quando ci si avvicina al massimo valore di coefficiente di attrito, la curva non è più lineare, si entra nella zona di transizione e inizia gradualmente lo slittamento. Superato il valore di coefficiente di attrito statico, si entra nella zona di instabilità, nella quale, pur aumentando la velocità della ruota, non c'è aumento di trazione e il coefficiente di attrito tende ad assestarsi a un valore pressoché costante.

Spesso il grafico di Figura 2.1 viene espresso non in funzione del coefficiente di attrito ma, fissato un certo valore di carico normale alla ruota ( $F_z$ ), in funzione della forza di trazione  $F_x = \mu F_z$ . Anche se non è in genere vero, è possibile considerare questo grafico simmetrico rispetto all'origine per cui, a meno dei segni, il comportamento in frenata è del tutto simile a quello in accelerazione.

## 2.2 Dinamica in curva

Quanto accade sul battistrada quando viene generata la forza di trazione, si verifica, in modo analogo, anche nella generazione della forza laterale ( $F_y$ ). Si introduce l'angolo di deriva o *slip angle*  $\alpha$ , definito come l'angolo fra la direzione del moto e l'asse longitudinale della ruota o, riferito alle velocità longitudinale e laterale della

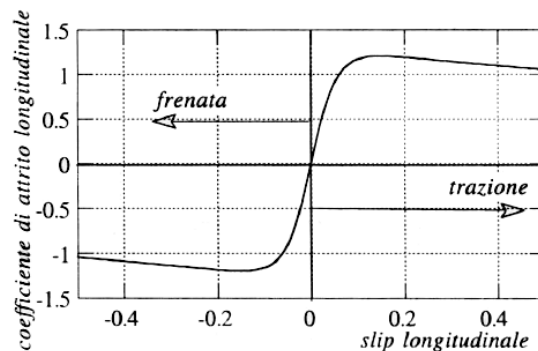


Figura 2.1: Andamento del coefficiente d'attrito longitudinale al variare dello slip ratio

ruota,

$$\alpha = \arctan -\frac{V_y}{V_x} \quad (2.3)$$

Analogamente al caso longitudinale é possibile rappresentare il coefficiente di attrito laterale e quindi forza laterale  $F_y$  in funzione ora dello slip angle, in assenza di slip longitudinale (Figura 2.2a).

Se si combinano i due effetti, si ottiene che, all'aumentare dello slip in una direzione, diminuisce la forza nell'altra (Figure 2.2a e 2.2b).

Spesso si riassume il comportamento di uno pneumatico in regime stazionario, come descritto fino a ora, attraverso l'ellisse di trazione che puó venire rappresentato come nel grafico in Figura 2.3. Si vede chiaramente che la risultante delle forze longitudinale e laterale  $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$  non puó mai uscire dal perimetro esterno dell'ellisse. In questo grafico in particolare, é anche possibile determinare le grandezze fino a ora introdotte in funzione l'una delle altre.

Oltre alle forze longitudinali e laterali, quando é presente uno slip angle, si genera al punto di contatto fra pneumatico e fondo un momento torcente, detto anche di allineamento in quanto si oppone alla variazione che ha generato l'aumento di slip angle.

## 2.3 Camber e rollio

Il comportamento dello pneumatico dipende fortemente anche da un altro fondamentale parametro cioé l'angolo di inclinazione tra l'asse verticale della ruota e la perpendicolare al piano stradale. In un'auto si parla di *camber* mentre in una moto

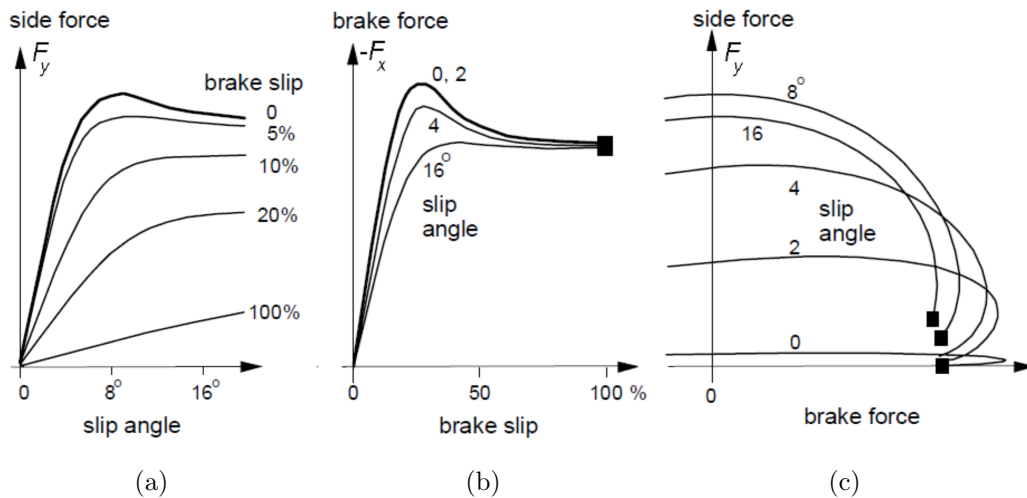


Figura 2.2: Relazioni fra  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $\alpha$  e  $\lambda$

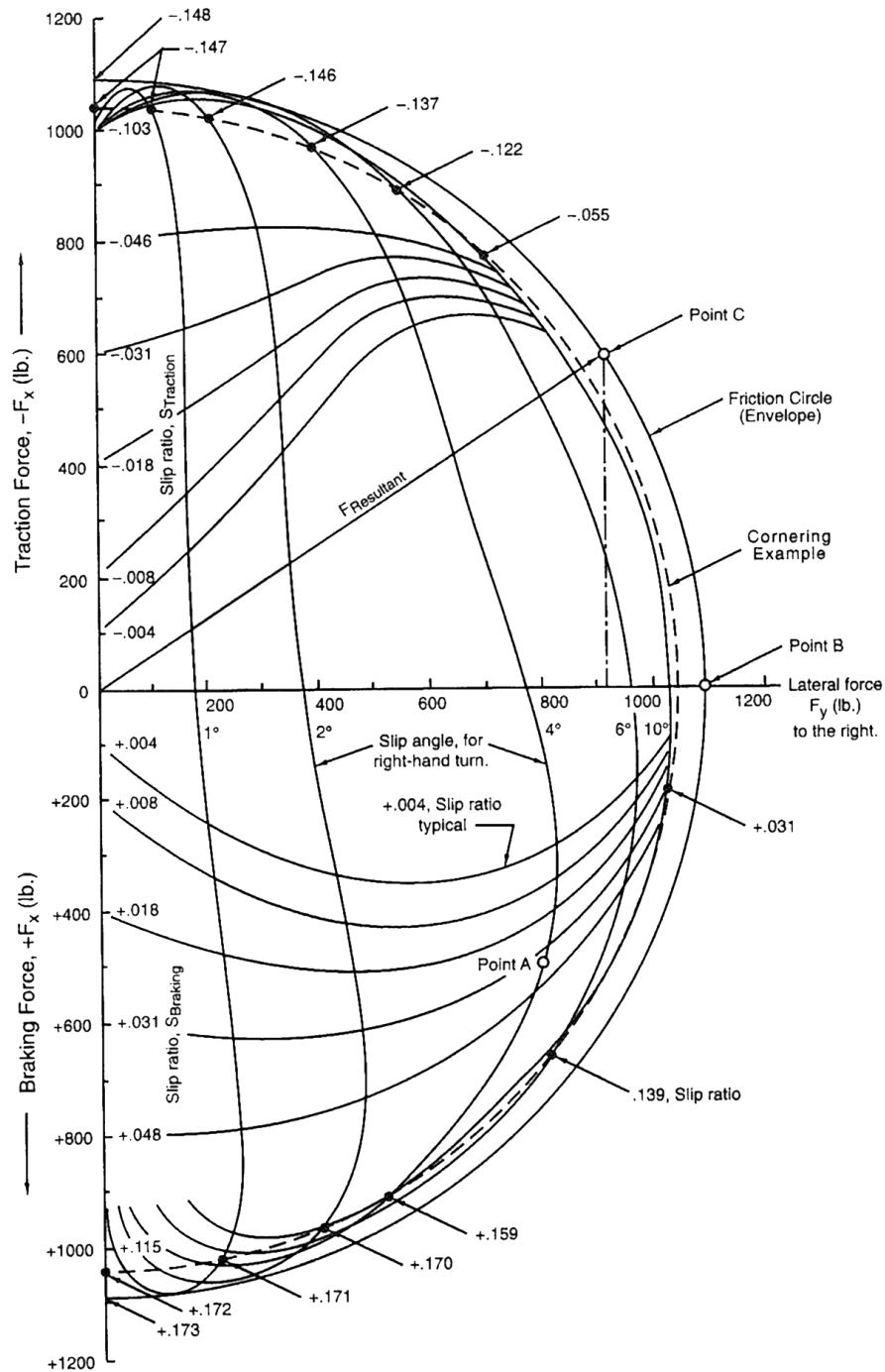


Figura 2.3: Esempio di ellisse di trazione

di angolo di rollio<sup>1</sup>.

Nell'autoveicolo il camber non raggiunge mai grandi valori per cui, in prima ap-

<sup>1</sup>In generale l'angolo di rollio é l'angolo formato dall'asse verticale della carcassa del veicolo rispetto alla perpendicolare al piano stradale. Nella moto questo angolo coincide con la definizione di camber per l'auto

### 2.3. CAMBER E ROLLIO

prossimazione, può essere trascurato il suo effetto nello studio del comportamento stazionario del veicolo. Nella moto invece l'angolo di rollio può raggiungere diverse decine di gradi e la sua variazione è molto importante ed è la causa principale della variazione di direzione del veicolo.

Aumentando l'angolo di rollio, infatti, la forza laterale per bassi valori di slip

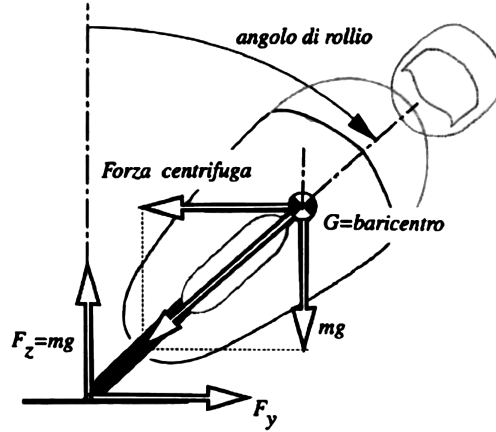


Figura 2.4: Equilibrio di forze nella moto con rollio

angle aumenta per poi assestarsi, all'aumentare dello slip angle, ai valori ottenuti con rollio nullo. Questo significa che, per mantenere la moto a un valore di rollio costante, è necessario che la forza laterale generata dallo pneumatico sia uguale alla forza centrifuga insistente sul centro di gravità della moto. Quando aumenta la forza centrifuga restando costante l'angolo di rollio, aumenta lo slip angle quindi macroscopicamente la moto inizia a girare.

Un altro effetto del rollio in una moto è la variazione del raggio di rotolamento

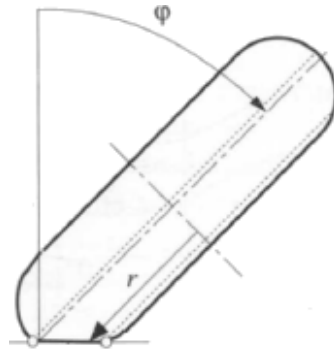


Figura 2.5: Raggio di rotolamento con rollio

a veicolo fermo ( $R_0$ ), infatti, a causa della forma degli pneumatici, la distanza fra

l'asse del mozzo ruota e il punto di contatto con il fondo stradale diminuisce all'aumentare dell'angolo di rollio. Inoltre, essendo di norma lo pneumatico anteriore piú piccolo del posteriore, l'entitá della diminuzione del raggio di rotolamento é in genere diversa, per cui al rollio si associa anche un fenomeno di beccheggio.

## 2.4 Trasferimenti di carico

Come si é visto nei paragrafi precedenti, la forza longitudinale e laterale generata alla ruota é proporzionale al carico normale alla ruota stessa. In una moto in cui le ruote sono allineate, la massa complessiva sará, a veicolo non accelerato su fondo non inclinato, distribuita sulle due ruote in modo inversamente proporzionale alla distanza dell'asse della ruota dal centro di gravitá. Lo stesso é valido anche per l'asse anteriore e posteriore di un'auto; in particolare ogni ruota di ciascun asse sará, in genere, sottoposta a metá del carico insistente sull'asse.

Chiamato  $p$  il passo del veicolo e  $b$  la distanza orizzontale fra l'asse posteriore e il centro di gravitá, le forze normali all'asse anteriore e posteriore saranno

$$F_{zf_0} = \frac{b}{p}mg \quad F_{zr_0} = \frac{p-b}{p}mg \quad (2.4)$$

Prendendo in esame un'auto, nel momento in cui il centro di gravitá viene sottoposto a un'accelerazione, il peso del veicolo si ridistribuisce nella direzione opposta all'accelerazione stessa. Sempre considerando lo stesso sistema per l'Equazione 2.4, e chiamando  $h$  l'altezza del centro di gravitá rispetto al fondo stradale e considerando che il veicolo stia accelerando con un'accelerazione pari a  $a = \frac{dV}{dt}$ , le forze normali agli assi anteriore e posteriore diventano

$$F_{zf} = F_{zf_0} - \frac{hma}{p} \quad F_{zr} = F_{zr_0} + \frac{hma}{p} \quad (2.5)$$

Ragionamenti analoghi si possono fare in un'auto per le accelerazioni laterali dove al posto del passo si sostituisce la carreggiata.

## 2.5 Sterzo

Sia nell'auto che nella moto lo sterzo é il comando usato dal guidatore per far cambiare direzione al veicolo. Oltre a questo evidente effetto, la variazione dell'angolo di sterzo provoca altri effetti minori la cui entitá dipende dalla geometria degli pneumatici e da come la ruota é vincolata al resto del telaio.

Nell'automobile il cambiamento di direzione viene imposto dal guidatore che, attra-

verso lo sterzo, modifica l'orientamento del piano longitudinale alla ruota rispetto al piano longitudinale del telaio. L'angolo effettivo di sterzata sarà quindi proporzionale e determinato principalmente dall'angolo di sterzo. Anche nella moto la variazione dell'angolo di sterzo determina una variazione di direzione, tuttavia, una volta iniziato il cambiamento di direzione, la forza laterale generata alla ruota deve essere controbilanciata da un aumento della forza centrifuga che avviene abbassando il baricentro e quindi inclinando la moto. La forza laterale è molto sensibile alle variazioni di slip angle per cui, una piccola variazione di angolo di sterzo (qualche grado) comporta una grande variazione dell'angolo di rollio necessario a mantenere l'equilibrio che, provocando a sua volta un aumento dello slip angle, fa sì che l'angolo di sterzo possa restare basso.

Si considera ora un modello a due ruote allineate in cui solo la ruota anteriore può ruotare attorno al suo asse verticale; il centro di massa è posizionato fra le due ruote. Il modello si muove mantenendo il suo centro di massa in una circonferenza e l'asse passante per le due ruote tangente alla circonferenza. In questa condizione le forze laterali delle ruote moltiplicate per il braccio fra il centro ruota e il centro di massa sono uguali. Quando c'è più forza verso il retrotreno si dice che il veicolo è in sottosterzo, viceversa il veicolo è in sovrasterzo. Il modello appena considerato corrisponde di fatto a una moto, ma le stesse considerazioni valgono per un'auto valutando il bilanciamento fra l'asse anteriore e quello posteriore.

## 2.6 Sistema sospensivo

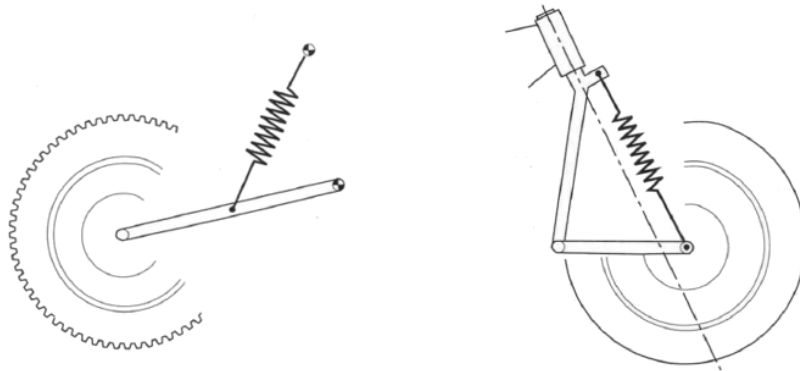


Figura 2.6: Esempio di sospensioni posteriore e anteriore di una moto

Tutti i veicoli reali sono dotati di sistemi sospensivi cioè sistemi che permettono al gruppo ruota di muoversi rispetto al telaio del veicolo con un certo numero di gradi di libertà. Esistono diverse configurazioni di tali sistemi. Il sistema sospensivo

serve ad assorbire le vibrazioni dovute alle imperfezioni del fondo stradale e a migliorare la stabilità complessiva del veicolo.

## Moto

All'avantreno sono di fondamentale importanza due misure definite dal costruttore: l'angolo di inclinazione dello sterzo  $\epsilon$  definito come l'angolo formato dalla normale al piano stradale con l'asse parallelo allo sterzo e l'avanzamento  $d$  ovvero la distanza fra l'asse dello sterzo e il centro ruota. A queste caratteristiche geometriche si associa la misura di avancorsa  $a_d$  definita come la distanza fra il punto di contatto al terreno e il punto di intersezione fra l'asse dello sterzo e il terreno. Se quest'ultimo punto precede il punto di contatto, l'avancorsa è negativo, altrimenti è positivo. Queste caratteristiche sono molto importanti in quanto, in presenza di rollio e di angolo di sterzo non nulli, il punto di contatto fra pneumatico e asfalto cambia<sup>2</sup> e, con avancorsa positivo, la moto tende ad alzarsi per cui per piccole perturbazioni l'effetto è stabilizzante. Vice versa se l'avancorsa è negativo.

La sospensione anteriore, a seconda dei diversi vincoli e bracci di leva che ne caratterizzano la tipologia, può modificare in modo più o meno sensibile l'avancorsa al variare dell'escursione dell'ammortizzatore.

Anche al posteriore sono possibili diverse configurazioni. Dinamicamente la rotazione del gruppo ruota posteriore, a cui è collegata la catena per la trasmissione del moto, provoca una piccola rotazione della ruota stessa, che si traduce in un piccolo aumento o diminuzione di velocità della ruota durante lo spostamento, pur rimanendo costante il regime del motore.

La variazione di estensione di uno o entrambi gli ammortizzatori provoca anche uno spostamento del centro di gravità sia in direzione longitudinale (beccheggio) sia in altezza (beccheggio e contemporanea variazione di estensione su entrambi gli ammortizzatori)

## Auto

Anche per l'auto sono presenti delle misure caratteristiche. In particolare, considerando il regime stazionario, convergenza e camber. La convergenza è un offset angolare di pari ampiezza e direzione opposta fra la ruota a destra e a sinistra rispetto all'angolo di sterzo della ruota. Questo angolo, in generale diverso fra l'asse anteriore e posteriore, serve a compensare in curva la differenza di slip angle fra le ruote anteriori che sterzano e posteriori generalmente non sterzanti.

---

<sup>2</sup>Per piccole variazioni si suppone che l'avancorsa non cambi in modo rilevante

Il camber é l'inclinazione dell'asse verticale della ruota rispetto alla normale al fondo stradale. Questo angolo, di fatto equivalente all'angolo di rollio definito per i motoveicoli, ha effetti sulla superficie di contatto dello pneumatico che, a differenza del motoveicolo, ha sezione piatta sul perimetro esterno. Ne consegue che, per piccoli angoli di camber, lo pneumatico é in contatto con il fondo per tutta o quasi tutta la sua larghezza anche se con un carico non necessariamente costante, la cui entità e distribuzione lungo la larghezza dello pneumatico dipende anche dall'angolo di camber.

Modificando questi angoli all'asse anteriore e/o posteriore si può quindi intervenire sulla tendenza al sovrasterzo o sottosterzo.

Anche per l'auto esistono diversi cinematismi utilizzati per collegare il gruppo ruota al telaio. Si possono individuare per una generica ruota altri due angoli caratteristici: il caster, ovvero l'inclinazione dell'asse verticale del portamozzo rispetto alla normale al fondo stradale in senso longitudinale e il king pin, ovvero l'inclinazione dell'asse verticale del portamozzo rispetto alla normale al fondo stradale sul piano laterale. L'effetto del caster é analogo a quello dell'avanzamento per la moto. Anche il king pin ha lo stesso effetto, però in direzione perpendicolare. L'entità di questi angoli, assieme alle lunghezze dei bracci delle varie parti che compongono il sistema sospensivo, provocano, al variare dell'estensione dell'ammortizzatore, variazioni dei parametri di camber e convergenza. Come per la moto, anche per l'auto la variazione di estensione delle sospensioni provoca uno spostamento del centro di gravità del veicolo.

Un altro parametro determinato dalla geometria del sistema sterzante é l'angolo di Ackerman che, durante la sterzata, provoca un cambiamento di direzione di entità differente fra la ruota sinistra e la destra. Questo comportamento é giustificato dal fatto che le ruote sinistra e destra percorrono raggi diversi.

## 2.7 Aerodinamica

Un veicolo che si muove é sottoposto alle forze generate dall'aria che esercita una pressione sulle superfici del veicolo. L'analisi dettagliata dell'aerodinamica é solitamente molto complessa e alcuni fenomeni sono ancora in fase di studio.

Si può comunque riassumere l'effetto dell'aria su parti o sull'intero veicolo attraverso i coefficienti di lift e drag ( $c_l$  e  $c_d$  oppure  $c_z$  e  $c_x$ ). Questi coefficienti sono valori adimensionali che rappresentano la pressione esercitata su una superficie che hanno come effetto la generazione di forze lungo l'asse verticale (lift) e longitudinale



(drag). Per determinare le forze si utilizza l'equazione

$$F_{a_{z,x}} = c_{z,x} \frac{1}{2} \rho V^2 A_{z,x}$$

dove con i pedici  $_{z,x}$  si indicano gli assi verticale e longitudinale del veicolo,  $\rho$  é la densità dell'aria,  $V$  é la velocità dell'aria rispetto al veicolo e  $A$  é la superficie su cui viene applicata la pressione dell'aria.

Le forze aerodinamiche si sviluppano sia per il contatto dell'aria su una superficie che per effetto suolo. Il fondo di certe auto infatti é costruito in modo da accelerare il flusso d'aria che comporta, per il principio di Bernoulli, una diminuzione di pressione sotto all'auto che genera una forza verso il basso.

La presenza di forze aerodinamiche si ripercuote sulla dinamica longitudinale e laterale. Nelle moto, nei veicoli stradali e in generale per le auto turismo, l'effetto piú rilevante é il drag che può essere visto come una forza  $F_a$  applicata a un'altezza  $h_a$  rispetto al suolo che, oltre a creare una forza opposta al moto pari a  $F_a$ , provoca un trasferimento di carico verso il posteriore del veicolo per cui la formula 2.5 diventa

$$F_{zf} = F_{zf_0} - \frac{hma + h_a F_{a_x}}{p} \quad F_{zr} = F_{zr_0} + \frac{hma + h_a F_{a_x}}{p} \quad (2.6)$$

Nei veicoli ad alte prestazione e in particolare nei prototipi e nelle vettura formula, anche il lift diventa un fattore fondamentale. Nelle competizioni automobilistiche dove le velocità sono molto alte e si cercano di ottenere grandi forze di trazione, si applicano appendici aerodinamiche che rendono il coefficiente di lift negativo. Mentre per un'auto tipo turismo si riescono a ottenere carichi aerodinamici pari a circa il 10%-20% del peso del veicolo, in prototipi e formula si ottengono carichi anche di alcune tonnellate.

In questi casi si eseguono test sperimentali o simulazioni numeriche che permettono di determinare i coefficienti  $c_x$  e  $c_z$  calcolati sull'intero veicolo o sugli assi, in funzione di diverse configurazioni del veicolo, in modo da permettere di calcolare direttamente le forze aerodinamiche normali a ciascuna ruota.

In molte auto stradali e in genere nelle moto, il coefficiente di lift é leggermente positivo con un conseguente alleggerimento all'aumentare della velocità. Spesso si trascura questo effetto in quanto é irrilevante rispetto a quello prodotto sull'asse longitudinale. Nella moto i due effetti portano alla tendenza al ribaltamento ad altissime velocità.

Ai fini dello studio del controllo di trazione é quindi necessario determinare per quali categorie di veicoli l'effetto aerodinamico produce forze di entità confrontabile con quelle coinvolte nella generazione della trazione e in questi casi valutare

se e in che modo tenerle in considerazione.

## 2.8 Dinamica

Quanto fin'ora descritto é il comportamento del veicolo in situazione stazionaria, ovvero non é stato considerato il transitorio che ha portato il veicolo nel particolare stato fisico considerato. Nel momento in cui una qualsiasi massa del veicolo, e quindi anche il veicolo stesso, viene sottoposta a una forza non costante, questa si sposterá in qualche direzione, in funzione dei vincoli meccanici che la legano al resto del veicolo. Il gruppo funzionale piú importante dal punto di vista dinamico é il sistema massa-molla-ammortizzatore che forma le sospensioni. Per quanto riguarda invece l'intero veicolo, questo é di fatto un corpo con una massa distribuita in modo generalmente non uniforme, che puó ruotare attorno a tre assi.

### Gruppo sospensivo

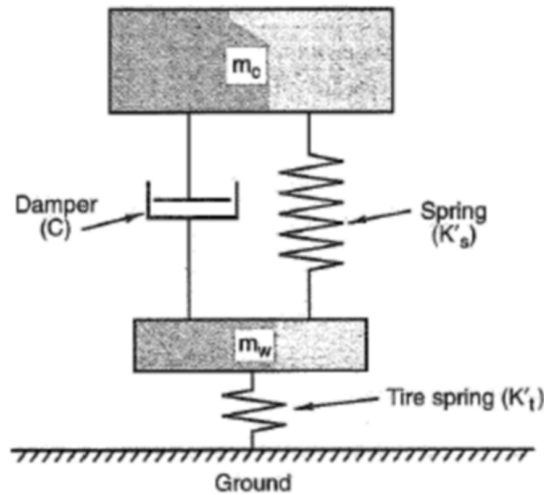


Figura 2.7: Rappresentazione del gruppo massa-molla-ammortizzatore di una ruota

In Figura 2.7, é rappresentato in modo semplificato il gruppo sospensivo di una ruota.  $m_c$  é la massa del veicolo che ha effetto sul gruppo preso in considerazione, quindi pari a circa  $1/4$  della massa totale di un'auto o circa  $1/2$  per una moto.  $m_w$  é la massa della ruota. Fra le due masse c'è quello che viene comunemente detto "ammortizzatore", formato da una molla con una determinata costante elastica  $K'_s$  e l'ammortizzatore o smorzatore caratterizzato da una costante di smorzamento  $C$ . Nella quasi totalità dei veicoli, la molla é "avvolta" attorno allo smorzatore creando un unico componente.  $K'_t$  é la costante elastica dello pneumatico che viene quindi

rappresentato da un elemento elastico.

Il comportamento della molla della sospensione é grossomodo lineare tuttavia, in alcuni casi, si utilizzano configurazioni di molle per cui, in funzione dell'escursione della sospensione, la costante elastica cambia. In ogni caso, quando ci si avvicina alla completa compressione, il comportamento perde linearitá. Anche il comportamento dello smorzatore non é in genere lineare e spesso sono definite due costanti per cui il comportamento é diverso quando la velocitá di escursione é alta o bassa. In un determinato punto di lavoro comunque é possibile definire delle frequenze di oscillazione naturale per la carcassa del veicolo e per la ruota. Mentre la seconda é importante per l'assorbimento delle asperitá del terreno, la prima, piú lenta, ha grandi implicazioni nelle variazioni di assetto dell'intero veicolo.

## Dinamica del veicolo

Se si considera il veicolo a terra in condizione di non slittamento, questo puó rollare o beccheggiare attorno agli stessi assi definiti nel Paragrafo 2.6. L'imbardata, intesa rispetto all'angolo della traiettoria percorsa, invece é possibile solo quando almeno un asse del veicolo sta slittando.

Per quanto riguarda il movimento di beccheggio puro, la sua velocitá é determinata dalle forze di reazione delle sospensioni descritte nel paragrafo precedente, e dalla massa dell'intero veicolo che ha una sua inerzia. Questo é sicuramente valido sia per un'auto che per una moto. Per quanto riguarda invece il rollio, nell'auto si possono fare le stesse considerazioni fatte per il beccheggio, nella moto invece, la velocitá di rollio é determinata quasi esclusivamente dalle forze inerziali dovute alla massa del veicolo e dagli effetti giroscopici delle ruote.

Quando gli pneumatici sui due assi di un veicolo generano forze laterali molto diverse fra loro (questo accade durante lo slittamento), il veicolo é sottoposto a un momento di imbardata attorno a un centro di rotazione la cui posizione dipende dalla distribuzione della massa del veicolo, dalla distanza fra l'asse anteriore e posteriore e dalle forze generate dagli pneumatici. Questo momento é contrastato dal momento inerziale dovuto alla massa del veicolo stesso.

## Altre considerazioni sui motoveicoli

Essendo le masse delle diverse parti che compongono una moto confrontabili fra loro ed essendo la cinematica molto piú complessa rispetto a un'auto, spesso non é possibile trascurare alcuni effetti che in un'auto vengono "assorbiti" dalla grande massa. In particolare il movimento dei pistoni e degli organi rotanti di un motore motociclistico genera degli effetti giroscopici che vanno a modificare la dinamica di

beccheggio e rollio, in funzione della velocità di rotazione del motore stesso.

L'analisi dinamica di un veicolo può essere trattata in modo semplificato utilizzando i modelli e le considerazioni fisiche appena descritte, ma a volte è necessario considerare anche le non idealità, per esempio del telaio che non è un corpo rigido, come anche i giochi e le tolleranze di qualsiasi componente del veicolo.

Questo è soprattutto valido per i motoveicoli, in quanto anche piccole perturbazioni possono avere grossi effetti sulla dinamica dell'intero veicolo a causa della loro piccola massa e provocare facilmente cadute.

## 2.9 Il motore a benzina

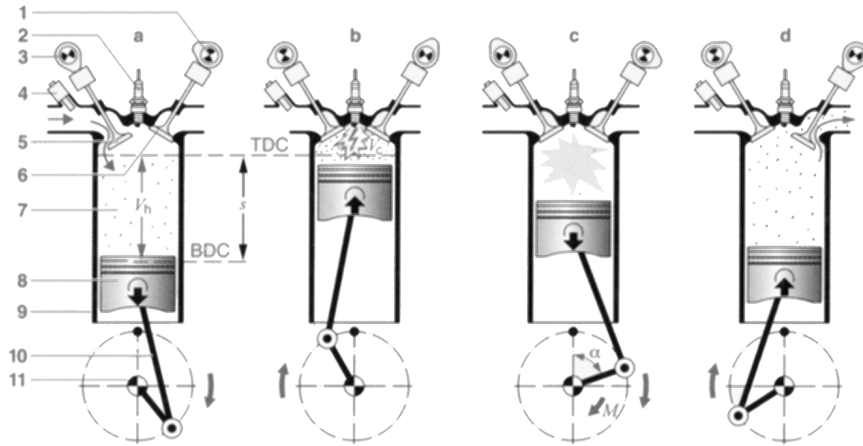


Figura 2.8: Fasi di un motore 4 tempi

Con riferimento alla Figura 2.8, il motore alternativo a combustione interna comandato è composto da una o più camere cilindriche (9) all'interno di ognuna delle quali scorre un pistone (8) collegato all'albero motore (11) attraverso un sistema a biella-manovella. Nella camera sono presenti due gruppi di condotti che permettono alla miscela aria-benzina di entrare (condotti di aspirazione) e ai gas prodotti dalla combustione di uscire (condotti di scarico). Per iniziare la combustione sono presenti una o più candele (2).

Quando il pistone si trova sul punto più alto del cilindro si dice che si trova al punto morto superiore (PMS o, in inglese, TDC) mentre nel suo punto più basso si dice essere al punto morto inferiore (PMI o BDC).

Si prende ora in esame un singolo cilindro di un motore a quattro tempi. Il ciclo

motore si divide appunto in quattro fasi: aspirazione, compressione, espansione e scarico.

Durante la prima fase solo le valvole di aspirazione (5) sono aperte e il pistone, muovendosi dal PMS al PMI, crea una depressione che permette alla miscela aria-benzina di entrare. Nella seconda fase il pistone risale al PMS a valvole chiuse comprimendo la miscela che, a questo punto, entrando nella terza fase, viene incendiata dalla candela per cui in camera di combustione (7) c'è un aumento di pressione che spinge il pistone al PMI. Alla successiva risalita del pistone, viene aperta la valvola di scarico (6) e i gas generati nella combustione possono uscire, spinti dal pistone. Un ciclo completo avviene quindi in due rivoluzioni dell'albero motore.

Nei motori a più cilindri la biella (10) di ciascun pistone è collegata allo stesso albero motore in modo che (generalmente) nessun cilindro si trovi contemporaneamente nella stessa fase di funzionamento di un altro.

In genere per identificare la posizione istantanea del pistone in un cilindro e la sua fase di funzionamento si fa riferimento alla posizione angolare dell'albero motore rispetto all'angolo nullo che è solitamente corrispondente alla posizione TDC in fase di espansione. Per un monocilindrico un ciclo motore completo dura quindi  $720^\circ$ . Per motori a più cilindri, un ciclo completo corrisponde ai gradi di rotazione dell'albero motore eseguite per riportare un pistone alla fase corrispondente alla precedente posizione nulla. Per ciascun cilindro, poi, il ciclo motore inizierà a un angolo pari ai gradi di un ciclo motore completo diviso per il numero di cilindri.

Nel motore a due tempi i condotti di aspirazione e scarico sono disposti sul cilindro in modo da essere aperti e chiusi alternativamente dal pistone stesso. In alcuni motori sono presenti anche ulteriori valvole e pompe, non necessariamente comandate, che regolano l'ingresso e l'uscita dei gas. In questo tipo di motore la miscela viene aspirata, compressa, combusta ed espulsa in un singolo giro dell'albero motore.

Nonostante le differenze fra motori a due e quattro tempi siano evidentemente sostanziali, per quanto necessario allo studio di questa tesi, le due tipologie di motore possono essere confuse, a meno della durata del ciclo motore. Se non diversamente specificato, si farà successivamente riferimento ai motori a quattro tempi in quanto i motori a due tempi possono essere visti come un caso particolare di quelli a quattro.

### **Rapporto stechiometrico**

Il fenomeno che permette il funzionamento del motore è la combustione della miscela aria-benzina. Il rapporto stechiometrico è verificato per 14.7 parti di aria e

una di benzina in massa. Spesso si utilizza l'indicatore  $\lambda$  che é definito come

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_0} = \frac{AFR}{14.7}$$

dove con  $AFR$  si indica il rapporto aria-benzina (Air Fuel Ratio) e assume quindi valore 1 quando il rapporto fra aria e benzina é stechiometrico. Un valore inferiore a 1 corrisponde a un eccesso di benzina, superiore corrisponde invece a un eccesso di aria.

Al variare del rapporto aria-benzina, variano la quantità di gas presenti allo scarico, le prestazioni e la temperatura del motore:

- $\lambda < 1$  Si dice che la miscela é grassa. In queste condizioni, per valori attorno allo  $0,8 \sim 0,9$  c'è un massimo del tasso di combustione che corrisponde alle massime prestazioni ottenibili dal motore. Allo scarico saranno presenti una grande quantità di monossido di carbonio e di idrocarburi. Strategie che utilizzano questi valori sono state utilizzate fino agli anni '70 e vengono tuttora utilizzate nei veicoli da competizione.
- $\lambda = 1$  Rapporto stechiometrico. Corrisponde al punto di lavoro dei convertitori catalitici. Proprio per questo motivo, a partire dagli anni '90, la quasi totalità dei veicoli, attraverso sistemi retroazionati sempre più complessi, funziona mantenendo il rapporto aria-benzina stechiometrico. La quantità di inquinanti allo scarico é modesta e viene abbattuta dal convertitore catalitico.
- $\lambda > 1$  Si dice che la miscela é magra. All'aumentare del valore di lambda aumenta la temperatura di combustione fino  $\lambda \approx 1,1$  in cui vi é il massimo di rendimento termico del motore. Le alte temperature favoriscono l'emissione

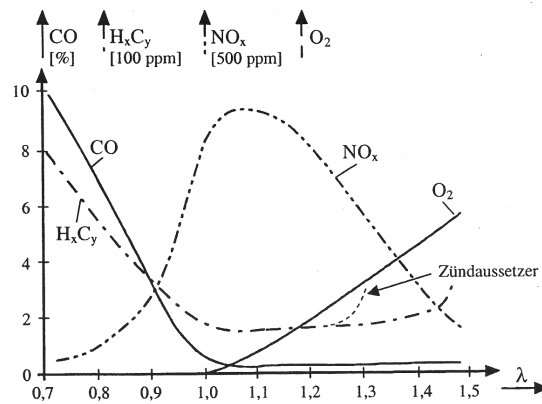


Figura 2.9: Composizione degli inquinanti allo scarico in funzione di  $\lambda$

di ossidi di azoto. Un ulteriore aumento di  $\lambda$  permette la diminuzione di temperature ed emissioni di ossidi di azoto oltre a favorire l'ovvia riduzione dei consumi. Le prestazioni diminuiscono e per valori superiori a  $1,3 \sim 1,5$  iniziano a esserci problemi di combustione. Strategie magre sono state utilizzate fino agli anni '90 oppure in nuovi sistemi mirati a diminuire il consumo di carburante.

## Sistema di alimentazione e formazione della miscela

Nei sistemi a iniezione di benzina la coppia motrice è determinata dalla quantità di miscela aria-benzina entrante nel cilindro che viene determinata dal guidatore attraverso l'acceleratore che comanda una valvola sui condotti di aspirazione. Se si considera un generico motore a quattro cilindri come in Figura 2.9 si possono individuare tre possibili posizionamenti degli iniettori. Con la lettera *a* si identifica il sistema a iniezione centrale in cui la benzina viene iniettata prima della valvola dell'acceleratore. Questo sistema molto semplice ed economico è stato gradualmente abbandonato in favore di sistemi più performanti e comunque economici come il multi-point o manifold injection (*b*) in cui nel condotto di aspirazione di ogni cilindro, a brevissima distanza dal cilindro, è presente un iniettore. Un'ulteriore evoluzione di questo sistema è l'iniezione diretta (*c*) in cui la benzina viene iniettata direttamente nella camera di combustione.

### Circuito di iniezione

Sebbene esistano molti sistemi per portare la benzina dal serbatoio alla camera di combustione, si possono identificare delle caratteristiche comuni.

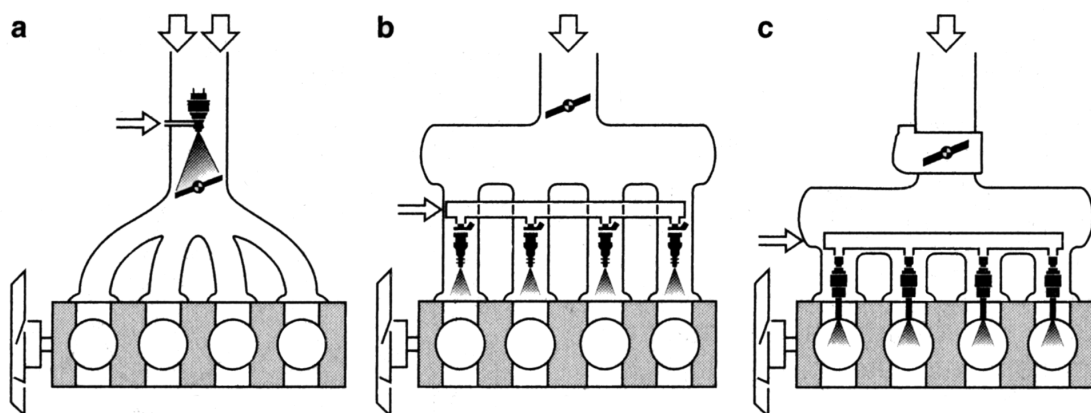


Figura 2.10: Possibili configurazioni dell'iniezione

Dal serbatoio la benzina viene estratta attraverso una o piú pompe che possono essere esterne o immerse nel serbatoio e portata agli iniettori. La pressione della benzina presente agli iniettori viene mantenuta costante da un regolatore di pressione. Nei motori a piú cilindri, posizionati in linea e vicini fra loro, gli iniettori vengono spesso collegati e alimentati attraverso un unico condotto che prende il nome di rail. A volte nei sistemi a iniezione nei condotti di aspirazione, viene posizionato un secondo rail di iniettori nei condotti ma a una distanza superiore oppure a monte della valvola dell'acceleratore.

### **Strategia di accensione/iniezione**

Con strategia di accensione/iniezione si intende la scelta del momento in cui viene aperto l'iniettore e del momento in cui viene accesa la candela. Il sistema piú intuitivo detto sequenziale prevede di iniettare la benzina in corrispondenza della fase di aspirazione e accendere la candela alla fine della fase di compressione di ciascun singolo cilindro. Questo sistema prevede che la centralina che gestisce accensione e iniezione conosca l'esatta fase di ciascun singolo cilindro. É però possibile, confondendo per esempio le fasi di compressione e scarico in due cilindri sfasati di  $360^\circ$ , iniettare in corrispondenza dell'abbassamento del cilindro e accendere la candela prima del PMS, ignorando quale sia l'effettiva fase del singolo cilindro. Risulta che, mentre in un cilindro la sequenza di iniezione e accensione é corretta, nell'altro verrà accesa la candela in fase di scarico e iniettata la benzina che resterà nel condotto di aspirazione fino al giro motore successivo in cui entrerà nel cilindro, assieme alla nuova carica, che a quel punto sarà correttamente in fase di aspirazione. Questo tipo di sistema veniva utilizzato quando l'elettronica non permetteva di riconoscere facilmente l'effettiva fase dei cilindri oppure per utilizzare un numero minore di trasformatori ad alta tensione o di driver per l'accensione e l'iniezione.

### **Angolo di accensione**

La combustione all'interno del cilindro avviene fra la fase di compressione e quella di espansione. É necessario un certo tempo, a partire dall'accensione della candela, perché la combustione sia completa. Per questo motivo é necessario che l'istante di accensione preceda il raggiungimento del PMS. L'angolo motore fra l'istante di accensione e il PMS é detto anticipo ed é considerato positivo quando l'accensione precede il PMS. La pressione che si sviluppa all'interno della camera di combustione aumenta in modo proporzionale all'angolo di anticipo. Un eccessivo angolo di anticipo tuttavia comporta un aumento di pressione tale da innescare l'auto-combustione della miscela che si manifesta come una vibrazione che può portare



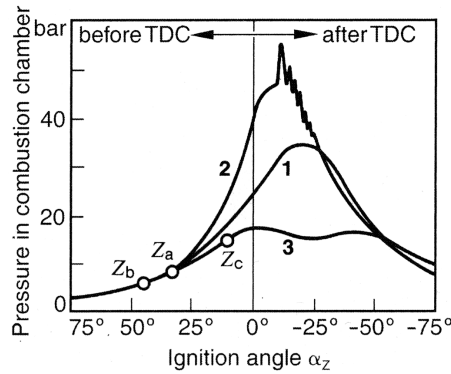


Figura 2.11: Variazione della pressione in camera al variare dell'anticipo

al danneggiamento del motore. Questo fenomeno viene detto battito o knock. A parità di regime e carico, la curva di coppia in funzione dell'angolo di anticipo risulta avere un punto di massimo. Diminuendo l'anticipo diminuisce la coppia mentre aumentandolo eccessivamente si rischia di incorrere nel battito.

## 2.10 Controllo elettronico del motore

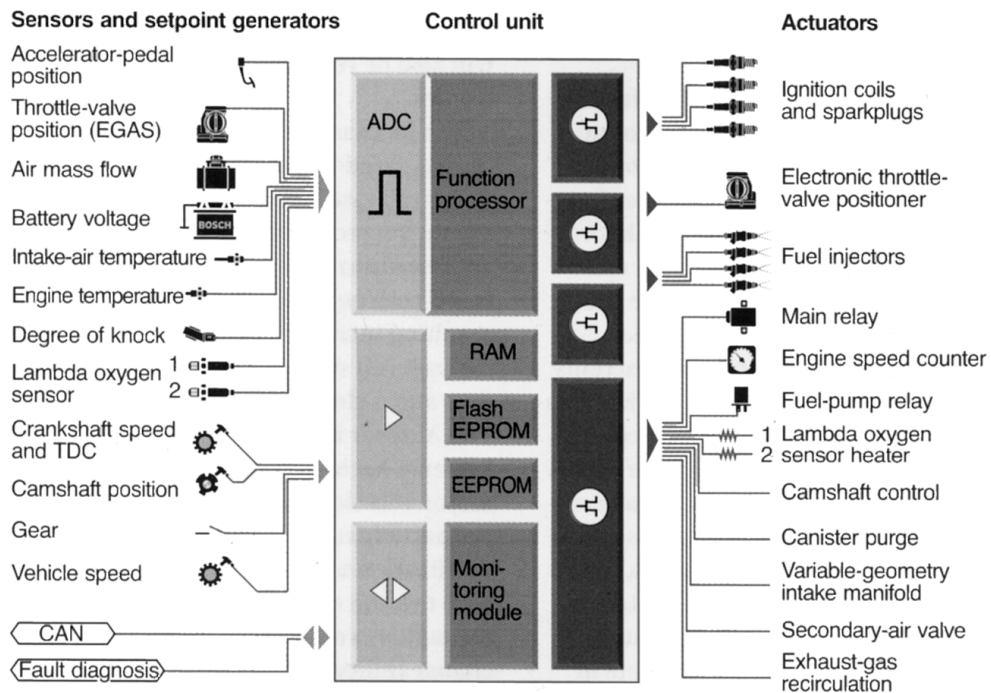


Figura 2.12: Schema di principio di una centralina motore

Una centralina elettronica, spesso chiamata per semplicità ECU<sup>3</sup>, è un sistema elettronico che analizza dei segnali provenienti da sensori o linee di comunicazione, li elabora e agisce su degli attuatori. La centralina che gestisce il motore in particolare legge la posizione dell'albero motore, la quantità d'aria che entra nel motore, la potenza richiesta dal guidatore e altri parametri e, leggendo lookup table e in genere analizzando i dati, accende candele e iniettori. Alcune centraline oltre a gestire queste funzionalità, possono comandare altre valvole e attuatori come per esempio un corpo farfallato motorizzato nei sistemi drive-by-wire. Un'altra importantissima funzionalità è l'esportazione dei parametri letti in ingresso o dello stato di funzionamento della centralina, attraverso linee di comunicazione per la visualizzazione sul cruscotto, per la diagnosi in caso di problemi o per scambiare dati con altre centraline.

### Protocolli e sistemi di comunicazione

Le diverse centraline elettroniche possono comunicare fra di loro e con cruscotti o dispositivi di visualizzazione attraverso diversi tipi di linee di comunicazione. I primi sistemi erano molto semplici e basati su linee codificate in PWM o in frequenza con grossi limiti di velocità e affidabilità. Erano quindi necessari molti conduttori fra i sistemi da collegare. La necessità di trasferire molti dati ha portato all'introduzione di protocolli seriali in cui con pochi conduttori è possibile scambiare una grande quantità di dati.

Con il tempo si sono affermati sistemi che utilizzano il bus CAN. Il bus CAN definisce un protocollo hardware molto robusto tuttavia non definisce nessun protocollo software. Nelle vetture di serie questo sistema di comunicazione viene utilizzato per interconnettere diversi dispositivi elettronici e sensori oppure per comunicare dati diagnostici agli operatori che si collegano al veicolo attraverso apposite interfacce. Mentre nel primo caso il formato del messaggio è proprietario del produttore di sensori o delle centraline elettroniche, per quanto riguarda la diagnostica, da alcuni anni tutte le auto di nuova produzione devono rispettare un preciso protocollo software.

Anche nei veicoli da competizione il bus CAN ha avuto grande successo e viene ampiamente usato ottenendo una grande riduzione della complessità degli impianti elettrici e un aumento delle possibilità e velocità di riconfigurazione dei vari sistemi.

---

<sup>3</sup>Electronic Control Unit

# Capitolo 3

## Sensori e attuatori

Sensori e attuatori sono l'occhio e la mano di un sistema elettronico. Il compito del sensore è quello di trasformare la grandezza fisica che si vuole conoscere in un segnale elettrico. Al contrario un attuttore esegue un'operazione meccanica quando attivato da un segnale elettrico.

La complessità dei sensori è aumentata con l'evoluzione dell'elettronica. I sensori più semplici convertono direttamente una quantità fisica in elettrica sfruttando fenomeni elettromeccanici, aumentando la complessità si possono trovare sensori che restituiscono sempre un segnale elettrico analogico ma linearizzato fino a sensori che restituiscono un segnale digitale o comunicano direttamente con un bus CAN non solo il valore fisico misurato ma anche parametri di taratura o configurazioni. L'elettronica che compie queste conversioni e digitalizzazioni viene inglobata all'interno dello stesso package del sensore.

Verrà ora descritto come vengono misurate, in ambito automotive, le grandezze fisiche di interesse motoristico e come funzionano e vengono controllati i principali attuatori utilizzati.

### 3.1 Posizione albero motore

È la grandezza fisica fondamentale per la gestione del motore. Viene misurata attraverso un sensore che legge una ruota fonica.

La ruota fonica è un disco che possiede attorno alla sua circonferenza, a distanza regolare, dei riferimenti che possono essere letti da un sensore. Per la lettura della velocità e posizione angolare del motore in genere si utilizza un sensore induttivo e una ruota fonica che presenta dei denti di materiale ferromagnetico. Il sensore induttivo è formato da un avvolgimento immerso in un campo magnetico generato da un magnete permanente. Il veloce passaggio del dente vicino al sensore provoca

la generazione di una tensione ai capi dell'avvolgimento. Si otterrà quindi una tensione alternata di frequenza proporzionale alla velocità di rotazione della ruota fonica che é collegata all'albero motore. Per determinare, oltre alla velocità, anche la posizione angolare dell'albero motore si usa rimuovere uno o piú denti dalla ruota fonica in modo da creare un riferimento che, dal momento che la variazione di velocità del motore é lenta rispetto alla velocità del motore stesso, viene interpretato dalla centralina che é quindi in grado di ricavare la posizione del motore. A volte possono essere utilizzati dei sensori non induttivi ma a effetto hall, che rilevano la variazione di campo magnetico, generato per esempio da un magnete permanente, dovuta al passaggio del dente metallico della ruota fonica vicino al sensore. Pur essendo il segnale fornito originariamente per effetto hall di tipo analogico, viene quasi sempre inserito un circuito che in base a una soglia prefissata dal costruttore, agisce su un'uscita di tipo open collector fornendo quindi un segnale digitale. Il vantaggio di questo tipo di sensore é quello di poter rilevare la presenza del dente della ruota fonica anche in condizioni stazionarie o con velocità particolarmente basse.

## 3.2 Velocitá

Per misurare la velocità delle ruote vengono utilizzati sistemi analoghi a quelli utilizzati per determinare la velocità del motore tuttavia la ruota fonica, ora solidale con la ruota di cui si vuole misurare la velocità, non presenta dei riferimenti che permettano di determinarne la posizione assoluta in quanto non necessari. Pur esistendo molte metodologie di rilevazione del movimento di una ruota fonica, alcune delle quali permettono anche di determinare il verso di rotazione sfruttando

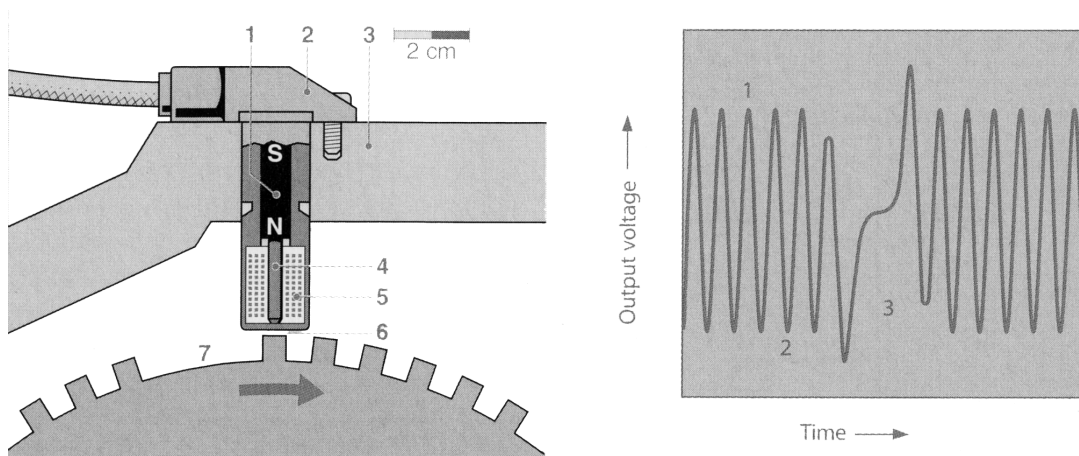


Figura 3.1: Sensore posizione albero motore e segnale generato

il principio degli quadrature encoder, in ogni caso la misura di velocità avviene basandosi sul tempo che passa fra due denti successivi.

Anche il sensore di fase del motore si basa su questo tipo di sensori, in questo caso però non si legge il passaggio del dente di una ruota fonica ma di una camma dell'albero che comanda le valvole che ruota a metà velocità rispetto all'albero motore.

Come ruota fonica spesso vengono utilizzati gli ingranaggi del cambio per determinare la velocità del motore a valle del sistema di trasmissione.

### 3.3 Posizione angolare

Per determinare la posizione del pedale o manopola dell'acceleratore, del manubrio o dello sterzo, di una valvola a farfalla, ecc. è necessario un sensore in grado di determinare con una certa precisione una quantità angolare. Uno dei sistemi prevede l'uso di potenziometri meccanici che variano quindi il valore di una resistenza in funzione dell'angolo da misurare. Questi sistemi hanno molti difetti come l'isteresi meccanica che non permette di discriminare correttamente piccole variazioni e il rapido invecchiamento che comporta errori di misura crescenti con il tempo. Sono quindi stati introdotti diverse tipologie di sensori contactless che sfruttano principi elettromagnetici.

Ognuna delle diverse tipologie si distingue oltre che per la complessità e il costo, anche per la precisione e il massimo range misurabile. In particolare per misurare

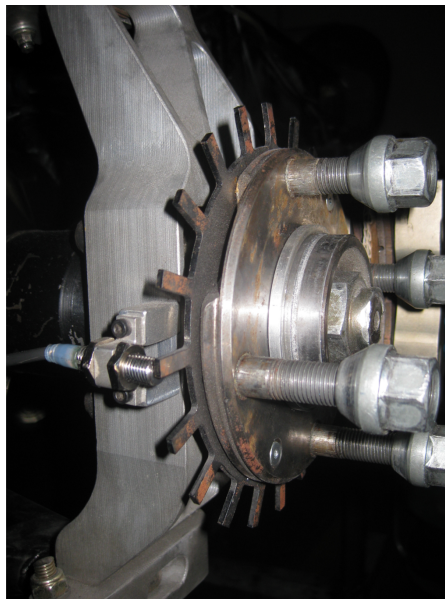


Figura 3.2: Gruppo ruota MG0308 con ruota fonica e sensore per la velocità

angoli superiori a  $360^\circ$  si utilizzano spesso sistemi con riduzioni meccaniche o, attraverso l'elettronica di condizionamento, viene mantenuto memorizzato il conteggio dei giri effettuati.

## 3.4 Accelerazione

In un veicolo ci sono diverse applicazioni in cui é necessario misurare delle accelerazioni che si distinguono per l'intensit  e la velocit  di variazione dell'accelerazione. Vengono sfruttati due principi fisici: la variazione di capacit  dovuta alla variazione di posizione delle armature e la tensione generata dalla deformazione di materiali piezoelettrici.

Nei sensori piezoelettrici si utilizza una massa nota che, quando sottoposta a un'accelerazione, esercita una forza sul materiale piezoelettrico in cui avviene una ridistribuzione delle cariche che comporta la generazione di una differenza di potenziale misurabile. Questo tipo di sensori non permette di misurare con precisione accelerazioni costanti in quanto la ridistribuzione di cariche avviene solo nei transitori. Con l'evoluzione della microelettronica e della realizzazione dei circuiti integrati sono stati introdotti i sensori MEMS. Per la misura dell'accelerazione vengono realizzati all'interno del wafer di silicio delle strutture a forma di pettine fisse e mobili. I denti dei pettini, gli uni intercalati agli altri, formano un condensatore. Alla presenza di un'accelerazione il pettine mobile, muovendosi rispetto a quello fisso, modifica la capacit  del condensatore che viene misurata e convertita in una tensione o in un segnale digitale.

### Sensore di battito

Il battito si manifesta come una vibrazione del motore a frequenze di decine di kHz. Si utilizzano solitamente dei pickup piezoelettrici che generano una tensione proporzionale all'entit  della vibrazione. L'identificazione della presenza del battito é di solito affidata a una circuiteria esterna al sensore o direttamente alla centralina di controllo del motore.

### Sensori per sistemi di controllo

Molti dispositivi di controllo della stabilit  devono conoscere le accelerazioni alle quali é sottoposto il veicolo. Queste accelerazioni hanno entit  di qualche G e frequenze di pochi Hertz. Vengono usati sia sensori piezoelettrici che MEMS. I secondi vengono sempre pi  utilizzati in quanto il loro costo inizia a diminuire e, fra

i diversi vantaggi, misurano con maggiore precisioni variazioni lente dell'accelerazione. Spesso sono già dotati di elettronica di condizionamento del segnale che può essere fornito sotto forma di tensione linearizzata proporzionale all'accelerazione o come segnale digitale. Spesso nello stesso sensore sono implementati più sensori in grado di misurare l'accelerazione lungo più direzioni.

### **Sensori per dispositivi di sicurezza passiva**

L'attivazione di sistemi come airbag e pretensionatori avviene principalmente sulla base della grande decelerazione del veicolo dovuta a un impatto. I sensori che rilevano queste accelerazioni devono essere in grado di misurare alcune centinaia di G. Fino agli anni '90 spesso venivano utilizzati interruttori meccanici calibrati in modo da chiudersi quando veniva superata una certa decelerazione. Attualmente si utilizza la tecnologia MEMS.

Nei motoveicoli è spesso presente un sensore di moto a terra che ha il compito di rilevare se la moto è appoggiata su un lato a terra spegnendo il motore e impedendone la riaccensione. Vengono utilizzati sensori meccanici in cui una massa ruota attorno a un perno. Superata una certa inclinazione e quindi rotazione della massa, viene chiuso meccanicamente o, senza contatto per esempio con sensori hall, un contatto elettrico.

## **3.5 Velocità angolare**

Molti sistemi per il controllo della stabilità, ma anche le moderne centraline che comandano gli airbag, richiedono la conoscenza della velocità di rotazione del veicolo attorno a un asse di rotazione. Vengono utilizzate sia la tecnologia piezoelettrica che MEMS. In entrambi i casi il principio di funzionamento si basa sulla misura della forza di Coriolis. Una o più masse vengono fatte oscillare lungo un asse a una velocità costante. Quando il sistema ruota attorno a un asse perpendicolare al piano di oscillazione, sulla massa viene esercitata la forza di Coriolis che può essere misurata con degli accelerometri assiali. Sebbene esistano diverse modalità di costruzione di questi tipi di sensore, tutti utilizzano lo stesso principio fisico.

## **3.6 Angolo di rollio**

Nei motoveicoli viene spesso fatto riferimento all'angolo di rollio che ha una grande influenza nel comportamento del veicolo. Attualmente non ci sono sistemi economici per la determinazione di questa grandezza. Vengono utilizzati unicamente

nelle competizioni e in prototipi sensori ottici in grado di determinare con ottima precisione l'angolo di rollio. Sono allo studio dei prototipi che sfruttano piú accelerometri e sensori di velocità angolare già presentati in questo capitolo ed effettuano complesse operazioni di filtraggio e rielaborazione per determinare l'angolo di rollio. La complessità di questi sistemi, oltre alla generale riluttanza all'introduzione di controlli elettronici nei motoveicoli, non ne premette per ora l'utilizzo massiccio nei veicoli di serie.

## 3.7 Grandezze relative agli pneumatici

Slip ratio, slip angle e i coefficienti di attrito sono parametri molto importanti nella determinazione dei limiti di aderenza e quindi sicuramente utili al fine della realizzazione di un controllo di trazione. Queste quantità non sono direttamente misurabili in tempo reale se non attraverso costosi e complessi sensori ottici. In laboratorio possono essere eseguiti dei test che caratterizzano questi valori al variare dei carichi o di particolari condizioni a contorno in modo da ottenere le curve introdotte nei paragrafi 2.1 e 2.2. Attraverso queste curve parametrizzate, misurando direttamente grandezze come forze, accelerazioni o posizione dello sterzo/manubrio, é possibile risalire ai valori cercati. La difficile reperibilità di parametrizzazioni e la loro non affidabilità quando le condizioni a contorno differiscono di molto da quelle dei test rendono difficile una stima di queste grandezze



Figura 3.3: Apparecchiature per la caratterizzazione degli pneumatici



in tutte le condizioni che si possono incontrare nella guida di un veicolo.

L'unica grandezza che si può stimare in modo diretto con una certa precisione è lo slip ratio longitudinale se il veicolo è dotato di almeno una ruota trascinata. Dalla definizione di slip ratio introdotta nel paragrafo 2.1 è necessario conoscere la velocità di avanzamento della ruota e la sua velocità angolare di rotazione. Quest'ultimo valore si ricava direttamente attraverso la ruota fonica montata sulla ruota mentre la velocità di avanzamento della ruota corrisponde in prima approssimazione alla velocità del veicolo che, nel veicolo che accelera, corrisponde alla velocità angolare della ruota trascinata, sempre misurabile attraverso una ruota fonica. La formula di calcolo dello slip ratio per una moto o un'auto a trazione posteriore diventa quindi

$$\lambda = -\frac{V_f - V_r}{V_f}$$

Questo principio si basa sul presupposto che la ruota trascinata non sia soggetta a forze che ne generino deformazione, quindi non è più valido nel veicolo che frena, dove lo slip ratio non è più nullo in nessuna delle ruote.

Nelle auto a trazione integrale o, in generale, nei casi in cui non sia possibile determinare attraverso misurazioni dirette la velocità di avanzamento, questa grandezza viene determinata in modo indiretto in modi diversi, in funzione dell'applicazione che richiede tale velocità.

Alcuni esempi e ulteriori descrizioni su queste grandezze sono presenti nel Capitolo 4.

## 3.8 Lambda

Per verificare la corretta combustione del motore si utilizza la cosiddetta sonda lambda o *oxigen sensor*. Il compito di questo sensore è quello di dare un'indicazione dal rapporto reale fra aria e combustibile. Esistono due principali tipologie per questo tipo di sensore. La prima comprende tutti quei sensori che forniscono un segnale a due livelli di tensione mentre la seconda fornisce una tensione analogica in qualche modo proporzionale al rapporto di combustione. Tali sensori sono detti a banda larga. I sensori sono basati su elementi ceramici che, a elevate temperature, permettono la generazione di una tensione se esposti a un gradiente di concentrazione di ossigeno. In particolare vengono messi a contatto con l'atmosfera dei gas di scarico e con l'ambiente esterno. Quando la miscela è grassa la concentrazione di ossigeno allo scarico è molto bassa<sup>1</sup> quindi viene generata una tensione compresa fra 0.8V e 1V, appena la miscela diventa magra la concentrazione cambia

---

<sup>1</sup>9 · 10<sup>-15</sup>% per λ = 0.99

bruscamente<sup>2</sup> e la tensione scende a circa  $0.1V$ . Le sonde a banda larga sfruttano lo stesso principio ma contengono una pompa per gli ioni di ossigeno comandata da una tensione esterna che ha la funzione di spostare il punto di lavoro della sonda. Associata a una elettronica di controllo che regola la tensione di comando della pompa ionica, é possibile quindi ottenere una tensione proporzionale al valore di  $\lambda$ .

L'elemento ceramico presente in tutti questi sensori si attiva a temperature superiori a  $350^{\circ}C$  e si ottengono tempi di risposta di qualche millisecondo quando la temperatura supera i  $600^{\circ}C$  per cui viene inserito un riscaldatore che permette il raggiungimento e il mantenimento della temperatura ideale in breve tempo.

## 3.9 Pressione

In un veicolo esistono decine di applicazioni che richiedono la misura di una pressione. Sebbene la diversa destinazione d'uso abbia le proprie peculiaritá, i sensori di pressione in genere sono costituiti da una membrana in cui un lato é esposto a una pressione di riferimento, l'altro é esposto al fluido di cui si vuole misurare la pressione. Viene misurata la deformazione della membrana attraverso estensimetri, ovvero dispositivi che variano la propria resistenza elettrica in funzione della loro deformazione lungo una o piú direzioni.

Viene solitamente misurata la pressione dell'impianto di lubrificazione del motore e quello di raffreddamento. Sempre nel motore viene misurata la pressione nei condotti di aspirazione per verificare l'effettivo carico richiesto dal motore anche a seguito dell'introduzione di un compressore. Spesso viene monitorata anche la pressione del carburante per determinare anomalie o regolare la quantitá di benzina da iniettare.

In alcuni sistemi di sicurezza attiva viene misurata la pressione nell'impianto frenante che é in qualche modo proporzionale alla forza esercitata dal guidatore sul pedale del freno e dá quindi un riferimento dell'entitá di decelerazione desiderata dal guidatore e fornisce anche, a meno di correttivi, il momento frenante applicato alle ruote.

In limitate applicazioni sportive i sensori di pressione vengono utilizzati per misurare la velocitá del veicolo rispetto all'aria attraverso i tubi di pitot.

---

<sup>2</sup>0.2% per  $\lambda = 1.01$

## 3.10 Massa e flusso dell'aria

Il rapporto stechiometrico dipende dalla massa di aria effettivamente coinvolta nella combustione. É quindi indispensabile avere una misura di questa grandezza. I sensori di massa d'aria o di flusso vengono inseriti lungo il condotto di aspirazione. Esistono una grande varietà di questi sensori che utilizzano principi fisici molto diversi fra loro. In alcuni il flusso d'aria viene parzialmente ostruito. Misurando la differenza di pressione prima e in corrispondenza o subito dopo l'ostruzione, é possibile determinare il flusso. É anche possibile misurare la forza esercitata sui componenti che costituiscono l'ostruzione. É possibile misurare il flusso inserendo nel condotto di aspirazione una paletta mobile che ruota attorno a un asse che viene spinta dal flusso d'aria. Viene misurata attraverso un potenziometro o comunque attraverso uno dei sistemi introdotti nel paragrafo 3.3 la rotazione della paletta. Attraverso un conduttore scaldato dal passaggio di una certa corrente elettrica esposto al flusso d'aria é possibile calcolarne l'intensità in funzione della caduta di temperatura del conduttore. Sempre utilizzando un elemento riscaldante, antepo- nendo e postponendo un elemento sensibile alla temperatura, misurando da tali elementi il differenziale di temperatura é possibile determinare la quantità di flusso e la direzione dell'aria. Questi due sistemi, a differenza di quelli meccanici molto piú lenti, permettono di rilevare cambiamenti del flusso con costanti di tempo dell'ordine dei millisecondi.

## 3.11 Iniettori

L'iniettore é una valvola che, comandata elettricamente, permette il passaggio della benzina e la nebulizza nei condotti o in camera di combustione. I piú comuni sono di tipo elettromagnetico. Il condotto della benzina viene mantenuto chiuso da uno spillo spinto da una molla. Attorno allo spillo é presente un avvolgimento elettrico che, quando viene percorso da una corrente tira lo spillo permettendo il passaggio della benzina che viene nebulizzata attraverso degli orifizi. La loro disposizione dimensione determina, oltre alla quantità di benzina iniettata a parità di pressione, anche la qualità e la direzione dello spruzzo.

Solitamente nelle centraline vengono utilizzati delle uscite open collector di potenza per comandarli.

Una volta aperta la valvola la quantità di benzina iniettata aumenta linearmente con il tempo tuttavia é necessario tenere conto anche del ritardo di apertura e di chiusura della valvola che varia con la tensione di batteria.

C'è da fare una distinzione fra i dispositivi per iniezione nei condotti e iniezione di-

retta. Sebbene il principio di funzionamento sia esattamente lo stesso, gli iniettori per iniezione diretta, dovendo iniettare una grossa quantità di benzina in un intervallo di tempo molto breve, sono costruiti per sopportare pressioni della linea del carburante superiori e, inoltre, il comando elettrico richiede una sovracorrente all'accensione, fornita dalla centralina, necessaria ad annullare il ritardo di apertura della valvola.

### 3.12 Candele e trasformatori ad alta tensione

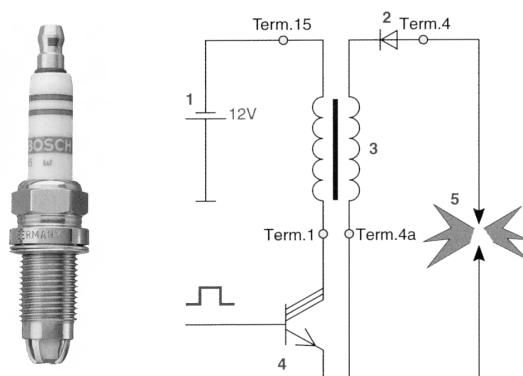


Figura 3.4: Candela ed esempio di connessione

La candela è il dispositivo che genera la scintilla all'interno del cilindro e dà inizio alla combustione. La scintilla viene generata quando fra il corpo metallico e il contatto in alto viene applicata un'alta tensione dell'ordine del migliaio di Volt. La tensione viene generata attraverso un trasformatore. In riferimento allo schema in Figura 3.4, nel periodo di tempo in cui il transistor è acceso, il sistema trasformatore-candela viene visto come un'induttanza per cui il trasformatore si carica con una corrente che cresce linearmente. All'apertura del transistor l'energia accumulata si trasforma quasi istantaneamente in una tensione applicata alla candela sui cui elettrodi si forma la scintilla. Il tempo in cui il transistor resta acceso e quindi il tempo di carica del trasformatore è detto *dwell time*. Da questo tempo dipende l'energia della scarica ed è determinato a partire dalle caratteristiche del trasformatore. Essendo questo tempo rilevante (fino a qualche millisecondo) va tenuto in considerazione dalla centralina che deve anticipare l'accensione del transistor rispetto all'angolo di anticipo richiesto del tempo di dwell.

Nei motori a più cilindri che utilizzano il sistema di iniezione semisequenziale spesso si collega a entrambi i capi del secondario una candela. Con questo sistema si dimezza il numero di trasformatori ma il principio di funzionamento è esattamente analogo al sistema a singola candela.

### 3.13 ETC

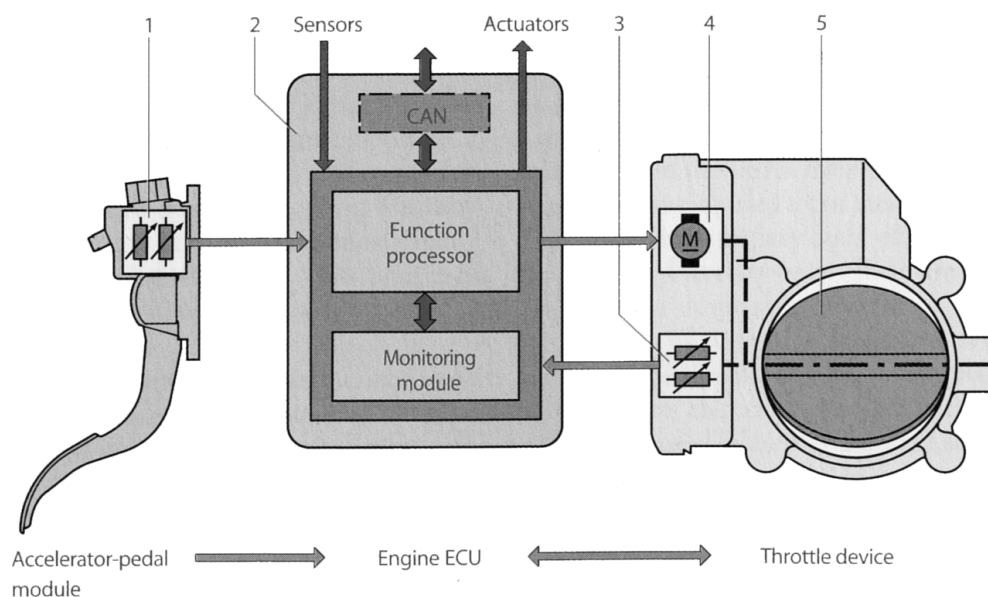


Figura 3.5: Principio di funzionamento dell'ETC

Con ETC (Electronic Throttle Control) si identifica il sistema di controllo elettronico della valvola (5) che regola la quantità di aria che entra nel motore. Con riferimento alla Figura 3.13, la regolazione avviene attraverso un motorino elettrico (4) che viene comandato da centralina principalmente in funzione del carico richiesto dal guidatore ma anche da altri parametri. La possibilità di bypassare il guidatore viene sfruttata da alcuni sistemi di controllo attivo della stabilità e della trazione.

La misurazione della posizione del pedale (1) e della farfalla (3) avviene attraverso i sensori già introdotti nel paragrafo 3.3, tuttavia dovendo essere il sistema particolarmente affidabile i segnali sono spesso duplicati.

Per l'attuazione solitamente si utilizza nei corpi farfallati un motore in corrente continua demoltiplicato meccanicamente e retroazionato in posizione.

Pur non potendo essere considerati propriamente dei sistemi ETC, vengono utilizzate delle valvole comandate elettricamente per stabilizzare il motore in condizione di minimo. La grandezza di controllo per la retroazione in questo caso non è la posizione della valvola ma il regime del motore da mantenere per cui non contengono un sensore per la posizione e il motore che le attua può essere un passo passo solitamente di tipo bipolare.



# Capitolo 4

## Sistemi di controllo

Ciascun sistema di controllo ha per definizione degli obiettivi da raggiungere che spesso, come già detto, non sono esprimibili con grandezze fisiche misurabili. Ogni produttore quindi sceglie su quale o quali principi fisici basare la strategia di controllo in modo da rispettare quelle che sono le specifiche. Ulteriore complicazione é il fatto che spesso non é possibile misurare direttamente una grandezza fisica ed, essendo comunque il sistema di controllo basato su modelli semplificati della realtà del veicolo, eventi e condizioni non considerati nel modello possono non essere riconosciuti dal sistema di controllo e quindi provocare un calo delle prestazioni o anomalie. Bisogna inoltre tenere in considerazione che, una volta riconosciuta una situazione anomala, deve essere presente un sistema di attuatori in grado di riportare il veicolo nelle condizioni desiderate. Mentre alcuni controlli che sono nelle mani del guidatore possono essere facilmente bypassati e presi in consegna dal sistema elettronico, altri non possono essere controllati.

### 4.1 Eventi da riconoscere

A completamento di quanto introdotto nel Capitolo 2 verranno ora introdotti alcuni eventi particolari che influiscono in qualche modo sulle caratteristiche di trazione o non permettono di considerare piú ideali le situazioni già considerate. Verranno anche descritti alcuni metodi teorici o effettivamente utilizzati per distinguere tali situazioni.

#### Cambio

Nella quasi totalità dei veicoli é presente, fra motore e ruote, un sistema meccanico che permette di variare la velocità di rotazione del motore rispetto alle ruote. Il cambio é un sistema meccanico formato generalmente da due set di ingranaggi

che, combinati fra loro, permettono di selezionare fino a sei o sette rapporti di trasmissione. Esistono anche sistemi di cambio a variazione continua in cui é possibile selezionare in modo continuo il rapporto di trasmissione.

Si può definire il rapporto di trasmissione totale come il rapporto fra la velocità angolare del motore  $\omega_e$  e la velocità angolare della ruota  $\omega_w$ <sup>1</sup>

$$\tau = \frac{\omega_e}{\omega_w}$$

Oltre alla variazione di velocità, c'è anche la variazione di coppia trasmessa alla ruota che, a meno di attriti e altre coppie dissipative, varia in modo inversamente proporzionale al rapporto di trasmissione.

$$\frac{M_e}{M_w} = \frac{1}{\tau}$$

Considerando anche l'inerzia del motore  $I_e$ , la coppia alla ruota diventa

$$M_w = \left( M_e - I_e \frac{d\omega_e}{dt} \right) \tau = M_e \tau - I_e \frac{d\omega_w}{dt} \tau^2$$

per cui l'inerzia del motore viene moltiplicata per il quadrato del rapporto di trasmissione il cui contributo non può quindi sempre essere trascurato.

Per determinare il rapporto di trasmissione alcuni cambi sono dotati di un sensore (solitamente un potenziometro) da cui é possibile determinare quale marcia é inserita e quindi conoscerne il relativo rapporto di trasmissione. I cambi sequenziali per uso motociclistico spesso integrano un interruttore che chiude un contatto a massa quando il cambio si trova in posizione di folle. Pur non dando nessuna indicazione sulla marcia inserita, viene utilizzato come indicatore al guidatore per ritrovare la posizione di folle o per evitare che compia operazioni pericolose con il veicolo con la marcia inserita.

In assenza di sensori dedicati, é possibile risalire alla marcia inserita e quindi al rapporto di trasmissione misurando la velocità del motore e di un albero a valle del cambio e calcolarne il rapporto che resta costante per ogni marcia ed é noto. Questo sistema richiede che il veicolo sia in movimento e da' valori errati durante il cambio marcia, in folle o quando viene premuta la frizione per cui, per essere utilizzato efficacemente, sono spesso necessari particolari accorgimenti nella realizzazione degli algoritmi.

---

<sup>1</sup>Si trascura l'effetto di un eventuale differenziale



## Differenziale

Quando un'auto, o un veicolo in cui le ruote non sono allineate, percorre una curva, le ruote interne percorrono una circonferenza di raggio inferiore a quelle esterne e ruotano quindi a velocità diverse. Viene quindi inserito nella catena di trasmissione il differenziale che permette di distribuire la coppia fornita dal motore alle due ruote dello stesso asse permettendo loro di ruotare a velocità diverse. Il differenziale più semplice divide in modo uguale la coppia data in ingresso sui due assi in uscita. La conseguenza è che, nel caso una ruota inizi a slittare, l'altra si ritroverebbe senza coppia disponibile. Sono stati quindi ideati differenziali autobloccanti o a slittamento limitato in cui, in caso di slittamento, viene comunque garantita trazione alla ruota non slittante. La ripartizione della coppia di questi differenziali è determinata dalle caratteristiche meccaniche costruttive e spesso non è modificabile se non con adeguate operazioni di manutenzione. Recentemente sono stati introdotti differenziali che permettono la modifica della ripartizione della coppia in tempo reale in modo proporzionale a una corrente elettrica.

Nella determinazione dello slittamento spesso si confrontano le velocità dell'asse trascinante e dell'asse trascinato. Mentre in rettilineo il confronto può essere fatto in modo agevole, in curva o in slittamento non omogeneo tra le ruote dello stesso asse, lo slip ratio non può più essere calcolato come descritto nel paragrafo 3.7. A partire dalla posizione dello sterzo e dalle caratteristiche geometriche delle sospensioni è possibile ricavare i raggi di percorrenza di ciascuna ruota e quindi la loro velocità teorica tuttavia, in caso di blocco del differenziale, la velocità delle ruote non è più facilmente stimabile e, per un corretto calcolo dello slittamento, è necessario ricorrere ad altri tipi di sensori e sistemi o, per l'uso su sistemi di controllo di trazione o stabilità, si possono eseguire banalmente delle medie o altri tipi di elaborazione matematica delle velocità attraverso la caratterizzazione della cinematica e delle caratteristiche del differenziale.

## Pendenza della strada

La pendenza del fondo stradale ha effetti sulla trazione in quanto modifica la ripartizione del carico sulle ruote e aggiunge una forza che si va a sommare a quella che lo pneumatico deve sviluppare per permettere il moto del veicolo.

Chiamando  $\alpha_x$  l'angolo formato dal piano non inclinato rispetto alle rette parallele all'asse longitudinale del veicolo e  $\alpha_y$  l'angolo formato rispetto alle rette parallele all'asse laterale del veicolo, le forze lungo l'asse longitudinale e laterale dovute alla

pendenza si calcolano come

$$F_{sx} = mg \sin \alpha_x \quad F_{sy} = mg \sin \alpha_y$$

Prendendo in considerazione la sola componente longitudinale e riprendendo la formula 2.5 si ottiene

$$F_{zf} = F_{zfo} - \frac{h(ma + F_{sx})}{p} \quad F_{zr} = F_{zro} + \frac{h(ma + F_{sx})}{p}$$

Il verso di  $F_{sx}$  é da considerarsi con il verso reale dell'accelerazione di gravitá e per strada in salita.

Per gli autoveicoli si possono fare analoghe considerazioni anche per la forza dovuta alla pendenza lungo l'asse laterale. Per i motoveicoli invece la conseguenza é la variazione dell'angolo di rollio rispetto al fondo stradale in quanto, a seconda del segno di  $\alpha_y$ , é necessaria una maggiore o minore inclinazione della moto per mantenere l'equilibrio.

La determinazione dell'inclinazione del fondo stradale é possibile solo attraverso complesse elaborazioni di segnali, in particolare accelerazione e velocitá angolare. La complessitá degli algoritmi e la quantitá di segnali necessari aumenta all'aumentare della richiesta di precisione e alla capacitá di discriminare forze non gravitazionali. In molte applicazioni é sufficiente avere una stima molto approssimativa e quindi utilizzare, per esempio, semplici accelerometri, oppure gli effetti della pendenza del fondo possono essere rilevati in altri modi.

## Salto

Si puó parlare di salto quando un veicolo si trova con tutte le ruote sollevate da terra. É importante che nella fase di atterraggio il veicolo sia correttamente inclinato nei tre assi. La posizione all'atterraggio é determinata dall'assetto del veicolo nelle fasi immediatamente precedenti al salto e dalla distribuzione dei pesi nel veicolo. Nell'auto, il pilota puó controllare il salto solo nelle fasi immediatamente precedenti, nella moto o comunque se il veicolo é sufficientemente leggero, spostando il suo peso puó modificare l'assetto durante la fase di volo. In aggiunta, soprattutto nel cross, durante il salto si usa dare brusche accelerate o frenate alla ruota motrice. Cosí facendo, per la conservazione del momento angolare, la moto tende rispettivamente a inclinarsi verso indietro o avanti.

Controllando le sole velocitá delle ruote, un'accelerazione durante il salto puó essere identificata come un rapido e consistente aumento di slip ratio e provocare quindi una sostanziale riduzione di coppia. É quindi indispensabile che il controllo

non intervenga quando si esegue un'accelerata in salto.

É possibile, almeno nella teoria, determinare quando il veicolo é sollevato da terra attraverso sensori di tipo inerziale.

## Frizione

La frizione é il dispositivo che permette di scollegare l'albero motore dal resto della trasmissione che va alle ruote. In serie alla catena di trasmissione, é formata da piú superfici, in parte solidali al lato motore e in parte al lato ruote. Applicando una forza che stringe fra di loro queste superfici, sfruttando le forze di attrito, il moto e quindi la coppia vengono trasferiti dal motore alle ruote. Quando la forza applicata alle superfici é sufficientemente alta, il lato motore e il lato ruote ruotano alla stessa velocità e idealmente tutta la coppia viene trasferita; questa é la condizione normale di marcia. Al contrario, quando la forza é sufficientemente bassa, le superfici di attrito sono completamente separate per cui non c'è trasmissione di moto. All'aumentare della forza applicata, si sviluppa una forza di attrito dinamico. La coppia trasferita alla ruota é direttamente proporzionale alla forza di attrito dinamico fra le superfici della frizione e i due alberi ruotano a velocità diverse. Questo permette di mantenere alta la coppia del motore, che può ruotare ad alto regime, anche quando la velocità delle ruote é bassa. La coppia trasferita alle ruote, e quindi di interesse nello studio del controllo di trazione, é regolata anche dal guidatore attraverso la frizione. La frizione viene attuata nei cambi marcia e durante la partenza. Proprio questo ultimo caso é il piú critico in quanto può essere applicato un grande differenziale di coppia alle ruote in breve tempo, provocando potenzialmente uno slittamento anche di grossa entità.

La frizione viene attuata da un pedale o da una manopola che tira un cavo o agisce su un collegamento meccanico oppure mette in pressione un circuito idraulico attraverso una pompa. É possibile determinare, almeno indirettamente, la forza applicata agli elementi di attrito della frizione misurando la posizione dell'attuatore o la pressione del circuito idraulico e correggendo il valore letto, in quanto la funzione che lega la misura effettuata con la forza sulle superfici della frizione e quindi sulla coppia trasferita non é lineare ed é molto dipendente dall'usura, dalla temperatura della frizione e dalle tolleranze meccaniche del sistema. É quindi possibile correggere il funzionamento dei controlli in modo da prendere in considerazione anche l'effetto della frizione. Le strategie utilizzabili sono diverse e possono essere applicate sempre oppure solo durante la partenza e ignorate a eventuali successive pressioni della frizione. La strategia differenziata per la partenza rispetto al normale funzionamento viene comunemente chiamata launch control.

Un altro effetto della frizione é quello di variare la velocità fra gli elementi di trasmissione verso il motore e verso le ruote. I sistemi che rilevano la marcia inserita sulla base del confronto fra la velocità del motore e delle ruote devono quindi tenere in considerazione questo fattore e intervenire in modo adeguato.

## 4.2 Strategie e modalità di intervento

Lo studio dei controlli elettronici per la dinamica dei veicoli é stato effettuato prevalentemente dalle aziende che producono i veicoli o alcuni fornitori. Gli algoritmi e i sistemi di intervento sono quindi protetti da brevetti e segreto industriale. La letteratura scientifica pubblica non fornisce infatti molte informazioni in particolare per le applicazioni di interesse in questa tesi. Nonostante questo, le case automobilistiche e i produttori di questi sistemi di sicurezza, spesso a scopo di pubblicizzare i propri prodotti, descrivono in modo piú o meno dettagliato i principi di funzionamento dei loro sistemi da cui é comunque possibile partire per lo sviluppo di nuovi controlli.

### ABS

ABS é l'acronimo con cui é noto il sistema che impedisce il bloccaggio delle ruote in frenata. Inizialmente introdotto da Bosch nel mercato europeo, ora é di serie in tutte le auto di nuova costruzione e in alcuni motoveicoli. Il sistema determina quando la ruota durante una frenata si arresta o si sta arrestando e interviene in modo da diminuire la forza frenante e permettere alla ruota di rotolare. L'impianto frenante deve essere dotato di una pompa e valvole elettroattuate che permettano alla centralina di controllo di variare la pressione del fluido dell'impianto freno verso i cilindri in modo da diminuire adeguatamente la coppia frenante.

Un controllo ABS efficiente deve rispettare i seguenti obiettivi, elencati in ordine di priorit :

- Mantenere la stabilit  direzionale
- Permettere di sterzare anche in frenata di emergenza
- Diminuire la distanza di frenata
- Rapido adattamento alle diverse condizioni del fondo
- Assicurare bassi livelli di vibrazione dovuti all'attuazione del controllo
- Assicurare buoni livelli di comfort acustico e di guida

Questi obiettivi, forniti in forma discorsiva, vengono perseguiti controllando alcune grandezze fisiche rilevabili attraverso sensori.

La variabile che viene controllata é lo slittamento delle ruote che viene mantenuto mediamente a un valore determinato dalla centralina di controllo. L'effettiva regolazione della velocità delle ruote, e quindi anche dello slittamento, avviene misurando l'effettiva accelerazione delle ruote e agendo sulle valvole dell'impianto frenante aumentando o diminuendone la pressione ai cilindri quando vengono superate determinate soglie, calcolate dalla centralina di controllo. Essendo durante la frenata tutte le ruote sottoposte a slittamento, la velocità di riferimento per il calcolo dello slip ratio viene determinata dalla centralina sulla base di continue rilevazioni effettive sulle ruote in fase di marcia normale e poi fatta diminuire linearmente quando, durante la frenata, la loro misurazione non darebbe più valori attendibili.

La soglia di slittamento viene continuamente adattata durante la frenata in base al comportamento della ruota in risposta a determinati aumenti o diminuzioni di pressione sul cilindro del freno.

Considerando il comportamento in frenata di un'auto che si trova, per esempio, con le ruote nei due lati su fondo con diversa aderenza, si possono distinguere tre tipi di strategie. Adattando il comportamento di tutte le ruote al comportamento di quella con più aderenza, le ruote su fondo a bassa aderenza tendono a slittare provocando un testacoda. Se al contrario si uniforma il rallentamento alle ruote con fondo a minore aderenza, la distanza di frenata aumenta notevolmente. Nelle versioni più avanzate di ABS viene utilizzato anche un sensore di velocità di imbardata. In funzione del momento di inerzia del veicolo attorno al suo asse verticale e dei dati ottenuti dal sensore di velocità di imbardata, l'intervento sulle ruote con maggiore aderenza viene ritardato in modo da garantire una certa controllabilità del veicolo mantenendo comunque brevi gli spazi di frenata. Ci sono quattro soglie di velocità di imbardata che variano con la velocità. Il sistema inoltre tende a ripartire la frenata verso le ruote anteriori in modo da permettere alle posteriori di generare molta forza laterale e quindi di stabilizzare il veicolo. Nella frenata in curva la ruota anteriore esterna risulta molto carica e, utilizzando il controllo sull'imbardata, ne viene ulteriormente aumentata la capacità di frenatura portando l'auto al sovrasterzo. Attraverso un sensore di accelerazione laterale é possibile determinare se l'auto si trova in curva e quindi disabilitare il controllo sulla velocità di imbardata.

### TCS

Con TCS Bosch identifica il controllo di trazione implementato nei propri sistemi. Non vengono fornite molte indicazioni sul suo principio di funzionamento, si intuisce comunque che la variabile da controllare é lo slip ratio che viene mantenuto al valore ottimale attraverso un controllore PID. Quando il coefficiente di attrito non é uguale alle ruote a destra e a sinistra di un'auto, la corretta distribuzione della coppia motrice ai due lati viene ottenuta applicando una coppia frenante asimmetrica che simula il blocco del differenziale, attraverso le valvole del controllo ABS. Durante l'accelerazione su fondo asimmetrico, la ruota su fondo piú scivoloso ruota infatti piú velocemente dell'altra generando una velocità differenziale maggiore di 0. Il Transversal differential lock controller, ovvero la parte del sistema che simula il blocco del differenziale, controlla quindi a 0 la velocità differenziale attraverso un controllore PI.

L'intervento di riduzione della coppia motrice avviene, oltre che con l'attuazione dei freni, con interventi sull'accensione e l'iniezione per un rapido intervento e sulla farfalla comandata dei sistemi drive-by-wire per un intervento piú lento. I sistemi vengono usati in congiunzione tra di loro e si intuisce che, sebbene il principio di attivazione del controllo resti sostanzialmente lo stesso, il sistema debba essere comunque notevolmente modificato per essere adattato e ottimizzato su un particolare veicolo.

Viene anche fatto notare che il TCS con intervento sui freni sia destinato ad auto di serie con intervento solo in caso di emergenza, in quanto il continuo uso provocherebbe un eccessivo riscaldamento dei freni.

### ESP

L'ESP é un complesso sistema che permette di dirigere un'auto esattamente dove vuole il guidatore anche durante manovre di emergenza. É composto da piú blocchi funzionali e si interfaccia con i sistemi ABS e TCS appena descritti, condividendo sensori, attuatori e sottosistemi.

Le due grandezze controllate sono la velocità di imbardata e l'angolo  $\beta$  formato dall'asse longitudinale dell'auto con la tangente alla circonferenza che dovrebbe percorrere l'auto in condizioni nominali. La velocità di imbardata reale viene letta dall'apposito sensore mentre l'angolo  $\beta$  viene stimato dall'observer a partire dall'accelerazione laterale, l'angolo di sterzo, la velocità del veicolo e la forza di frenatura. I valori nominali per il confronto vengono calcolati dal controllore ESP sulla base delle richieste del guidatore e interpretate a partire dall'angolo di sterzo, la pressione dell'impianto frenate e la coppia richiesta al motore (posizione del pe-

dale dell'acceleratore) e sulla base di grandezze fisiche come accelerazione laterale e longitudinale (stimata), velocità del veicolo. Sulla base del confronto fra le due grandezze controllate con i loro valori nominali, viene dato in uscita dal controllore un unico valore di momento angolare che corrisponde alla coppia da generare sull'asse verticale veicolo per riportarlo in condizioni nominali. Questa grandezza, viene ulteriormente elaborata per fornire i valori di correzione dello slittamento, la coppia di bloccaggio nominale del differenziale fittizio alle ruote motrici e gli altri parametri di ingresso dei sistemi ABS e TCS che operano in modo sostanzialmente invariato rispetto all'uso senza il controllo ESP.

Di particolare interesse é il meccanismo di stima della velocità di avanzamento della ruota per il calcolo dello slip ratio. La ruota viene frenata con una forza di frenatura  $F_B$  nota per un certo periodo di tempo e misurando la velocità di rotazione della ruota  $\omega R_0$ , conoscendo il carico normale alla ruota  $F_z$  e la rigidezza dello pneumatico  $C_\lambda$ , si calcola la velocità di avanzamento che poi viene usata, come già noto, per il calcolo dello slip ratio.

$$V = \omega R_0 \frac{C_\lambda}{C_\lambda - \frac{F_B}{F_z}} \quad (4.1)$$

Una piú completa descrizione del sistema ESP é presente in [3,6] dove sono descritte in dettaglio tutte le grandezze misurate e calcolate e una parte delle equazioni utilizzate.

Nei controlli appena descritti dove alcuni dei comandi come acceleratore e freni sono gestiti dall'elettronica, é necessario monitorare costantemente il corretto funzionamento di tutti i sensori e del corretto funzionamento di tutte le componenti del controllo. Questo richiede un'ulteriore complicazione del sistema di controllo che é assolutamente indispensabile nei veicoli per uso stradale.

## DCCD

La maggior parte delle auto prodotte al giorno d'oggi possiedono di serie o come optional dei sistemi controllo della frenata, trazione e stabilità i cui fini sono gli stessi dei controlli fino a qui introdotti ma il cui funzionamento puó essere anche sostanzialmente diverso. É da notare che i sistemi sono progettati per un uso stradale e si attivano quasi solo in caso di emergenza. Alcuni modelli di auto prodotti da Subaru particolarmente sportivi, abbina ai comuni sistemi di controllo il DCCD, ovvero il Driver Controlled Central Differential. I veicoli su cui é montato sono a trazione integrale e presentano all'asse anteriore e posteriore due differenziali autobloccanti, il differenziale centrale é invece bloccabile in modo continuo ripartendo

la coppia trasmessa all'anteriore rispetto al posteriore dal 50% al 35%. Mentre il sistema ESP simula il blocco del differenziale attraverso l'attuazione dei freni (è stato descritto comportamento del blocco del differenziale sull'asse in trazione del veicolo con ESP, tuttavia si possono fare analoghe considerazioni anche per il differenziale centrale in una trazione integrale), in questo caso si varia la ripartizione di coppia di un vero differenziale che diventa il vero attuatore che permette il riallineamento dell'auto. È comunque da notare che il controllo del differenziale è autonomo rispetto al controllo di stabilità, qui chiamato VDC, che interviene in modo analogo all'ESP. Altra caratteristica interessante di questo tipo di sistema è la sua tarabilità. Tutti i controlli presenti possono infatti essere completamente o parzialmente disattivati dal guidatore o tarati in modo da modificare la metodologia di intervento, in particolare è possibile ridurre l'entità di intervento rendendo il veicolo più instabile ma più prestazionale. Tale caratteristica è assente nella quasi totalità dei veicoli non sportivi e permette di comprendere quanto un sistema completamente automatico sia sicuramente adeguato come dispositivo di sicurezza ma non sia prestazionale e quindi adatto alle competizioni o all'uso sportivo.

### **DTC**

Ducati ha recentemente sviluppato un controllo di trazione di derivazione sportiva applicato ora alle moto stradali. Non vengono fornite particolari descrizioni sul funzionamento del sistema, tuttavia si può intuire che vengono utilizzati come parametri le velocità delle ruote e uno o più sensori inerziali, oltre alle grandezze già rilevate dalla centralina motore. L'intervento avviene in più fasi, ritardando l'anticipo e successivamente escludendo uno o più cilindri. Fra le varie caratteristiche si descrive la capacità di individuare le impennate e la marcia inserita.

Viene applicato su moto ad altissime prestazioni e viene data al guidatore la possibilità di impostare l'entità e la modalità di intervento in otto step. Questa caratteristica, come già descritto per il DCCD, contraddistingue i controlli utilizzati nelle competizioni.

### **Controlli basati sulla posizione**

In moltissime competizioni vengono utilizzati i controlli della trazione. Sebbene le implementazione e i principi di funzionamento non siano sempre uguali, tutti possono essere tarati modificando alcuni parametri. Alcuni tipi di controllo permettono di modificare alcuni di questi parametri in modo automatico e differente in funzione della curva che sta per essere affrontata. Questo sistema è chiaramente



utilizzato in percorsi chiusi e con un numero quindi limitato di curve. La posizione all'interno della pista può essere determinata a partire dalla posizione ricavata da un ricevitore GPS o analizzando dati come distanza percorsa, pressione dell'impianto frenante e posizione dell'acceleratore. Entrambi i sistemi presentano grosse limitazioni e possibilità di errata determinazione della posizione con scarsa copertura GPS o se il veicolo è costretto per una qualsiasi ragione a manovre non previste dal controllo, tuttavia sono sufficientemente affidabili e prestanti per le competizioni.



# Capitolo 5

## L'esperienza Formula Student

Buona parte delle conoscenze riguardanti i veicoli stradali e da competizione sono state apprese e approfondite nell'ambito del progetto RaceUP Team. Il progetto nasce nel Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università degli Studi di Padova e prevede la realizzazione di vetture monoposto e la partecipazione agli eventi organizzati dalla SAE.

### 5.1 L'evento

É previsto che gli studenti, senza un diretto aiuto da parte di professionisti o docenti, progettino e costruiscano un'auto monoposto tipo formula ad alte prestazioni. Esiste un regolamento che descrive, oltre alle caratteristiche tecniche che deve avere il veicolo, gli obiettivi degli eventi e il loro svolgimento.

Ogni evento consiste nello svolgimento di 8 prove per ciascuna delle quali viene assegnato un punteggio per un totale di 1000 punti:

- **Technical Inspection.** Una commissione nominata dall'organizzatore dell'evento controlla la corrispondenza dell'auto al regolamento e verifica se sono soddisfatte tutte le prescrizioni di sicurezza. Il non superamento delle verifiche non permette la partecipazione alle prove dinamiche.
- **Design.** Viene presentato dagli studenti a una commissione di professionisti dell'ambiente automotive il progetto del veicolo in tutti i suoi particolari tecnici. Vengono assegnati fino a 150 punti.
- **Cost and Manufacturing.** Viene valutato il costo di produzione dell'auto sulla base di un report dettagliato preparato dagli studenti prima dell'evento e discusso poi con la commissione valutatrice. Vengono assegnati fino a 100 punti.

- **Presentation.** Viene presentato a una commissione che si finge un gruppo di potenziali imprenditori, un business plan con lo scopo di convincere la commissione a investire nella produzione dell'auto. Vengono assegnati fino a 75 punti.
- **Skid-pad.** In questa prova viene testata la tenuta laterale dell'auto. Lo scopo é quello di percorrere un percorso a '8' nel minor tempo possibile. Vengono assegnati fino a 50 punti.
- **Acceleration.** Viene cronometrato il tempo impiegato a percorrere 75m con partenza da fermo. Vengono assegnati fino a 75 punti.
- **Autocross.** Viene cronometrato il tempo per percorrere un circuito di circa 1Km. Vengono assegnati fino a 150 punti.
- **Endurance.** Viene testata l'affidabilità nel veicolo in un percorso complessivamente di 22Km con cambio pilota a metà gara. Vengono assegnati fino a 300 punti sulla base dei tempi e ulteriori 100 punti in base alla quantità di benzina utilizzata.

## 5.2 Vetture realizzate

L'esperienza Formula Student per l'Università degli Studi di Padova é iniziata nel 2006. Verranno ora presentate le vetture realizzate fra gli anni 2007 e 2009 con particolare riferimento all'elettronica e agli argomenti di interesse di questa tesi

### MG0207

É stata la prima vettura prodotta dal team dotata di iniezione elettronica. L'auto era dotata del motore di serie sulla Kawasaki ZX6R del 2006. É un motore quattro tempi a quattro cilindri sfasati di 180°. É stata utilizzata per la gestione del motore una centralina prodotta da Walbro<sup>1</sup> completamente configurabile in tutti i suoi parametri. É stato quindi progettato e realizzato un nuovo cablaggio mantenendo la quasi totalità dei sensori presenti sul motore di serie. La moto originariamente era dotata di due rail iniettori di cui é stato mantenuto solo quello basso in configurazione manifold injection. Tutta l'aspirazione é stata modificata per adattarsi al regolamento della competizione. In particolare é presente un'unica valvola a farfalla dotata di TPS a potenziometro. Anche il cablaggio dei sottosistemi elettrici (pompa benzina, ventole di raffreddamento, luce freno) e del cruscotto é stato

---

<sup>1</sup>Nel 2009 la divisione elettronica di Walbro é stata acquisita da Athena S.p.A.



(a) MG0207



(b) MG0308



(c) MG0409

Figura 5.1: Alcune vetture realizzate dal RaceUP Team

progettato da zero e realizzato in modo conforme al regolamento. Il cruscotto era molto semplice e composto da due indicatori di errore e alcuni pulsanti e interruttori per l'accensione, per il settaggio della mappa in centralina e per l'attivazione del launch control.

É stata realizzata la calibrazione della centralina motore su un banco a rulli frenato

per uso motociclistico.

#### **MG0308**

É la diretta evoluzione del veicolo precedente, sostanzialmente uguale nella configurazione meccanica. É stato introdotto un dashboard-datalogger di tipo ADL2 prodotto da MoTeC e sono stati montati nuovi sensori: sensori velocità e ruote foniche per ogni ruota, accelerometro biassiale con sensore di velocità di imbardata, 2 sensori di pressione per l'impianto frenante, 1 sensore di pressione per l'impianto benzina, 1 sensore di pressione olio motore, sensore di posizione sterzo, 3 sensori di temperatura pneumatici per ciascuna ruota.

Questo ha portato alla riprogettazione integrale dell'impianto elettrico per adattarsi ai nuovi componenti. É stata curata anche la configurazione del sistema di acquisizione e visualizzazione dei dati in funzione delle necessità dei piloti e degli altri membri del team.

Alcune modifiche alla configurazione di aspirazione e scarico hanno reso necessaria la ricalibrazione della centralina, questa volta su un banco frenato all'albero.

#### **MG0409**

A causa di sostanziali modifiche del regolamento, é stata necessaria la riprogettazione dell'intero veicolo. Resta comunque sostanzialmente inalterata la configurazione del motore. É stato comunque riprogettato l'impianto elettrico per essere facilmente adattabile a una nuova centralina e per permettere una rapida modifica dei sensori da acquisire. Per esempio é stato predisposta la connessione di 8 sensori di temperatura dell'acqua in diversi punti dell'impianto di raffreddamento e di 4 potenziometri assiali per misurare l'estensione di ciascun ammortizzatore, oltre a quanto già utilizzato nella MG0308. É stato progettato anche il prototipo di una semplice centralina per il controllo di valvole pneumatiche da utilizzare per l'elettroattuazione del cambio. Il prototipo é stato realizzato e applicato nella vettura MG0510.

Anche per questa vettura é stata ricalibrata la centralina per adattarsi alla nuova aspirazione e scarico e ad alcune modifiche della fasatura delle valvole.

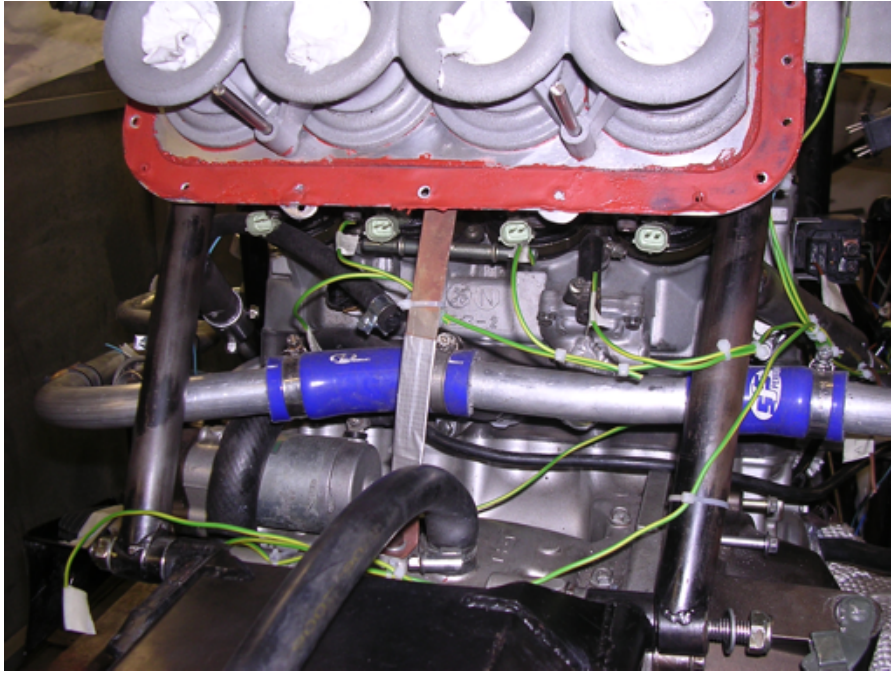


Figura 5.2: Realizzazione dello scheletro del cablaggio sulla vettura MG0308 zona motore

## 5.3 L'esperienza pratica

### Il cablaggio

Per quanto riguarda la progettazione dei cablaggi sono state presi in considerazione diversi aspetti:

- Costo dei materiali
- Costo del cablaggio computato ai fini della prova di cost and manufacturing
- EMC
- Sicurezza
- Facilit  di intervento e modifica delle connessioni
- Adeguatezza rispetto al regolamento degli eventi Formula SAE
- Reperibilit  dei materiali

  stata curata la disposizione dei cavi lungo il telaio per separare e schermare adeguatamente i conduttori elettricamente rumorosi da quelli sensibili, per rendere il cablaggio snello e accessibile e per tenere distanti i fili da parti calde o in

movimento. Per questo si sono sempre preferiti, spesso a discapito della facilitá di reperibilitá del materiale e dei costi, conduttori di qualitá superiore, meccanicamente flessibili e con sezione del conduttore e della guaina contenuta. Connettori, pulsanti e interruttori invece sono stati scelti fra quelli reperibili facilmente a catalogo di costo particolarmente contenuto.

Nei tre anni si é costruito un metodo per la progettazione e realizzazione di cablaggi. Si compone in piú fasi:

- Schema dei collegamenti dettagliato. Ciascun filo collegamento viene identificato negli schemi da un codice unico. Anche i connettori vengono codificati.
- Creazione dello scheletro del cablaggio (Figura 5.2). Sull'auto vengono applicati dei fili che rappresentano i rami del cablaggio. Questi fili collegano tutti i sensori e sottosistemi elettrici. Per praticitá viene applicata un'etichetta ai capi di ciascun filo che sará codificata come il connettore che rappresenta.
- Realizzazione del disegno dello scheletro in cui ogni ramo viene codificato e misurato.
- Viene creata una lista su un foglio di calcolo in cui per ciascun filo del primo schema viene identificata la lunghezza calcolata sulla base del secondo schema creato. In aggiunta per ciascun filo viene indicato il colore e il modello di cavo.
- Analogamente viene creata una lista per ciascun ramo del secondo schema in cui si indica, oltre alla lunghezza del ramo, la sezione e il modello della guaina di rivestimento dei fili.
- Una volta tagliati e codificati tutti i fili si puó procedere all'assemblaggio del cablaggio.

Utilizzando questo sistema é possibile replicare lo stesso cablaggio molto rapidamente. Ulteriore vantaggio di questo metodo é la possibilitá di avere in modo estremamente rapido la quantitá di cavo e guaine necessaria per effettuare l'ordine del materiale. Sfruttando le potenzialitá di molti CAD per la progettazione di circuiti é possibile ottenere automaticamente il BOM anche per quanto riguarda i connettori.

## La mappatura della centralina

La mappatura della centralina consiste fundamentalmente nell'impostare la quantitá di benzina da iniettare nel motore e l'angolo di anticipo al variare del regime e



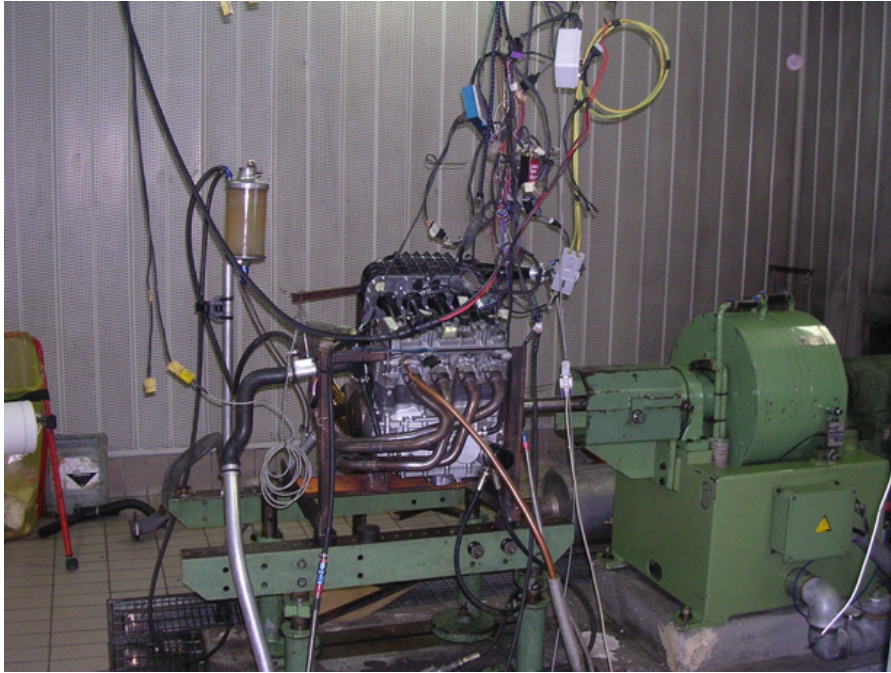


Figura 5.3: Motore della vettura MG0308 montato su banco all'albero

del carico. Le metodologie per effettuare la calibrazione sono diverse. Si é adottata la strategia a lambda costante. Per questo tipo di calibrazione il motore viene frenato e mantenuto a regime costante dal banco di calibrazione indipendentemente dall'apertura dell'acceleratore. Leggendo il valore di lambda viene modificata la quantità di benzina iniettata fino a raggiungere il valore di lambda desiderato. Questa operazione viene effettuata per quanti piú regimi e aperture di acceleratore possibili fino a riempire l'apposita tabella nella centralina.

Piú complessa é la ricerca dell'angolo di anticipo corretto. Concettualmente é necessario, per ciascun punto della tabella relativa all'angolo di anticipo, variare l'anticipo fino a raggiungere la massima coppia, misurata dal banco di test, senza incorrere nel battito.

Queste operazioni, pur essendo concettualmente molto semplici e ripetitive, nella realtà richiedono molta attenzione e intervento umano per evitare danni al motore e per calibrare correttamente punti di lavoro come il minimo in cui la procedura normale non é applicabile.

### **Acquisizione e analisi dati**

A partire dalla vettura MG0308, é sempre presente un sistema di acquisizione dati. Tale sistema é stato progettato tenendo in considerazione le esigenze degli altri componenti del team e di quanto necessario nei test e in gara. Oltre alla

progettazione e alla configurazione, il sistema di acquisizione é stato costantemente gestito durante i numerosi test e durante gli eventi e sono stati analizzati i dati di cui é stata acquisita la sufficiente confidenza per iniziare ad affrontare gli argomenti di questa tesi.

#### **L'esperienza acquisita**

Sebbene non sia esplicitamente richiesto, le conoscenze tecniche di ciascun membro del team non possono essere limitate a quanto richiesto dalle proprie mansioni in quanto il lavoro di progettazione coinvolge piú ambiti dell'ingegneria. Per realizzare un singolo componente infatti spesso é necessario considerare aspetti riguardanti l'intero veicolo anche se non direttamente collegati allo stesso. Ad esempio la scelta e il posizionamento di un componente come la batteria per l'avviamento richiede di considerare, oltre alle caratteristiche elettriche della batteria, il suo peso che, spostato in punti diversi dell'auto potrebbe cambiarne il bilanciamento dei pesi, la batteria deve essere inoltre posizionata in una zona ventilata e deve essere predisposto un supporto per tenerla in posizione. Inoltre, nelle vicinanze della batteria deve essere collegata a telaio la massa; questa operazione prevede la foratura del telaio per l'inserimento di una boccola. I fori sia per l'applicazione della boccola che per il fissaggio dei supporti non devono trovarsi in zone del telaio sottoposte a grossi carichi. É chiaro che nel caso in questo esempio le conoscenze seppure approssimative non possono limitarsi alla sola conoscenza delle caratteristiche elettriche ed é quindi indispensabile un continuo scambio di informazioni con i diversi reparti che compongono il team.

Deve sempre essere tenuto in considerazione che quanto progettato deve poi essere realizzato in modo semplice ed economico, sia dal punto di vista della spesa effettivamente sostenuta dal team che in funzione del cost report che viene valutato nella prova di cost and manufacturing.

# Parte II

## Progettazione



# Capitolo 6

## Specifiche di progetto

In questo capitolo verranno descritti gli obiettivi del progetto, le specifiche e i principali vincoli e problemi che sono stati considerati nella realizzazione del sistema di controllo.

### 6.1 Obiettivi e vincoli di progetto

La richiesta di progetto consiste nello studiare uno o piú sistemi di controllo della trazione su motoveicoli che possano essere facilmente adattati a diverse tipologie di veicolo, sia per uso stradale che per uso sportivo.

I controlli devono poter essere implementati all'interno della centralina di controllo del motore e utilizzare un numero minimo di sensori in quanto destinato anche a un mercato di produzione di serie dove il costo di un sensore puó influire notevolmente nel prezzo finale del veicolo.

I controlli devono inoltre determinare e intervenire correttamente su alcune condizioni come il ribaltamento, il rollo, il salto e la partenza.

Inoltre viene tenuta in considerazione la possibilitá di convertire facilmente il controllo per l'uso su un autoveicolo.

### Centralina

Sono stati presi in considerazione diversi modelli di centralina motore prodotti da Athena, sostanzialmente equivalenti nell'organizzazione del firmware e dell'hardware. Tutti i modelli considerati, oltre agli ingressi e le uscite necessari al funzionamento del motore, hanno due ingressi riservati a sensori di velocitá di tipo Hall. Alcuni possono inoltre comandare un corpo farfallato motorizzato e una valvola per il controllo del minimo. In funzione delle differenti configurazioni attualmente

utilizzate, dipendenti dall'applicazione finale, possono restare liberi degli ingressi analogici e digitali. Tutti i modelli hanno una linea di comunicazione bidirezionale basata sul bus CAN.

Per la realizzazione del controllo di trazione é stato richiesto di utilizzare le configurazioni I/O già esistenti anche se viene tenuta in considerazione la possibilità di dedicare alcune linee (anche attraverso CAN) per il collegamento di altri sensori. Il firmware é implementato in un microcontrollore RISC a virgola fissa che gestisce tutte le funzioni della centralina. Sono messi a disposizione per il controllo della trazione tutte le tabelle, piani, variabili e calcoli intermedi già esistenti per il normale funzionamento e viene data la possibilità di creare liberamente algoritmi rispettando le temporizzazioni e lo scheduling già implementato. In alcuni casi é anche possibile far eseguire delle funzioni in corrispondenza di alcuni interrupt del microcontrollore.

In alcune applicazioni é già esistente un controllo di partenza (launch control) con cui il controllo di trazione dovrà in qualche modo interfacciarsi.

### **Regole e destinazione d'uso**

La centralina é destinata a un mercato molto vasto che va da tutte le tipologie di motoveicoli alle auto, sia da competizione che di serie. Ognuno di questi settori ha una propria regolamentazione e impone quindi delle limitazioni sulla configurazione del controllo di trazione.

Sebbene non siano stati dati particolari vincoli a riguardo, é stato comunque richiesto di tenerne conto.

Sono stati presi in considerazione alcuni esempi di applicazioni e di regole in qualche modo restrittive nell'uso e nella configurazione dei controlli di trazione e di interesse per le possibili applicazioni delle centraline utilizzate.

### **Campionati motociclistici**

La maggior parte delle competizioni motociclistiche é aperta a veicoli prodotti in serie. Nei campionati aperti a prototipi o veicoli prodotti solo per le competizioni, non ci sono importanti limitazioni dal punto di vista dell'utilizzo di controlli elettronici. In altri campionati invece viene richiesto che i veicoli mantengano inalterata la loro configurazione di serie. Viene solitamente data la possibilità di sostituire la centralina elettronica ma non é possibile a volte aggiungere sensori o attuatori non previsti dal produttore della moto. In particolare, non essendo la quasi totalità dei veicoli già provvista di controlli elettronici di frenata o trazione, non sono presenti sensori di velocità sulle ruote. Anche il sensore di marcia inserita non é quasi mai

presente, a meno dell'interruttore che indica la folle. I sistemi ETC su motoveicoli di serie non sono quasi mai utilizzati per cui non é di norma possibile utilizzarli dove non previsti.

I regolamenti della Federazione Internazionale di Motociclismo si applicano anche per veicoli ATV e motoslitte da neve.

### **Formula SAE**

Essendo una competizione nata come progetto didattico, non ci sono particolari restrizioni sull'utilizzo di controlli elettronici, quantità e tipologia di sensori. Le maggiori restrizioni sono mirate a rendere i veicoli, costruiti da studenti, sicuri.

#### **B7.1.4**

“Brake-by-wire” systems are prohibited.

#### **B8.5.2 Throttle Actuation**

The throttle must be actuated mechanically, i.e. via a cable or a rod system.

The use of electronic throttle control (ETC) or “drive-by-wire” is prohibited.

É chiaro che in questo tipo di competizione un controllo della trazione che agisca su freni e corpo farfallato non sarebbe ammissibile.

Un altro aspetto da considerare é il costo dei vari sottosistemi che viene valutato nel *cost event*. Ovviamente piú il sistema é complesso e ricco di componenti, piú aumenta il suo costo.

### **Semplicitá**

Il requisito fondamentale del controllo, che é servito da linea guida principale per la progettazione, é la semplicitá. Devono essere quindi evitati algoritmi troppo complessi dal punto di vista computazionale e l'uso di un eccessivo numero di tabelle o variabili da impostare sia per le limitazioni del microcontrollore (nonostante le prestazioni siano buone, vanno comunque evitati calcoli in virgola mobile e lo spreco di eccessive risorse RAM/ROM), che per la inevitabile difficoltà di tarare un controllo con troppi gradi di libertà.

### **Conclusione**

Sono stati resi disponibili i seguenti segnali:

- RPM
- TPS
- Velocità 1
- Velocità 2
- *qualsiasi elaborazione matematica di tali segnali già calcolata in centralina*

Sarà possibile scrivere qualsiasi tipo di algoritmo tenendo conto delle limitazioni computazionali ma viene comunque richiesto di rispettare per quanto possibile la logica interna e le temporizzazioni già implementate.

Il controllo deve essere in ogni caso semplice e facilmente regolabile.



# Capitolo 7

## Strumenti e loro utilizzo

Vengono ora presentati gli strumenti hardware e software utilizzati per l'acquisizione dei dati, la loro elaborazione e come questi strumenti sono stati utilizzati per lo studio dei controlli presentati in questa tesi.

### 7.1 Software

Sono stati utilizzati diversi applicativi che possono essere distinti in due categorie: software per l'elaborazione dei dati e software di gestione dei dispositivi elettronici per l'acquisizione dei segnali dal veicolo, nonché la centralina motore.

#### Scilab e Scicos

Scilab e Scicos fanno parte di un pacchetto di software open source che permette di eseguire facilmente operazioni su matrici, risolvere e visualizzare funzioni matematiche e simulare schemi a blocchi. Le due applicazioni possono essere paragonate come funzionalità ai più noti Matlab e Simulink. Pur essendo nato su piattaforma Linux, ne esiste una versione per i sistemi operativi Windows.

Scicos é stato utilizzato principalmente per simulare la centralina motore. Sono state simulate solo le parti necessarie per lo sviluppo del controllo di trazione cercando di riprodurre fedelmente non solo la logica della centralina ma anche le corrette temporizzazioni e le inevitabili quantizzazioni dovute all'organizzazione a virgola fissa del controllore. Nella simulazione é stata posta, inoltre, particolare cura nella corretta lettura dei segnali provenienti dai sensori.

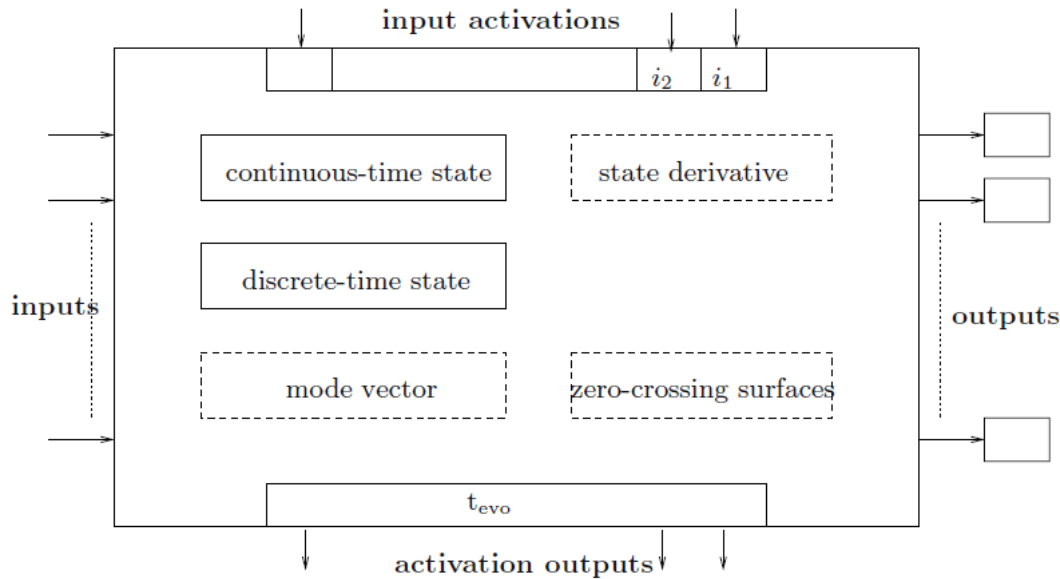


Figura 7.1: Rappresentazione di un generico blocco Scicos

### Note sulle diverse versioni del software

L'evoluzione di questi programmi é stata portata avanti da diversi gruppi di sviluppatori. Scilab e Scicos sono di fatto due applicativi distinti, sebbene siano stati inizialmente sviluppati e distribuiti assieme. Nel 2005 un gruppo separato di progettisti ha portato avanti lo sviluppo di ScicosLab che contiene al suo interno Scicos. Nel frattempo il gruppo di lavoro originario ha pubblicato una nuova versione dei due applicativi dove ora Scicos viene chiamato xcos. Durante il periodo di tesi sono state testate diverse versioni di questi applicativi e la scelta finale é ricaduta su ScicosLab ora giunto alla versione 4.4.

Fra le varie versioni il linguaggio di programmazione e la gestione dei blocchi rimane uguale, salvo piccoli particolari, mentre i file dei diagrammi Scicos non sono in genere compatibili fra le diverse versioni.

In questa tesi si fa quindi riferimento a Scilab e Scicos come linguaggi di programmazione, indipendentemente dalla piattaforma software utilizzata.

Tutte le versioni considerate utilizzano un compilatore C esterno al programma. Questo comporta che, passando fra Linux e Windows, alcune piccole parti di codice possano dover essere modificate per adeguarsi alle esigenze dei diversi compilatori.

### Blocchi Scicos e gestione degli eventi

Scicos é un ambiente di sviluppo in cui vengono collegati fra loro dei blocchi. Ogni blocco, il modulo base che costituisce un diagramma di Scicos, puó gestire numerosi vettori in ingresso e uscita, segnali di attivazione in ingresso e uscita, stati per la

simulazione a tempo continuo e a tempo discreto e altri registri e flag che descrivono alcune condizioni interne del blocco.

In generale il funzionamento dei blocchi é molto complesso ma, nella maggior parte dei casi e, in particolare per la realizzazione dei modelli per il controllo, si utilizza solo una parte delle loro funzionalità:

- **Ingressi e uscite.** L'insieme degli ingressi (e analogamente delle uscite) é un array di vettori. Ogni elemento dell'array viene rappresentato nell'interfaccia grafica da una freccia in ingresso (o in uscita) al blocco.
- **Stato.** É un vettore che rappresenta lo stato o la memoria del sistema. Esiste un vettore per gli stati continui e uno per gli stati a tempo discreto.
- **Evento.** L'evento in Scicos corrisponde al concetto di interrupt e serve per attivare altri blocchi. É implementato come un vettore di flag (uno per l'ingresso e uno per l'uscita). All'arrivo di un evento si attiva il blocco e vengono settati i flag relativi alle linee che hanno generato l'evento. Gli eventi possono anche essere ereditati dall'ingresso e, anche per questa situazione, c'è un apposito flag.

## Linguaggio C

Ogni singolo blocco é descritto da uno script in linguaggio Scilab che ne definisce sostanzialmente le caratteristiche grafiche (numero di ingressi-uscite-eventi, dimensione del blocco, icona, schermata per l'impostazione dei parametri, ecc.) e da una funzione in linguaggio Scilab, Fortran o C che esegue effettivamente le operazioni su ingressi e uscite.

La funzione viene chiamata quando un blocco viene attivato da un qualsiasi evento interno, esterno o per necessità del motore di simulazione.

Per la realizzazione dei modelli di questa tesi é stato utilizzato il linguaggio C in quanto direttamente utilizzabile per l'implementazione sul microcontrollore. In Figura 7.2 viene descritto un esempio della funzione C che descrive un generico blocco Scicos. Fra i commenti segnati in rosso andrà poi inserito il codice da portare sul microcontrollore. Per mantenere anche il nome delle variabili utilizzato nell'implementazione in centralina é sufficiente modificare le dichiarazioni sotto al commento *Definizioni* che, in questo caso identificano un ingresso, un'uscita, uno stato e un parametro passato dall'interfaccia grafica.

## Eventi e temporizzazione

Uno degli aspetti piú interessanti di Scicos é la gestione degli eventi temporali che si é rivelato particolarmente adatto alla simulazione della centralina.

Un evento di Scicos é un segnale che provoca l'esecuzione di un blocco, ovvero di una funzione simile a quella descritta in Figura 7.2. Esistono diverse ragioni per cui viene generato un evento. Quelli di interesse di questa tesi sono unicamente quelli relativi agli ingressi-uscite dei blocchi che indicano quindi quando l'espressione identificata dal blocco viene eseguita. Gli eventi possono essere espliciti (segnale in rosso in uscita o entrata da alcuni blocchi) o impliciti, cioè generati quando un blocco genera un segnale in uscita.

In Figura 7.3 é riprodotto un generico stadio di ingresso per dei segnali acquisiti da un datalogger e successivamente dati in ingresso a Scicos sotto forma di file di testo. Tale diagramma é quindi un esempio di come é stata realizzata una parte del sistema di simulazione.

I blocchi sulla sinistra del diagramma servono per la lettura dei file. Quello iden-

```
#include <scicos/scicos_block4.h>

#define r_IN(n, j) ((GetRealInPortPtrs(block, n+1))[(j)])
#define r_OUT(n, j) ((GetRealOutPortPtrs(block, n+1))[(j)])
#define par (GetRparPtrs(block))
#define state (GetDstate(block))

// Definizioni
#define u0 (r_IN(0, 0))
#define y0 (r_OUT(0, 0))
#define state0 state(0)
#define par0 par(0)

void funzione(scicos_block *block,int flag)
{
    switch(flag)
    {
        case 1:
            // inizio codice

            // fine codice
            break;
    }
}
```

Figura 7.2: Esempio di funzione di un blocco generico in C

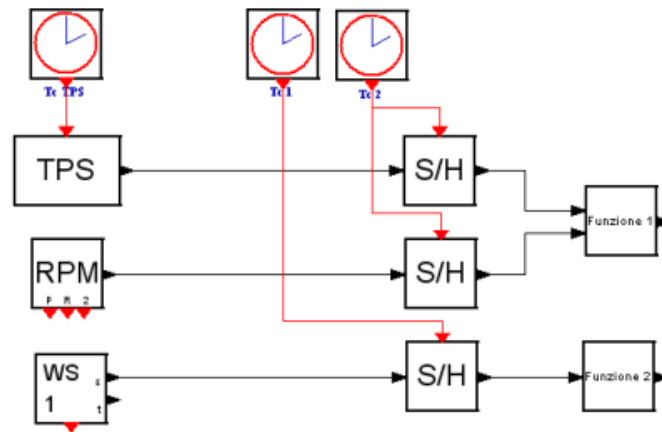


Figura 7.3: Esempio di configurazione per la lettura dei dati

tificato da TPS serve per la lettura di un generico segnale analogico fornito da un file in cui, a ogni attivazione del blocco, viene letto un campione. È stato utilizzato un blocco già reso disponibile dagli sviluppatori di Scicos.

Il blocco identificato da RPM è stato invece creato usando più blocchi primitivi di Scicos e permette di leggere un file di testo, creato attraverso gli applicativi Java a partire da un segnale campionato a tempo costante. In uscita viene dato, oltre al valore RPM, anche un segnale per ogni giro dell'albero motore, uno per ogni giro motore e uno ogni ciclo completo motore<sup>1</sup>.

Il blocco identificato da WS# è costruito in modo analogo a quello di RPM ma serve a fornire un segnale di velocità e genera un segnale di attivazione simulando il passaggio del dente della ruota fonica sul sensore. Fornisce, oltre alla velocità, anche il tempo fra il dente attuale e il dente precedente. Per la determinazione del valore di velocità è necessario impostare il numero di denti della ruota fonica e il raggio della ruota. Questi valori devono essere uguali a quelli utilizzati nell'applicazione Java per convertire i valori dal tempo continuo. Tuttavia, utilizzando valori differenti, è possibile simulare, per esempio, il comportamento del sistema nel caso in cui vengano impostati dei valori di configurazione errati.

Con blocchi di questo tipo si simula quindi l'interfaccia fra sensore e sistema. Utilizzando dei blocchi di tipo *sample-and-hold*, identificati da S/H, si riproducono poi le temporizzazioni della centralina. In particolare, la Funzione 2 utilizzerà i valori di WS1 e verrà eseguita a una frequenza determinata da TC 1, la Funzione 2 utilizzerà i valori di RPM e TPS e verrà eseguita a una frequenza stabilita da TC 2. I blocchi TC 1 e TC 2 generano quello che, nel microcontrollore, potrebbe

<sup>1</sup>Se si considera un motore a quattro tempi a più cilindri sfasati di 180° per un totale di 720°. In generale, il primo segnale di attivazione dipende dal file di ingresso, il secondo viene attivato ogni due attivazioni del primo e il terzo ogni quattro attivazioni del primo

essere l'interrupt prodotto dall'overflow di un timer.

Per eseguire una funzione, per esempio, a ogni passaggio del dente della ruota fonica, basterebbe collegare l'uscita di attivazione del blocco WS1 all'ingresso di attivazione di un *sample-and-hold*

### Visualizzazione e analisi dei dati

I segnali, sia quelli forniti in ingresso, sia quelli generati nella simulazione, possono essere visualizzati e analizzati in modi diversi. Esistono dei blocchi Scicos che permettono la generazione di grafici e altri che permettono il salvataggio su file e la successiva visualizzazione con altri metodi. Sono stati utilizzati entrambi i metodi. Inizialmente il primo è risultato il più intuitivo e semplice ma si è rivelato troppo limitativo in quanto, una volta scelta la configurazione dei segnali da visualizzare, la modifica della posizione o l'aggiunta di un nuovo segnale richiedeva una modifica del diagramma Scicos. Questa modalità di visualizzazione è stata utilizzata solo per verificare il funzionamento di piccole parti del sistema da simulare.

Per le analisi più complesse si è preferito salvare tutti i segnali in un unico file, effettuare il lancio della simulazione dall'ambiente Scilab, leggere il file generato e visualizzare solo i dati necessari richiamando comuni funzioni di plotting.

Questo sistema, unito alla possibilità di scrivere degli script in linguaggio Scilab, ha anche permesso di effettuare delle simulazioni parametriche e di scegliere la configurazione dei segnali da visualizzare modificando solo poche righe di uno script.

### GET MX2

MX2 è il programma prodotto da Athena per l'analisi dei dati provenienti dal veicolo. Permette inoltre di configurare e di interfacciarsi facilmente con i datalogger prodotti da Athena.

È possibile, attraverso un'interfaccia abbastanza semplice e intuitiva, selezionare quali segnali visualizzare e creare nuovi segnali attraverso delle formule liberamente impostabili visualizzando, campione per campione, la posizione del veicolo sul tracciato (posizione fornita dal GPS).

Possono essere creati diversi layout di visualizzazione per permettere di confrontare rapidamente acquisizioni provenienti, per esempio, da diversi veicoli o in momenti diversi.

Una funzione molto importante è la possibilità di esportare i dati, memorizzati su file codificati in formato proprietario, su file csv facilmente analizzabili.

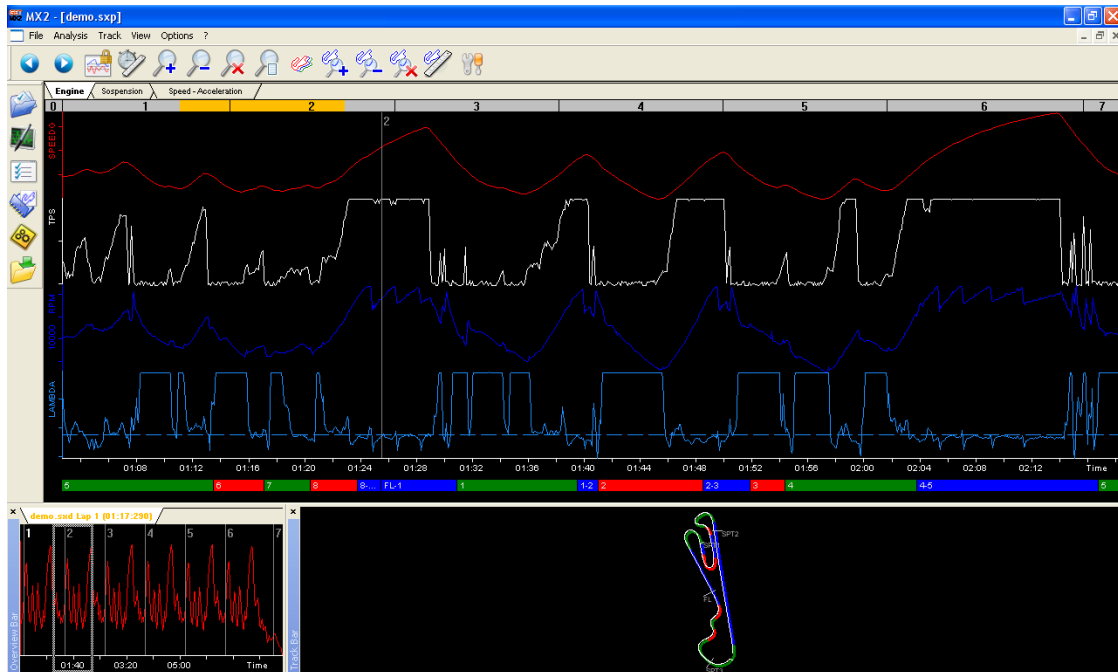


Figura 7.4: Schermata principale di GET MX2

## Maya

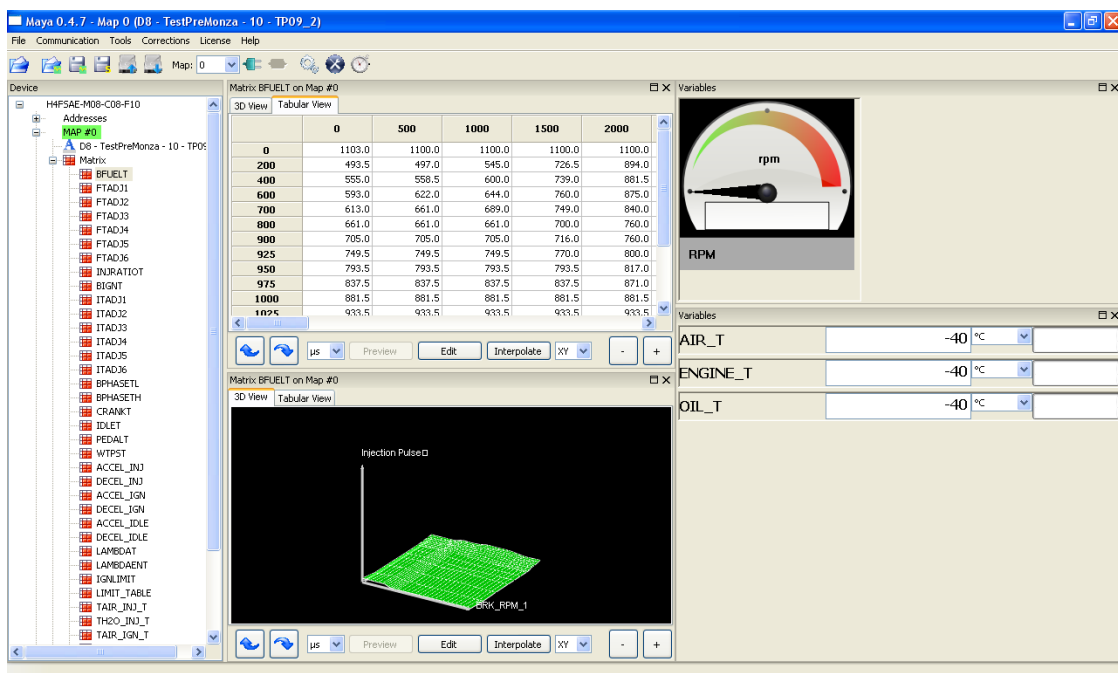


Figura 7.5: Tipica schermata di Maya

Maya é il software prodotto da Athena per la configurazione delle proprie centraline motore. Permette di visualizzare e di modificare, sotto forma di tabelle bi- o tridimensionali o di grafici, tutti i parametri configurabili in centralina. É possibile

aprire liberamente piú sottofinestre per poter visualizzare le configurazioni della centralina e i parametri motore anche in tempo reale rendendo agevole il setup e la mappatura.

## i2Pro

i2Pro é il sistema di analisi dei dati acquisiti dai datalogger prodotti da MoTeC. Svolge le stesse funzioni di MX2 tranne per la gestione del datalogger che é affidata a un secondo applicativo. Anche i2Pro permette l'esportazione dei dati in formato CSV.

## Java e NetBeans IDE

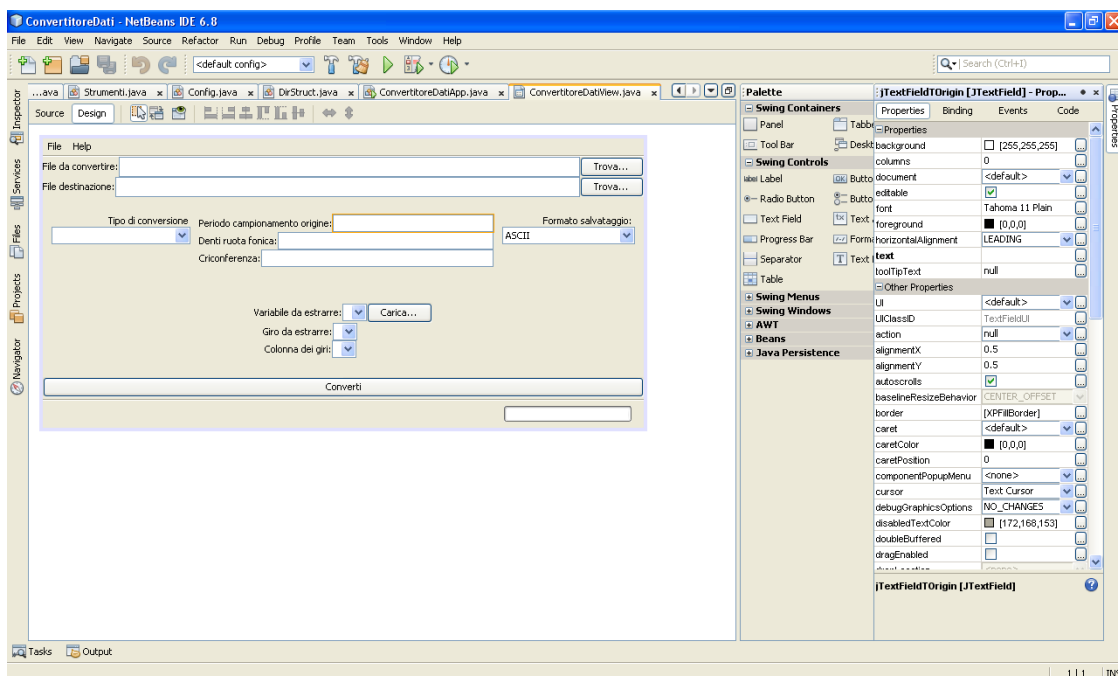


Figura 7.6: Ambiente di sviluppo NetBeans IDE

Java é un linguaggio di programmazione orientato agli oggetti sviluppato da Sun Microsystems. La stessa Sun Microsystems mette liberamente a disposizione anche un evoluto sistema di sviluppo, NetBeans IDE, che permette di realizzare applicazioni, anche con interfaccia grafica, in brevissimo tempo. É stato scelto fra i diversi linguaggi di programmazione esistenti per la grande facilitá nello sviluppare semplici programmi e per la portabilitá che permette di utilizzare i programmi sviluppati sia su Windows che su Linux. In Java sono state realizzate delle utility per convertire, filtrare ed elaborare i dati esportati dai software di acquisizione.



## Convertitore Dati

Le utility create sono state riunite sotto un'unica applicazione che svolge quattro funzioni:

- Convertire i file esportati dai software di acquisizione dati in formato leggibile dal simulatore
- Convertire valori di RPM campionati a tempo continuo in un formato che permette di generare degli eventi in Scicos a ogni ciclo motore
- Convertire valori di velocità campionati a tempo continuo in un formato che permette di simulare in Scicos il passaggio di un dente della ruota fonica sul sensore
- Generare un file campionato a tempo continuo con frequenza di campionamento maggiore del file di origine attraverso interpolazione lineare

## 7.2 Sistema di acquisizione

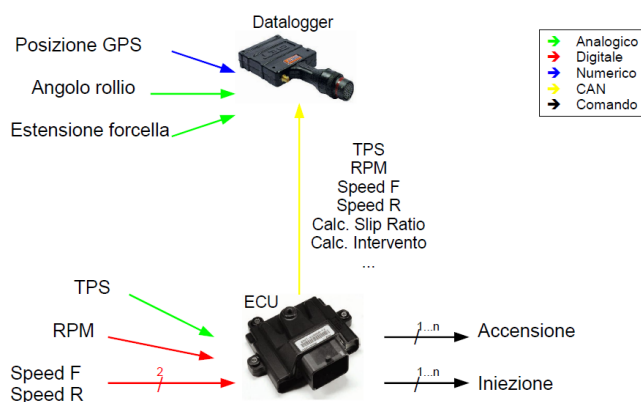


Figura 7.7: Sistema di acquisizione dati adatto a un motoveicolo

Per ottenere dei dati da analizzare è necessario avere un veicolo con installati dei sensori e almeno una centralina che ne acquisisca i segnali generati. Per l'analisi delle funzionalità del controllo è inoltre ovviamente necessaria una centralina motore con implementato il sistema di controllo della trazione da studiare. È possibile collegare i sottosistemi con configurazioni molto diverse fra loro. Verranno ora presentate alcune possibili soluzioni di massima che sono state utilizzate per acquisire i dati per le analisi di questa tesi.

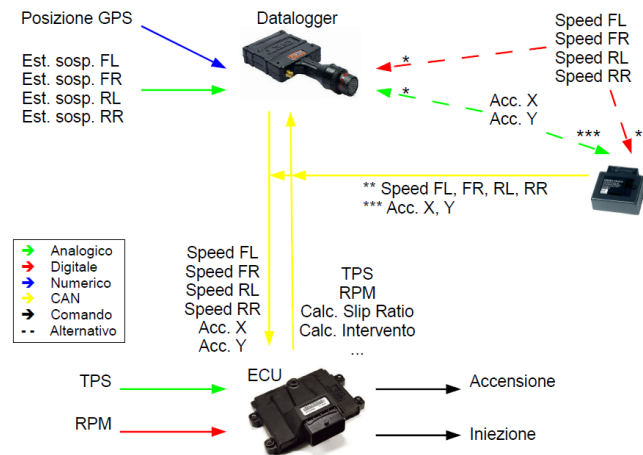


Figura 7.8: Sistema di acquisizione dati adatto a un autoveicolo

Una centralina di acquisizione o datalogger è un dispositivo che permette di memorizzare dei segnali elettrici dati in ingresso. La maggior parte dei sistemi di acquisizione utilizzati in ambito motor sport permette frequenze di campionamento fino a 100Hz e a volte fino a 1kHz. Tuttavia, soprattutto se sono presenti grandi quantità di segnali da memorizzare, è possibile scegliere di campionare a frequenze più basse. Nel configurare il sistema di acquisizione va quindi tenuta in considerazione la velocità di cambiamento delle grandezze fisiche che si vogliono raccogliere anche in funzione dell'uso che se ne vuole fare. Inoltre, per i segnali provenienti da linee di comunicazione digitale, risulta inutile campionare a frequenze superiori a quella in cui vengono inviati i dati al datalogger. Nonostante non sia difficile configurare un sistema di acquisizione almeno di piccole dimensioni, non bisogna comunque perdere di vista il “percorso” del segnale dal sensore al computer che lo analizzerà, per evitare di perdere informazioni e trovarsi quindi con dati inutilizzabili.

I segnali richiesti per lo sviluppo del sistema di controllo sono RPM, TPS e due velocità. È importante che questi segnali, quando dati in ingresso ai modelli di simulazione, siano il più possibile uguali ai valori effettivamente acquisiti e calcolati nella centralina motore. Per questo motivo, oltre a RPM e TPS, anche i due segnali di velocità sono direttamente collegati alla centralina motore. Quest'ultima comunica questi dati al datalogger attraverso una linea CAN. Sempre attraverso il bus CAN vengono passati i valori di altre variabili calcolate all'interno della centralina motore, come i valori di intervento del controllo. Per l'analisi è anche indispensabile conoscere la posizione e l'assetto del veicolo attraverso sensori come GPS, accelerometri, sensori di estensione delle sospensioni, ecc. che vengono invece

collegati direttamente al datalogger.

Nel caso si studi il comportamento di un motoveicolo questa configurazione é sicuramente adeguata (Figura 7.7), per un'auto invece, avendo a disposizione almeno quattro velocitá, é piú opportuno acquisirle direttamente all'interno del datalogger o, attraverso un'ulteriore centralina di condizionamento dei segnali che li comunichi eventualmente alla centralina attraverso la linea CAN. In Figura 7.8 é rappresentato un esempio di tale configurazione. La scelta di collegare alcuni segnali nella configurazione indicata da \* é la piú semplice se il datalogger é in grado di portare sul bus CAN i segnali provenienti dalle sue linee fisiche e se la presenza del datalogger é ammissibile per via delle sue dimensioni fisiche, peso, costo o per questioni di regolamento nelle competizioni. Se il datalogger dovesse essere per queste ragioni eliminato nell'applicazione finale, é possibile utilizzare una o piú centraline come indicato nella figura. Questo é indispensabile se il datalogger non puó trasmettere dati via CAN o se, oltre alla conversione da segnale elettrico a numerico, sia necessario eseguire elaborazioni particolari.

In generale c'è uno scambio di informazioni fra le diverse centraline installate nel veicolo che possono acquisire in modi differenti i segnali provenienti dai sensori per poi essere raccolte e memorizzate nel datalogger.

## **Modello del veicolo per la simulazione retroazionata**

Per verificare la correttezza non solo logica ma anche funzionale degli algoritmi, é possibile costruire un modello del veicolo da controllare per chiudere l'anello di retroazione e simulare quindi se l'algoritmo é in grado di funzionare su un veicolo. Questo tipo di approccio si é subito rivelato impraticabile in quanto la rilevanza dei dati ottenuti non sarebbe stata giustificata dalla complessitá del modello. Il tipo di controllo studiato, inoltre, é destinato sia a motoveicoli che autoveicoli per cui sarebbe stato necessario realizzare piú modelli completamente diversi tra di loro. Ulteriore anello della retroazione del sistema controllato é il guidatore la cui reazione all'intervento del controllo non é facilmente determinabile e quindi simulabile. Si é deciso di affidare preliminarmente la verifica del funzionamento del controllo all'analisi manuale delle simulazioni verificando se il controllo intervenisse nelle condizioni identificate e se l'entitá dell'intervento fosse adeguata. Una volta verificata la realizzabilitá del controllo ci si é affidati a test su veicoli strumentati attraverso i quali é stato possibile avere un quadro piú completo delle peculiaritá e dei limiti del controllo e del sistema di simulazione realizzato.

Una completa simulazione retroazionata, pur essendo sicuramente uno strumento potente per lo studio del controllo, puó dare come risultato solo dei valori numerici

che non hanno nessun significato se non vengono correttamente interpretati.

## 7.3 Uso degli strumenti

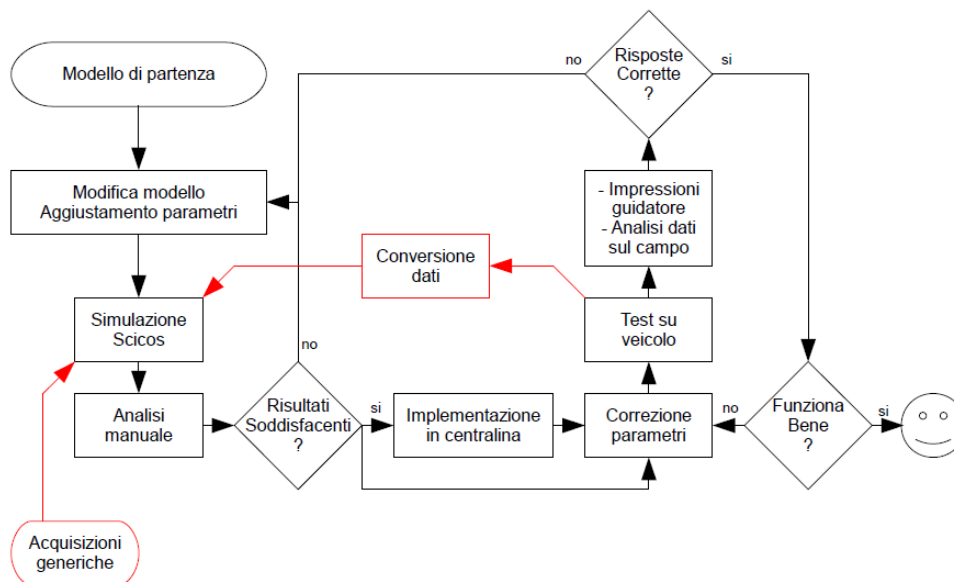


Figura 7.9: Schema operativo per lo studio di un controllo

Dall'analisi del comportamento del veicolo allo studio del sistema di controllo, tutti questi strumenti sono stati usati in modo congiunto. Il cuore del sistema di analisi è Scicos attraverso il quale è stata simulata la centralina e, quindi, il controllo di trazione. I dati da dare in ingresso al sistema sono ottenuti da un datalogger e convertiti in formato compatibile con il simulatore attraverso le applicazioni scritte in Java.

L'obiettivo dell'analisi è stato quello di identificare le situazioni di slittamento e altri casi particolari descritti nel paragrafo 4.1 e di determinare quali segnali fossero indispensabili per il riconoscimento di tali condizioni e in che modo operare su tali segnali per intervenire correttamente. Questa analisi è stata eseguita manualmente studiando le curve visualizzate attraverso software come MX2 o i2Pro. Come aiuto nell'analisi sono stati spesso utilizzati canali matematici per avere un facile riscontro visivo di alcune grandezze e altre funzioni, come la possibilità di visualizzare, campione per campione, la posizione del veicolo sul tracciato.

Non avendo, almeno nella fase preliminare dello studio di un particolare tipo di controllo, la possibilità di testare sul veicolo il reale effetto di tutte le modifiche apportate al modello, molte considerazioni sono state effettuate solo sulla base di

precedenti esperienze o dei principi fisici.

Come visibile in Figura 7.9, il corretto funzionamento del controllo avviene in due modi: attraverso simulazioni e attraverso test. Chiaramente il costo e il tempo di eseguire una simulazione sono molto inferiori a quelli necessari per un test. Anche l'implementazione su centralina é un momento critico nello studio in quanto si possono verificare problemi che richiedono un certo tempo per la risoluzione. Il grosso della progettazione del controllo deve essere quindi eseguito nel modo piú preciso possibile proprio nella prima fase in modo da utilizzare i test solo per la verifica del funzionamento e la taratura del controllo che puó essere eseguita in modo efficace solo sul veicolo. É da notare che, durante tutte le fasi della simulazione, vengono utilizzati diversi dati sia per migliorare il modello, ma anche, una volta che questo viene ritenuto definitivo, per verificare la bontá del motore di simulazione e per acquisire maggiore esperienza nella lettura manuale dei dati.



# Capitolo 8

## Lavoro svolto e risultati ottenuti

Il lavoro di tesi é finalizzato allo studio di un nuovo sistema di controllo della trazione attraverso la realizzazione di modelli e sistemi di simulazione software. I vincoli e il modo di operare, a partire dalle specifiche iniziali, si sono evoluti in funzione di nuove richieste da parte dell'azienda e dei risultati ottenuti da simulazioni e dalle prove sui veicoli.

### 8.1 Modalitá di intervento

Prima della realizzazione del sistema di riconoscimento delle situazioni di slittamento, é necessario determinare come avverrá la riduzione di coppia alle ruote motrici. Fra le diverse possibilitá si é subito scelto intervenire sull'accensione delle candele e sull'iniezione della benzina. La ragione principale per la scelta é la sua semplicitá e velocitá di intervento. Operando infatti su una farfalla motorizzata (comunque non sempre disponibile nei veicoli), intercorre un tempo anche di centinaia di millisecondi fra la rilevazione della condizione di slittamento e l'effettiva riduzione di coppia. Spegnendo invece bobine e iniettori, il controllo é in grado di intervenire potenzialmente al giro motore (o mezzo giro in motori a piú cilindri) successivo alla determinazione dello slittamento.

Ulteriori soluzioni che coinvolgono altri sottosistemi non direttamente controllabili dalla centralina (freni e sistema ABS, valvole secondarie, differenziali, ecc.) non sono stati presi in considerazione.

Il taglio netto dell'alimentazione per la durata della condizione di slittamento, corrispondente di fatto allo spegnimento del motore, é però in molte situazioni poco efficace, soprattutto in ambito motorsport, in quanto provoca una brusca decelerazione del motore che in un autoveicolo puó provocare un ritardo nella ripresa dopo l'intervento, in una moto, in aggiunta, puó addirittura essere pericoloso in quanto

provoca delle brusche sollecitazioni.

Per risolvere almeno in parte questi inconvenienti, si é utilizzato un sistema in cui é previsto un parziale spegnimento del motore, intervenendo solo su alcuni cilindri e in modo non continuativo.

Il sistema prevede una lookup-table di 16 righe e 8 colonne. Per ognuna delle combinazioni di ingresso é possibile impostare in quali cilindri spegnere l'iniezione o l'accensione. Un contatore che incrementa, sempre, a ogni ciclo motore seleziona la colonna della tabella; la riga corrisponde invece all'intensitá di intervento. L'obiettivo di questo sistema di taglio é infatti quello di ottenere idealmente un valore di riduzione di coppia direttamente proporzionale al valore dato in ingresso al sistema che gestisce l'intervento. Ci si puó avvicinare a questa condizione impostando in modo adeguato la tabella di taglio. Anche con questa modalitá di intervento avviene lo "spegnimento" del motore ma solo per un breve periodo di tempo rispetto alla durata della condizione di slittamento.

Nonostante esistano altri sistemi per ridurre la coppia motrice in modo graduale, é stato scelto di utilizzare questa tabella in quanto il meccanismo di funzionamento é giá sfruttato anche per altre funzioni come il limitatore giri, il taglio in cambiata e il launch control. Ulteriore vantaggio di questo sistema é quello di poter studiare un controllo che funzioni in modo indipendente dalla tipologia di intervento infatti, cosí come studiato, é sufficiente fornire al sistema di taglio un valore da 0 a 15, ignorando come il taglio venga effettivamente effettuato. Nel caso in cui la modalitá di intervento dovesse cambiare, il controllo potrebbe funzionare correttamente con nessuna modifica dell'algoritmo.

## 8.2 Evoluzione del modello

L'obiettivo del modello Scicos per la simulazione dei sistemi di controllo é quello di provare gli effetti di diversi algoritmi a partire da dati acquisiti su veicoli. Un modello assolutamente fedele e completo della centralina in ogni sua parte é risultato inutilmente complesso per cui sono state implementate solo le parti necessarie. La possibilitá di aggiungere facilmente blocchi al modello non ha reso questo un limite in quanto eventuali altri sottosistemi della centralina inizialmente non simulati, sono stati agevolmente inseriti senza alterare quanto giá realizzato quando se ne fosse presentata la necessitá. Allo stesso modo é possibile togliere parti inutili per snellire la simulazione. Anche il livello di realismo é stato aggiornato solo quando necessario. Le tabelle lookup, per esempio, sono state implementate usando blocchi giá disponibili in Scicos, ignorando completamente la reale implementazione in



centralina, in quanto aspetto non rilevante ai fini delle analisi da eseguire.

### 8.2.1 Blocchi funzionali realizzati

Per simulare il funzionamento della centralina sono stati utilizzati i blocchi base già disponibili in Scicos e ne sono stati creati degli altri quando se ne fosse presentata la necessità.

#### Velocità ruote

Un aspetto ritenuto molto importante da simulare è la corretta riproduzione della successione degli eventi in centralina. I calcoli, la lettura dei sensori e l'effettiva applicazione dei segnali calcolati avvengono infatti in tempi e con frequenze diverse fra loro. È stato quindi necessario riconvertire i segnali di velocità ruote in modo da simulare l'interrupt al passaggio del dente delle ruote foniche. Si è scelto di procedere in questa direzione per poter verificare se e quanto il numero dei riferimenti della ruota fonica influisse sull'efficacia del controllo. È anche stato possibile verificare quanto fosse importante eseguire alcuni algoritmi al passaggio dei riferimenti della ruota fonica sul sensore piuttosto che a tempo costante o vice versa.

Una volta realizzato il modello e il programma per la conversione dei dati si è provveduto a verificare eventuali anomalie o limiti della simulazione. Si verificano dei problemi a bassissime velocità in quanto la distanza fra i riferimenti aumenta molto rendendo particolarmente inaffidabili le parti di simulazione al di sotto dei 3-5km/h. Questo tuttavia non si è rilevato essere un grosso problema in quanto i controlli sono in genere attivi a velocità più alte dove l'errore è quasi nullo. È da tenere comunque in considerazione che, anche nella realtà a basse velocità, i riferimenti sono molto distanti fra loro dando luogo a potenziali anomalie. Si nota che, anche quando la velocità è sufficientemente alta, è impossibile ricostruire l'istante esatto di passaggio dei riferimenti per cui si può dire che il segnale ricostruito sia un'ottima approssimazione di quanto realmente acquisito, a meno di qualche piccolo sfasamento.

Questo sistema di elaborazione delle velocità ha permesso, assieme ad altre considerazioni, di decidere quando eseguire determinati algoritmi per il controllo della trazione.

### **Velocità motore**

Anche per la velocità del motore è stato utilizzato un sistema molto simile che non presenta i problemi a basse velocità riscontrati per le ruote in quanto il motore, quando acceso, ruota sempre a una velocità molto più alta di quella alla quale si verificano errori. Gli eventi generati sono stati utilizzati principalmente per l'analisi visiva delle simulazioni in cui è possibile distinguere cosa succede a ogni ciclo motore quando cioè è possibile attuare l'intervento di riduzione della coppia.

### **Riconoscimento della marcia inserita**

Nei primi modelli è stato creato un blocco Scicos che, a partire dalla velocità della ruota motrice e dalla velocità del motore, permette di calcolare la marcia inserita. Il blocco restituisce il numero della marcia inserita sulla base dell'elenco dei rapporti inseriti come parametro. Sono state anche inserite alcune misure per prevenire valori errati al cambio marcia. L'algoritmo è stato verificato con discreto successo a partire dalle acquisizioni provenienti dalla vettura MG0308 del RaceUP Team. Il motore Kawasaki dispone di un sensore che misura la velocità dell'albero secondario del cambio, da cui proviene un segnale non influenzato dagli effetti della catena e dagli altri organi di trasmissione che vanno alle ruote.

Così come era stato provato nelle simulazioni, il valore di marcia veniva successivamente passato a una lookup table che forniva un correttivo da applicare direttamente all'intensità di intervento calcolata dal controllo.

Ulteriori verifiche sono state eseguite a partire da acquisizioni su moto da cross dove la velocità della ruota viene letta a valle della catena. La grande rumorosità di tale segnale, causata dai movimenti della catena molto ampi a causa della grande escursione della sospensione posteriore tipica di questo tipo di moto, non ha permesso in nessun modo un efficace riconoscimento della marcia inserita.

L'algoritmo di calcolo del rapporto di trasmissione tuttavia non è stato implementato nei due sistemi di controllo poi realizzati ma rimane comunque uno strumento utile nelle simulazioni ed eventualmente per successive applicazioni.

### **Correttivi sulle accelerazioni**

Sempre nella fase di studio dei primi modelli è stata prevista la possibilità di correggere il valore di intervento a partire da due segnali numerici generici.

Tale sistema permette correzioni a partire per esempio dalle accelerazioni longitudinali e laterali di un autoveicolo o dall'accelerazione longitudinale e dall'angolo di rollio per un motociclo. Il sistema, così come ideato, permette idealmente di

impostare i parametri di correzione in modo intuitivo, sulla base di semplici considerazioni fisiche sui trasferimenti di carico. Nella pratica tuttavia la taratura finale di tali correzioni non é agevole e richiede un notevole sforzo. Vista l'applicazione finale di questi controlli e la necessità di aggiungere sensori, tali correttivi non sono stati implementati.

Come per altre parti di modello poi non utilizzate o modificate, anche in questo caso si prova l'utilità dei modelli di simulazioni che permettono velocemente di capire se una soluzione può essere efficace e quindi approfondito il suo studio fino all'implementazione o, vice versa, se non sia più opportuno proseguirne l'analisi.

### **Slip ratio**

Una delle grandezze più importanti per il controllo di trazione é lo slip ratio. A partire dall'equazione già introdotta sono state effettuate delle modifiche all'algoritmo per renderlo funzionale e robusto. In particolare é stato studiato come evitare la divisione per 0, inevitabile a veicolo fermo.

Attraverso questo blocco sono stati provati diversi sistemi per la determinare l'intensità di intervento ed é il blocco principale del controllo basato sullo slip ratio poi realizzato e descritto nel paragrafo 8.3.

### **Derivata**

Pur essendo già disponibili in Scicos dei blocchi di calcolo sia per la derivata continua che per la derivata a tempo discreto, é stato creato un blocco programmato in C che permettesse di testare un algoritmo poi utilizzabile per l'implementazione, dal momento che, come confermato dalle numerose simulazioni, l'operatore di derivata é risultato un elemento particolarmente critico.

### **Filtraggio dei dati**

In molti casi si é reso indispensabile filtrare i dati acquisiti dai sensori o calcolati. Sono stati realizzati due tipi di filtro, entrambi rappresentati in Scicos da un blocco con un ingresso e un'uscita. Entrambi realizzano sistemi del primo ordine. Pur essendo presenti in Scicos dei blocchi che realizzano filtri digitali, si é preferito scrivere gli algoritmi in C in modo da poter verificare la funzionalità del filtro non solo a livello di sistema, ma anche a livello di codice.

Nell'implementazione in centralina di uno dei filtri, che nella simulazione ha dato buoni risultati, si sono verificati dei problemi che ne hanno reso impossibile l'utilizzo.

Questo ha portato in luce il problema della portabilità del codice per cui quanto scritto in linguaggio C in Scilab/Scicos deve essere comunque rianalizzato ed eventualmente corretto nell'implementazione su microcontrollore. Questa limitazione tuttavia permette comunque di provare il funzionamento logico degli algoritmi scritti e non é quindi da considerarsi un grosso difetto in quanto gli obiettivi del sistema di simulazione sono comunque rispettati.

### 8.2.2 Prime simulazioni

Inizialmente é stato realizzato un modello della centralina generico e si é verificata e affermata la sua validità. É stato poi abbozzato quello che sarebbe diventato il primo controllo poi implementato.

Le prime simulazioni sono state eseguite sulla base di acquisizioni effettuate sulla vettura MG0308. Grazie a questi test é stato possibile realizzare e perfezionare i blocchi presentati nei paragrafi precedenti.

Per quanto riguarda la generazione dei segnali di velocità e giri motore, é stato possibile verificare la correttezza del funzionamento sia dei blocchi Scicos che dell'applicazione Java che effettua la conversione. Inizialmente si presentava un comportamento anomalo quando il veicolo da una condizione di movimento si fermava. Una correzione del software di conversione ha risolto, almeno parzialmente, questo problema. Per quanto già esposto, confermato anche da tutte le seguenti simulazioni e acquisizioni, non si é ritenuto necessario affinare ulteriormente tale sistema.

La decisione di calcolare lo slip ratio é stata subito presa in considerazione in quanto parametro sicuramente utile, almeno per l'analisi visiva dei risultati. L'equazione di calcolo di questo parametro é stata quindi inserita nel modello.

Soprattutto per familiarizzare con le diverse grandezze fisiche in gioco, sono state inseriti dei blocchi per la visualizzazione e l'eventuale analisi di ulteriori segnali come le accelerazioni laterali e longitudinali. Sempre in questa fase é stato creato il blocco di calcolo della marcia inserita.

É stato previsto anche un calcolo della derivata dei giri motore, in vista della realizzazione di un controllo con minimo numero di sensori.

Durante le prime simulazioni si é subito reso indispensabile filtrare alcuni segnali, in particolare quelli di velocità, per cui sono stati studiati e inseriti nel modello i filtri presentati nel paragrafo precedente.

Questo modello risultava particolarmente complicato e dispersivo ma, nonostante fossero stati inseriti parametri di configurazione in modo non particolarmente

curato, era comunque in grado di rilevare in modo sostanzialmente corretto le situazioni di slittamento e di restituire dei valori di intensità di intervento ritenuti adeguati per proseguire con tale sistema di simulazione.

### 8.3 Controllo sullo slip ratio

Dopo aver verificato la bontà e l'effettiva utilizzabilità del sistema di studio adottato, è stato sostanzialmente modificato il modello appena descritto, mantenendo e migliorando solo la parte in cui viene calcolato lo slip ratio.

A questo punto è stato richiesto di proseguire lo studio del sistema di controllo soprattutto per l'applicazione su motocross. Le acquisizioni utilizzate per il successivo sviluppo sono state quindi effettuate su questo tipo di veicoli. I dati, acquisiti su un percorso contenente le situazioni tipiche delle competizioni motocross, contenevano diversi parametri motore rilevati direttamente nella centralina motore (fra cui la velocità delle ruote) e da altri sensori esterni collegati direttamente al datalogger. Oltre ai dati "numerici", conoscendo la posizione della moto sulla pista fornita dal ricevitore GPS, è stato anche possibile individuare salti e cambiamenti di pendenza non sempre facilmente identificabili dall'acquisizione in sé.

La scelta dei parametri iniziali di configurazione da inserire nella simulazione è stata effettuata sulla base di semplici considerazioni fisiche. Verificato che il controllo fosse in grado di intervenire in modo sostanzialmente corretto, è stata decisa la configurazione definitiva da adottare. In questa fase si è notato come i segnali di velocità delle ruote fossero spesso rumorosi necessitando l'introduzione dei filtri descritti nel paragrafo 8.2.1.

A questo punto sono stati curati alcuni dettagli come l'effetto della discretizzazione dovuta all'organizzazione a virgola fissa del processore e, sempre sulla base di simulazioni parametriche è stato possibile determinare la risoluzione e il range dei parametri di configurazione che permettessero un'adeguata flessibilità di impostazione.

La versione definitiva del controllo prevede il calcolo dell'intervento sulla base della determinazione dello slip ratio. Il controllo utilizza 4 segnali provenienti da sensori:

- Velocità ruota anteriore (o non motrice)
- Velocità ruota posteriore (o motrice)
- RPM
- TPS

ed é configurabile attraverso 8 parametri

- Soglia su TPS
- Soglia su RPM
- Soglia su velocità
- Soglia su slip ratio
- Guadagno proporzionale (GAIN)
- Guadagno derivativo (GAIND)
- Offset (OFFSET)
- Profondità filtro

É presente un ulteriore parametro che abilita o disabilita la funzionalità di controllo di trazione.

I primi quattro parametri servono a stabilire le condizioni di abilitazione dell'intervento. Per i primi tre é possibile decidere se abilitare il controllo quando i valori letti sono superiori o inferiori alla soglia fissata; per lo slip ratio é invece possibile abilitare il controllo solo al di sopra della soglia impostata.

Per la determinazione dell'intensità di intervento, viene calcolato lo slip ratio a partire dai segnali provenienti dai sensori di velocità. Il blocco di calcolo dello slip ratio é costruito in modo tale da non generare errori in caso di bloccaggio delle ruote e quindi di divisione per 0. Oltre al valore di slip ratio, espresso in percentuale (SLIP%), ne viene calcolata anche la derivata (DeltaSLIP%).

L'intensità di intervento (SLIP\*), espressa da un intero compreso fra 0 e 15 si ottiene dalla formula

$$SLIP^* = SLIP\% \cdot GAIN + \text{Delta}SLIP\% \cdot GAIND + \text{OFFSET}$$

É poi possibile impostare la profondità di filtraggio, uguale per entrambe le velocità, attraverso l'ultimo parametro che può assumere sette valori.

Nel firmware della centralina precedente all'introduzione del controllo di trazione era già implementato il calcolo delle due velocità attraverso l'impostazione del numero di denti della ruota fonica e della circonferenza di ciascuna ruota.

## Test del controllo

Una volta realizzato e implementato in modo definitivo il controllo, questo é stato testato su diversi veicoli. Di particolare interesse sono le acquisizioni su un monocilindrico da cross: il controllo interveniva infatti dove previsto. In questa occasione é stato possibile anche testare il sistema di taglio che, pur essendo già utilizzato per altre funzioni all'interno della centralina, non é mai stato efficacemente testato per lunghi intervalli di tempo a valori di intervento intermedi così come avviene invece nel traction control. In genere nel limitatore giri, taglio in cambiata e limitatore del launch control, pur essendo prevista una forma di "soft cut", il suo corretto funzionamento<sup>1</sup> non é infatti particolarmente importante. Proprio su motori monocilindrici il sistema di taglio adottato mostra alcuni limiti in quanto, anche con un'accurata impostazione dell'apposita tabella, non é possibile ottenere piccole e medie riduzioni della coppia ma solo bruschi tagli. Questo é chiaramente visibile dalle acquisizioni effettuate in cui, per tutta la durata dell'intervento (qualche secondo), il valore di intervento oscillava. Il risultato é un'oscillazione del segnale dei giri motore e, di conseguenza, anche della ruota motrice. Questo ha portato alla necessità di studiare un nuovo sistema di taglio non analizzato in questa tesi. Questo non ha comunque comportato nessuna modifica all'algoritmo di controllo della trazione ma solo della parte relativa alla riduzione della coppia che accetta come parametro di riferimento lo stesso fornito al precedente sistema di taglio. Alcuni test sono stati effettuati anche su motori a quattro cilindri con risultati decisamente migliori per quanto riguarda il sistema di taglio descritto nel paragrafo 8.1. I motori a quattro cilindri infatti sono solitamente progettati per ruotare a velocità superiori ai monocilindrici e, in aggiunta, la configurazione a quattro cilindri prevede due fasi di espansione per giro motore raddoppiando quindi la "risoluzione" del pattern di taglio.

## Caratteristiche e limiti del controllo

Questo controllo si basa sul principio che, oltre a un certo valore di slip ratio, si entra nella regione di instabilità e si verifica lo slittamento. Lo slip ratio si calcola applicando la formula introdotta nel paragrafo 3.7 supponendo che la ruota trascinata abbia velocità uguale a quella del veicolo.

Impostando adeguatamente il controllo é possibile iniziare a intervenire poco intensamente nella zona di transizione per poi tagliare pesantemente quando si entra in instabilità. Il termine di derivazione permette di intervenire prontamente e con

---

<sup>1</sup>Con "corretto funzionamento" si intende una riduzione pressoché lineare o per lo meno graduale della coppia alle ruote in funzione del valore di intervento richiesto

grande intensit  quando l'aumento di slip ratio   molto rapido e contemporaneamente di ridurre l'intensit  di intervento quando lo slip ratio sta rientrando a valori normali rendendo pi  pronto il motore. L'offset permette un'ulteriore possibilit  di configurazione.

L'applicazione di questo controllo a un motoveicolo, oltre a controllare lo slittamento della ruota posteriore, interviene anche in caso di ribaltamento in quanto il sollevamento della ruota anteriore viene identificato come un aumento di slip ratio che viene quindi controllato diminuendo la coppia motrice.

Il controllo non tiene conto del rollio della moto per cui nella taratura   necessario tenere conto della diminuzione del coefficiente di attrito dovuta alla generazione delle forze laterali sullo pneumatico.

Anche la variazione di aderenza del fondo stradale non viene considerata. Nei veicoli da competizione questo pu  essere poco importante in quanto possono essere fatte diverse tarature in funzione delle condizioni della pista e del meteo. In un veicolo stradale deve essere fatta una taratura di compromesso o sfruttare la possibilit  di inserire due configurazioni di mappatura complete selezionabili dal guidatore<sup>2</sup>.

Queste considerazioni valgono anche per l'applicazione su autoveicoli. La presenza di solo due ingressi per le velocit  non permette di tenere in considerazione l'effetto del differenziale e della differenza di velocit  fra le ruote interne ed esterne alla curva. Cos  come attualmente implementato e studiato, questo controllo pu  essere applicato su autoveicoli solo a scopo sperimentale.

Il controllo proposto vuole essere un sistema facilmente e intuitivamente regolabile destinato a tutti i tipi di competizioni su due ruote ma anche per motoveicoli stradali dove un controllo di trazione, implementato nella stessa centralina motore che utilizza sensori particolarmente economici, ne accresce sicuramente valore e sicurezza.

## 8.4 Controllo DRPM

Alla luce dei risultati dei test sul controllo basato sul calcolo dello slip ratio   stato sviluppato un secondo controllo da applicare a moto da cross. Questi veicoli nascono con un'elettronica molto limitata e non sono mai presenti in origine sensori di velocit  sulle ruote. Non essendo possibile aggiungere tali sensori nelle competizioni, il controllo sullo slip ratio non   pi  utilizzabile. Gli unici segnali disponibili risultano quindi quelli di velocit  motore e posizione dell'acceleratore.

---

<sup>2</sup>Collegando un interruttore a un pin della centralina   possibile selezionare in tempo reale fra due set di configurazioni di tutti i parametri impostabili



Il controllo si basa sul principio per cui, su strada piana e in assenza di carichi verticali generati da forze esterne, la massima accelerazione esprimibile dalla moto espressa in G, é pari al coefficiente di attrito fra ruota e fondo. Questa situazione si verifica quando tutto il peso della moto si trova sulla ruota motrice e quindi quando ci si trova al limite del sollevamento della ruota anteriore. Qualsiasi accelerazione superiore a questo valore puó quindi essere segnale di slittamento. L'accelerazione della moto in condizioni di trazione é sostanzialmente pari alla derivata della velocità del motore moltiplicata per una costante che tiene conto del rapporto di trasmissione e delle dimensioni della ruota.

Il controllo, nella sua versione definitiva, calcola un valore di slip ratio equivalente a partire dalla derivata della velocità motore che viene poi applicato all'algoritmo descritto nel paragrafo precedente.

### **Riconoscimento della condizione di salto**

Durante lo studio di questo controllo é stato sperimentato in simulazione un sistema di riconoscimento di alcune situazioni in cui l'intervento deve essere disabilitato, ovvero accelerando in folle o con la frizione premuta e durante i salti. Queste due condizioni presentano alcune caratteristiche comuni chiaramente rilevabili visivamente dalle acquisizioni, ovvero un'improvvisa apertura dell'acceleratore seguita immediatamente da una grande accelerazione del motore. É stato quindi realizzato un sistema in Scicos in grado di distinguere l'accelerazione del motore in fase di salto o di sfollata da quella in caso di slittamento, basato sull'introduzione di un ritardo nell'intervento. Il sistema, in una prima simulazione, é stato in grado di inibire l'intervento o comunque di ridurlo durante quasi tutte situazioni riconosciute come salto o accelerazione a vuoto, pur continuando a funzionare dove previsto. Purtroppo con dati di altre acquisizioni, anche modificando la taratura del sistema ed effettuando modifiche, l'intervento veniva inibito anche dove necessario per cui lo studio di questo algoritmo é stato abbandonato.

### **Test del controllo**

I test eseguiti hanno dato risultati interessanti in quanto é stato verificato da piloti professionisti che il controllo porta effettivamente vantaggi. Inoltre é venuto in luce un aspetto molto importante che riguarda l'impostazione del lavoro di studio del controllo, cioè la necessità di analizzare manualmente i risultati delle simulazioni. Il controllo, cosí come realizzato, interviene nella discesa da un salto. Questo intervento, riconosciuto come difetto già in fase di simulazione, é stato invece apprezzato dal pilota.

## Caratteristiche e limiti del controllo

L'utilizzo di poche informazioni provenienti da sensori non permettono il facile riconoscimento di molte situazioni singolari tuttavia é sicuramente in grado di intervenire nelle situazioni di slittamento. Il fatto che venga applicato su una moto per uso prevalente su fondo non compatto semplifica da un lato l'elaborazione dei dati in quanto la particolare conformazione dello pneumatico e il fatto che la ruota affondi nella terra spostandola verso l'esterno fa si che, pur essendo la moto nelle curve inclinata rispetto al terreno, l'angolo di rollito effettivo della ruota sia inferiore come se la moto si trovasse in ogni curva su una strada inclinata.

Resta comunque particolarmente difficile l'individuazione di salti, variazioni di pendenza e sollevamenti delle ruote caratteristici per l'uso di questo tipo di moto. Tuttavia la difficoltà di questo stile di guida impone che il guidatore sia particolarmente esperto e sia quindi in grado di utilizzare adeguatamente questo controllo della trazione, consapevole dei suoi inevitabili limiti.

# Capitolo 9

## Acquisizioni e simulazioni

Vengono ora presentati alcuni esempi di come sono stati interpretati e analizzati acquisiti da veicoli strumentati e di quali sono i risultati ottenibili dal sistema di simulazione realizzato.

### 9.1 Formula SAE

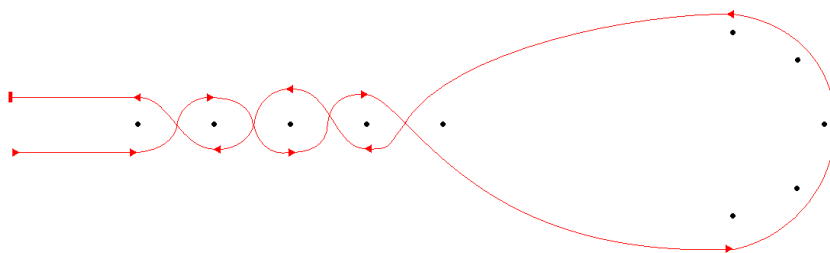


Figura 9.1: Percorso relativo alla simulazione

Come anticipato nel capitolo precedente, le prime analisi sono state effettuate dai dati acquisiti sulla vettura MG0308. L'acquisizione che viene ora presentata è stata effettuata in occasione di una simulazione di alcune situazioni tipiche delle competizioni di Formula Student. Fra le diverse situazioni è stata scelta la simulazione di curve tipiche dell'autocross ovvero uno slalom seguito da una curva di medio raggio. Il controllo studiato accetta in ingresso solo due segnali di velocità per cui si è provato a simulare il controllo utilizzando la velocità anteriore e posteriore al lato destro.

I segnali di accelerazione, TPS e pressione freno sono l'esatta visualizzazione alla stessa frequenza di campionamento sull'auto. I segnali di velocità ruote e motore



(a) Secondo 5.5



(b) Secondo 6.5



(c) Secondo 18.5

Figura 9.2: Immagini del percorso

sono invece stati rielaborati come descritto nel capitolo precedente. Il segnale di slip ratio é quello calcolato dal simulatore e corrisponde a quanto verrebbe calcolato in centralina. Anche i segnali di intervento sono calcolati dal simulatore.

Un difetto del sistema di simulazione é visibile fra i secondi 2 e 5.2 circa sul segnale di velocità. In questo intervallo di tempo il veicolo é in movimento e quindi il

segnale di velocità dovrebbe essere diverso da zero come infatti appare nell'acquisizione originale. Il fenomeno è noto e appare di entità diversa in diversi punti della simulazione. Il segnale di velocità diventa utilizzabile non appena questo diventa improvvisamente maggiore di 0.

Il percorso effettuato in questa simulazione è rappresentato in Figura 9.1. Dopo un'iniziale accelerazione su rettilineo, l'auto si inserisce nello slalom accelerando solo una volta uscita dal primo birillo quindi sterzando a destra al secondo 5.2 (Figura 9.2a). L'accelerazione successiva corrisponde invece a una curva a sinistra (Figura 9.2b). Pur essendo le due curve affrontate sostanzialmente allo stesso modo, lo slip ratio nei due casi è molto diverso. Questo è dovuto a diversi fattori fra cui la presenza del differenziale, la presenza di diverse forze laterali alle ruote interne ed esterne, e alla geometria di Ackerman per cui, in questo particolare veicolo, la ruota esterna ha un angolo di sterzo molto più alto di quella interna. Guardando l'entità di intervento nei due controlli, si nota come girando a destra o a sinistra, questi siano discordanti. L'intervento sullo slip ratio è giustificato da quanto appena esposto mentre il differente intervento sulla derivata dei giri motore può essere dovuta ad asimmetrie meccaniche.

Nei tratti rettilinei o quasi rettilinei (ai secondi 7, 12 e 17.5) i due controlli intervengono invece in modo sostanzialmente simile. L'inizio dell'intervento e l'ampiezza in modulo sono determinati dai parametri di taratura. All'inizio delle tre accelerazioni il veicolo si trova comunque in curva: a destra nel primo e terzo caso, a sinistra nel secondo. Nella prima parte di accelerazione si vede infatti che i due controlli intervengono in modo diverso per poi tendere a uniformarsi quando il veicolo si è raddrizzato.

In Figura 9.2c si nota che il pilota è costretto a un lieve controsterzo e che quindi si è verificato uno slittamento riconosciuto da entrambi i sistemi di controllo, in particolare da quello basato sulla derivata della velocità motore.

Sia sulla velocità anteriore che posteriore si nota che, superata una certa velocità, il segnale diventa molto rumoroso. Questo difetto è presente solo nelle acquisizioni effettuate su questo particolare veicolo a causa di un difetto nell'installazione del sensore e della ruota fonica. Applicando il filtraggio, fenomeni di questo tipo vengono notevolmente ridotti.

## Calcolo della marcia

La Figura 9.4 è un'acquisizione, effettuata nella stessa giornata della precedente, di un'accelerazione in rettilineo. I due segnali di velocità motore e velocità ruota posteriore sono stati acquisiti dal veicolo e trasformati in un segnale di intervalli

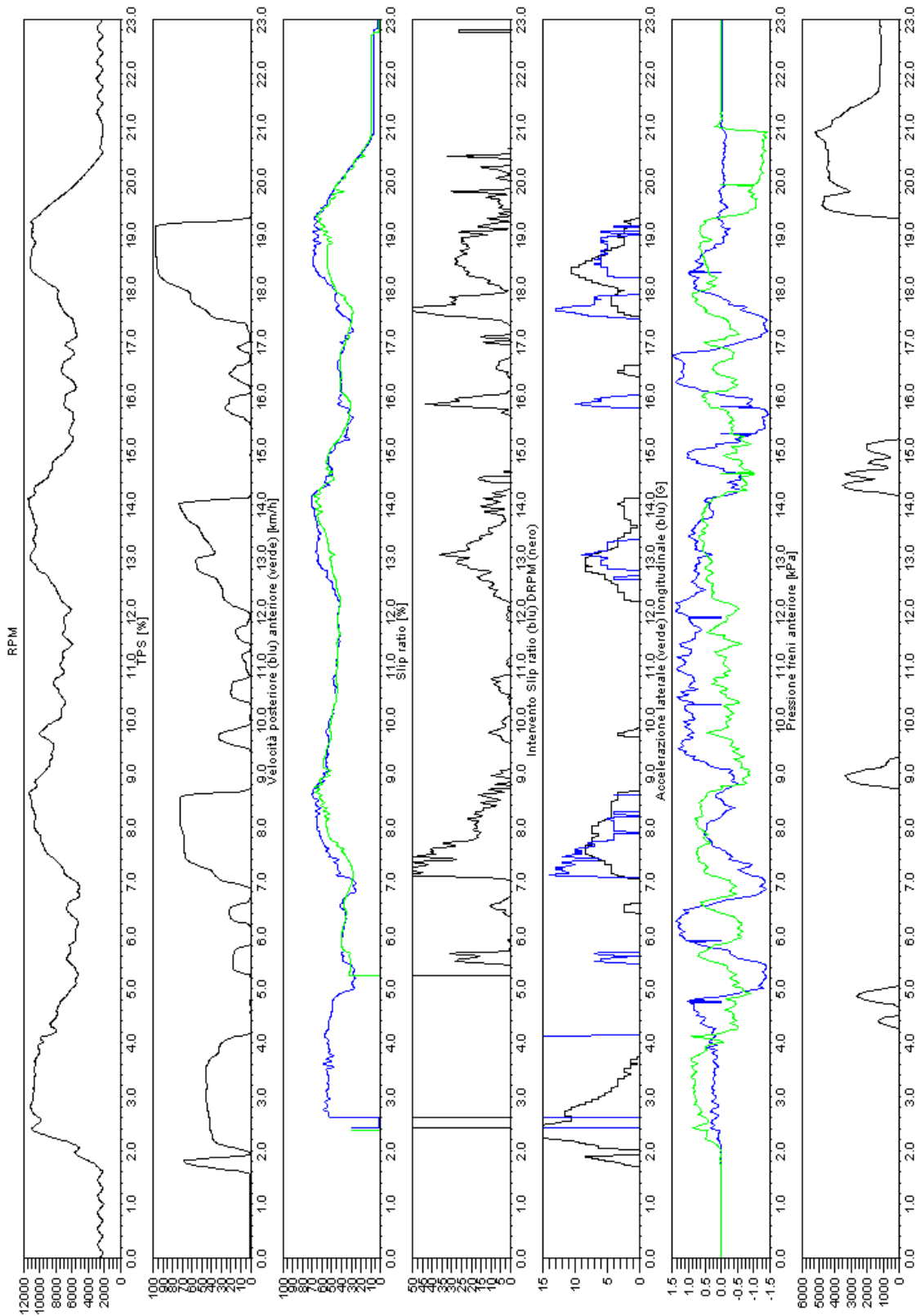


Figura 9.3: Acquisizione e simulazione MG0308

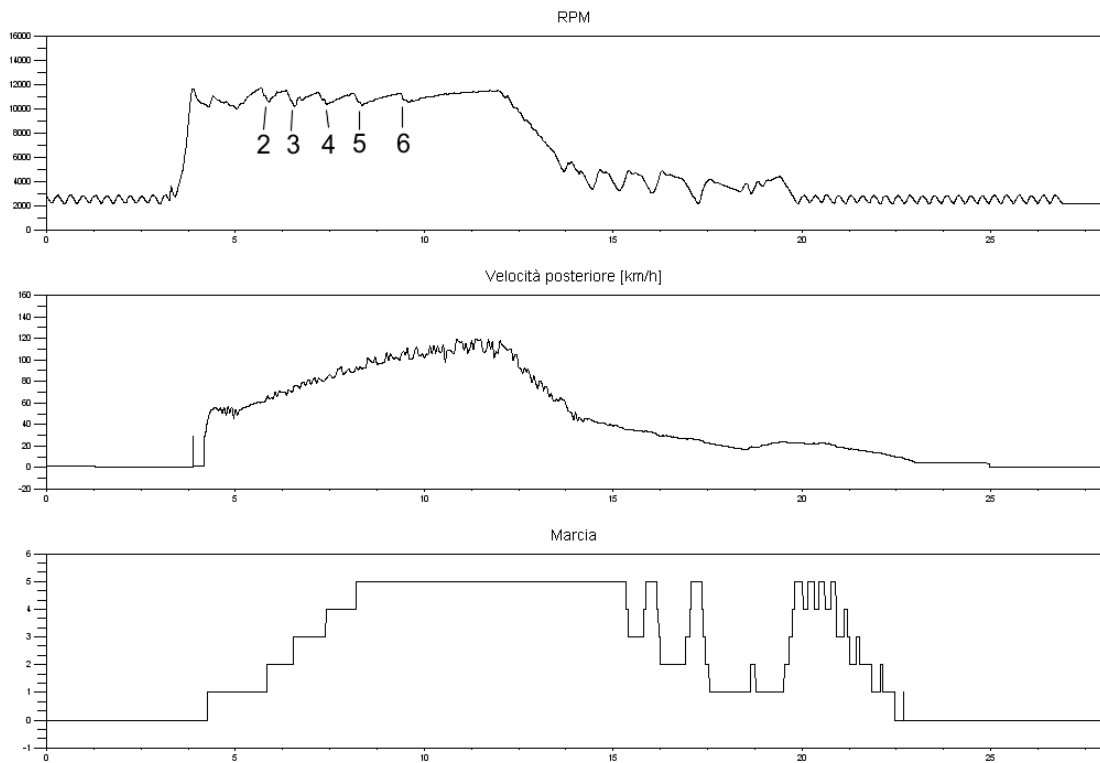


Figura 9.4: Riconoscimento marcia inserita

fra dente e dente della ruota fonica, come già descritto in precedenza. Il segnale di marcia è calcolato dal simulatore con il metodo del rapporto fra velocità motore e ruota motrice.

Si nota che nella prima metà dell'acquisizione, durante l'accelerazione, la marcia viene calcolata regolarmente. La sesta, pur venendo ingranata, non viene rilevata, in quanto i rapporti di trasmissione fra quinta e sesta marcia sono molto simili e, anche a causa anche della rumorosità dei due segnali, la distinzione è quasi impossibile con l'algoritmo utilizzato.

Durante la fase di decelerazione si notano dei picchi sul segnale di marcia, dovuti alla pressione della frizione durante la scalata (in salita di marcia la frizione non viene premuta), per cui le velocità del motore e della ruota non sono più legate fra loro. In particolare, dal secondo 19 il sistema fornisce un valore assolutamente casuale.

Sebbene l'algoritmo utilizzato dimostri molti limiti, i valori ricavati potrebbero comunque essere utilizzati in quanto, dove l'auto è in condizioni di trazione, il segnale calcolato è corretto. Il mancato riconoscimento della sesta marcia non è particolarmente importante, in quanto essendo il rapporto di trasmissione fra quinta e sesta molto simile, anche l'eventuale correzione ai parametri del controllo di trazione

sarebbero simili fra loro e verrebbe quindi compiuto un errore non particolarmente rilevante.

## Filtraggio

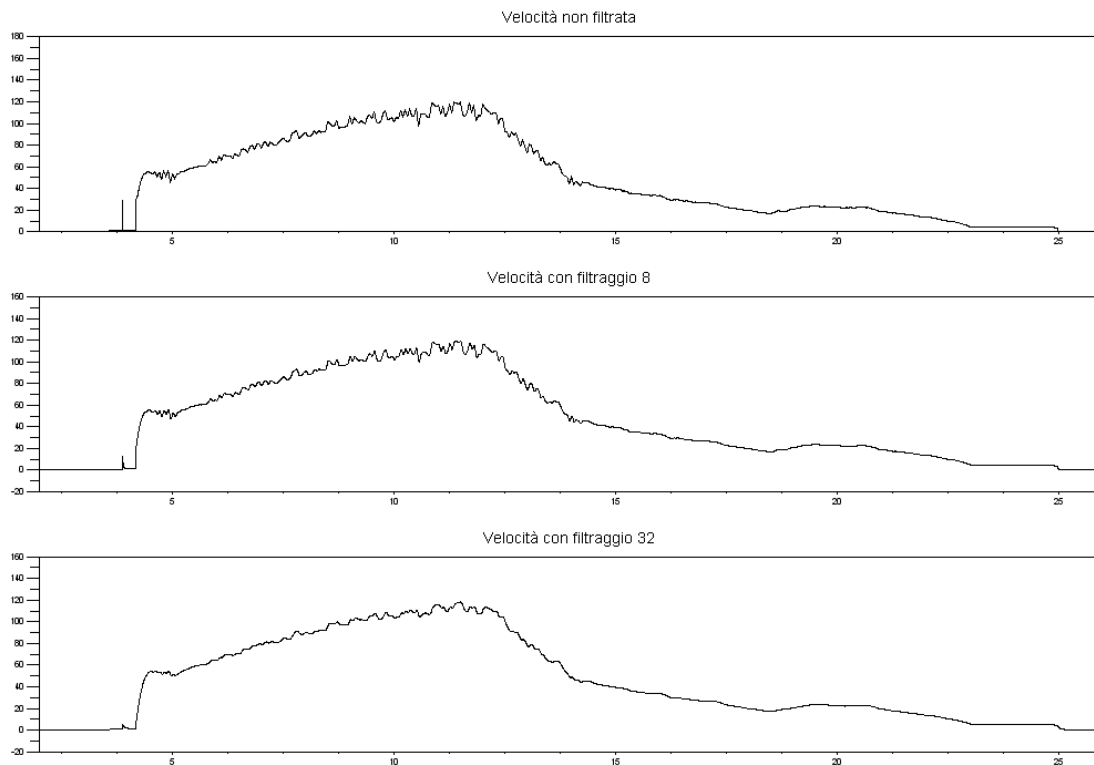


Figura 9.5: Filtraggio del segnale di velocità

In Figura 9.5 è confrontato lo stesso segnale di velocità a cui è stato applicato un filtro con profondità di filtraggio differenti.

### Elaborazione a tempo costante o non costante

Viene ora dimostrata con un esempio l'utilità di rielaborare i segnali di velocità in modo da simulare il passaggio del dente della ruota fonica sul sensore. In Figura 9.6, al segnale di velocità è stato applicato lo stesso filtro. Nel secondo grafico l'elaborazione avviene a intervalli di tempo regolare, nel terzo quando viene effettivamente rilevata in centralina la variazione di velocità e quindi al passaggio del riferimento della ruota fonica sul sensore. È evidente come i due grafici siano molto diversi e che quindi eseguire un certo algoritmo in un determinato momento piuttosto che un altro può dare risultati molto diversi.



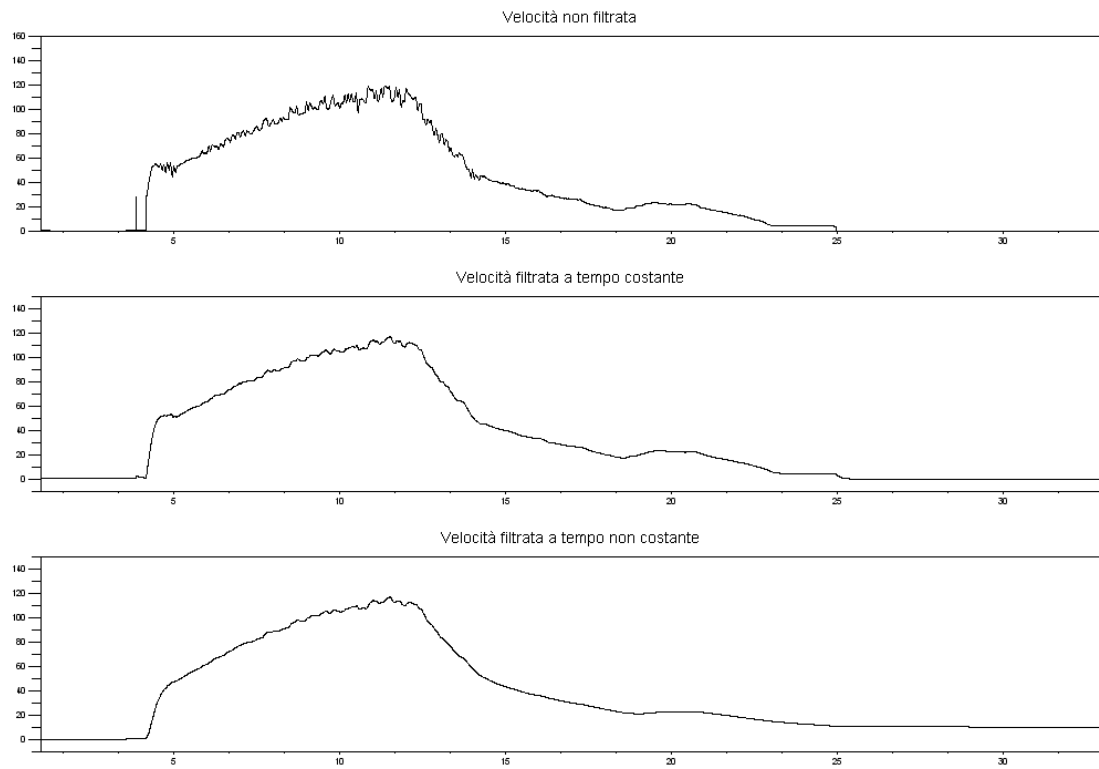


Figura 9.6: Confronto fra segnali elaborati a tempo costante o non costante



# Conclusioni

Durante il periodo di stage e attraverso l'esperienza Formula Student sono state acquisite le competenze necessarie per affrontare lo studio del controllo di trazione. Come richiesto sono stati analizzati i dati provenienti da acquisizioni su veicoli strumentati e sono stati realizzati degli strumenti software per agevolare lo studio di controlli della trazione. I modelli software realizzati devono essere quindi considerati come un aiuto all'analisi manuale e non la sostituzione dell'operatore umano. Attraverso questi strumenti é stato possibile progettare, realizzare e testare due sistemi di controllo della trazione applicati principalmente a motoveicoli. Sebbene lo studio fosse finalizzato soprattutto a veicoli a due ruote, il sistema realizzato é in grado di effettuare simulazioni utili per lo studio anche su autoveicoli con pochissime modifiche.



# Bibliografia

- [1] V. Cossalter (1999) *Cinematica e dinamica della motocicletta*, Edizioni Progetto
- [2] W. F. Milliken, D. L. Milliken (1995) *Race car veichle dynamics*, Society of Automotive Engineers
- [3] AA. VV. (2007) *Automotive Handbook 7th edition*, Robert Bosch GmbH
- [4] AA. VV. (2007) *Automotive Electrics Automotive Electronics 5th edition*, Robert Bosch GmbH
- [5] AA. VV. (2006) *Gasoline-Engine Management 3rd edition*, Robert Bosch GmbH
- [6] AA. VV. (2006) *Safety, Comfort and Convenience Systems*, Robert Bosch GmbH
- [7] S. L. Campbell, J. P. Chancelier, R. Nikoukhah (2006) *Modeling and Simulation in Scilab/Scicos* Springer
- [8] P. Schmidt (2009) *Creating a C Function Block in Scicos* <<http://www-scicos.inria.fr/ScicosCBlockTutorial.pdf>>
- [9] A. Doria (2009) *Assetto e controllo del veicolo*, Dispense del corso, Dipartimento di Innovazione e Meccanica Gestionale, Università degli Studi di Padova
- [10] P. Cardinale, C. D'Angelo, M. Conti *A Traction Control System for Motocross and Supermotard*, DEIT, Universtitá Politecnica delle Marche
- [11] I. Boniolo, S. M. Savaresi, M. Tanelli (2009) "Roll angle estimation in two-wheeled vehicles", *IET Control Theory and Applications*, 3, 1, pp. 20-32
- [12] C. Rouelle (2008) *Vehicle Dynamics, Race Car Engineering, Simulation & Data Acquisition*, Dispense del seminario, OptimumG

- [13] G. Brasseur (2008) *Kraftfahrzeugmesstechnik*, Dispense del corso, Institut für Elektrische Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung, TU Graz
- [14] B. Eichberger (2008) *Automotive Elektronik*, Dispense del corso, Institut für Elektronik, TU Graz