

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova
Dipartimento di Ingegneria Industriale

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN: INGEGNERIA INDUSTRIALE
INDIRIZZO: PROGETTAZIONE MECCANICA ED INGEGNERIA MOTOCICLISTICA
CICLO: XXV°

PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI UN SIMULATORE DI GUIDA MOTOCICLISTICO TRASPORTABILE

Direttore della Scuola : Ch.mo Prof. Paolo Colombo
Coordinatore d'indirizzo : Ch.mo Prof. Vittore Cossalter
Supervisore : Ch.mo Prof. Vittore Cossalter

Dottorando : Stefano Rota

Indice

| | |
|---|-----------|
| STEFANO ROTA | 6 |
| ABSTRACT | 9 |
| SOMMARIO | 11 |
| 1. LA SICUREZZA NEI VEICOLI | 13 |
| 1.1 L'ANDAMENTO DEGLI INCIDENTI STRADALI IN EUROPA | 13 |
| 1.2 PUNTO DELLA SITUAZIONE NEI VEICOLI A DUE RUOTE | 14 |
| 1.3 SICUREZZA PASSIVA | 17 |
| 1.3.1 <i>Il caso Dainese: D-Air</i> ® | 17 |
| 1.4 SICUREZZA ATTIVA..... | 20 |
| 1.4.1 <i>Anti-locking Braking System (ABS)</i> | 21 |
| 1.4.2 <i>Traction Control</i> | 23 |
| 1.5 L'ESIGENZA DI UN NUOVO STRUMENTO:IL SIMULATORE | 26 |
| 2 IL SIMULATORE DI GUIDA | 29 |
| 2.1 L'EVOLUZIONE DEI SIMULATORI DI GUIDA MOTOCICLISTICI | 33 |
| 2.2 IL SIMULATORE SAFEBIKE DELL'UNIVERSITÀ DI PADOVA | 36 |
| 2.3 LA VALIDAZIONE DEL SIMULATORE | 39 |
| 2.3.1 <i>La validazione oggettiva del simulatore</i> | 41 |
| 2.3.1.1 Manovra di Slalom | 43 |
| 2.3.1.2 Manovra di Lane Change | 47 |
| 2.3.1.3 Manovra di Steady State..... | 51 |
| 2.3.2 <i>La validazione soggettiva del simulatore</i> | 56 |
| 2.4 LA STRUMENTAZIONE DEL MOTOCICLO..... | 61 |
| 2.4.1 <i>Data Logger</i> | 62 |
| 2.4.2 <i>Accelerometri e girometri</i> | 64 |
| 2.4.2.1 Orientamento della piattaforma inerziale | 65 |
| 2.4.3 <i>GPS</i> | 65 |
| 2.4.4 <i>Sensori di velocità</i> | 67 |
| 2.4.5 <i>Sensore coppia di sterzo</i> | 67 |
| 2.4.5.1 Taratura del sensore coppia di sterzo..... | 70 |
| 2.4.6 <i>Sensore angolo di sterzo</i> | 72 |
| 2.4.6.1 Taratura del sensore angolo di sterzo | 73 |
| 2.4.7 <i>Sensore di coppia sulle pedane</i> | 74 |
| 2.4.8 <i>Videocamera</i> | 78 |
| 2.5 IL SIMULATORE COME STRUMENTO DI RICERCA | 78 |
| 2.5.1 <i>Caso di studio: Traction Control</i> | 80 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 2.6 | IL SIMULATORE COME STRUMENTO PER IL TRAINING | 98 |
| 3 | STUDIO DI UN NUOVO SIMULATORE DI GUIDA | 99 |
| 3.1 | LO STUDIO DI FATTIBILITÀ | 100 |
| 3.1.1 | <i>Scelta dei comandi di Input</i> | 100 |
| 3.1.2 | <i>Scelta dei gradi di libertà</i> | 101 |
| 3.1.3 | <i>Scelta del sistema di attuazione e controllo</i> | 104 |
| 3.2 | LA PROGETTAZIONE | 104 |
| 3.2.1 | <i>Il mock-up</i> | 112 |
| 3.2.2 | <i>Il basamento</i> | 113 |
| 3.2.3 | <i>Il sistema di audio-video</i> | 116 |
| 3.2.3.1 | La struttura del sistema di visualizzazione | 117 |
| 3.2.4 | <i>I sensori</i> | 121 |
| 3.2.4.1 | Il sensore coppia di sterzo | 123 |
| 3.2.5 | <i>La gestione del sistema</i> | 128 |
| 3.2.6 | <i>Il quadro elettrico</i> | 131 |
| 3.3 | I TEST DI COLLAUDO | 136 |
| 3.3.1 | <i>Counter Steering</i> | 136 |
| 3.3.2 | <i>Frenata in curva</i> | 137 |
| 3.3.3 | <i>Scivolamento in curva</i> | 138 |
| 3.3.4 | <i>Instabilità di Weave</i> | 139 |
| 3.3.5 | <i>Instabilità di Wobble</i> | 139 |
| 4 | CONCLUSIONI | 141 |
| 4.1 | EVENTI DI PARTECIPAZIONE | 143 |
| 4.2 | SVILUPPI FUTURI | 144 |
| 5 | BIBLIOGRAFIA | 145 |
| | RINGRAZIAMENTI | 147 |

Curriculum Vitae

STEFANO ROTA

2010 - 2012 Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale, Indirizzo Progettazione Meccanica ed Ingegneria Motociclistica, Università degli Studi di Padova;

Tesi : "Progettazione e Realizzazione di un Simulatore di guida trasportabile"

2006 - 2009 Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica, Indirizzo Veicoli Terrestri, Università degli Studi di Padova;

Tesi: "Analisi del comportamento di un sistema ABS per motocicli al variare dei parametri di funzionamento e dell'aderenza"

2003 - 2006 Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Padova;

Tesi: "Analisi sperimentale del comportamento strutturale di componenti di trattori agricoli"

PUBBLICAZIONI

- "A Portable Driving Simulator for Single-Track Vehicles" – M.Massaro, V.Cossalter, R.Lot, S.Rota, M.Ferrari, R.Sartori, M.Formentini, IEEE International Conference on Mechatronics 27-28 February, 1st March 2013, Vicenza, Italy (Articolo approvato)
- "The Influence of Footpegs Forces in Lane Change Maneuver" – V.Cossalter, S.Rota, M.Ferrari, Congresso IFZ 9th International Motorcycle Conference, 1-2 October 2012, Koln, Germany
- "Intelligent intersection support for powered two-wheeled riders: a human factors perspective" – V.Huth, R.Lot, F.Biral, S.Rota. IET - Intelligent Transport Systems 2012, Vol.6, Iss.2, pp 107-114
- "Intersection Support System for Powered Two-Wheeled Vehicles. Threat assessment based on a receding horizon approach" – F.Biral, R.Lot, S.Rota, M.Fontana, V.Huth, IEEE Intelligent Transportation Systems, June 2012, Vol.13, Iss. 2, pp 805-816
- "Virtuelles testen der antriebschlupfregelung mithilfe eines motorrad-simulators" - V.Cossalter, A.Doria, S.Rota, R.Sartori, , ATZ autotechnology, 2011
- "Experimental Evaluation of an advanced curve warning system for motorcycles" – F.Biral, R.Lot, S.Rota, R.Sartori, A.Borin, 22nd International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Manchester University, 2011
- "Virtual Testing of traction control systems by means of a motorcycle riding simulator" – V.Cossalter, A.Doria, S.Rota, R.Sartori, 30May – 4 June, Fisita 2010, Budapest, Hungary
- "Objective and subjective evaluation of an advanced motorcycle riding simulator" – V.Cossalter, R.Lot, S.Rota, EuropeanTransport Research Review, December 2010, Vol 2, Iss.2, pp 223-233
- "On the validation of a motorcycle riding simulator" – V.Cossalter, R.Lot, S.Rota, BicycleMotorcycleDynamics Delft, Holland 2010

ABSTRACT

In this work are presented the main activities involved and followed during the PhD Research, focused on the optimization of an advanced motorcycle riding simulator and ended with the development of a transportable version of this. This has been possible thanks to the presence of a simulator symbol of the state of the art, start to develop more than ten years ago and evolving continuously by the Motorcycle Dynamics Research Group of University of Padova.

The first part of the activity has been dedicated to the improvements in hardware and software of the existing simulator taking it to be one of the most advanced in the world. The system's flexibility demonstrated makes it a perfect research tool and for this reason has been chosen as one of the few motorcycle simulators inside European Projects for the development of innovative systems for riding's safety.

In the first chapter are shown some data on road safety in Europe in recent years, illustrating the most common applications for powered two wheelers (PTW) with regards to the concepts of Active Safety and Passive Safety and how the simulators can be used to improve these.

The second chapter explains the concept of driving simulator, in particular for the PTW use. Initially an historical overview from the first prototypes of the 80's up to the latest versions used. Then a macroscopic overview of the system (known as SafeBike) and on the validation performed with dedicated experimental tests. To conclude the chapter are also briefly reported some examples of study and analysis on the performance of motorcycles executed with the simulator.

In the third chapter is presented the developing work of a portable motorcycle riding simulator. Rather than a document that contains all the geometrical specifics and other similar information, this thesis is presented as the procedure to follow to develop a new simulator, in which are collected the issues, choices, considerations and solutions adopted for the project, starting with a feasibility study which follow targets appositely sets, through the issue of costs and construction's possibilities. At the end, the validation's work of this tool with typical motorcycle's maneuvers to verify the dynamics of the motorcycle.

The fourth and last chapter contains the conclusions and suggestions for future developments have to be made to increase the level of the simulator.

The activities performed during this PhD have been focused on the macro topic of the Simulator, however many other works have been followed in order to investigate other aspects of PTW that would extend motorcycle's knowledge.

SOMMARIO

In questo lavoro viene presentato il percorso principale seguito durante il dottorato di ricerca che ha portato dall'ottimizzazione di un simulatore di guida per motocicli allo sviluppo di una versione trasportabile. Questo è stato possibile grazie alla presenza di un simulatore "simbolo dello stato dell'arte", progetto cominciato più di dieci anni fa ed in continua evoluzione da parte del Motorcycle Dynamics Research Group dell'Università degli Studi di Padova.

La parte iniziale ha visto il miglioramento a livello hardware e software del simulatore esistente portandolo ad essere uno degli strumenti, nel suo genere più avanzati al mondo. La flessibilità di utilizzo dimostrata lo rende un perfetto strumento di ricerca e per questo motivo è stato utilizzato come uno dei pochi simulatori motociclistici all'interno di progetti europei atti allo sviluppo di sistemi di sicurezza innovativi.

Volendo restare nel contesto della sicurezza, nel primo capitolo vengono riportati alcuni dati sulla sicurezza stradale in Europa, negli ultimi anni. Si sono considerate le applicazioni più comuni nel campo delle due ruote per quanto riguarda i concetti di Sicurezza Attiva e Sicurezza Passiva e si è valutato come il simulatore in generale si possa prestare per lo sviluppo degli stessi.

Nel secondo capitolo viene illustrato il concetto di simulatore di guida, in particolare per un utilizzo di tipo motociclistico. All'inizio un excursus storico dai primi prototipi degli anni 80 fino alle versioni più recenti utilizzate. Successivamente si espone una descrizione macroscopica della struttura del sistema ed il lavoro di validazione del modello del simulatore con numerosi test sperimentali. Per concludere il capitolo vengono, inoltre, riportati brevemente alcuni esempi di studio ed analisi sulle prestazioni dei motocicli eseguiti con il simulatore.

Nel terzo capitolo viene presentato il lavoro di sviluppo di un simulatore di guida motociclistico trasportabile. Questa tesi raccoglie tutte le problematiche, le scelte, le considerazioni e soluzioni adottate per il progetto, partendo da uno studio di fattibilità che ha inseguito dei target prefissati, passando per il problema dei costi e delle potenzialità costruttive disponibili fino alle soluzioni adottate in un'ottica di sviluppo futuro.

Infine, è presentato il lavoro di validazione su questo strumento, con manovre tipiche motociclistiche, per verificare la dinamica dei veicoli a due ruote.

Nel quarto ed ultimo capitolo vengono riportate le conclusioni con suggerimenti per gli sviluppi futuri da apportare per aumentare il livello del simulatore.

Le attività svolte durante questo dottorato si sono focalizzate sul macro-argomento del simulatore, anche se numerosi altri lavori sono stati seguiti per poter approfondire altri aspetti dei veicoli a due ruote che permettessero una visione più ampia delle caratteristiche coinvolte.

1. LA SICUREZZA NEI VEICOLI

In questo capitolo viene affrontato il tema della sicurezza stradale, inizialmente con un resoconto sulla situazione europea in termini di incidenti stradali ed in particolar modo prestando attenzione al settore motociclistico, successivamente illustrando velocemente i sistemi di ausilio alla guida per la sicurezza più comuni in dotazione nei veicoli più recenti.

1.1 L'andamento degli incidenti stradali in Europa

Nel comunicato stampa del 5 Luglio 2011 [1], la Commissione Europea ha pubblicato le statistiche che mostrano come gli incidenti stradali nell'area UE siano diminuiti dell'11%, nel 2010. Nonostante il dato confortevole dichiarato, i decessi legati agli incidenti stradali restano comunque numerosi, stimati orientativamente su cento persone al giorno. Con l'obiettivo di dimezzare il numero delle vittime per il 2020, l'attenzione ricadrà quindi sul tipo di veicolo che le persone utilizzano, al modo e al contesto dell'utilizzo.

La tabella riportata a fianco (Tabella 1) mostra i progressi ottenuti grazie al Piano di azione per la sicurezza stradale 2001-10. Sono riportati i dati relativi a tutta l'UE e suddivisi per paese.

Nel luglio 2010 la Commissione Europea ha adottato una serie di misure ambiziose per dimezzare la mortalità sulle strade europee nei prossimi dieci anni. Le iniziative proposte oggi nell'ambito degli "Orientamenti europei 2011-2020 per la sicurezza stradale" vanno da norme più rigorose in materia di sicurezza dei veicoli, al miglioramento dell'educazione degli utenti della strada, fino ad una più severa applicazione del codice della strada. Per attuare questo obiettivo la Commissione opera in stretta collaborazione con gli Stati membri.

| Stato Membro | Numero di vittime per milione di abitanti | | Andamento del numero delle vittime | |
|-----------------|---|------|------------------------------------|-------------|
| | 2001 | 2010 | 2009 - 2010 | 2001 - 2010 |
| Lettonia | 236 | 97 | -14% | -61% |
| Lituania | 202 | 90 | -19% | -58% |
| Spagna | 136 | 54 | -9% | -55% |
| Svezia | 66 | 28 | -26% | -54% |
| Lussemburgo | 159 | 64 | -33% | -54% |
| Slovenia | 114 | 53 | -25% | -53% |
| Irlanda | 107 | 45 | -16% | -51% |
| Francia | 134 | 62 | -7% | -51% |
| Slovenia | 140 | 68 | -19% | -50% |
| Portogallo | 163 | 79 | 1% | -49% |
| Germania | 85 | 45 | -12% | -48% |
| Regno Unito | 61 | 31 | -18% | -47% |
| Paesi Bassi | 62 | 32 | -17% | -46% |
| Belgio | 145 | 76 | -12% | -44% |
| Italia | 125 | 66 | -6% | -44% |
| UE | 112 | 62 | -11% | -43% |
| Austria | 119 | 66 | -13% | -42% |
| Estonia | 146 | 88 | 20% | -41% |
| Ungheria | 121 | 74 | -10% | -40% |
| Repubblica ceca | 130 | 76 | -11% | -40% |
| Cipro | 140 | 75 | -15% | -39% |
| Danimarca | 81 | 48 | -13% | -39% |
| Finlandia | 84 | 51 | -1% | -36% |
| Grecia | 172 | 116 | -10% | -30% |
| Polonia | 145 | 102 | -15% | -29% |
| Bulgaria | 124 | 102 | -14% | -23% |
| Malta | 41 | 36 | -29% | -6% |
| Romania | 109 | 111 | -15% | -3% |

Tabella 1 - Risultati piano d'azione per la sicurezza stradale

Il programma di azione per la sicurezza stradale presenta un insieme di iniziative incentrate su miglioramenti che possono essere apportati ai veicoli, alle infrastrutture e ai comportamenti dei conducenti.

Gli obiettivi strategici sono sette:

1. Maggiori misure di sicurezza per i mezzi pesanti e le automobili;
2. Costruzioni di strade più sicure;
3. Sviluppo di veicoli "intelligenti";
4. Rafforzamento della formazione e del sistema di rilascio delle patenti;
5. Migliore applicazione delle norme più severe;
6. Azioni mirate per i feriti;
7. Attenzione rinnovata ai motociclisti;

In questo contesto, ed in particolare sui punti 3 e 4, si inserisce il simulatore di guida motociclistico: uno strumento con il quale sia possibile provare nuove soluzioni di sistemi di ausilio alla guida in grado di aumentare la sicurezza del conducente e "allenare" l'utente inesperto, alle prime armi, in un contesto virtuale quindi sicuro, prima di iniziarlo all'utilizzo vero e proprio su strada.

1.2 Punto della situazione nei veicoli a due ruote

Guidare una moto è sempre stato molto affascinante e nessun altro veicolo terrestre può far provare le stesse sensazioni di dinamicità, agilità e libertà ma è accompagnato dal crescente rischio di incidenti. Nonostante le recenti innovazioni tecnologiche, è pressoché impossibile rendere le moto sicure quanto un'automobile (sia attivamente che passivamente).

Si riportano ora alcune informazioni risultate da un'analisi Istat riguardante l'anno 2010 [2] :

- Nel 2010 gli incidenti stradali che hanno causato lesioni a persone e in cui è stato coinvolto un ciclomotore o motociclo sono stati 71.108, causando il decesso di 1.244 persone e il ferimento di 84.548;
- Il 34% del totale degli incidenti stradali considerati vede coinvolto un veicolo a due ruote; inoltre, una vittima della strada su tre perde la vita in un incidente in cui è stato coinvolto un motoveicolo;
- Tra il 2006 ed il 2010, gli incidenti stradali di questo tipo sono diminuiti del 18.6%. Anche il numero dei morti risulta in calo (-23%);
- Sulle strade urbane si sono verificati ben 62.238 incidenti con il coinvolgimento di un motoveicolo (87.5% del totale): essi hanno causato 73.826 feriti (87.3% del totale) e 655 morti (52.7% del totale);
- L'indice di mortalità per i veicoli a due ruote, sulle strade extraurbane, è di 7.1 per 100 incidenti; sulle strade urbane, invece, è di 1.1 morti per 100 incidenti;

- Rispetto al 2001 l'Italia ha registrato una diminuzione del numero di morti del 42% negli incidenti stradali, mentre il Libro Bianco dell'Unione Europea prevedeva la riduzione della mortalità del 50% entro il 2010;
- La riduzione registrata rispetto al 2001 risulta solamente del 19.2% se si considera il numero di morti in cui sia stato coinvolto almeno un motorino;
- Il maggior numero di incidenti dei veicoli a due ruote si è verificato, come negli altri anni, nel mese di Luglio (9.326 in valore assoluto). L'indice di mortalità risulta, invece, più elevato nel mese di Agosto (2.5 morti ogni incidenti);
- Il maggior numero di decessi avviene tra persone che hanno tra i 30 ed i 44 anni. Una vittima su tre è un giovane adulto;
- Nove vittime su dieci di incidenti mortali, che coinvolgono veicoli a due ruote, sono uomini;

L'analisi delle circostanze, accertate o presunte, di causa di incidente che coinvolge almeno un motoveicolo mette in evidenza che, nell'ambito dei comportamenti errati di guida, la guida distratta, la velocità troppo elevata e il mancato rispetto delle regole di precedenza sono le prime tre cause di incidente. Con riferimento alla categoria di utenti della strada, per i veicoli a due ruote si nota una percentuale più alta di cause legate sia alla velocità troppo alta, soprattutto sulle strade extraurbane, sia al mancato rispetto delle regole di precedenza sulle strade urbane.

Questi sono punti fondamentali sui quali lavorare per sensibilizzare il futuro motociclista a una guida più sicura rispettando il codice stradale.

Per le loro caratteristiche di flessibilità nel traffico, per gli ingombri ridotti e i consumi contenuti, i veicoli a due ruote sono una soluzione efficace per la mobilità urbana. Gli effetti benefici sono controbilanciati da una esposizione al rischio di incidente maggiore, rispetto agli altri utenti della strada. In tutta Europa le statistiche dimostrano che una gran parte di incidenti in motoveicolo sono causati da errori umani. A questi si aggiungono fattori di rischio come le condizioni del fondo stradale, le condizioni meteorologiche e gli ostacoli.

Concentrandosi ora sull'utilizzatore, si osserva come l'età dei morti o feriti (nella fascia 30-44 anni) dimostri che il motoveicolo sia diventato un mezzo alternativo all'automobile, per gli spostamenti sistematici "casa-lavoro". Il calo che si registra nelle fasce di età successive (dai 45 anni in poi) si può imputare sia ad un numero inferiore di utilizzatori, sia ad una maggiore consapevolezza dei pericoli del mezzo e della strada, dovuta all'esperienza di guida.

Dai 18 ai 29 anni il numero di utilizzatori delle due ruote aumenta considerevolmente e quindi si riscontra un trend crescente anche nel numero degli infortunati. Nell'età post-lavorativa, invece, il motoveicolo diventa una scelta e non più una necessità, con un andamento costante del numero di infortunati [2],[3].

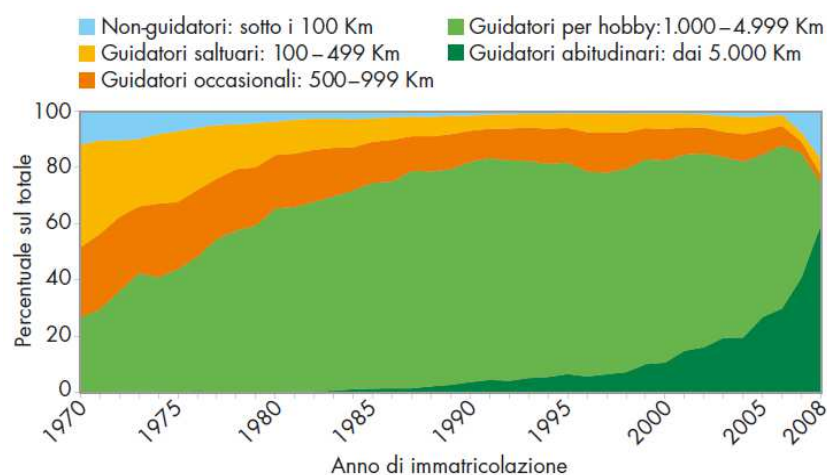


Figura 1 - Utilizzo delle moto in Germania (media dei km percorsi in un anno)

Rispetto all'obiettivo fissato dall'UE nel Libro Bianco del 2001, che prevedeva la riduzione della mortalità del 50% entro il 2010 per l'incidentalità stradale nel complesso, l'Italia ha raggiunto una diminuzione del 42,4% del numero dei morti. Analizzando l'andamento del numero dei morti che si è avuto nello stesso periodo, per gli incidenti in cui sia stato coinvolto almeno un motoveicolo, la riduzione risulta solamente del 19,2%.

In Tabella 2 vengono invece riportati i dati sulla riduzione della mortalità nel periodo che va dal 2006 al 2010, comprensivo di incidenti totali e incidenti che hanno visto coinvolti veicoli a due ruote.

| | Incidenti | Morti | Feriti | Indice di mortalità (a) | Incidenti | Morti | Feriti | Indice di mortalità (a) |
|------|-------------------------|-------|---------|-------------------------|-------------------------------------|-------|---------|-------------------------|
| | Totale incidenti | | | | di cui a veicoli a due ruote | | | |
| 2006 | 238.124 | 5.669 | 332.955 | 2,4 | 87.305 | 1.615 | 102.401 | 1,8 |
| 2007 | 230.871 | 5.131 | 325.850 | 2,2 | 87.258 | 1.701 | 103.152 | 1,9 |
| 2008 | 218.963 | 4.725 | 310.745 | 2,2 | 80.012 | 1.502 | 95.281 | 1,9 |
| 2009 | 215.405 | 4.237 | 307.258 | 2,0 | 77.877 | 1.379 | 93.136 | 1,8 |
| 2010 | 211.404 | 4.090 | 302.735 | 1,9 | 71.108 | 1.244 | 84.548 | 1,7 |

(a) L'indice di mortalità si calcola come rapporto tra il numero di morti e il numero degli incidenti, moltiplicato 100.

Tabella 2 - Incidenti stradali, morti e feriti per totale incidenti e per incidenti a veicoli a due ruote 2006-2010

In ogni caso, chi utilizza la moto, a prescindere se durante il tempo libero o per scopi lavorativi, va sempre incontro ad un elevato rischio. Per questa ragione, in Europa, il rischio di incorrere in un incidente mortale (o comunque molto grave) in sella è 18 volte più elevato rispetto agli altri utenti della strada. Lo mostra anche l'esperienza: quando si verifica un incidente, l'infortunio è spesso grave se non addirittura fatale e ciò avviene prevalentemente per il fatto che i motociclisti sono più esposti e non hanno la possibilità di essere protetti dal veicolo.

1.3 Sicurezza Passiva

Migliorare la sicurezza passiva in moto (intesa come adozione di misure di sicurezza in caso di incidente) purtroppo è ancora un tema che difficilmente viene applicato di serie. Questi possibili accorgimenti sono limitati anche dal fatto che la sicurezza può essere realizzata in modo limitato perché può far leva soltanto sul vestire il corretto abbigliamento protettivo e indossare il casco. Le prospettive di miglioramento della sicurezza passiva si legano dunque al concetto di “attenuazione delle conseguenze post-incidente”.

Oltre alle protezioni di casco ed indumenti, bisogna fare attenzione a non essere feriti dal veicolo stesso sul quale si sta viaggiando. Per questa ragione vengono condotti dei crash-test pensati appositamente per queste eventualità. Il concetto è identico ai crash-test per le automobili; per il rilievo dei dati vengono utilizzati dei manichini antropomorfi (chiamati “dummy”) che vengono fatti sedere sulla moto. L'esecuzione e l'analisi di queste ricerche sono state sviluppate nei primi anni '80 [3]. Oggi i produttori di veicoli, le autorità e i ricercatori sono obbligati ad eseguire i crash-test sulle moto seguendo scrupolosamente le procedure indicate dallo standard internazionale ISO 13232, pubblicato ufficialmente nel 1996. La logica, attualmente in uso, per ottenere risultati attendibili durante le diverse prove eseguite sulle moto, è quella di combinare risultati reali registrati durante i crash-test con risultati virtuali ottenibili nelle simulazioni numeriche.

Lo standard ISO 13232, finalizzato alla regolamentazione delle tecniche di test e sviluppato all'inizio degli anni '90, scaturisce dalla collaborazione tra l'industria motociclistica del tempo e le istituzioni competenti in materia.

L'aggiornamento di questo standard è datato ottobre 2005 ed è quello tutt'oggi in vigore. In particolare, negli ultimi 30 anni si è cercato di far qualcosa per migliorare la sicurezza stradale per le moto che però non sembra esser stato sufficiente.

Un esempio di come il simulatore di guida motociclistico possa essere utilizzato come strumento di ricerca per sviluppare nuovi sistemi di sicurezza passivi è il D-Air® della Dainese. L'affinamento dell'algoritmo di calcolo in grado di comandare l'intervento dell'airbag è stato completato presso il laboratorio del gruppo di ricerca del Motorcycle Dynamics Research Group dell'Università degli Studi di Padova.

1.3.1 Il caso Dainese: D-Air®

Il D-Air® è un brevetto Dainese ed identifica un abbigliamento intelligente (un dispositivo di sicurezza tipo airbag per motociclisti) progettato per proteggere il pilota ed il passeggero nell'uso della moto su strada. Il sistema opera in sinergia con un paraschiena Dainese e garantisce la protezione di clavicola, schiena e torace.

I test svolti secondo gli standard europei in vigore per le protezioni del torace (prEN 1621.3/2010), mostrano che D-Air® diminuisce la forza trasmessa di più dell'87% rispetto a protezioni composite

tradizionali e distribuisce la forza con prestazioni di livello 2. Per quanto riguarda i test svolti sulla schiena (EN 1621.2), la forza trasmessa diminuisce del 75% rispetto ad un paraschiena di tipo tradizionale [4].

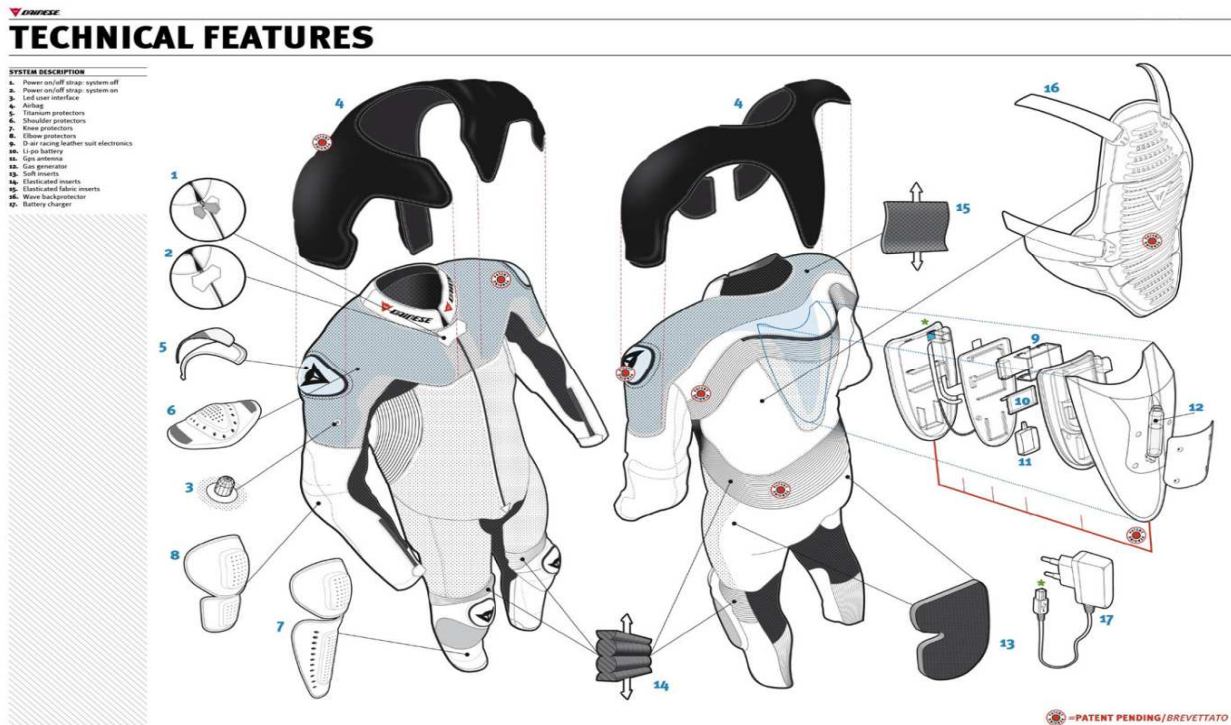


Figura 2 - D-Air Racing - Dainese

Attualmente sono disponibili due tipi di prodotto: il primo destinato al mondo delle corse e viene denominato D-Air® Racing , il secondo dedicato a chi utilizza moto o scooter su strade aperte al traffico. Questa differenziazione è sorta principalmente per migliorare gli algoritmi di intervento a seconda del tipo di utilizzo.



Figura 3 – D-Air Jacket Dainese

Il sistema Racing contiene circa 5 litri d'aria ed è completamente alloggiato nella "gobba aerodinamica" della tuta del pilota. Esso è in grado di attivarsi in caso di scivolate e *highside* grazie alla lettura dei segnali forniti da tre giroscopi, tre accelerometri e un GPS e non interviene per velocità di utilizzo inferiori ai 50 km/h.

Nel modello Street invece il sistema è più voluminoso e contiene, dopo l'attivazione, circa 12 litri d'aria. Questo dispositivo si attiva in caso di scivolata e impatto proteggendo spalle, schiena e gabbia toracica oltre a limitare i movimenti del collo durante la caduta. I sensori sono, in questo caso, posizionati sulla moto e non sul pilota e passeggero.

Il sistema è abbastanza complesso ma allo stesso pratico e poco ingombrante, poiché funziona senza alcun collegamento fisico con il mezzo e comprende, essenzialmente due dispositivi: uno installato sulla moto e uno inserito nella giacca del motociclista. Il primo comprende una coppia di accelerometri triassiali montati sulla forcella (uno per stelo); un sensore per riconoscere la scivolata, montato sotto alla sella e un'unità centrale di elaborazione dei segnali e di gestione e monitoraggio del sistema con display di interfaccia utente.

L'unità a bordo del motociclo comunica costantemente, attraverso due canali radio, con l'elettronica installata a bordo giacca. In questo caso l'algoritmo non fa attivare il sistema in caso di cadute o incidenti a velocità inferiore ai 7 km/h. Entrambi i sistemi hanno un tempo di intervento totale (rilevazione del pericolo e gonfiaggio) di 45 millisecondi.

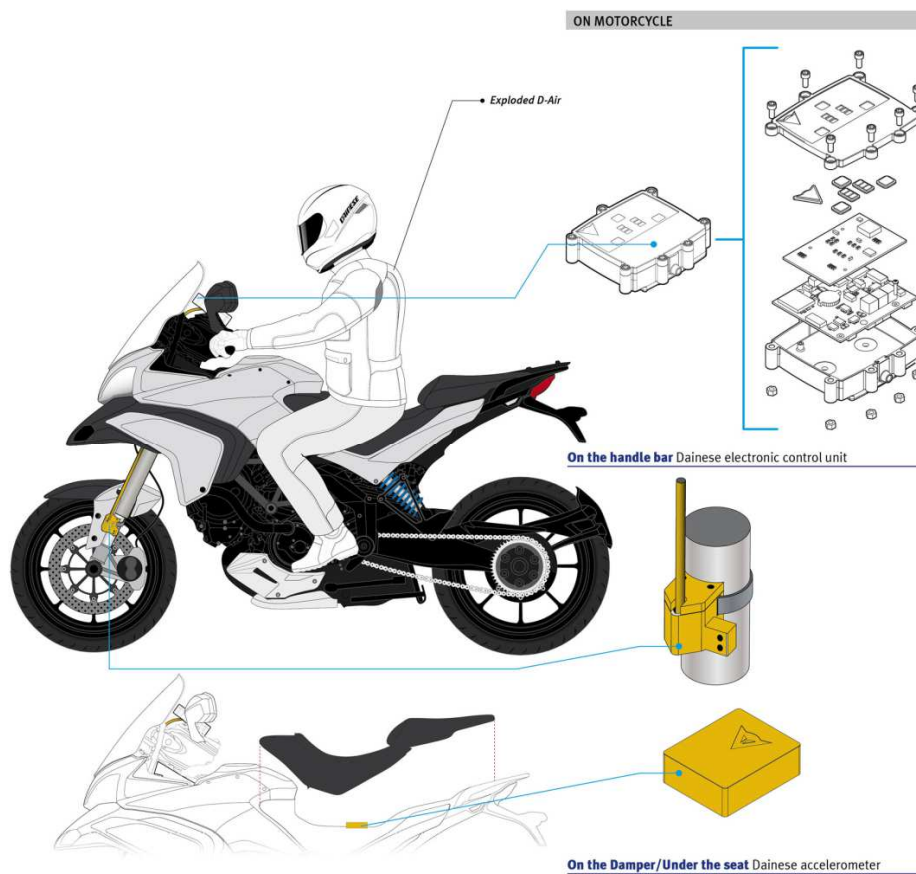


Figura 4 - D-Air sulla moto - Dainese

Questo vuole essere solamente un esempio dell'innovazione tecnologica apportata con la ricerca su contesti di primaria importanza come la sicurezza per il pilota di motocicli.

1.4 Sicurezza Attiva

In questi ultimi anni tutte le case costruttrici di veicoli, sia a due che a quattro ruote, sono impegnate nello sviluppo di sistemi di ausilio alla guida che permettano di incrementare il livello di sicurezza del conducente e del passeggero. Nel prossimo futuro alcuni di questi sistemi saranno addirittura obbligatori, di serie, per legge.

Con il termine "sicurezza attiva" si intende quell'insieme di dispositivi, sistemi od apparati che dovrebbero impedire il verificarsi di un incidente, con una funzione preventiva. Per definizione, il sistema di sicurezza attiva più efficiente dovrebbe essere il conducente stesso che, nell'ipotesi di funzionamento ideale, dovrebbe essere in grado di gestire e controllare il veicolo in tutte le condizioni. Quando però il conducente raggiunge gli inevitabili limiti fisici ecco che un intervento esterno risulta indispensabile per uscire dalle situazioni di pericolo in sicurezza.

Il sistema di sicurezza attiva più diffuso è sicuramente il sistema ABS (Anti-locking Braking System), dispositivo che evita il bloccaggio delle ruote in seguito ad una brusca frenata e che permette di non perdere il controllo del veicolo. Ogni casa costruttrice di veicoli sviluppa solitamente i sistemi internamente all'azienda e per questo motivo nel mercato sono disponibili un grande numero di prodotti. Nonostante l'elevato numero di sistemi ABS presenti, la logica di funzionamento rimane la stessa a meno di piccole personali interpretazioni.

Allo stesso modo, gli altri macro-gruppi presenti nel mercato, riguardanti i sistemi di sicurezza per motocicli, sono l'ESP ed il TCS.

L'ESP è un sistema di controllo elettronico della stabilità dinamica che interviene sul veicolo, quasi sempre in simbiosi con il sistema ABS, per ripristinare il controllo in caso di manovra di sovra o sottosterzo. Questa tecnologia deriva direttamente dal settore automobilistico nel quale l'uso invasivo ed il fatto di lavorare su un veicolo intrinsecamente stabile (si pensi alle 4 ruote di un'automobile contro le 2 di una motocicletta) aumentano le modalità di intervento e quindi i risultati ottenibili. Nel campo delle due ruote questo tipo di controlli sono utilizzati ma i risultati apportati non hanno un feedback così positivo come nel settore automotive.

Differentemente, il TCS è un sistema largamente utilizzato nelle motociclette di ultima concezione, si tratta di un dispositivo che interviene per ridurre il pattinamento dei pneumatici assicurandone così il funzionamento ottimale ed evitare perdite di controllo dovute a brusche accelerazioni o a perdite di aderenza. Alcune versioni di questo sistema si appoggiano direttamente al sistema ABS per controllare lo slittamento delle ruote. Questo ne facilita anche la predisposizione a bordo del veicolo potendo utilizzare lo stesso sistema per due scopi completamente diversi.

1.4.1 Anti-locking Braking System (ABS)

L'ABS è sicuramente il progenitore dei sistemi di sicurezza attiva di nuova concezione. La prima automobile ad adottare questa tecnologia fu la Mercedes Benz Classe S nel 1978 ma già nel 1936 Robert Bosch aveva brevettato un primo sistema di anti-incollaggio freni. BMW presenta nel 1988 il primo ABS per moto sul modello K100.

Il sistema ABS interviene quando è riconosciuta una rapida decelerazione della ruota rispetto agli istanti precedenti e, comunque, sempre confrontando le velocità angolari di entrambe le ruote. Se si verifica questa condizione, la pressione esercitata dai freni viene ridotta in modo da far riacquistare velocità alla ruota e assicurare nuovamente la massima capacità, per il pneumatico, di esercitare forza longitudinale. Negli istanti successivi, quando il sensore posizionato sulla ruota riconosce una nuova accelerazione (e quindi una diminuzione dello slittamento), la servovalvola torna ad aumentare la pressione facendo rallentare nuovamente il veicolo. In questo modo si controlla la frenata ottimizzando la capacità frenante del pneumatico. Una trattazione più completa ed esaustiva si può trovare in [5].

Nel 1994 la tecnologia adottata sulle automobili è stata trasferita nel settore motociclistico da parte di Bosch. Nelle prime versioni, dimensioni e peso avevano fatto sì che il sistema di sicurezza rimanesse a lungo una prerogativa dei modelli di grossa cilindrata. L'utilizzo di elettroniche e valvole di controllo sempre più compatte ha portato Bosch a presentare nel 2011 il sistema ABS 9 [6],[7].

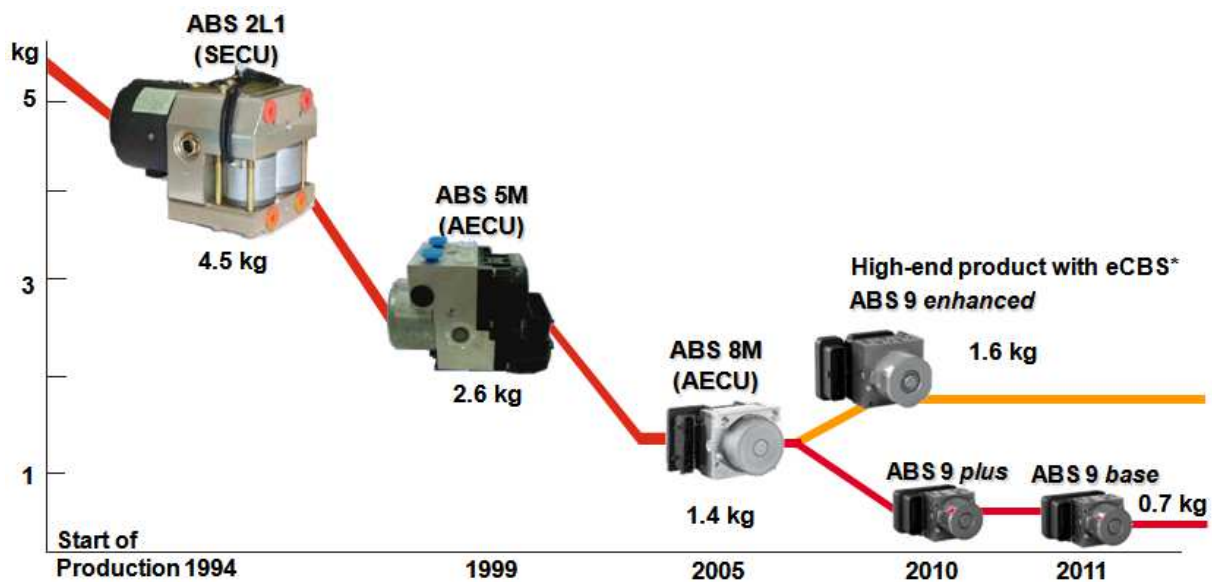


Figura 5 – Evoluzione dei sistemi ABS negli ultimi anni

Grazie a questa compattezza del sistema è stato possibile estendere l'applicazione anche agli scooter, seppur in numero ancora limitato.

A livello mondiale, nel 2010 il tasso di installazione dell'ABS sui motocicli di piccola cilindrata (<250 cc), circa 52.5 milioni di veicoli nel mondo, non arriva all'1%. Per quanto riguarda le cilindrature superiori ai 250 cc, l'ABS è installato su circa il 16% dei quasi 1.7 milioni di veicoli prodotti.

Secondo i dati del GIDAS project (German In-Depth Accident Study), il 47% degli incidenti in moto avvengono perché chi guida evita di frenare bruscamente per paura del blocco delle ruote, ma così facendo spesso la frenata non basta. La validità dell'ABS sulle moto è stata confermata da uno studio condotto dalla Swedish Highways Authority nell'ottobre del 2009: il 38% di tutti gli incidenti con feriti e il 48% di scontri con morti o feriti gravi si sarebbero potuti evitare grazie all'ABS.

I sistemi di sicurezza attiva come l'ABS e l'ESP sulle automobili hanno contribuito in modo significativo alla riduzione degli incidenti stradali. Tuttavia, la guida di una moto comporta ancora diversi rischi. Secondo l'European Transport Safety Council, a parità di distanza, la probabilità di incorrere in un incidente mortale è 20 volte superiore in moto, rispetto che in macchina.

In vista dell'obbligo (entro il 2017) di installare ABS su tutte le motociclette con cilindrata superiore a 125 cc, anche gli studi di DEKRA tendono a evidenziare quanto la presenza dell'ABS possa limitare gli incidenti o le loro conseguenze.

L'ABS 9 Enhanced associato all'eCBS (electro-hydraulic Combined Brake System) costituisce la migliore soluzione, attualmente disponibile, per quanto riguarda i sistemi di frenata assistita. Se, infatti, alla logica che evita il bloccaggio delle singole ruote si combina la ripartizione di frenata in modo che intervenga contemporaneamente su entrambe le ruote, agendo (ad esempio) solo sul comando della ruota anteriore o della ruota posteriore si assicurano i migliori risultati attualmente raggiungibili. In questo modo, oltre ad ottenere l'ottimo per quanto riguarda la manovra di frenata, si evitano anche gli scompensi di assetto tipici di quando si aziona uno solo dei freni. Inoltre questo sistema interagisce con gli altri sensori presenti a bordo del veicolo, adattando i parametri di intervento a seconda della situazione.

Ad esempio, grazie ad un sensore in grado di determinare l'angolo di rollio, l'eCBS può intervenire nelle frenate in curva: una delle manovre più rischiose proprio a causa dell'eccessiva pressione frenante esercitata dal pilota, garantendo la massima stabilità possibile in quelle condizioni.

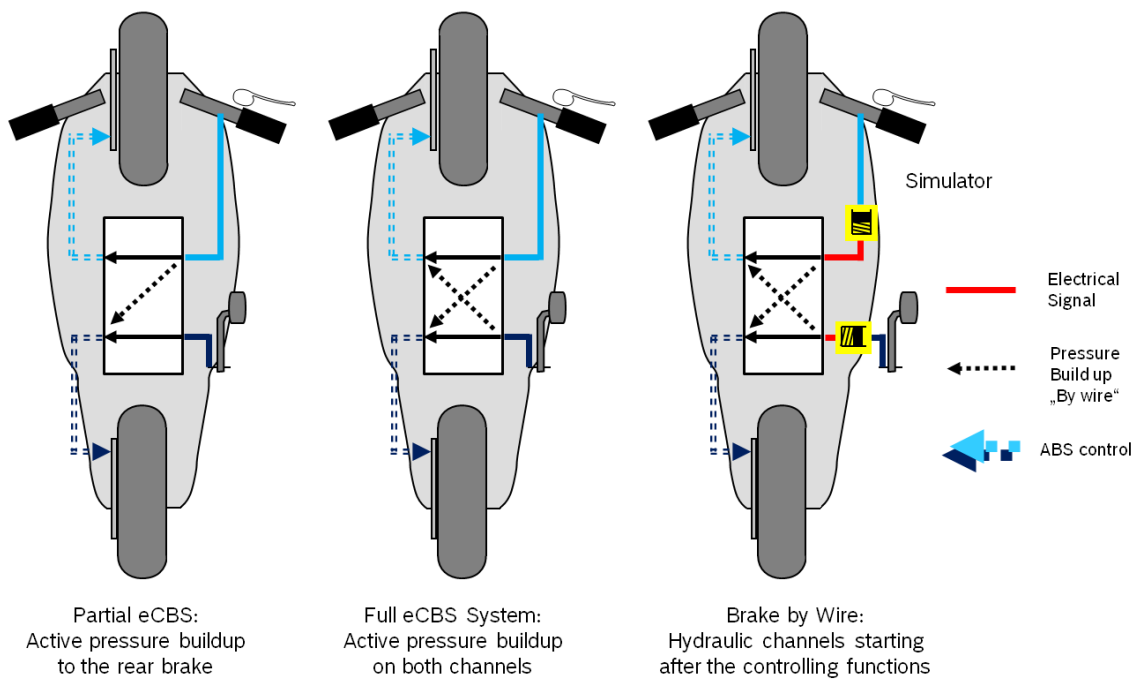


Figura 6 - Configurazioni possibili dell'eCBS

Si tratta, quindi, di un sistema invasivo che agisce direttamente sul veicolo e che a molti utilizzatori può risultare fastidioso in quanto al veicolo vengono impartiti degli input che non vengono assegnati direttamente dal pilota (o almeno non tutti) che, però, garantisce la massima sicurezza raggiungibile al giorno d'oggi.

Con questo sistema si elimina l'azione diretta del pilota sul freno in quanto l'azione vera e propria di frenata viene gestita (in modulo e ripartizione tra anteriore e posteriore) da un'elettrovalvola comandata da una centralina che entra in funzione solamente quando riceve l'input dato dal pilota

1.4.2 Traction Control

Come accade nella frenata, anche nel caso di accelerazione si può giungere alla saturazione del potenziale del pneumatico non in grado di generare la forza di aderenza richiesta, spingendosi così al di fuori dell'ellisse di trazione tipico dei pneumatici [8]. Nell'ABS si interviene riducendo la pressione nell'impianto frenante che equivale, quindi, ad una diminuzione della capacità frenante dell'impianto. Seguendo la stessa logica durante la fase di accelerazione, quando gli stessi sensori del sistema ABS montati sulle ruote rilevano una eccessiva differenza tra velocità di rotazione della ruota posteriore rispetto a quella anteriore si verificano le condizioni di slittamento del pneumatico posteriore e quindi la conseguente perdita di aderenza che porta al rischio di cadute pericolose.

Si interviene perciò limitando la coppia sviluppata dalla ruota posteriore sul terreno in modo da ridurre la forza trasmessa e mettere il pilota in condizioni di sicurezza. Le tipologie di traction control disponibili nel mercato sono di diversi tipi e diverse sono le logiche di intervento. Sicuramente, quello sviluppato da BMW Motorrad e identificato con l'acronimo ASC è il più all'avanguardia.

ASC sta per Automatic Stability Control e garantisce il controllo sulla stabilità del veicolo e, come appena detto, previene l'eccessivo slittamento del pneumatico posteriore riducendo la potenza del motore durante le brusche accelerazioni o nel caso di superficie a basso coefficiente d'attrito.

Spesso l'utente comune pensa che un dispositivo del genere sia dedicato esclusivamente ad un uso sportivo in quanto associa le brusche accelerazioni all'utilizzo delle moto in pista. Non pensa, però, che bastano accelerazioni contenute su un fondo sporco o bagnato per far perdere il controllo al posteriore del veicolo e incorrere, così, in una probabile caduta. Ecco che l'ASC si presenta come un dispositivo che non è stato concepito per raggiungere la massima accelerazione possibile a seconda delle condizioni e che non è stato pensato per accelerazioni estreme durante le fasi di percorrenza in curva. Come si vede in Figura 7 il sistema può essere abilitato o disabilitato tramite un pulsante posto sul manubrio. Se abilitato, i sensori dell'ABS controllano la velocità di rotazione delle due ruote e verificano le condizioni di slittamento, passando l'informazione alla centralina che di conseguenza gestisce il motore limitando la coppia attraverso il sistema di alimentazione. Si può intervenire agendo sull'accensione, sulla parzializzazione dell'iniezione e, in casi critici, anche sul taglio completo di un ciclo di iniezione (soluzione da evitare per non avere eccessiva discontinuità di erogazione di coppia dal motore).

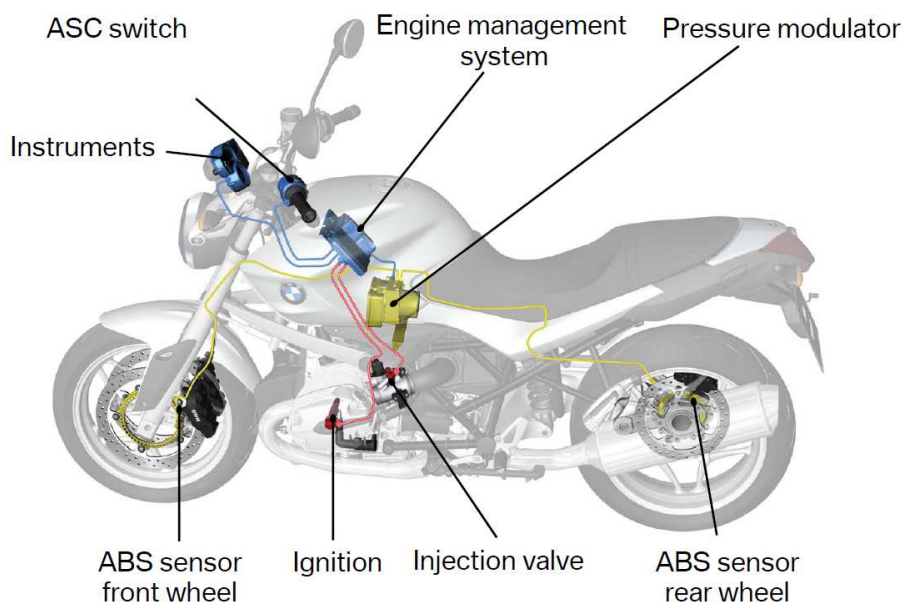


Figura 7 - Schema ASC BMW Motorrad

Il grafico in Figura 8 mostra le modalità di intervento sulla riduzione della coppia motore, qualora si verificano le condizioni di slittamento, semplicemente controllando la quantità di carica fresca somministrata al motore con l'iniettore.

Si può facilmente osservare come la coppia venga decrementata progressivamente al mantenersi delle condizioni di slittamento al posteriore.

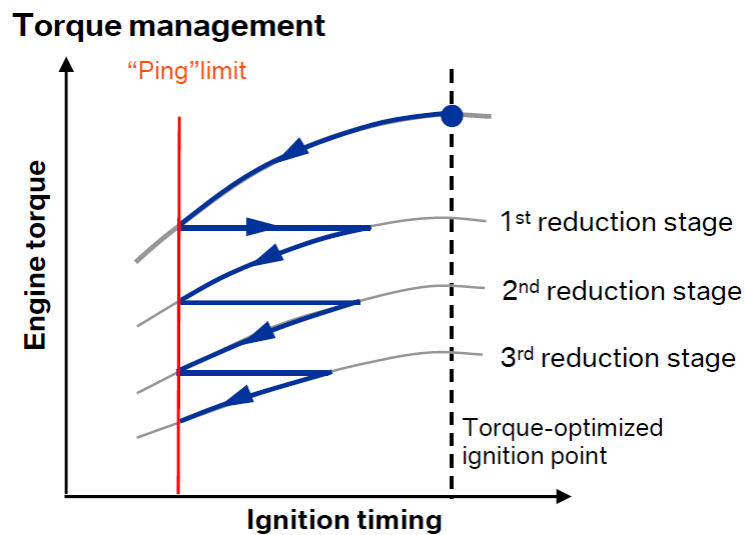


Figura 8 - Gestione della coppia motore

Questi vogliono essere semplicemente degli esempi di alcune applicazioni, sempre più diffuse nei veicoli moderni, che possono essere notevolmente migliorate utilizzando gli appositi strumenti in fase di ricerca e sviluppo.

1.5 L'esigenza di un nuovo strumento: il simulatore

L'avvento delle macchine ha rivoluzionato la storia dell'uomo il quale ha conosciuto nuovi limiti ed ha dovuto evolvere le proprie capacità per diventare telegrafista, ferroviere, automobilista, motociclista, pilota, astronauta ecc. La grande capacità di adattamento e di apprendimento ha permesso all'uomo di dominare queste tecnologie e di chiedere ad esse prestazioni sempre maggiori. E' un processo che non ha ancora conosciuto sosta: ogni giorno si scoprono tecnologie nuove, scontrandosi in prima battuta col problema di imparare ad utilizzarle per sfruttarne appieno vantaggi e potenzialità. In definitiva è una continua evoluzione della tecnica che si presta a soddisfare le esigenze dell'uomo e dell'uomo che si abitua ad utilizzare le tecnologie che gli si avvicinano. In questo complesso processo di incontro ecco che ancora una volta l'uomo si è avvalso di tecnologia per facilitarsi il compito di apprendere più velocemente e più facilmente. In questo "ponte tecnologico" tra tecnologia ed uomo annovereremo sicuramente i simulatori di volo e di guida.

I simulatori di guida sono stati sviluppati anzitutto per applicazioni aeronautiche militari e civili. Il primo simulatore di aereo risale al 1929 ad opera dell'americano Ed Link.



Figura 9 - primo simulatore di volo ad opera di Ed Link

Seguendo gli sviluppi e le evoluzioni tracciate dall'industria aeronautica il settore auto motive ha iniziato a sviluppare simulatori di autoveicoli. Ad oggi le maggiori case automobilistiche sono dotate di evoluti simulatori per lo sviluppo ed il test dei loro prodotti.

Il simulatore è un sistema complesso, che nasce con lo scopo di riprodurre l'ambiente reale in uno spazio ristretto, controllato e sicuro, al fine di addestrare le persone all'utilizzo di particolari attrezzature, di mettere a punto dispositivi ausiliari (ad esempio l'assistenza alla guida o servomeccanismi per la movimentazione) o, più semplicemente, per testare la reazione delle persone alle diverse situazioni che possono incontrare durante l'uso dell'attrezzatura.

Il primo impiego dei simulatori di guida è stato per l'apprendimento della guida degli aerei. In questo settore ci si è accorti che il simulatore risulta indispensabile per l'apprendimento vista la complessità della strumentazione di bordo e la pericolosità delle manovre da effettuare con le quali non è permesso fare errori.

Il loro elevato utilizzo è dovuto anche agli alti costi che caratterizzano i mezzi di volo ed alla pericolosità intrinseca in questi mezzi legata all'errore umano di manovra o al malfunzionamento delle apparecchiature in prova. I simulatori di volo sono sempre stati meno costosi rispetto a qualsiasi tipo di aereo che hanno cercato di riprodurre, in questo modo è stato possibile addestrare i piloti e gli equipaggi a costi inferiori e, soprattutto, a rischi nulli.

Successivamente con il diminuire dei costi necessari per realizzare un apparato di simulazione sono aumentati gli impieghi dei simulatori: sono così nati simulatori di guida per autovetture, per treni, camion e più recentemente motocicli.

I primi simulatori di "veicoli terrestri" sono stati sviluppati in ambito automobilistico con obiettivi differenti rispetto all'addestramento; molto spesso essi sono nati come strumenti di ausilio alla progettazione per validare nuove soluzioni prima del loro effettivo utilizzo o per studiare il comportamento e le reazioni umane in specifiche situazioni. Teoricamente, un simulatore dovrebbe essere in grado di far percepire all'uomo che lo sta utilizzando le stesse sensazioni di movimento, di accelerazione e controllo del veicolo.

In ambito motociclistico, anche a causa dei volumi di mercato più ristretti, questa pratica di utilizzo dei simulatori in ausilio alla progettazione non è ancora diffusa. Lo sviluppo di un simulatore di guida di veicoli a due ruote è di sicuro uno strumento per diminuire i costi della (e nella) fase di progettazione di un nuovo veicolo [9]. Inoltre il simulatore di guida ricopre un ruolo fondamentale per l'addestramento dell'utente inesperto che si accinge per la prima volta alla guida di un nuovo veicolo. In questo modo è possibile ricreare situazioni di potenziale pericolo con le quali addestrare il pilota per completare la manovra in completa sicurezza.

Gli obiettivi che portano allo sviluppo di un simulatore di guida sono:

- lo studio prestazionale di nuovi prototipi di veicoli nella fase di sviluppo, per raggiungere le caratteristiche di guida prefissate. Questo, quasi sicuramente, permette di ridurre i costi e i tempi nella fase iniziale dello sviluppo di un nuovo veicolo e di portare, quindi, più velocemente all'ingegnerizzazione del nuovo prodotto;
- l'addestramento e l'istruzione di guidatori inesperti in condizioni di sicurezza, tramite la simulazione di un ambiente di traffico reale. Questo permette di creare o aumentare la capacità di affrontare e prevedere situazioni di pericolo che possono presentarsi nelle normali condizioni di traffico, senza mettere a rischio l'incolumità di chi sta alla guida;
- la simulazione di manovre di guida pericolose e la gestione di situazioni estreme, da parte di guidatori esperti, senza che venga messa a rischio la loro incolumità;
- la creazione di modelli matematici affidabili per lo studio della dinamica della motocicletta e la conseguente valutazione, tramite simulazione del comportamento di un motoveicolo qualsiasi, noti i suoi dati;

- lo sviluppo e la verifica di modelli matematici che descrivono l'interazione tra mezzo e pilota, durante le varie fasi della guida;
- lo sviluppo e la verifica di sistemi di ausilio alla guida.

Questo ultimo punto, ad esempio, è quanto è stato fatto per il caso D-Air® di Dainese dove gli algoritmi di intervento sono stati testati ed affinati prima al simulatore e poi provati direttamente in pista. Si può facilmente capire che per un'applicazione di questo tipo per testarne l'efficacia del prodotto era richiesta necessariamente una caduta. Fortunatamente il sistema, sviluppato e testato prima al simulatore, ha funzionato al primo tentativo evitando danni al tester che è stato costretto a cadere di proposito. Da qui, la conferma che un approccio di questo tipo ad un lavoro di ricerca e sviluppo porta i suoi vantaggi ed abbatte drasticamente i costi considerando sempre la completa sicurezza durante l'esecuzione dei test.

2 IL SIMULATORE DI GUIDA

Fatta una breve introduzione sul perché siano nati i simulatori, viene ora spiegata macroscopicamente la struttura di un sistema così complesso considerando tutti gli aspetti che entrano in gioco per poter avere un buon simulatore.

Per riprodurre la realtà virtuale il simulatore deve essere composto da più parti che devono operare tra loro in modo coordinato. Il sistema risulta quindi essere costituito da:

- un sistema di acquisizione per trasformare le azioni del pilota in segnali di input;
- un sistema di elaborazione dei dati in ingresso, in grado di ricostruire l'evoluzione (dinamica) del fenomeno;
- un sistema di riproduzione delle sensazioni fisiche, acustiche, visive e tattili generate dal movimento del veicolo sul pilota;
- un sistema di riproduzione dell'ambiente esterno, dal punto di vista grafico ed acustico.

I modelli dinamici più utilizzati sono i modelli multi-body, basati su una descrizione del sistema tramite una serie di corpi rigidi vincolati tra loro come nella realtà. Il numero di corpi e i gradi di libertà variano a seconda dello scopo per cui è realizzato il simulatore, quindi a quanto spinta o meno risulti essere la semplificazione del fenomeno reale da simulare. Ad esempio uno degli aspetti sul quale non conviene semplificare eccessivamente il modello, risulta essere la descrizione del comportamento dei pneumatici. Questi infatti ricoprono un ruolo fondamentale nella dinamica dei veicoli terrestri e sono essenziali per creare le giuste sensazioni di guida nel pilota. Differente invece la modellazione ad esempio del motore. Infatti in questo caso non serve riprodurre ogni singolo componente, piuttosto la sua geometria di massima, il peso, l'inerzia e le prestazioni che il motore è in grado di generare, in quanto si è più interessati ad una prestazione dinamica d'insieme piuttosto che termodinamica del solo motore.

Il comportamento del veicolo virtuale è descritto dalle grandezze risultanti dall'integrazione del modello dinamico (posizioni, velocità, accelerazioni lineari ed angolari), la cui implementazione numerica deve garantire una velocità di integrazione tale da consentire l'interazione in tempo reale con il pilota. Verifiche condotte comparando i dati reali con quelli restituiti da simulatori già esistenti, hanno confermato la corrispondenza dei fenomeni fisici coinvolti nello studio.

Le grandezze generate dal modello matematico sono utilizzate come riferimento per il controllo dei sottosistemi responsabili della rappresentazione virtuale del movimento e dell'ambiente. La movimentazione è affidata e gestita ad un sistema di attuazione che applica le forze e le accelerazioni necessarie alla ricreazione delle sensazioni inerziali, simili a quelle reali.

La rappresentazione dell'ambiente prevede, invece, una serie di sottosistemi dedicati a riprodurre un insieme omogeneo di sensazioni:

- Sensazioni visive;
- Sensazioni uditive;
- Sensazioni tattili;

La necessità di utilizzare un sistema di riproduzione dell'ambiente così articolato dipende dal cervello umano che percepisce il movimento integrando diverse sensazioni di tipo visivo, acustico e fisico. Le principali percezioni di tipo fisico sono date dal sistema vestibolare situato nell'orecchio interno; in questa sede due diverse strutture, il vestibolo membranoso e il complesso dei canali semicircolari membranosi (che compongono un giroscopio biologico) hanno la funzione di rilevare rispettivamente l'equilibrio statico e quello dinamico. Alle sensazioni vestibolari si aggiungono quelle tattili che derivano dall'interazione con il sedile o la sella, col volante o manubrio e le pedane; infine, occorre ricordare le sensazioni derivanti dall'effetto del flusso d'aria che investe il pilota durante la guida, se a bordo di un veicolo scoperto [9].

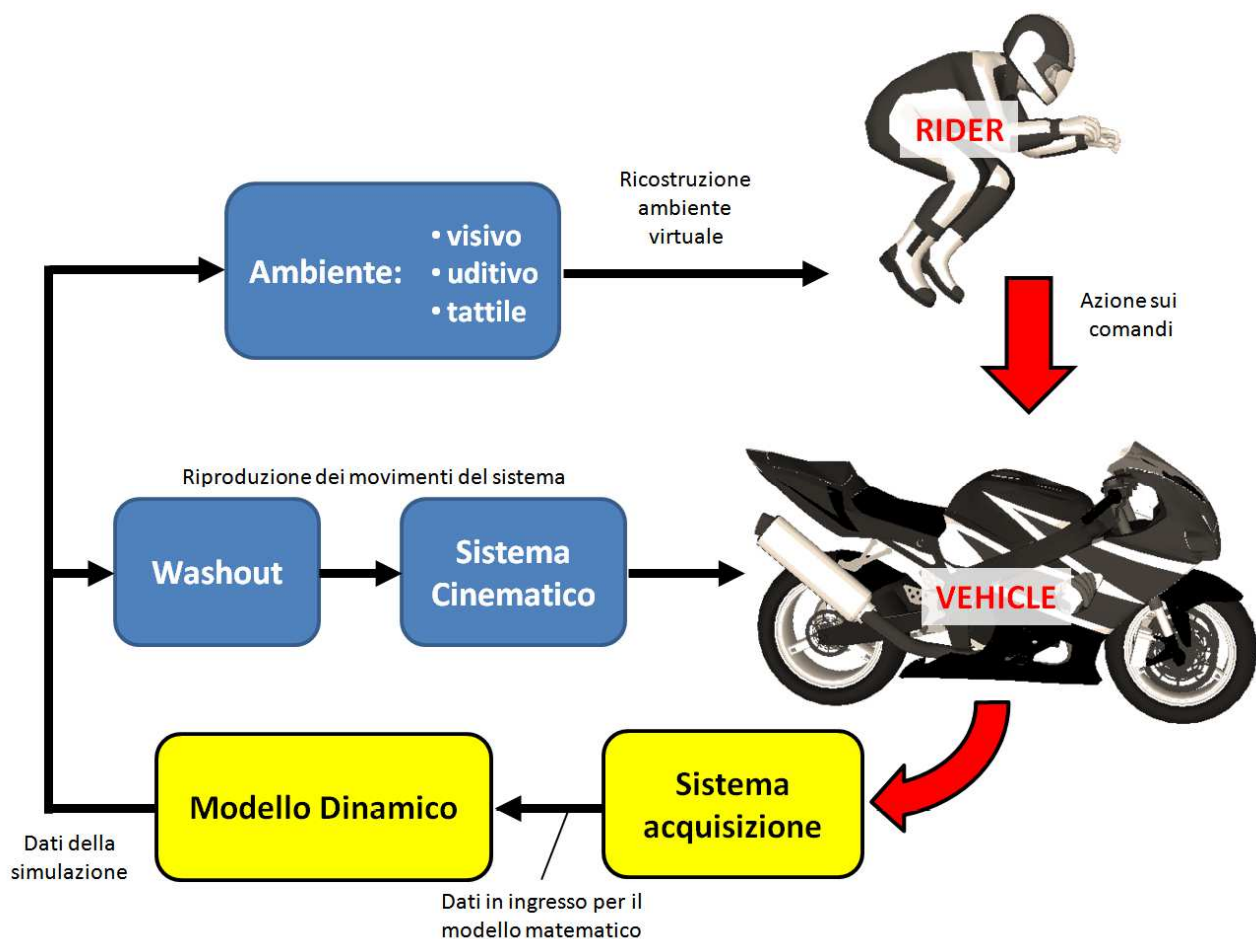


Figura 10 – Schema a blocchi di un simulatore di guida motociclistico

Il sistema grafico viene utilizzato per ricreare l'ambiente di guida dal punto di vista del guidatore nelle manovre che deve compiere e "illudere" il pilota di trovarsi realmente in quelle condizioni; può essere realizzato ricorrendo a schermi con proiettore (diverse soluzioni sono state proposte in questi anni) isolando, nel contempo, il soggetto in un ambiente buio che induca a concentrare l'attenzione sulle immagini. In questo modo si ottimizza l'effetto di immersione nell'ambiente virtuale che riproduce lo svilupparsi del percorso secondo le modalità ricavate dall'integratore e dall'ambiente grafico impostato.

Una possibile alternativa risulta essere l'utilizzo di visori indossabili, in alcuni casi stereoscopici, che forniscono una percezione visiva simile a quella di uno schermo da 100 pollici, con un ingombro molto più ridotto ma costi comparabili se non superiori. Gli effetti visivi possono sopperire alle limitazioni meccaniche dello spazio di lavoro, combinando i movimenti del pilota con un'opportuna inclinazione della visuale.

Il sistema acustico deve riprodurre sia i suoni propri del veicolo ai diversi regimi del motore, a seconda delle azioni sull'acceleratore, sia gli effetti sonori ambientali sincronizzati con le rappresentazioni del sistema visivo e ottimizzati tramite l'uso dell'effetto "doppler" tipico della percezione di fonti sonore in movimento, rispetto all'ascoltatore. Per ottenere questi risultati la soluzione più opportuna risulta l'utilizzo di sistemi sonori surround 5.1 (un canale per i suoni del veicolo, 4 per gli effetti ambientali e 1 per i bassi).

La necessità di rendere le sensazioni dinamica e tattile, legate allo spostamento d'aria dovuto al moto del mezzo nell'atmosfera, viene supportata dal sottosistema eolico che eroga un flusso d'aria proporzionale alla velocità ricavata dal modello real-time.

Per quanto riguarda il sistema di attuazione del simulatore, vero responsabile del feedback inerziale sul pilota, si possono adottare diverse soluzioni:

- una cinematica seriale: consiste in una catena cinematica aperta che connette la base alla parte da movimentare;
- una cinematica parallela: consiste in più catene cinematiche chiuse che uniscono la parte fissa a quella mobile (piattaforma di Stewart);
- una cinematica che presenti soluzioni ibride;

La seconda soluzione garantisce una migliore rigidità strutturale, un migliore rapporto carico applicato – peso del meccanismo, un minor errore di riposizionamento e frequenze proprie più elevate.

Al contrario, con i cinematismi seriali si ottengono un maggiore spazio di lavoro raggiungibile e minori ingombri, caratteristiche che li privilegiano in ambito commerciale, pur essendo necessari dei compromessi sugli aspetti in cui prevalgono le piattaforme di Stewart.

Tuttavia, il simulatore non ha la possibilità di movimento di un veicolo reale quindi le grandezze calcolate non possono essere applicate direttamente al sistema di movimentazione. A questo proposito riveste un ruolo fondamentale la strategia del simulatore, cioè l'algoritmo matematico che realizza la conversione dei movimenti del veicolo calcolate nel sistema dinamico, ai movimenti che il simulatore deve eseguire: la limitatezza dello spazio di lavoro per le manovre comporta sempre un certo errore nella loro replica. Se si verificano errori troppo elevati si può ottenere l'incoerenza con l'ambiente virtuale simulato dagli altri sottosistemi, quindi un errata sensazione inerziale sul pilota. In questo modo lo stesso viene portato a compiere manovre scorrette o, una volta posto alla guida del veicolo reale, a non interpretare correttamente ciò che sta succedendo, vanificando così l'uso del simulatore per l'addestramento.

Gli algoritmi che realizzano la strategia del simulatore sono strutturati in genere da due parti coordinate, una per la gestione dei moti longitudinali all'interno del piano di simmetria del veicolo, l'altra per la generazione dei moti laterali fuori piano (rollio, imbardata, sterzo,...).

Le tecniche di realizzazione della strategia di controllo sono riassunte nella denominazione "filtro di Washout" e non sono facilmente reperibili nel dettaglio in letteratura perché, spesso, costituiscono il cuore di potenziali sistemi commerciali; dalla loro descrizione di massima si può, comunque, rilevare che le azioni di controllo sono realizzate mediante semplici leggi di controllo con coefficienti regolati in base all'esperienza o mediante leggi derivanti da rilevazioni sperimentali su strada.

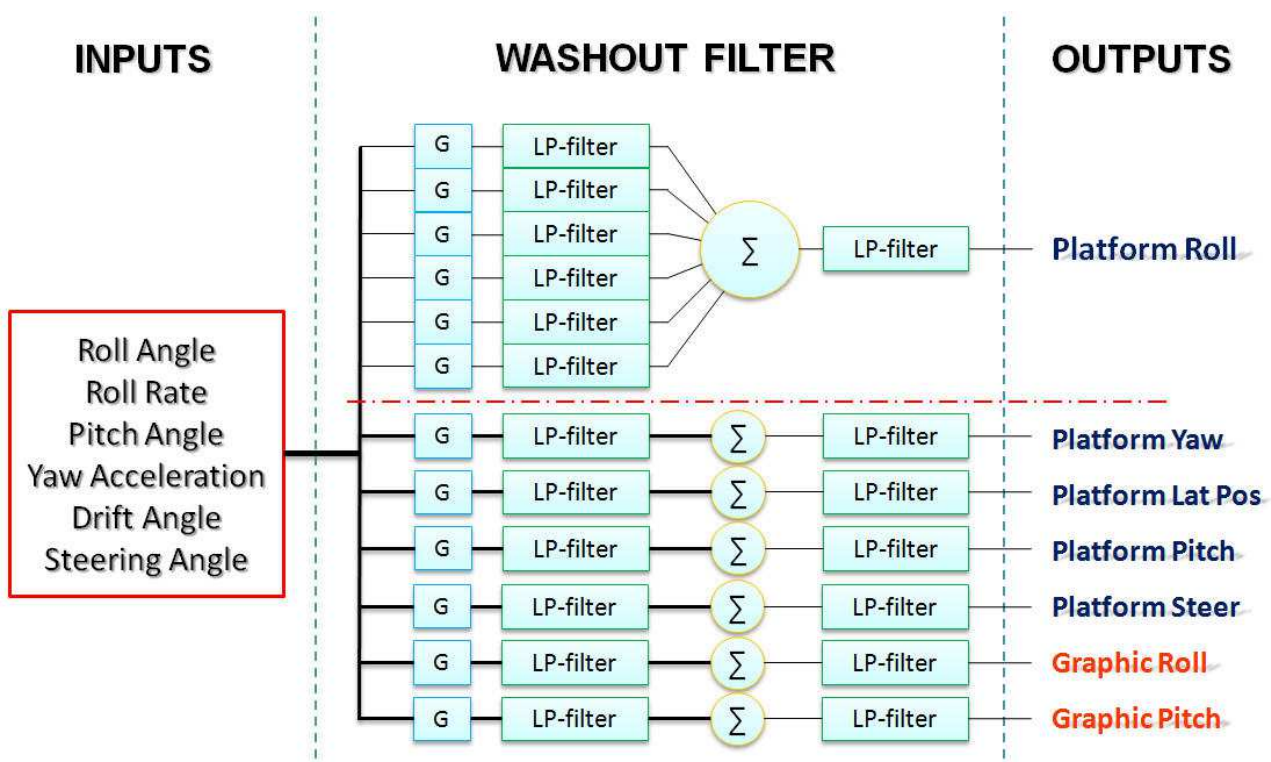


Figura 11 - Struttura generale del filtro di Washout

Un esempio del "filtro di Washout" sviluppato per il simulatore di guida del Motorcycle Dynamics Research Group assume la struttura riportata in Figura 11. Al Washout arrivano tutti i valori dei segnali di input i quali vengono moltiplicati inizialmente per un fattore di amplificazione (G); successivamente viene applicato un primo filtro passa-basso al segnale (Low Pass Filter) per poi combinare linearmente tutti i segnali in un'unica espressione. Il risultato della combinazione lineare viene filtrato nuovamente prima di generare il segnale di output desiderato. Questa sequenza di operazioni viene ripetuta per ogni output del sistema, al fine di ricreare il segnale desiderato.

Sistemi di controllo più sofisticati, per i quali è più corretto il termine filtri di Washout, sono quelli sviluppati nel settore dei simulatori di volo ed hanno la peculiarità di riprodurre le accelerazioni e le velocità angolari percepite a livello vestibolare dal pilota durante la guida sfruttando sia le accelerazioni e le velocità angolari del simulatore (effetto inerziale), sia l'accelerazione di gravità (effetto gravitazionale). Le accelerazioni da riprodurre vengono separate da filtri nelle loro componenti spettrali. Le componenti a bassa frequenza vengono riprodotte facendo uso della gravità, inclinando lentamente il simulatore, le componenti ad alta frequenza vengono invece riprodotte facendo muovere il simulatore più velocemente e sfruttando gli effetti inerziali generati dal movimento. In questo modo si riescono a riprodurre in maniera migliore le accelerazioni reali, pur con limitati spostamenti del simulatore.

Si è comunque riscontrato che per realizzare una buona strategia è necessario che le accelerazioni percepite dall'utilizzatore siano calcolate vicino all'incavo dell'orecchio in prossimità quindi del sistema vestibolare.

2.1 L'evoluzione dei simulatori di guida motociclistici

Nel 1988 Honda inizia per prima gli studi sul simulatore di guida motociclistico. In quegli anni numerosi simulatori di automobili erano già stati sviluppati ma per quanto riguarda il mondo delle ruote, nessun prototipo era ancora stato realizzato. Lo sviluppo è cominciato nel centro R&D ASAKA con la partecipazione di esperti di immagini, audio, esperti di dinamica e cinematica nonché di controlli di sistemi. Comincia così la collaborazione tra centri di guida sicura in possesso del know-how sull'educazione stradale su motocicli e la Honda Engineering esperta nei controlli automatici.

Sul primo prototipo realizzato nel 1989 l'audio era già stato digitalizzato e le immagini venivano proiettate a 30 frame al secondo. Questo simulatore era costituito da una struttura mobile, comprensiva di unità di guida e unità di visualizzazione, inserita in una culla provvista di guide. I risultati però furono pessimi in quanto tutti i motociclisti esperti coinvolti per i primi test di funzionamento caddero. La motivazione fornita fu che nessun tipo di accelerazione veniva riprodotta sul simulatore e in questo modo il pilota non era in grado di interpretare la motocicletta.

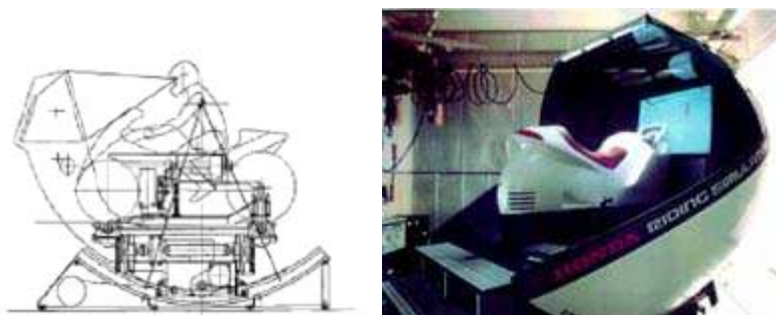


Figura 12 - Primo prototipo simulatore Honda (1989)

Nel 1990 viene presentato il Prototype 2 che si presenta con uno schermo da 100 pollici rispetto ai 52 della versione precedente. Inoltre è provvisto di un sistema di ventilazione in grado di ricreare la resistenza aerodinamica durante la guida. Nel 1991 viene installato nel Traffic Education Center di Suzuka. Nei successivi due anni il simulatore è stato coinvolto in numerosi test di guida per trarne i benefici a livello di educazione stradale e con un totale di 3500 piloti testati, sono stati stabiliti nuovi metodi di insegnamento utilizzando i simulatori di guida.



Figura 13 - Secondo prototipo di simulatore Honda (1990)

Con il Prototype 3, Honda cala il sipario nel 1994: avendo un progetto per la produzione di massa, il team di sviluppo di questo tipo di simulatori, durato per sei anni, è stato sciolto. Proprio quando tutti hanno cominciato a pensare di terminare il progetto dei simulatori di guida, il sistema delle patenti di guida è stato rivisto e, come requisito per le patenti di guida di moto di grossa cilindrata, è stato inserito il requisito di un corso di formazione con simulatori di guida presso le scuole di guida. A questo punto Honda ha formato nuovamente un team di sviluppo orientato ad un prodotto di massa, con lo scopo di ridurre i costi.



Figura 14 - Terzo prototipo di simulatore Honda (1993)

Il prodotto di massa, lo SMART, presentato il 19 Giugno 1996, ottenne un ampio successo tra le scuole di guida per quanto riguarda la modalità di guida come quella sui veicoli, le funzioni e l'ambiente ricreato del traffico.



Figura 15 - il prodotto di massa Honda SMART Simulator

Honda quindi è stata la pioniera dei simulatori di guida motociclistici e attualmente diversi prodotti sono reperibili nel mercato ma solo un numero ristretto di questi riproducono realmente la dinamica di un motociclo. La maggior parte sono prodotti ludici, destinati quindi al solo divertimento e nei quali i comportamenti reali del veicolo non sono l'obiettivo principale.

Sicuramente la francese Eca Faros non è una di queste: la società, fondata nel 1986, punta alle simulazioni rivolte alla sicurezza, soprattutto in campo auto-motive ed aeronautico. Attualmente realizza simulatori di guida per automobili, motocicli, veicoli pesanti su strada e simulatori di volo.

Per quanto riguarda il simulatore di guida motociclistico, l'EF-Bike, utilizza il modello dinamico sviluppato all'Università di Padova dal Motorcycle Dynamics Research Group.



Figura 16 - Il simulatore della Eca-Faros

Questo simulatore ha tre gradi di libertà: permette il moto di rollio, di beccheggio e un force feedback sull'asse di sterzo, quindi agente sul manubrio. Permette inoltre di agire indipendentemente sul freno anteriore e posteriore e ha il selettore manuale delle marce tramite la tradizionale pedalina.

La parte di visualizzazione è affidata a tre schermi e gli ambienti grafici forniti permettono di effettuare corsi di addestramento in ambienti urbani, extraurbani e di montagna. Sono previste inoltre aree testing dove è possibile simulare le manovre tipiche delle scuole di guida come, ad esempio, manovre di slalom o di steady state. Inoltre è possibile provare la guida della motocicletta in diverse condizioni ambientali, quali la pioggia, la nebbia, la guida notturna oppure all'alba/tramonto.

2.2 Il simulatore SafeBike dell'Università di Padova

Il primo prototipo di simulatore di guida motociclistico sviluppato interamente presso l'Università degli Studi di Padova, ed in particolar modo dal Motorcycle Dynamics Research Group (MDRG), risale al 2000. Si trattava di un sistema abbastanza semplice a livello hardware e di una prima versione software in grado di ricreare la dinamica del motociclo in tempo reale. Gli aspetti di dettaglio non vengono ora affrontati in quanto non facenti parte di questo lavoro, tuttavia sarà necessaria una panoramica generale delle caratteristiche del simulatore ed in particolare sul lavoro che mi ha coinvolto in questo progetto di dottorato.

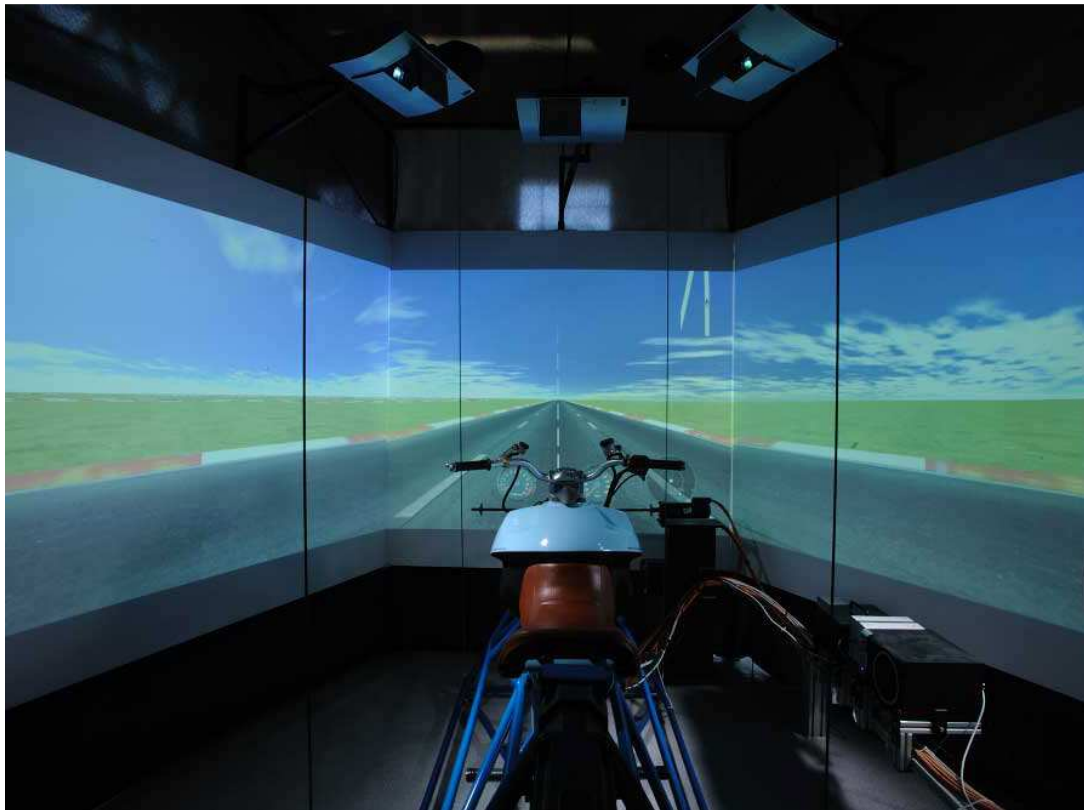


Figura 17 – Simulatore di guida SafeBike dell'Università degli Studi di Padova

Lo schema strutturale attuale del simulatore si presenta come riportato in Figura 18 dove sono anche evidenziati i 5 gradi di libertà (gdl) del sistema. In particolare il movimento di rollio (R1), il movimento di beccheggio (A4), il movimento di imbardata (A2-A3), lo spostamento laterale (A2-A3) e la rotazione dello sterzo (R5).

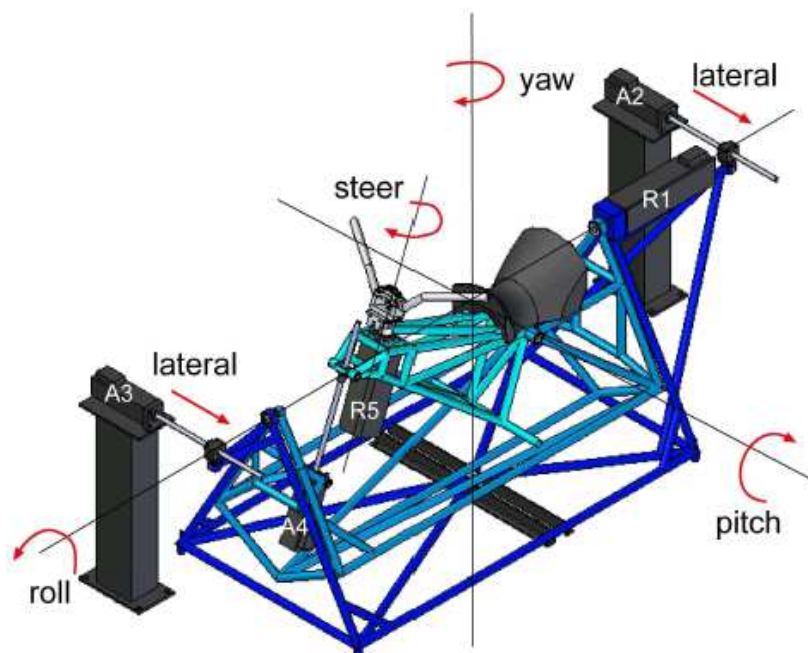


Figura 18 – Struttura SafeBike

Attraverso il mock-up del simulatore il pilota interagisce fornendo i segnali di input necessari al modello matematico per ricreare la dinamica in real-time. In particolare i segnali di input vengono forniti da:

- coppia di sterzo applicata al manubrio;
- azionamento del freno anteriore;
- azionamento del freno posteriore;
- azionamento della frizione;
- selezionatore delle marce;
- coppia di rollio applicata alle pedane;
- coppia di rollio applicata alla sella;

I primi cinque sensori erano già utilizzati nel modello presente all'inizio del mio lavoro di dottorato, le pedane presentavano già la predisposizione per l'acquisizione del segnale mentre il sensore della sella è stato realizzato ex novo. L'aggiornamento e l'evoluzione dei segnali acquisiti è frutto di uno studio condotto, in questi anni, sulle sensazioni di guida. L'approfondimento ha prodotto la necessità di aumentare la sensibilità di guida che, inizialmente, non permetteva la guida del veicolo utilizzando il corpo ma solo ed esclusivamente interagendo con il manubrio.

Con questa ricerca si sono potuti acquisire diversi segnali di input, è stato possibile fornirli come dati di ingresso al modello multibody della motocicletta che si basa su un codice validato e sviluppato dal gruppo MDRG negli ultimi anni [10]. Questo modello è in grado di catturare le caratteristiche essenziali della dinamica della motocicletta sintetizzate da un codice veloce orientato alla simulazione real-time. In questo contesto, l'accezione real-time intende evidenziare che il codice è in grado di essere simulato con un fattore di velocità superiore a quello dell'evento reale che simula.

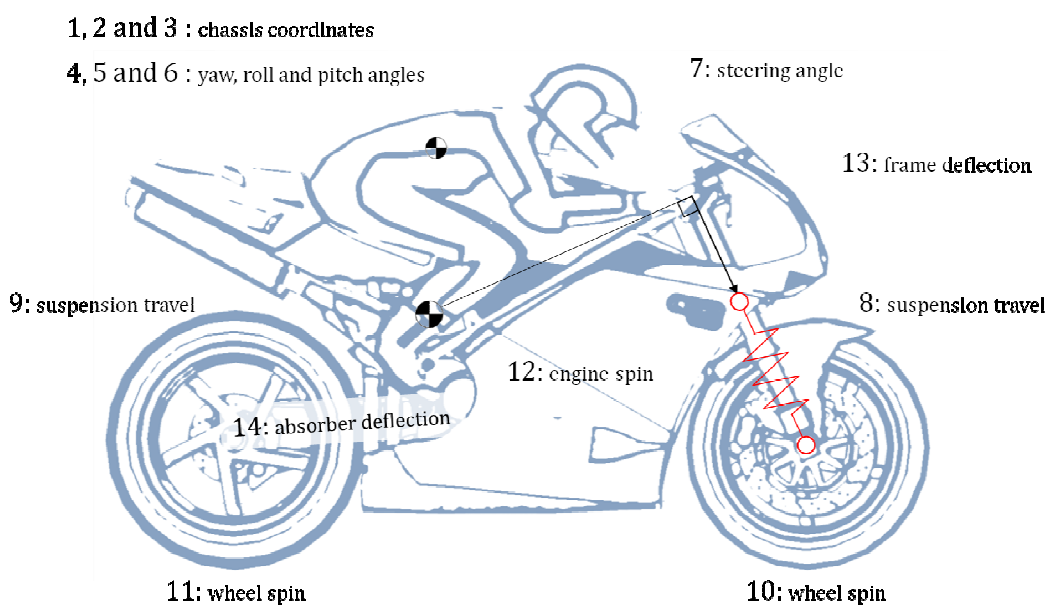


Figura 19 - Modello Multibody

Il modello ha 14 gradi di libertà (vedi Figura 19): la posizione ed orientazione dello chassis (6 gdl), l'angolo di sterzo (1 gdl), le corse delle sospensioni posteriore ed anteriore (2 gdl), le rotazioni delle ruote posteriori ed anteriori (2 gdl), la velocità di rotazione del motore (1 gdl), la deflessione laterale della sospensione anteriore (1 gdl) e la deflessione del parastrappi sulla ruota posteriore (1 gdl). Alcune assunzioni di linearità sono state fatte sull'angolo di sterzo; le corse delle sospensioni, la posizione laterale del pilota, la deflessione delle forcelle anteriori e del parastrappi in quanto le variazioni di tutte queste variabili, in un contesto di guida comune, sono ragionevolmente piccole. La forza generata dall'interazione tra ruota e strada è calcolata in accordo alla Magic Formula [11][12], ed è soggetta al fenomeno di rilassamento indotto dalle flessibilità laterale e longitudinale del pneumatico[13]. Il modello di ruota è toroidale e l'interazione con il modello di strada è una versione leggermente semplificata di quella presentata in [14]. Infine, un modello di frizione è stato inserito per permettere un cambio di marcia realistico durante la simulazione.

Le ragioni che portano all'introduzione della flessibilità sulla forcella anteriore ricadono nel desiderio di avere una dinamica del veicolo realistica, relativa alla vibrazione legata al modo wobble [15]: tale flessibilità ha un effetto stabilizzante molto importante ad alte velocità e senza di essa il veicolo tende a mostrarsi instabile a velocità molto più basse della realtà. L'introduzione del parastrappi è necessaria per simulare, con un sufficiente grado di accuratezza, la dinamica tra coppia motore e slip longitudinale del pneumatico posteriore: tale dinamica è fondamentale nella simulazione del veicolo dotato di un sistema di controllo della trazione [16]. Non di meno, tale flessibilità ha una forte correlazione con il fenomeno del chattering che, tipicamente, può apparire nelle motociclette da competizione durante una frenata [17] e che il simulatore è in grado di riprodurre.

A questo punto in uscita dal modello multibody vengono forniti i segnali per la movimentazione del sistema, la grafica sui tre proiettori indipendenti e l'audio, fornito dal sistema dolby surround 5.1.

2.3 La validazione del simulatore

Fin dalle sue prime versioni il simulatore è stato sottoposto a verifiche di prestazioni man mano che il sistema veniva sviluppato, trovando in questo modo la strada da seguire per lo sviluppo.

In questi ultimi anni, che hanno coinciso con la mia presenza nel laboratorio del MDRG, è stata realizzata una campagna intensiva di test e prove atte a validare sia oggettivamente che soggettivamente le prestazioni che il simulatore è in grado di raggiungere. Questo è stato possibile grazie anche alla partecipazione del gruppo di ricerca al Progetto Europeo sulla sicurezza stradale, noto con il nome di 2beSafe (2 Wheeler behaviour and safety).

Il progetto ha inizio ufficialmente nel Gennaio del 2009 e ha visto coinvolti diversi partner con l'obiettivo principale di indirizzare lo studio comportamentale ed ergonomico per sviluppare contromisure al fine di migliorare la sicurezza dei guidatori di veicoli a due ruote, includendo anche studi sulle cause degli incidenti ed errori umani.

All'interno di questo progetto l'Università degli Studi di Padova ha partecipato da protagonista potendo disporre di uno dei simulatori motociclistici all'avanguardia a livello mondiale.

I simulatori di guida motociclistici, come già accennato precedentemente sono più recenti dei simulatori di auto o veicoli pesanti e per questo motivo sono oggetto di grandi studi per poterne validare i risultati ottenibili e al fine di renderne fruibile l'utilizzo nelle analisi comportamentali del guidatore. Lo scopo è stato quello di valutare le mere prestazioni dinamiche del veicolo virtuale e le sensazioni che il simulatore è in grado di riprodurre in modo da replicare una guida del veicolo come nella realtà e allo stesso tempo un controllo da parte del guidatore il più verosimile alle condizioni reali.

Per raggiungere questo obiettivo è stata effettuata una prima ottimizzazione del simulatore dal punto di vista del sistema di movimentazione, del sistema audio e del sistema grafico, svolgendo dei test su un numero prefissato di motociclisti esperti.

Successivamente è stata eseguita una validazione del simulatore, comparando i comportamenti, le prestazioni e le impressioni di un gruppo di motociclisti di diversa età, sesso ed esperienza.

Questa attività di validazione del simulatore è stata quindi oggetto di due fasi separate:

- validazione oggettiva: dove alcuni parametri opportunamente selezionati sono stati calcolati e successivamente comparati tra manovre diverse eseguite prima con una moto reale e poi ripetute al simulatore;
- validazione soggettiva: dove le sensazioni di guida sono valutate attraverso degli indici relativi ai test soggettivi.

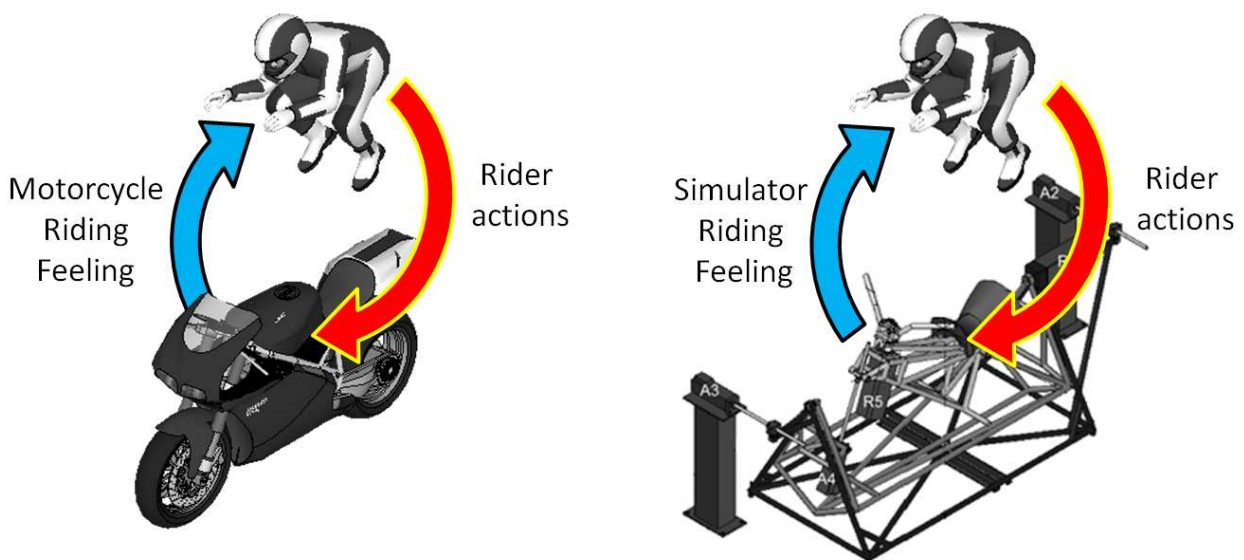


Figura 20- Interazioni motociclista – moto , motociclista - simulatore

Per poter meglio comprendere il significato di validazione, in Figura 20 a sinistra è riportata l'interazione Pilota – Veicolo nel quale viene evidenziata, in rosso, l'azione che il pilota esercita sul veicolo (agendo sul manubrio, accelerando o frenando, ecc..) mentre in blu la risposta del veicolo in termini di movimento, sensazioni inerziali, acustiche e visive. Sulla destra è riportata l'interazione Pilota – Simulatore che è dello stesso tipo di interazione uomo-macchina, come nelle condizioni reali. Il pilota agisce sul motociclo virtuale nello stesso modo con cui agirebbe su una motocicletta vera ed un corretto settaggio dei parametri del modello multibody dovrebbe ricreare sensazioni simili a quelle percepite nella realtà.

La fase della validazione oggettiva prevede l'esecuzione di manovre tipiche per l'identificazione della maneggevolezza di un veicolo a due ruote, prima su un veicolo reale opportunamente strumentato e successivamente al simulatore. I dati così ottenuti sono stati elaborati e, alla fine, comparati per vedere se manovre simili, in condizioni simili, restituiscono gli stessi valori di maneggevolezza.

Le manovre necessarie per l'identificazione della maneggevolezza più comuni e presenti in letteratura sono:

- Manovra di Slalom
- Manovra di Lane Change
- Manovra di Steady Turning

2.3.1 La validazione oggettiva del simulatore

Per poter disporre delle informazioni ed effettuare la validazione del simulatore è necessario strumentare appositamente una motocicletta utilizzata per l'acquisizione dei dati sperimentali.

La moto in questione è una Aprilia Dorsoduro 750cc come quella riportata in Figura 21.



Figura 21 – Aprilia Dorsoduro come quella utilizzata per i test sperimentali

Definire la maneggevolezza di un motociclo non è semplice in quanto si tratta di una caratteristica globale determinata da diverse componenti (motore, freni, aerodinamica, telaio, pneumatici, ecc.). Inoltre, c'è una forte componente soggettiva nell'uso e nella valutazione della motocicletta da parte del pilota, a seconda della sensibilità e dello stile di guida.

La maneggevolezza di solito è associata alla risposta del veicolo ad un'azione di controllo. Si assume che la motocicletta sia un sistema con alcuni input di controllo (coppia o angolo di sterzata, velocità di avanzamento) ed alcuni output cinematici e dinamici. Il comportamento della motocicletta, perciò, è descritto dalla funzione che collega gli input agli output nell'eseguire manovre tipiche come lo slalom, la prova a curvatura costante, il cambio di corsia e così via [8].

2.3.1.1 Manovra di Slalom

Durante una manovra di slalom in condizioni normali il pilota controlla il veicolo agendo in modo periodico sullo sterzo ed il veicolo risponde con moti periodici di rollio, imbardata e spostamento laterale. La frequenza tipica di una manovra di slalom è:

$$f = \frac{V}{2P}$$

Dove P è la distanza tra due coni consecutivi.

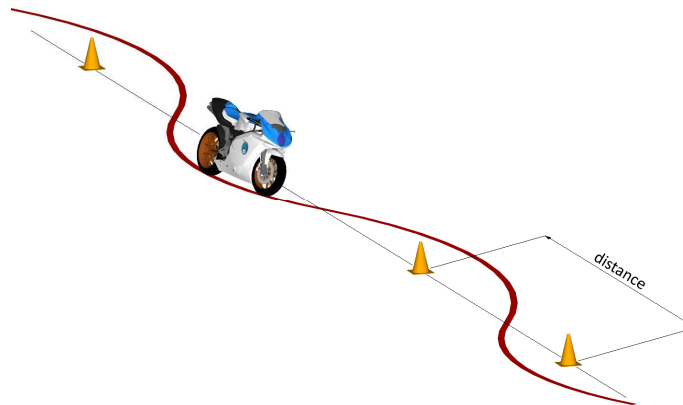


Figura 22 – Slalom Manoeuvre

In questa manovra la forzante agente sul sistema risiede nella coppia di sterzo applicata dal pilota mentre la risposta cambia in fase ed ampiezza in funzione della velocità di esecuzione della prova e della frequenza di slalom.

I test sono stati ripetuti con tre diverse distanze tra i coni in un tratto rettilineo di percorso:

- 7 metri ad una velocità circa di 17 km/h;
- 14 metri ad una velocità circa di 40 km/h;
- 21 metri ad una velocità circa di 70 km/h;

Per ogni distanza è stato ricavato un grafico chiamato Slalom Fitting e riporta i dati grezzi derivanti dall'acquisizione (linea blu) e di dati interpolati e filtrati.

Le variabili sono state interpolate usando una funzione sinusoidale del tipo:

$$y = y_0 \sin(2\pi f t - \phi)$$

Dove y_0 rappresenta l'ampiezza, f la frequenza di slalom, t il tempo e ϕ la fase. L'ampiezza, la frequenza di slalom e la fase sono state calcolate con il metodo dei minimi quadrati e sono inserite nei grafici con il corrispondente errore di interpolazione dei dati e la velocità media della manovra.

| Cones | Slalom | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|-------|-----------------|-------|-------------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-------------------|-------|-----------------|-------|
| | 7m | | | | 14m | | | | 21m | | | | | |
| | Aprilia Dorsoduro | | UNIPD SIMULATOR | | Aprilia Dorsoduro | | UNIPD SIMULATOR | | UNIPD SIMULATOR | | Aprilia Dorsoduro | | UNIPD SIMULATOR | |
| frequency [Hz] | 0.3463 | | 0.3393 | | 0.4474 | | 0.3557 | | 0.3604 | | 0.4548 | | 0.3581 | |
| av. speed [m/s] | 4.8483 | | 4.7505 | | 12.5261 | | 9.9588 | | 10.0917 | | 19.1029 | | 15.0382 | |
| | magn | phase | magn | phase | magn | phase | magn | phase | magn | phase | magn | phase | magn | phase |
| Gx [°s] | 0.462 | 3.356 | 0.430 | 0.236 | 1.243 | 2.254 | 0.587 | 3.499 | 0.569 | 2.997 | 1.188 | 0.328 | 0.753 | 6.094 |
| Gz [°s] | 0.522 | 5.145 | 0.466 | 2.399 | 0.473 | 4.242 | 0.271 | 5.386 | 0.288 | 4.911 | 0.310 | 2.446 | 0.255 | 1.638 |
| Steer Torque [Nm] | 12.946 | 2.192 | 16.660 | 3.061 | 27.836 | 5.502 | 19.701 | 0.165 | 18.344 | 5.909 | 45.300 | 3.425 | 29.384 | 2.796 |
| Steer angle [°] | 0.167 | 5.026 | 0.138 | 2.448 | 0.053 | 4.050 | 0.043 | 5.456 | 0.051 | 4.962 | 0.041 | 2.537 | 0.029 | 1.794 |
| Gx/τ | 0.0357 | | 0.0258 | | 0.0446 | | 0.0298 | | 0.0310 | | 0.0262 | | 0.0256 | |
| Gx/Gz | 0.8849 | | 0.9239 | | 2.6274 | | 2.1682 | | 1.9784 | | 3.8280 | | 2.9487 | |
| φ1-φ2 | -1.1647 | | -2.8252 | | -3.2484 | | -3.3336 | | -2.9124 | | -3.0974 | | -3.2986 | |

Tabella 3 – Dati relativi alla manovra di slalom eseguita sperimentalmente su veicolo e simulatore

Lo strumento matematico più adatto ad interpretare i risultati di un test di slalom è la funzione di trasferimento, che rende possibile descrivere la risposta del sistema (angolo di rollio) in relazione all'input caratteristico (coppia di sterzo) in funzione della frequenza:

$$f dt_{rollio} = \frac{\tau}{\phi} (v)$$

Se questa funzione di trasferimento assume valori bassi significa che il moto di rollio di una grossa motocicletta è ottenuto con un piccolo sforzo di sterzata, mentre una grande fase indica che l'angolo di rollio segue la coppia di sterzo con un certo ritardo. Aumentando la frequenza (direttamente proporzionale alla velocità) la motocicletta ha bisogno di uno sforzo di sterzata maggiore per seguire la traiettoria di slalom. Tuttavia, il feeling del pilota è determinato dal ritardo di fase tra l'angolo di rollio e la coppia di sterzo, piuttosto che dalla coppia di sterzo massima: una migliore maneggevolezza è associata alle motociclette che presentano una risposta veloce all'input di sterzata (quindi piccoli sfasamenti).

In Tabella 3 sono raccolti i dati delle prove di slalom eseguite sulle tre diverse distanze (7, 14 e 21 metri) prima con veicolo sperimentale (vedi Figura 23) e poi con il simulatore di guida SafeBike (vedi Figura 24). Partendo dal presupposto che è impossibile replicare esattamente la manovra di slalom al simulatore come nella realtà, il confronto è agevolato dagli indici calcolati basati sul rapporto G_x/τ tra la velocità di rollio del motociclo (che rappresenta il comportamento del veicolo) e la coppia di sterzo applicata al manubrio (che rappresenta l'azione del pilota).

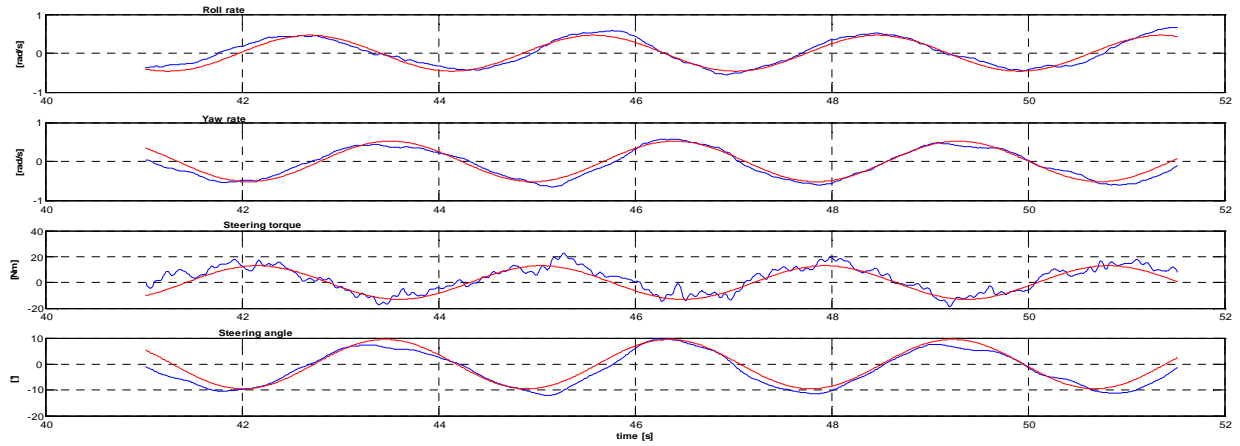
Aprilia Dorsoduro : cone distance =7 m ; frequency =0.34631 Hz ; average speed =4.8483 m/s

Roll rate : magnitude=0.46194 ; phase=3.3563 ; error=20%

Yaw rate : magnitude=0.52202 ; phase=5.1452 ; error=20%

Steering torque : magnitude=12.9457 ; phase=2.1916 ; error=33%

Steering angle : magnitude=9.5475 ; phase=5.0256 ; error=24%



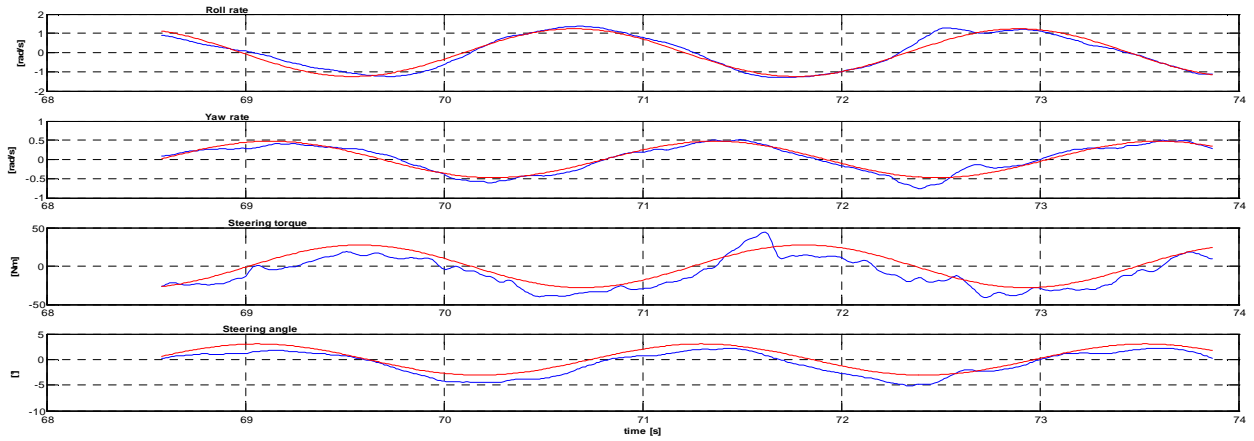
Aprilia Dorsoduro : cone distance =14 m ; frequency =0.44736 Hz ; average speed =12.5261 m/s

Roll rate : magnitude=1.2426 ; phase=2.2538 ; error=15%

Yaw rate : magnitude=0.47294 ; phase=4.2423 ; error=20%

Steering torque : magnitude=27.836 ; phase=5.5022 ; error=41%

Steering angle : magnitude=3.0457 ; phase=4.0502 ; error=39%



Aprilia Dorsoduro : cone distance =21 m ; frequency =0.45483 Hz ; average speed =19.1029 m/s

Roll rate : magnitude=1.1878 ; phase=0.32787 ; error=20%

Yaw rate : magnitude=0.31029 ; phase=2.4462 ; error=29%

Steering torque : magnitude=45.2997 ; phase=3.4253 ; error=24%

Steering angle : magnitude=2.3677 ; phase=2.537 ; error=59%

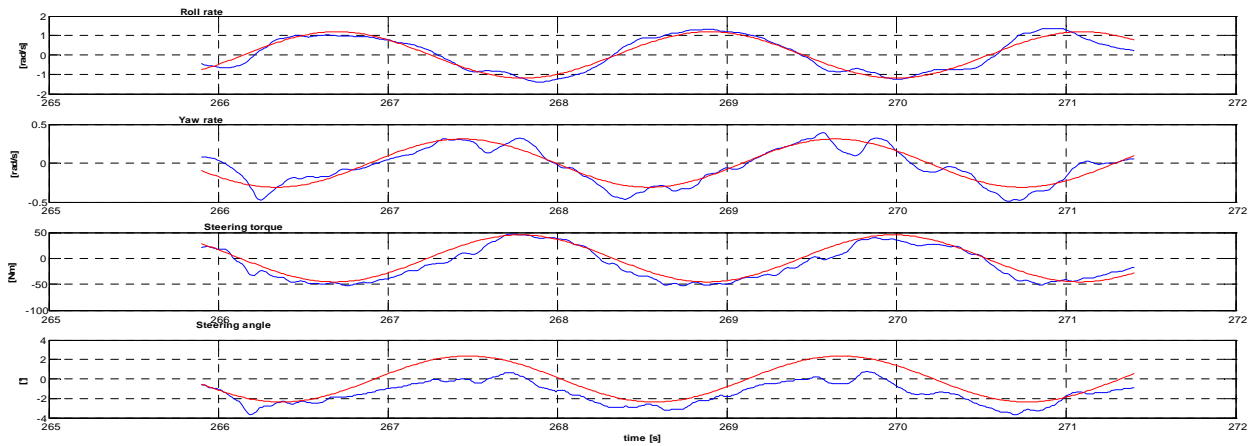
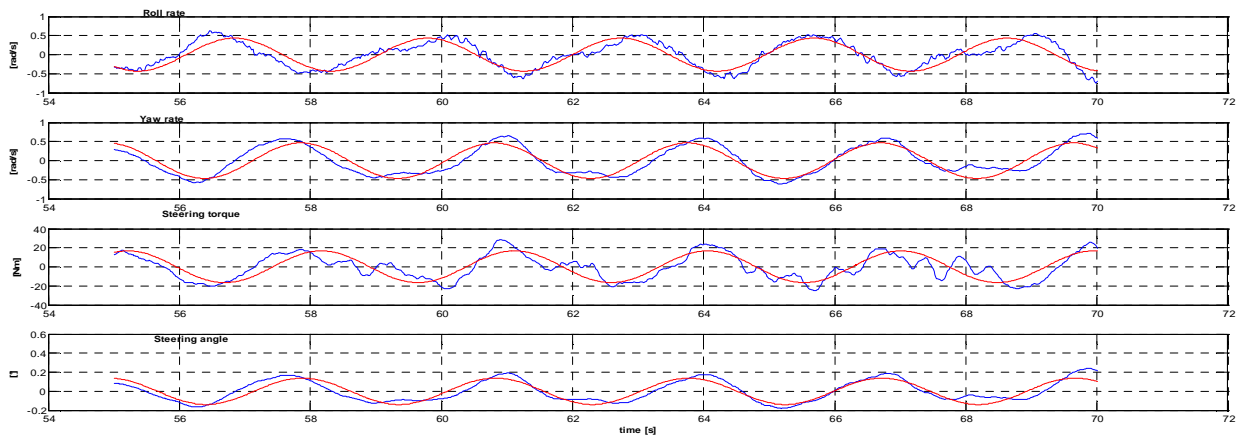


Figura 23 – Manovre di slalom con Aprilia Dorsoduro a 7, 14 e 21 metri di distanza tra i coni

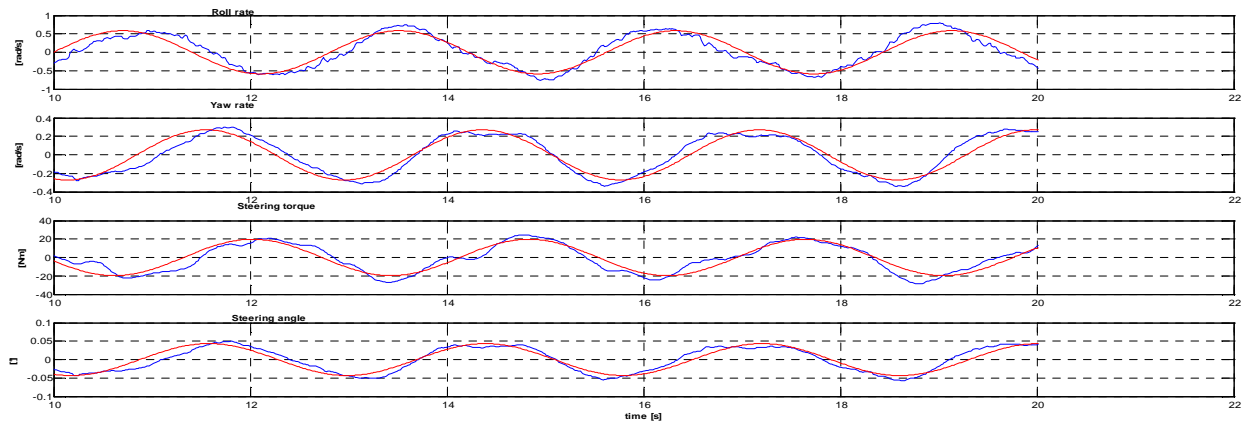
MDRG #1 : cone distance = 7 m ; frequency =0.33932 Hz ; average speed =4.7505 m/s

Roll rate : magnitude=0.43026 ; phase=0.23554 ; error=37%
 Yaw rate : magnitude=0.46568 ; phase=2.399 ; error=35%
 Steering torque : magnitude=16.6601 ; phase=3.0607 ; error=48%
 Steering angle : magnitude=0.1381 ; phase=2.4475 ; error=36%



MDRG#1 : cone distance = 14 m ; frequency =0.35567 Hz ; average speed =9.9588 m/s

Roll rate : magnitude=0.58688 ; phase=3.4988 ; error=27%
 Yaw rate : magnitude=0.27068 ; phase=5.3863 ; error=25%
 Steering torque : magnitude=19.7007 ; phase=0.16522 ; error=29%
 Steering angle : magnitude=0.043338 ; phase=5.4558 ; error=26%



MDRG#1 : cone distance = 21 m ; frequency =0.35805 Hz ; average speed =15.0382 m/s

Roll rate : magnitude=0.75294 ; phase=6.0943 ; error=37%
 Yaw rate : magnitude=0.25535 ; phase=1.638 ; error=34%
 Steering torque : magnitude=29.3843 ; phase=2.7957 ; error=36%
 Steering angle : magnitude=0.029442 ; phase=1.7937 ; error=38%

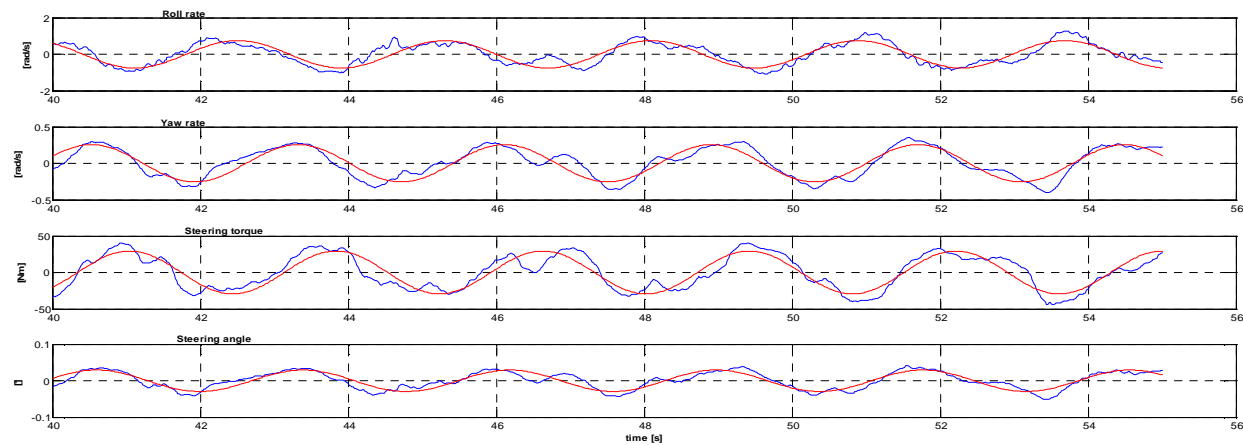


Figura 24 - Manovre di slalom con simulatore SafeBike a 7, 14 e 21 metri di distanza tra i coni

Ulteriori informazioni sono fornite dai parametri G_x/G_z (rapporto tra la velocità di rollio e la velocità di imbardata) , dello sfasamento $\varphi_1 - \varphi_2$ tra la fase della velocità di rollio e la fase della coppia di sterzo. Le differenze sostanziali sono state rilevate e osservate a basse velocità, quindi per la manovra che si riferisce alla distanza tra i coni di 7 metri. In queste condizioni lo sfasamento tra la coppia applicata dal pilota e la velocità di rollio è abbastanza diverso tra manovra reale e manovra virtuale e dimostra che sul simulatore la stessa manovra risultava più impegnativa da effettuare (valori di sfasamento maggiori) in quanto bisognava anticipare notevolmente l'azione sul manubrio. Questo legato anche al fatto stesso che l'unico input gestito dal pilota sul simulatore avviene tramite il manubrio mentre nella realtà anche il movimento del corpo sposta il baricentro sul veicolo contribuendo nel compiere la manovra più agilmente.

2.3.1.2 Manovra di Lane Change

La manovra di Lane Change (o cambio di corsia) è la manovra più utilizzata per l'identificazione della maneggevolezza di un veicolo a due ruote. L'indice che ne deriva, tuttavia, è strettamente legato all'esperienza ed allo stile di guida del pilota. Le varie strategie di guida dipendono dall'entità del controsterzo iniziale esercitato dal pilota e dal movimento del corpo rispetto al motociclo.

Nelle manovre eseguite ad alta velocità, inoltre, il pilota non agisce sul manubrio esercitando solo una coppia attorno all'asse di rotazione dello sterzo (coppia di sterzo) ma anche attorno ad un asse parallelo all'asse X della terna SAE (coppia di rollio). Queste considerazioni hanno portato alla successiva realizzazione di un sensore per il rilevamento della coppia M_x sul simulatore.

La manovra di Lane Change viene identificata da una larghezza e da una lunghezza dello spazio dove effettuare la manovra (vedi Figura 25).

I test sono stati eseguiti su diverse lunghezze di manovra mentre la larghezza è rimasta la stessa per ogni test. Le due diverse condizioni di prova sono state:

- 3 metri di larghezza e 14 metri di lunghezza, con velocità di prova di circa 50 km/h;
- 3 metri di larghezza e 21 metri di lunghezza, con velocità di prova di circa 70 km/h;

La manovra può iniziare dal lato destro dei coni e finire sul lato sinistro dei coni (o viceversa) e dovrebbe essere eseguita mantenendo la velocità il più costante possibile.

Nella manovra di Lane Change il pilota fornisce come input la coppia che genera il rollio e l'imbardata del veicolo. Il rapporto tra l'ampiezza tra i punti di massimo e minimo della coppia di sterzo e la velocità di rollio tra i relativi punti di massimo e minimo forniscono un buon indice della maneggevolezza del motociclo.

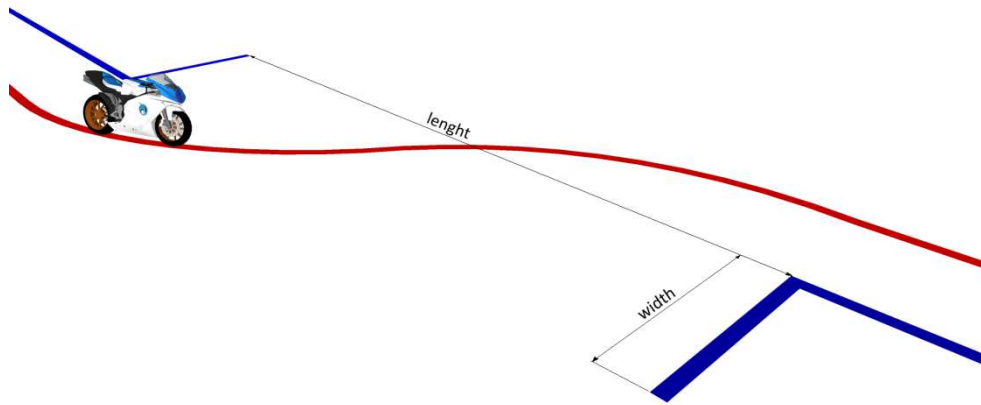


Figura 25 – Manovra di Lane Change

Normalizzando questa quantità con la velocità media di percorrenza della prova si ottiene il Lane Change Roll Index:

$$LCRI = \frac{\tau_{p-p}}{\dot{\phi}_{p-p} \cdot V_{avg}}$$

| Cones | Lane Change | | | |
|---------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | 3x14 | | 3x21 | |
| | Aprilia Dorsoduro | UNIPD SIMULATOR | Aprilia Dorsoduro | UNIPD SIMULATOR |
| Speed [km/h] | 49,12 | 49,01 | 55,25 | 73,29 |
| G_{xmax} [%s] | 100,70 | 102,00 | 90,50 | 39,87 |
| G_{xmin} [%s] | -64,10 | -52,20 | -63,10 | -103,30 |
| ΔG_x [%s] | 164,80 | 154,20 | 153,60 | 143,17 |
| G_{zmax} [%s] | 22,30 | 26,64 | 21,90 | 18,95 |
| G_{zmin} [%s] | -36,70 | -23,54 | -31,90 | -16,85 |
| ΔG_z [%s] | 59,00 | 50,18 | 53,80 | 35,80 |
| $\bar{\delta}_{max}$ [°] | 1,30 | 3,35 | 3,20 | 1,75 |
| $\bar{\delta}_{min}$ [°] | -4,60 | -3,27 | -1,60 | -1,05 |
| $\Delta \bar{\delta}$ [°] | 5,90 | 6,62 | 4,80 | 2,80 |
| T_{max} [Nm] | 28,21 | 42,91 | 52,10 | 64,84 |
| T_{min} [Nm] | -50,40 | -59,29 | -31,94 | -41,96 |
| ΔT [Nm] | 78,61 | 102,20 | 84,04 | 106,80 |
| LCRI | 2,0042 | 2,7907 | 2,0436 | 2,1004 |
| index | | | | |

Tabella 4 - Dati relativi alla manovra di Lane Change eseguita sperimentalmente su veicolo e simulatore

In Tabella 4 sono raccolti i dati relativi alla manovra di Lane Change per quanto riguarda i test eseguiti con il motociclo reale e con il simulatore. Vengono riportati il valore della velocità media, i valori minimo e massimo della velocità di rollio, della velocità di imbardata, dell'angolo di sterzo e della coppia applicata al manubrio. Infine viene calcolato il Lane Change Roll Index per ognuna delle configurazioni di prova.

Anche in questo caso si nota come a bassa velocità si sente maggiormente il movimento del corpo nel calcolo del parametro di confronto. Sul simulatore viene esercitata una coppia di sterzo maggiore che nella realtà dovuto al fatto di poter considerare solamente la M_z e non la M_x . La coppia da somministrare attraverso M_z è quindi maggiore. Essendo questo parametro direttamente proporzionale al LCRI, anche il valore relativo sarà di conseguenza più elevato.

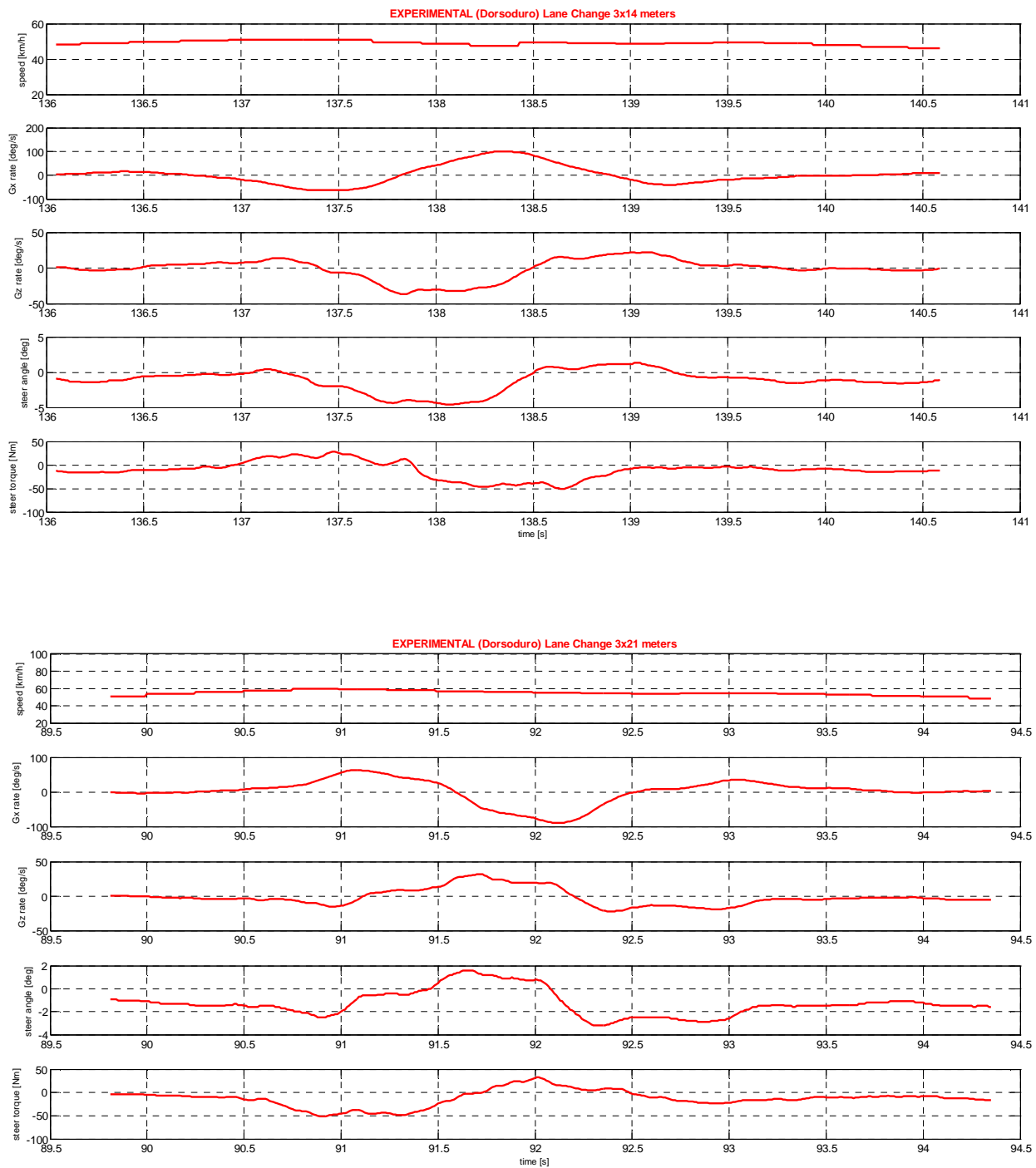


Figura 26 - Manovre di Lane Change con Aprilia Dorsoduro a 14 e 21 metri di distanza tra i coni

In Figura 26 e in Figura 27 sono riportati i grafici relativi alle prove di Lane Change svolte sull'area di prova pari a 3x14 metri e 3x21 metri.

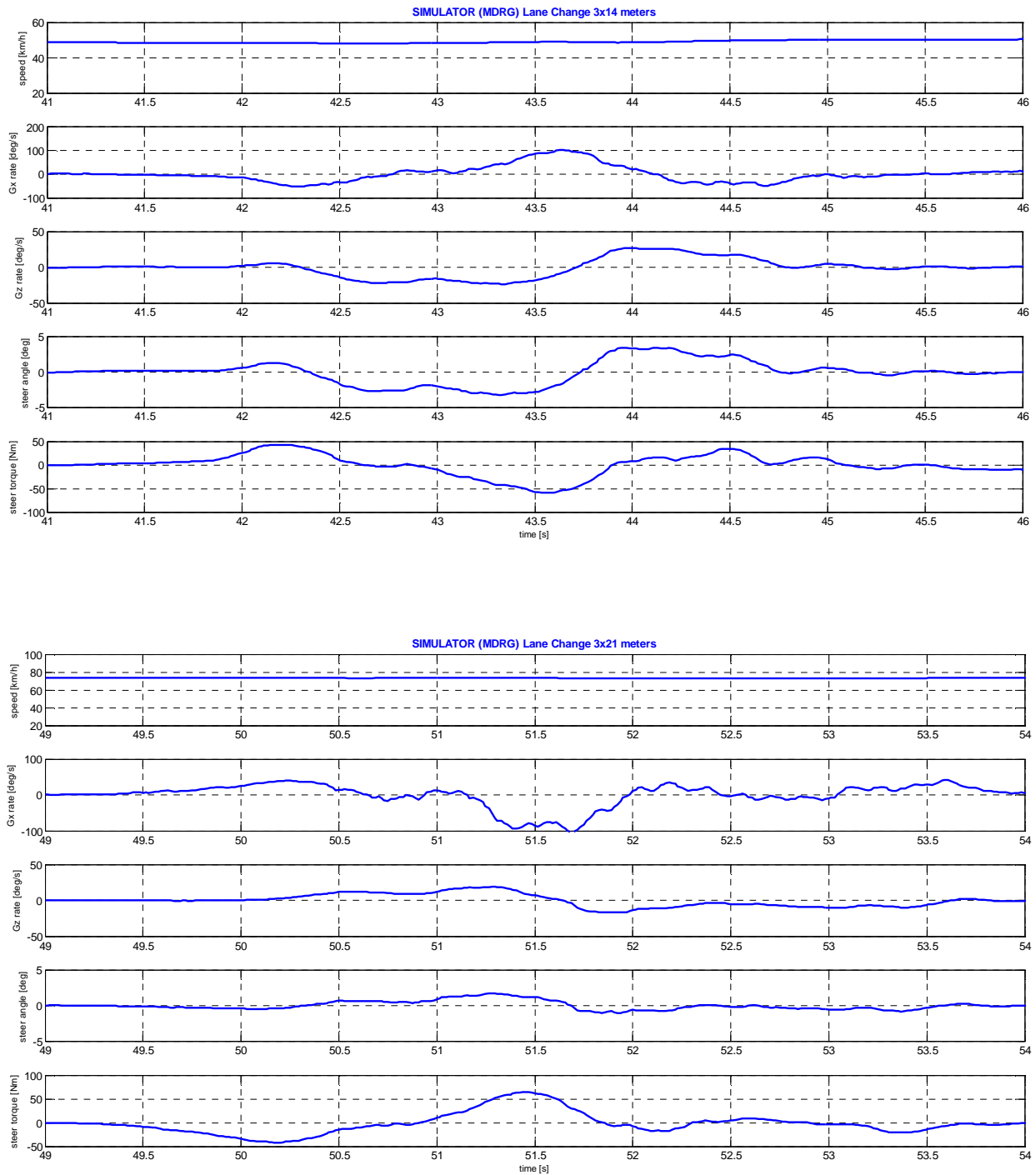


Figura 27 - Manovre di Lane Change con simulatore SafeBike a 14 e 21 metri di distanza tra i coni

In questa manovra gioca un ruolo importante anche il fattore velocità. Infatti, uno dei problemi principali del simulatore consiste nella sensazione di velocità che risulta essere inferiore a quella reale e quindi il tester tende a correre di più. Così facendo, anche nella realtà, a velocità maggiori devo compiere sforzi più elevati per guidare il veicolo e questo si può osservare soprattutto sulla prova 3x21 dove la velocità mantenuta durante la prova era più elevata. Tuttavia, essendo sia la coppia di sterzo che la velocità maggiori di quelle realmente impartite, ed essendo una grandezza a numeratore ed una a denominatore dell'indice, il valore finale risulta essere vicino al valore reale.

2.3.1.3 Manovra di Steady State

L'ultima manovra considerata in questa fase di validazione oggettiva consiste nella manovra di Steady State o manovra a curvatura costante. Con questa manovra si può constatare la manovrabilità di un veicolo e il suo comportamento dello sterzo. In generale, la sensazione di maneggevolezza percepita dal pilota è legata alla richiesta di coppia di sterzo per seguire una traiettoria prestabilita, alla velocità di avanzamento prefissata. Per una buona sensazione di maneggevolezza, piccoli valori di coppia dovrebbero essere applicati al manubrio e preferibilmente con valori negativi perché in questa situazione il comportamento in curva del motociclo tende ad essere stabile (controsterzo, [8]).

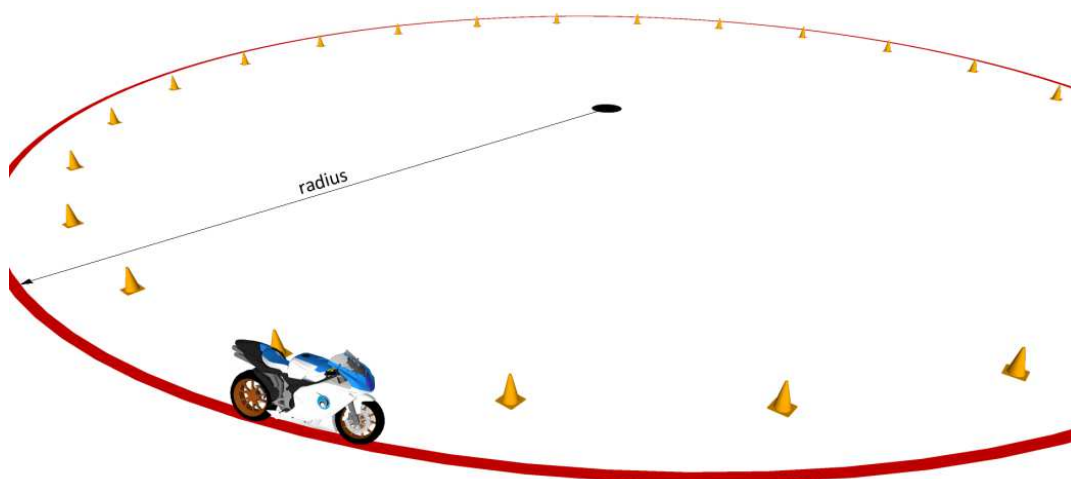


Figura 28 – Manovra di Steady State

La relazione tra l'azione del pilota e la risposta del veicolo può essere quantificata dal rapporto tra la coppia di sterzo e l'angolo di rollio:

$$Roll\ index = \tau / \varphi$$

Oppure dalla:

$$Acceleration\ Index: \frac{\tau}{V^2/R_c}$$

In questo caso è stato utilizzato l'*Acceleration Index* come parametro di confronto in quanto si dispongono di tutti i dati necessari alla sua determinazione senza doverne ricavare altri. In particolare τ è la coppia di sterzo applicata al manubrio, V la velocità media durante la prova e R_c il raggio di curvatura della traiettoria.

La coppia di sterzo negativa è preferibile in quanto un veicolo con tale comportamento, nel momento in cui venga rimossa la coppia di sterzo, dopo qualche piccola oscillazione laterale, tende a seguire una traiettoria rettilinea senza rovesciarsi (modo di Capsize stabile). L'opposto accade con una moto con la coppia di sterzo positiva. Nel momento in cui la coppia di sterzo viene a mancare il veicolo cade a terra. I test sono stati svolti su un tracciato con tre diversi raggi di manovra e precisamente:

- 10 metri ad una velocità di circa 25 km/h;
- 17 metri ad una velocità di circa 30 km/h;
- 25 metri ad una velocità di circa 35 km/h;

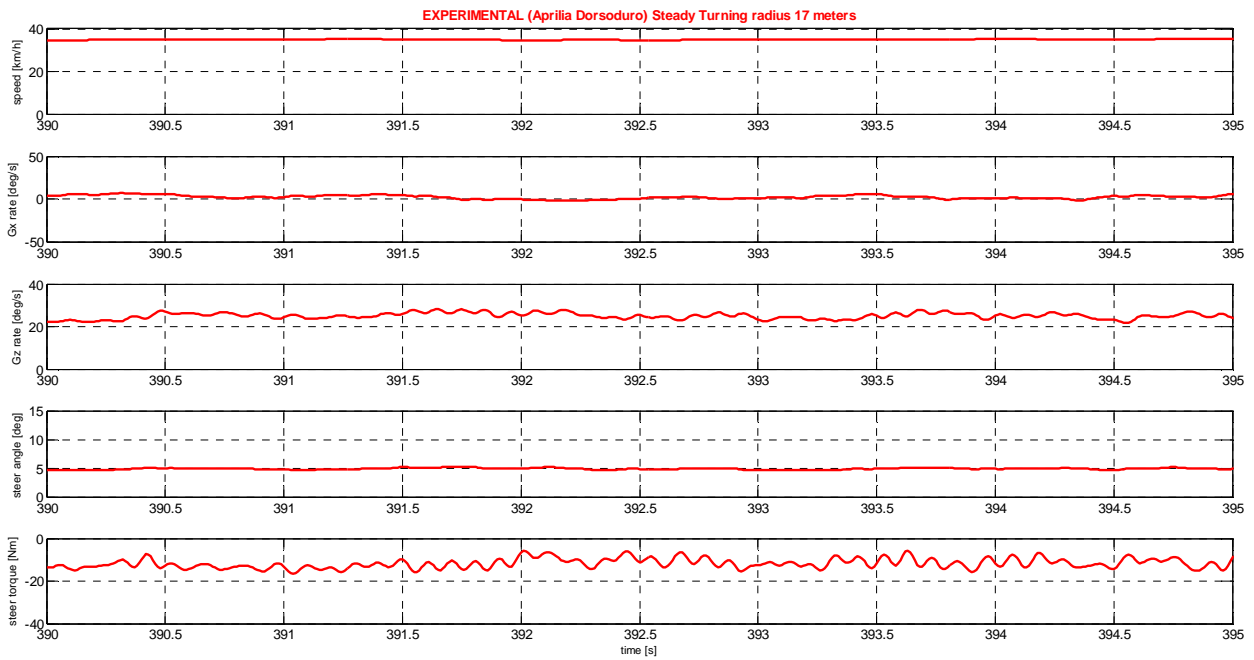
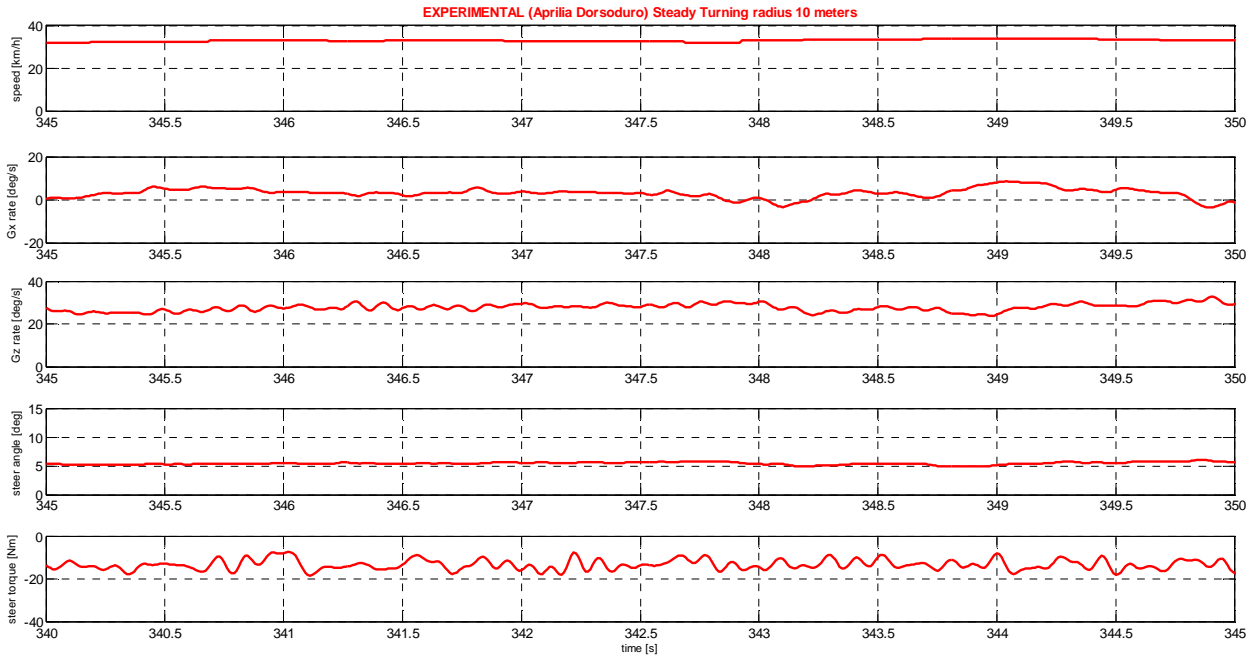
In Tabella 5 sono riportati i dati rilevati dalla telemetria delle diverse prove e l'*Acceleration Index* calcolato per ogni configurazione testata.

| Radius [m] | Steady Turning | | | | | |
|--------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | -10 | | -17 | | -25 | |
| | Aprilia Dorsoduro | UNIPD SIMULATOR | Aprilia Dorsoduro | UNIPD SIMULATOR | Aprilia Dorsoduro | UNIPD SIMULATOR |
| av_speed | 32.74 | 26.05 | 36.10 | 28.57 | 36.97 | 33.83 |
| av_Gx | -2.29 | -0.51 | -2.04 | 0.02 | -1.40 | 0.12 |
| av_Gz | -27.42 | -35.56 | -25.39 | -25.92 | -22.77 | -21.02 |
| av_δ | -5.44 | -8.93 | -4.76 | -5.64 | -4.36 | -3.76 |
| av_τ | 13.66 | 18.13 | 12.86 | 8.08 | 11.25 | 6.61 |
| acceleration index | -1.65 | -3.46 | -2.17 | -2.18 | -2.67 | -1.87 |

Tabella 5 - Dati relativi alla manovra di Steady State eseguita sperimentalmente su veicolo e simulatore

Come si vede dai risultati di Tabella 5 e in Figura 29 e Figura 30, il simulatore richiede uno sforzo più elevato nel test a 10 metri di raggio, presenta comportamenti simili a 17 metri di raggio (coppia leggermente inferiore e velocità superiore), mentre richiede una minore coppia di sterzo per manovre effettuate su un traiettoria di 25 metri di raggio.

Dai risultati emersi in questa prova, ed in accordo con le altre due, si evince che a basse velocità il simulatore risulta essere più difficile da guidare. Nella prova a ridotto raggio di curvatura si osserva dai grafici che il pilota fatica a trovare una configurazione stabile ed oscilla attorno a quella posizione mentre nella prova ad ampio raggio di curvatura il pilota trova una situazione di equilibrio che viene mantenuta però con meno coppia esercitata sul manubrio e a minor velocità, da qui il valore minore dell'indice. Tuttavia, i risultati, anche se diversi, non sono così distanti tra sperimentale e virtuale ed il margine di miglioramento sta nell'introduzione della coppia M_x con una successiva campagna di test sperimentali per l'ottimizzazione del punto di vista (FOV) nell'ambiente virtuale.



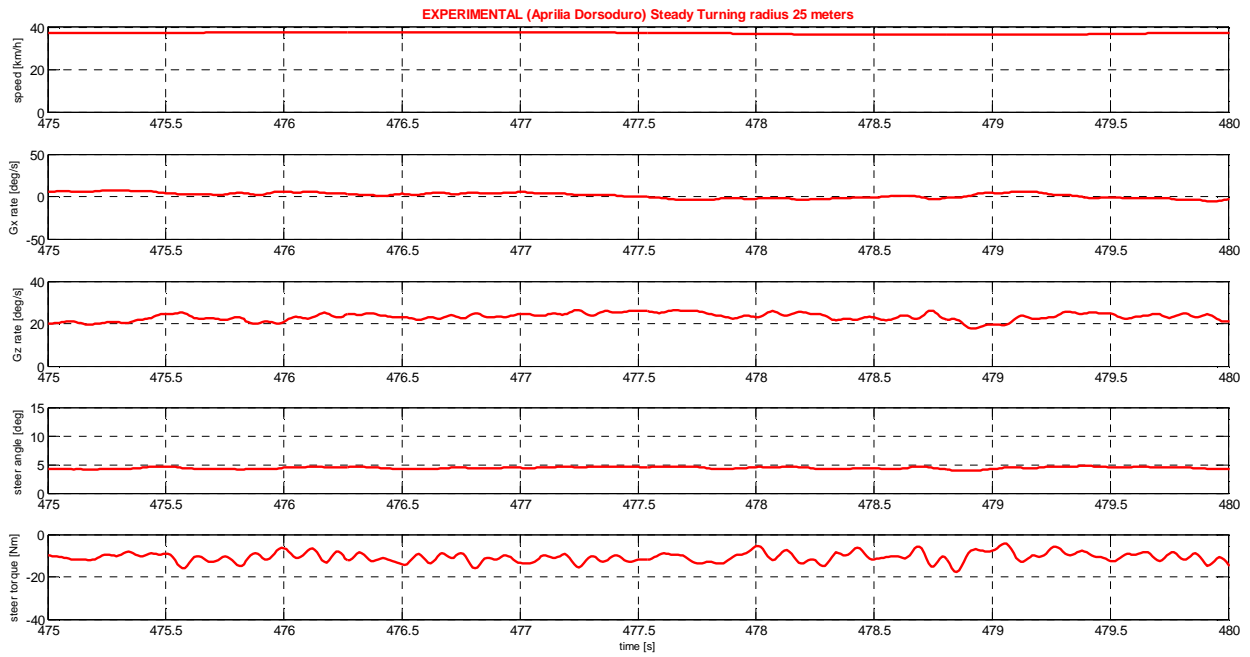
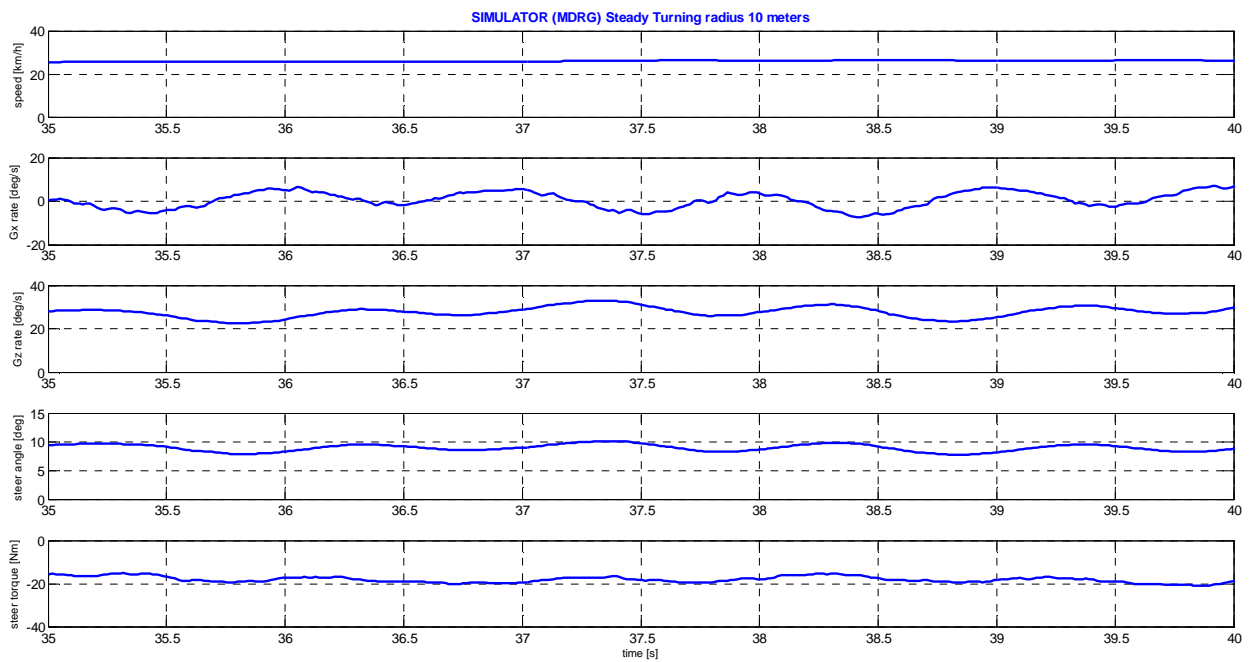


Figura 29 - Manovre di Steady State con Aprilia Dorsoduro a 10, 17 e 25 metri di raggio di curvatura



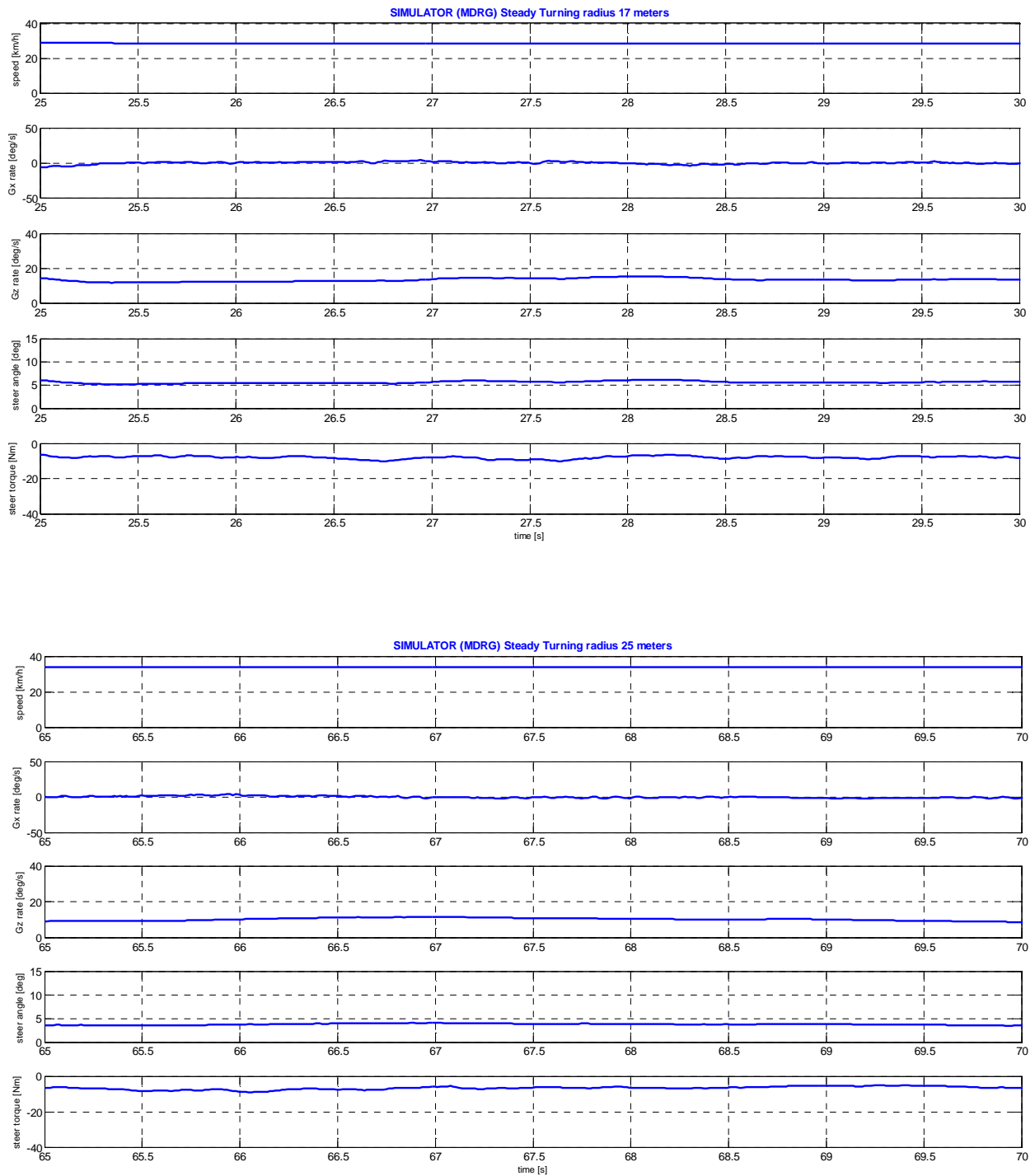


Figura 30 - Manovre di Steady State con simulatore SafeBike a 10, 17 e 25 metri di raggio di curvatura

2.3.2 La validazione soggettiva del simulatore

Questo tipo di studio consiste nel raccogliere informazioni soggettive da un gruppo di tester di diversa esperienza, età, sesso e stili di guida ed analizzarne le valutazioni restituite dopo brevi test di guida al simulatore. I risultati ottenuti in questo studio sono stati preziosi e fondamentali per lo sviluppo del simulatore dal punto di vista del feedback di sensazioni inerziali, visive e acustiche oltre alla capacità di guida che il simulatore è in grado di riprodurre.

Inizialmente il simulatore era equipaggiato solamente con un maxischermo e solo il manubrio veniva utilizzato per guidare il veicolo e dai primi test è emerso che bisognava lavorare su:

- percezione della velocità;
- sensazioni di decelerazione in frenata e durante la guida su strada sconnessa;
- entrata ed uscita di curva;
- maneggevolezza del veicolo durante le manovre di scartamento dell'ostacolo e cambio di corsia;
- manovre a bassa velocità;

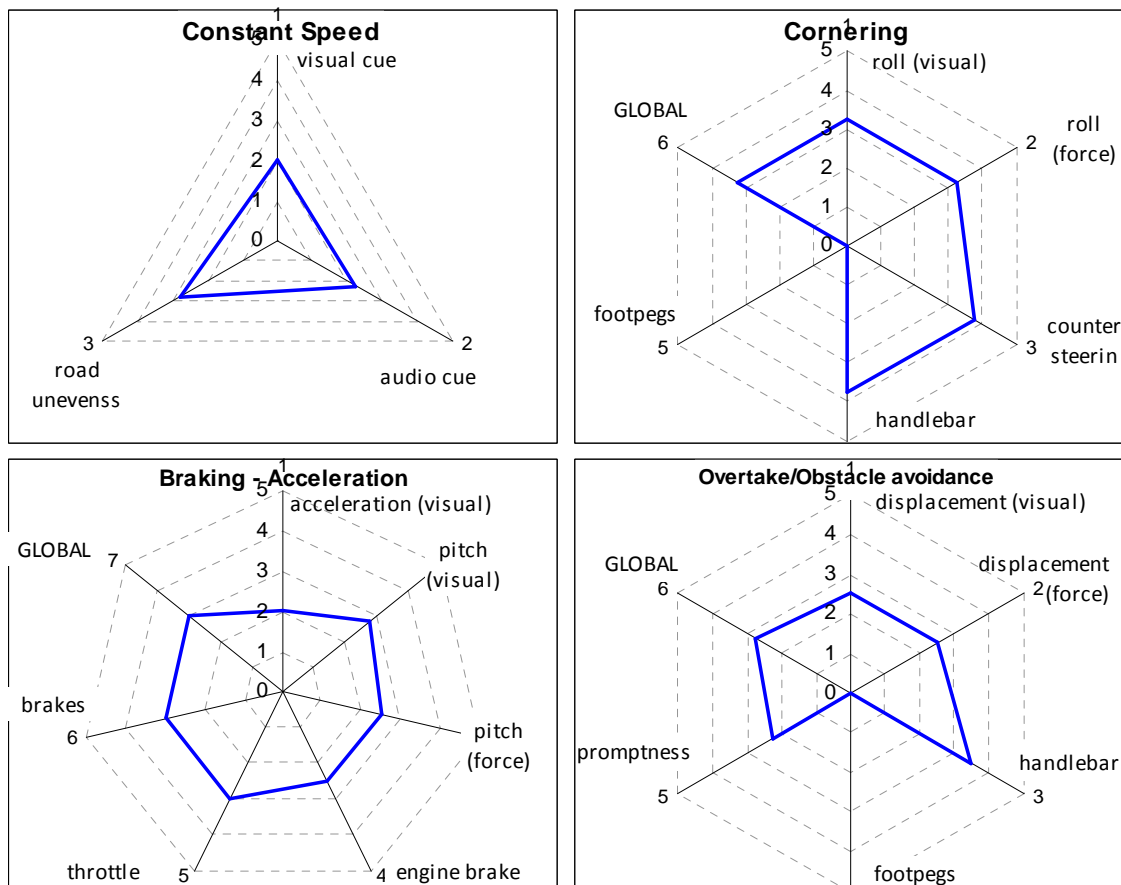


Figura 31 - Valutazione del simulatore nelle condizioni iniziali

Disponendo così dei punti di partenza sui quali lavorare per migliorare le prestazioni del simulatore, si è deciso di concentrarsi sulla reattività del veicolo, per far crescere la risposta e quindi la

maneggevolezza. Per questo motivo si è introdotto il controllo del veicolo tramite delle pedane in modo da guidare il simulatore anche con lo spostamento del corpo. Contemporaneamente si è lavorato sulla messa a punto del rendering visivo e della movimentazione, soprattutto sul moto di beccheggio per aumentare le sensazioni percepite in fase di frenata. Il miglioramento è stato fin da subito evidente come mostrato in Figura 32.

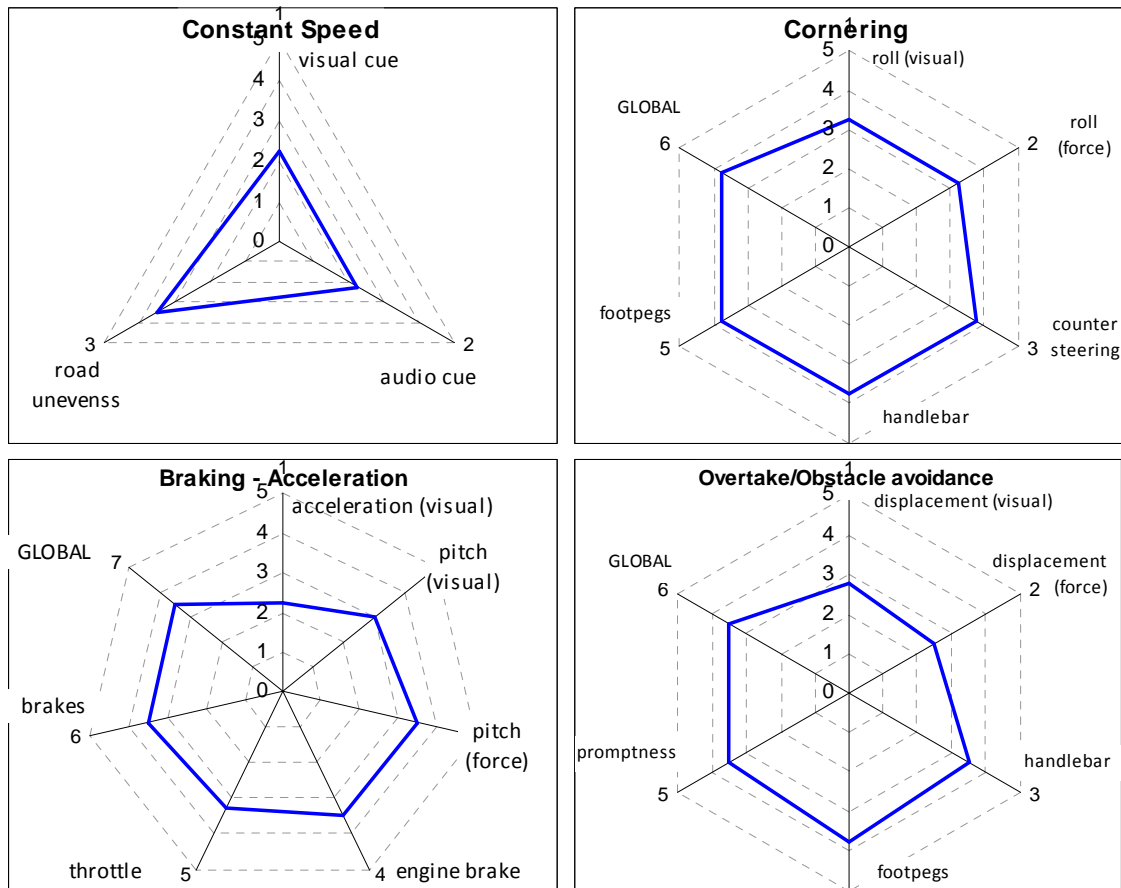


Figura 32 - Valutazione del simulatore dopo il primo upgrade

Successivamente ci si è concentrati sulla percezione della velocità e alcuni tentativi di miglioramento non sono andati a buon fine. La soluzione di adottare uno schermo curvo infatti distorceva le immagini e non rendeva l'effetto velocità atteso. La soluzione è stata di cambiare radicalmente strada e adottare un sistema più performante con tre maxischermi. In questo modo si è migliorata la sensazione di manovra a bassa velocità e la sensazione di velocità in generale oltre al maggior coinvolgimento del motociclista nell'ambiente virtuale.

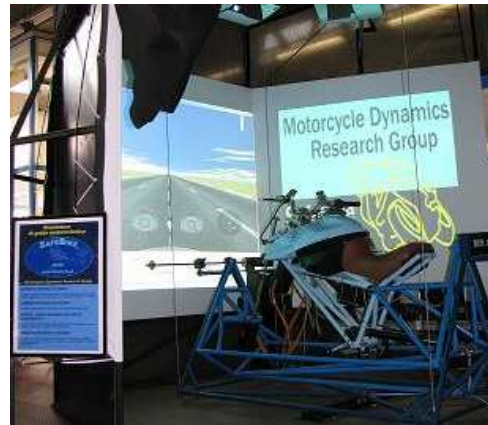
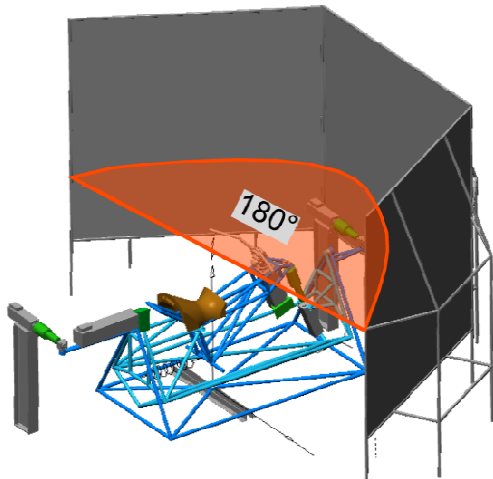


Figura 33 - sistema di visualizzazione con 3 maxischermi con ampio campo di vista

Tuttavia non sono stati riscontrati solamente effetti benefici. Questa soluzione infatti ha procurato diversi casi di sensazioni di nausea (fenomeno noto nel mondo dei simulatori come *sickness*) alcune volte al punto di richiedere l'intervento dell'operatore per prestare aiuto al tester coinvolto nelle prove. Questo comportamento è completamente soggettivo, infatti persone accusano questa nausea mentre altre non risentono minimamente di questo fenomeno. Per tal motivo è stata condotta una campagna di test anche con questa configurazione.

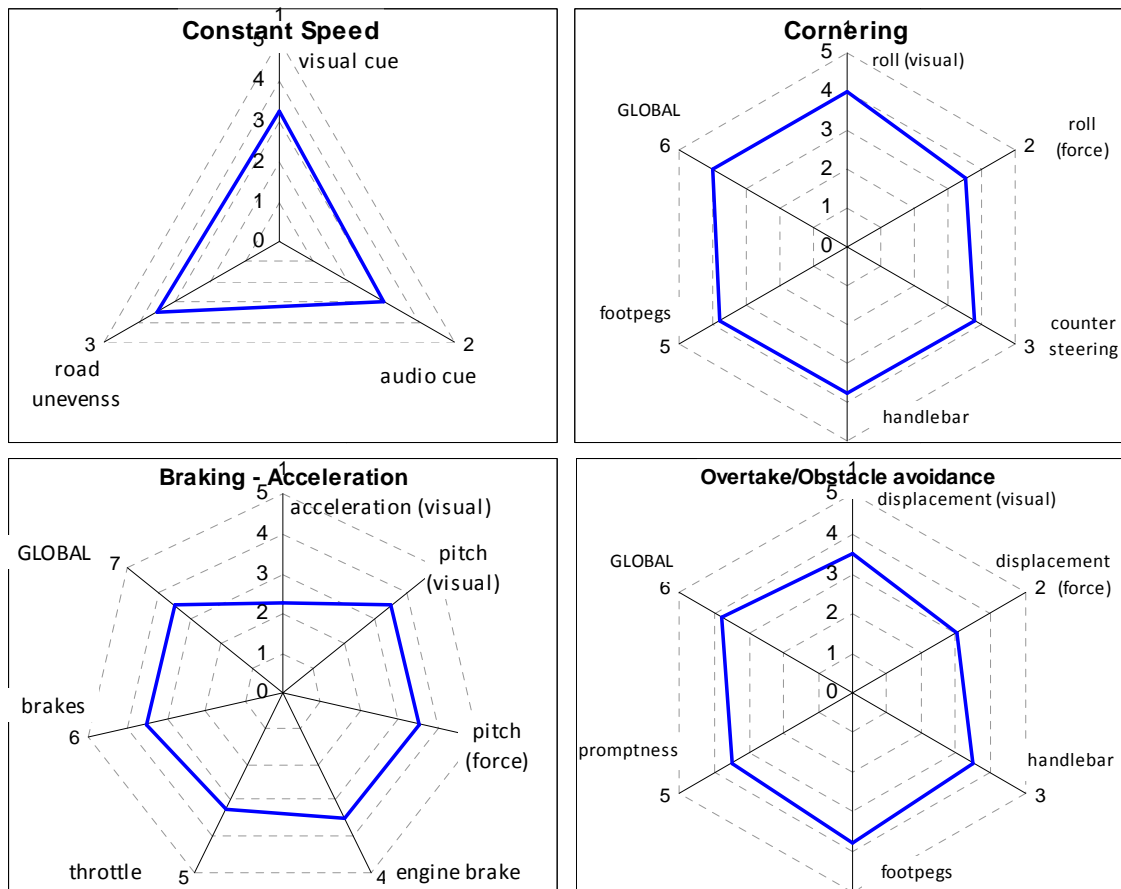


Figura 34 - Valutazione del simulatore allo stato finale

Il lavoro di miglioramento delle prestazioni che hanno visto interventi dal punto di vista hardware e software sul simulatore ha portato risultati positivi sul giudizio del simulatore. Tuttavia, all'interno del progetto 2BeSafe son stati eseguiti dei test su un gruppo di 20 tester (17 maschi e 3 femmine) di diversa esperienza di guida motociclistica.

Le tre diverse configurazioni che sono state fatte provare sono:

1. Full Features : configurazione finale del simulatore comprensiva di tutti i miglioramenti apportati (maxischermi, sensori sulle pedane e parametri del filtro di washout ottimizzati);
2. Handlebar: configurazione come la precedente ma con il sensore delle pedane disattivato;
3. Single screen: utilizza solo un maxischermo, con il sensore delle pedane disattivato. Questo è stato scelto per osservare se fossero emerse difficoltà di guida dovute alla non percezione dello spostamento del corpo ed inoltre per studiare il fenomeno della nausea provocato dai tre maxischermi;

Non riportando in dettaglio tutte le analisi svolte si presentano comunque i risultati ottenuti dalla campagna di test effettuati.

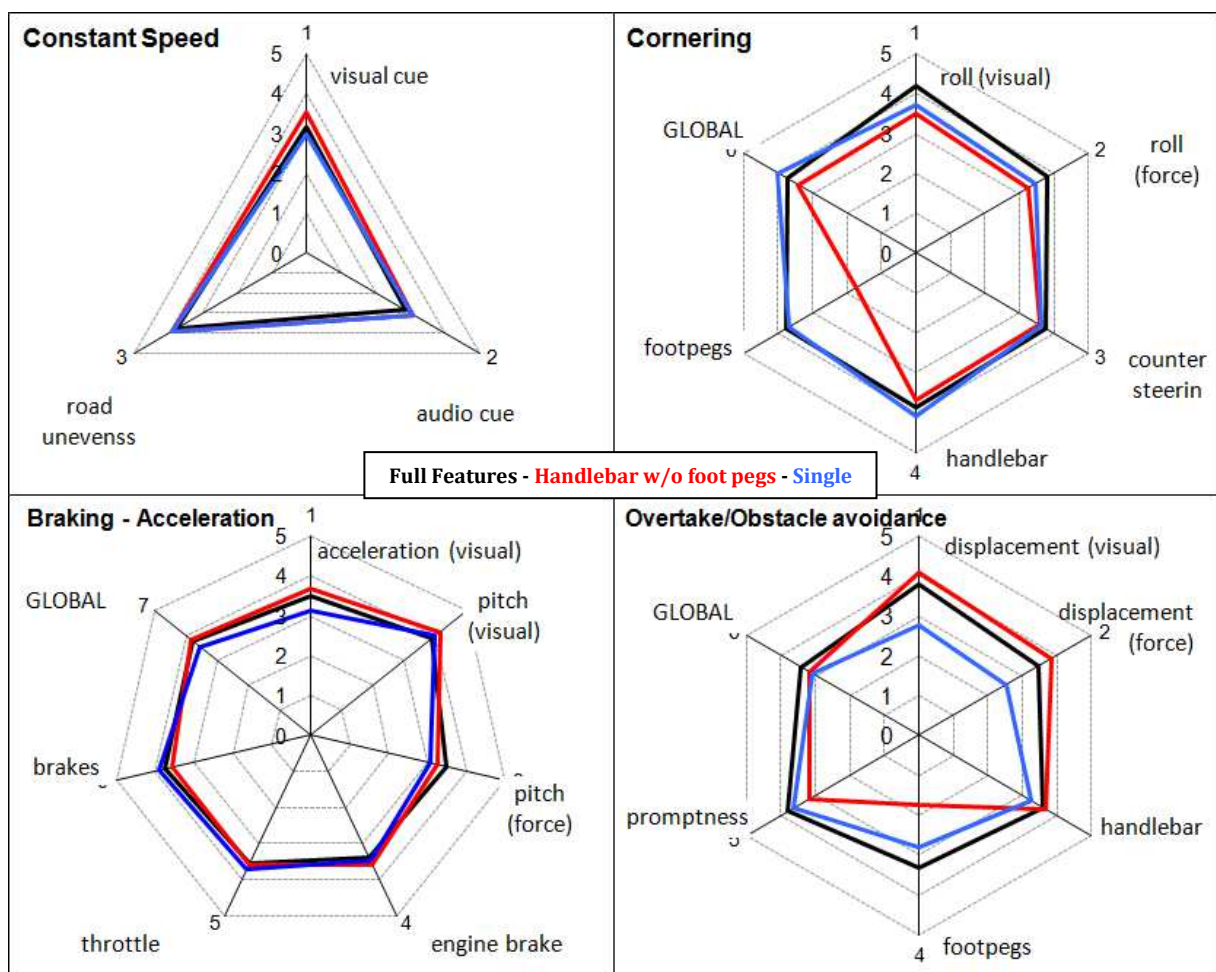


Figura 35 - Valutazione del simulatore per le configurazioni provate

Ai tester veniva fatta una rapida introduzione sul sistema e sul suo funzionamento, tuttavia non veniva loro detto quale configurazione stessero provando. Si osserva infatti come qualcuno, nei questionari

raccolti, abbia segnalato, per esempio, un basso effetto delle pedane in curva anche se queste erano state completamente disattivate. Questo evidenzia la difficoltà di percepire i diversi effetti e sensazioni derivanti da cause diverse, a sottolineare la difficoltà nel trovare la strada da seguire per migliorare il simulatore. Il lavoro è pubblicato in [18].

2.4 La strumentazione del motociclo

Per poter effettuare la validazione oggettiva è stato necessario realizzare una strumentazione molto accurata del veicolo reale coinvolto nelle diverse manovre sopra riportate. Solo in questo modo è stato possibile ricavare i dati di telemetria sottoposti all'analisi e studio comparativo svolto.

La moto è stata modificata per poter alloggiare i sensori ed il sistema di acquisizione senza però andare ad alterare le geometrie caratteristiche originarie. Nella Tabella 6 vengono riportate le caratteristiche generali del veicolo.

| | |
|----------------|---|
| Modello | Aprilia Dorsoduro |
| Motore | Aprilia bicilindrico V90 quattro tempi |
| Carburante | Benzina |
| Potenza | 67.3 kW (92 HP) a 8750 rpm |
| Coppia massima | 8.4 kgm (82 Nm) a 4500 rpm |
| Cambio | Sei rapporti |
| Dimensioni | Lunghezza: 2,216 mm ; Larghezza: 905 mm (al manubrio) ; Altezza: 1,185 mm (al cruscotto) ; Altezza sella: 870 mm ; Passo: 1,505 mm ; Avancorsa: 108 mm ; Inclinazione canotto di sterzo: 26° |
| Peso | 186 Kg |

Tabella 6 – Caratteristiche tecniche Aprilia Dorsoduro 750cc

Per poter acquisire i segnali necessari ad uno studio sulla maneggevolezza il veicolo è stato dotato della seguente strumentazione:

- Data Logger, 2D® Data Recording;
- Accelerometri e giroscopi, 2D® Data Recording;
- Velocità longitudinale, 2D® Data Recording;
- GPS, 2D® Data Recording;
- Pedane strumentate con cella di carico;
- Sensore di coppia applicata allo sterzo realizzato appositamente per questo motociclo;
- Videocamera, GoPro®;

Come mostrato in Figura 36, sulla moto è presente anche un sensore di coppia applicato nella zona sella che è stato introdotto durante il terzo anno di dottorato. È stato necessario inserire un ulteriore sensore di coppia, montato sul manubrio in grado di registrare le azioni esercitate dal pilota lungo un asse parallelo all'asse X della terna SAE del veicolo. Questi però non sono stati interessati per il lavoro di validazione descritto precedentemente. Tuttavia, diversi test sperimentali sono stati eseguiti nuovamente per uno studio sul comportamento del Rider in sella. Questo è uno degli esempi di esigenza di approfondimento, sorto da un'analisi comportamentale durante la guida tra veicolo reale e veicolo simulato.

La moto è stata ulteriormente strumentata montando sensori laser per determinare la distanza del forcellone da terra per permettere lo studio di un algoritmo dedicato alla ricostruzione dell'angolo di rollio dalle misure dell'altezza in marcia tra il lato destro e sinistro del veicolo.

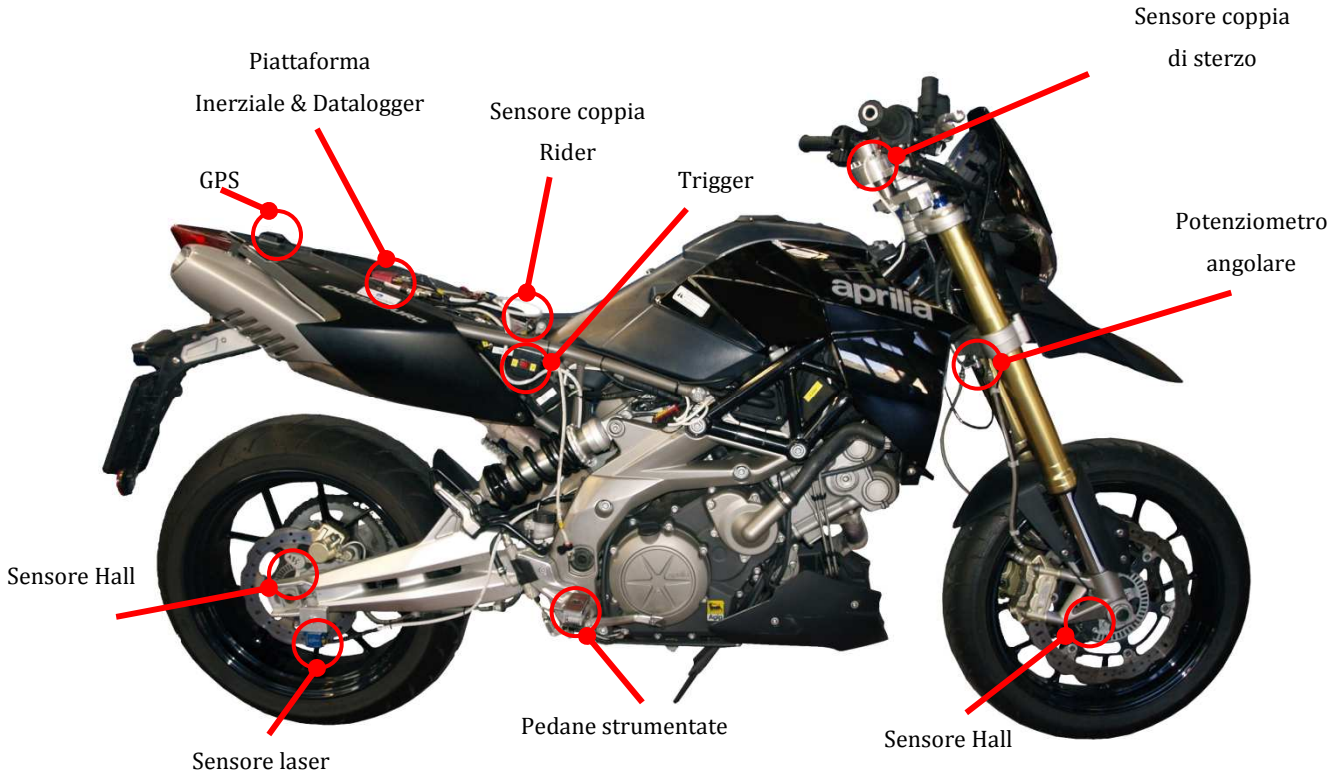


Figura 36 – Aprilia Dorsoduro strumentata presso il Motorcycle Dynamics Research Group

2.4.1 Data Logger

Il Data Logger è un componente hardware che consente di organizzare e gestire la sincronizzazione dei segnali derivanti dai diversi sensori installati nel veicolo oltre all'archiviazione dei dati. Attraverso un trigger esterno è possibile far iniziare la registrazione dei dati forniti dai sensori e dalla piattaforma inerziale.

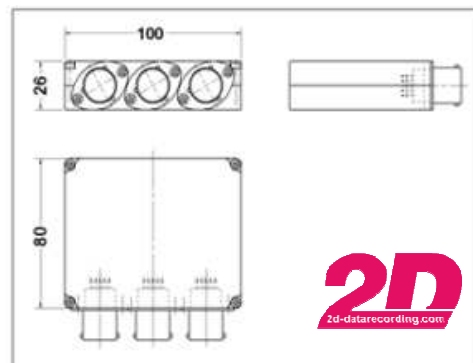


Figura 37 – Data Logger 6 della 2D® data recording

Caratteristiche principali:

- fino a 208 canali di registrazione;
- fino a 2 linee CAN completamente indipendenti;
- non vi sono limitazioni agli identificatori CAN;
- CAN Bridge: trasferimento dati tra i canali CAN;
- 4 porte di comunicazione: 2 seriali ad alta velocità, USB ed Ethernet 10/100 BaseT;
- comunicazione completa a 10/100 MBit e download via TCP/IP;
- supporto modulo WLAN;
- frequenza di campionamento impostabile individualmente per ciascun canale;
- frequenza di campionamento da 6,25Hz fino a 3200Hz (incrementabile a potenze di 2);
- 1 MByte di RAM aggiuntiva per log in modalità burst;
- 1 input per RPM, 1 per tempo su giro tramite trigger, 1 per sessione tramite trigger;
- 2 canali I/O combinati A/D aggiuntivi;
- 2 x 8 canali analogici a basso rumore 16Bit ADC;
- intervallo di ingresso selezionabile tra 0-5V o 0-20V per 8 canali;

In Figura 38 sono riportati i collegamenti principali tra il Data Logger e i sensori senza scendere nel dettaglio dei collegamenti dei singoli connettori in quanto esula dallo scopo di questa tesi; è possibile identificare due porte: quella rossa per la gestione dell'alimentazione, dell'interruttore ON/OFF, dell'interfaccia Ethernet e del canale di comunicazione del logger con la piattaforma inerziale ed il GPS(CAN-1); alla porta gialla è connesso il canale analogico (A 1-4 e A 5-8) di collegamento al sensore di coppia di sterzo e alle pedane.

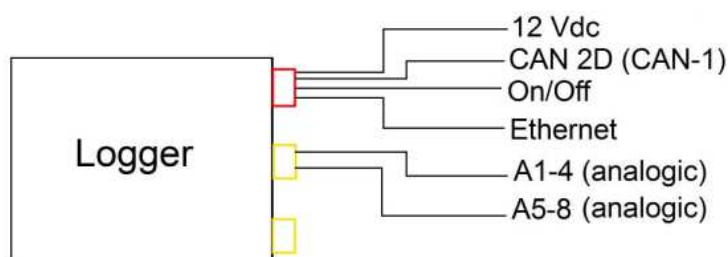


Figura 38 – Collegamenti Data Logger con i moduli esterni

Il Data Logger, così come la piattaforma inerziale, sono stati installati nel vano sotto-sella: questo posizionamento garantisce protezione ed al contempo facilità di accesso (vedi Figura 39).

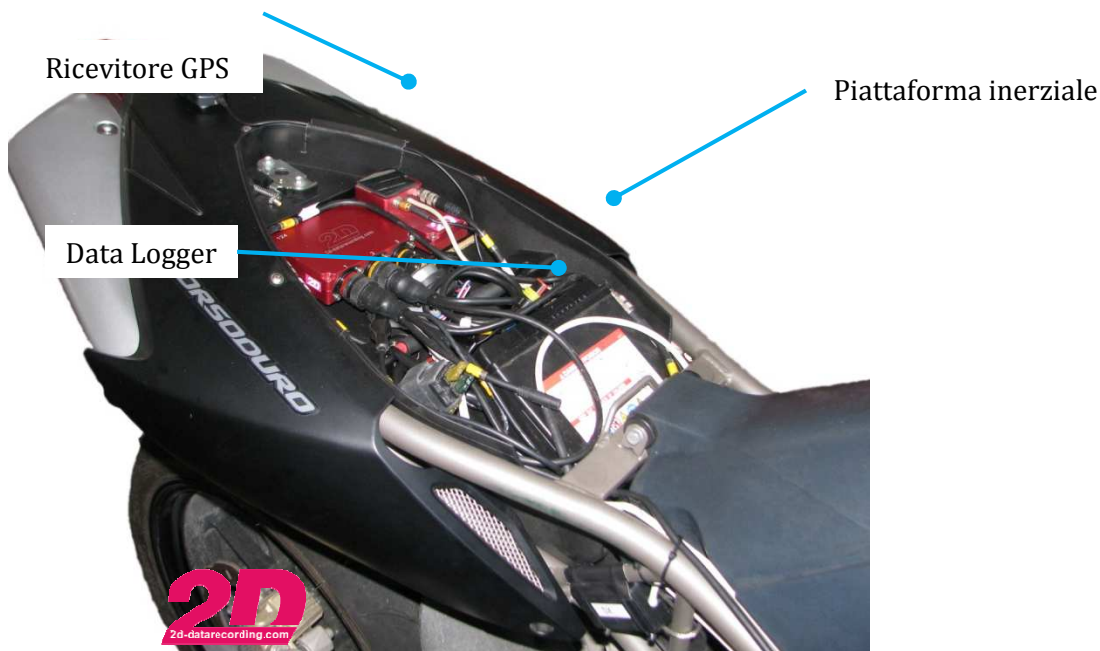


Figura 39 – Installazione del Data Logger, Piattaforma inerziale e ricevitore GPS

2.4.2 Accelerometri e girometri

Il comportamento dinamico del motociclo è definito dalle accelerazioni e dalle velocità angolari cui esso è soggetto. La piattaforma inerziale Dyna 3 (modello sviluppato da 2D esclusivamente per il Motorcycle Dynamics Research Group) permette la misura di tali parametri; essa è dotata di tre accelerometri e tre girometri. In conformità con le convenzioni SAE i segnali acquisiti sono:

- Accelerazione longitudinale lungo l'asse X (A_x [m/s^2]);
- Accelerazione laterale lungo l'asse Y (A_y [m/s^2]);
- Accelerazione verticale lungo l'asse Z (A_z [m/s^2]);
- Velocità angolare attorno all'asse X (rollio G_x [$^\circ / s$]);
- Velocità angolare attorno all'asse Y (beccheggio G_y [$^\circ / s$]);
- Velocità angolare attorno all'asse Z (imbardata G_z [$^\circ / s$]).

Peculiarità di questa piattaforma inerziale è l'utilizzo stand alone in quanto dotata di un memoria interna che permette di archiviare i dati e di scaricarli, poi, tramite la porta USB del computer. Questo ha reso possibile numerose diverse applicazioni in quanto risulta sufficiente alimentare la piattaforma inerziale con una tensione di 12 V.

Nel nostro caso il download dei dati avverrà tramite il Data Logger provvisto di un cavo di rete per gestire meglio la grande mole di dati.

2.4.2.1 Orientamento della piattaforma inerziale

La procedura di seguito descritta non si può definire taratura, ma piuttosto un settaggio digitale per un sistema di riferimento in accordo con la convenzione della terna SAE. Disponendo la piattaforma inerziale su un piano orizzontale è possibile allineare l'asse verticale con quello della terna SAE: in tal modo il valore visualizzato per l'accelerazione sarà pari a circa $-1g$ (9.806 m/s^2). Un'analogha procedura è ripetuta per ogni asse.

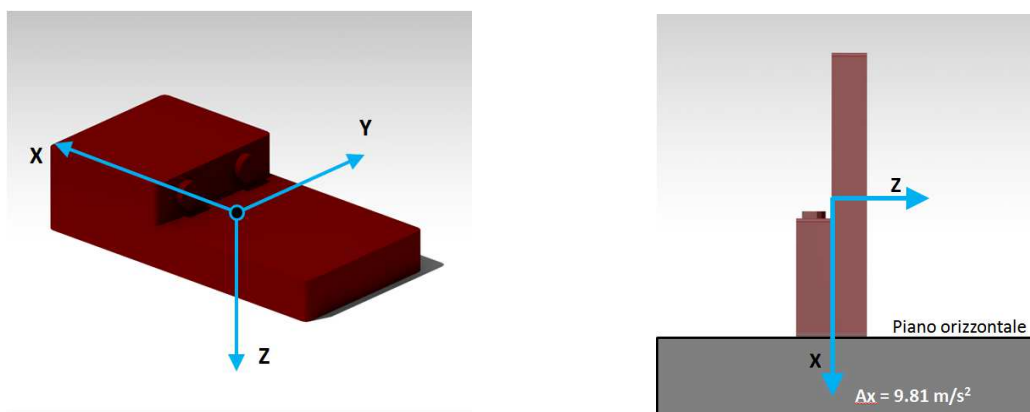


Figura 40 - Orientazione assi coordinati del Dyna3

In questo modo nei segnali dell'accelerazione troveremo:

- un valore positivo dell'accelerazione X in fase di accelerazione ed uno negativo in fase di decelerazione;
- un valore positivo di accelerazione Y per spostamenti verso destra ed uno negativo per spostamenti verso sinistra;
- un valore positivo di accelerazione Z nel caso di estensione delle sospensioni mentre negativo nel caso di compressione;

2.4.3 GPS

Il sistema GPS, come detto sopra, è direttamente connesso alla piattaforma inerziale; esso permette di ricostruire la traiettoria percorsa, attraverso l'antenna installata sul motociclo e un sistema composto da 24 satelliti. L'informazione ottenuta è necessaria ad associare i dati acquisiti alla manovra effettuata.

L'antenna del sistema GPS è disposta dietro la sella: tale posizione permette una trasmissione a cielo aperto e la protegge da vibrazioni ed eccessivo riscaldamento.

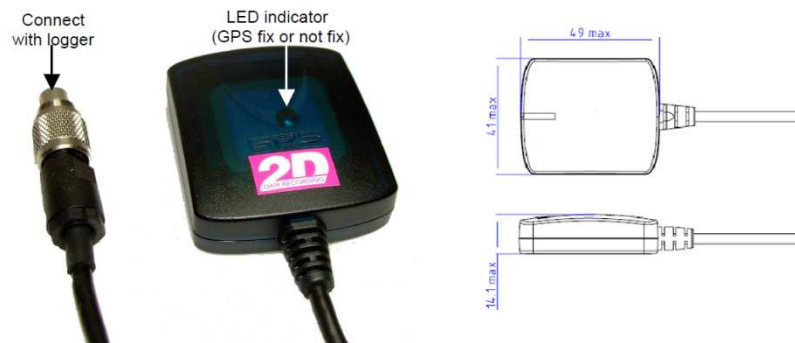


Figura 41 – Antenna GPS della 2D®

Specifiche tecniche

| Electrical characteristics | | Mechanical characteristics | |
|------------------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Powered by connected logger | Yes | Dimensions | 49 x 41 x 14.1 mm ³ |
| Easy interfacing (Plug&Play) | Yes | Weight (with cable) | 81 g |
| Connections | | Environmental | |
| Housing material | PVC | Operating temperature | -30 to 85 °C |
| Connector type | Binder 712, 4PM | Storage temperature (range) | -40 to 85 °C |
| Cable | | Storage temperature (typical) | 25 °C |
| Type | PUR | Humidity | 5 to 95 % |
| wire cross section | 4 x AWG28 | Sealing class | IP67 (waterproof) |
| length | 1950 mm | | |

Il sistema GPS è stato settato per operare a 6 Hz e fornisce:

- Latitudine [°];
- Longitudine [°];
- Velocità [km/h];
- Accelerazione longitudinale e laterale [m/s²] (non come misura diretta ma ricavata dai segnali precedenti);

Le caratteristiche principali sono:

- Semplicità d'uso e applicazione;
- Connessione diretta al logger;
- Non è necessaria l'alimentazione esterna;
- Indicatore Led per agganciamento satelliti;
- La calamita integrata permette un facile assemblaggio su tutte le superfici magnetiche;
- Basso consumo;
- Guscio compatto e leggero;
- Protetto da acqua e vibrazioni;

Nell'utilizzo in centri urbani ad alta densità è capitato di perdere temporaneamente il segnale GPS; per questo motivo le prove di maneggevolezza sono state eseguite in ampi piazzali senza ostacoli per la ricezione del segnale.

2.4.4 Sensori di velocità

La velocità longitudinale del motociclo è rilevata tramite due sensori di velocità induttivi, uno alla ruota anteriore ed uno alla ruota posteriore (Figura 42). Il sensore reagisce alla sovrapposizione di parti metalliche (ad esempio viti o parti del disco del freno), che generano variazioni nel segnale: esse vengono così rilevate e contate. Le ruote originali sono state dotate di ruote foniche per il rilevamento della velocità angolare, consentendo così di valutare lo slip che governa il sistema ABS del motociclo.

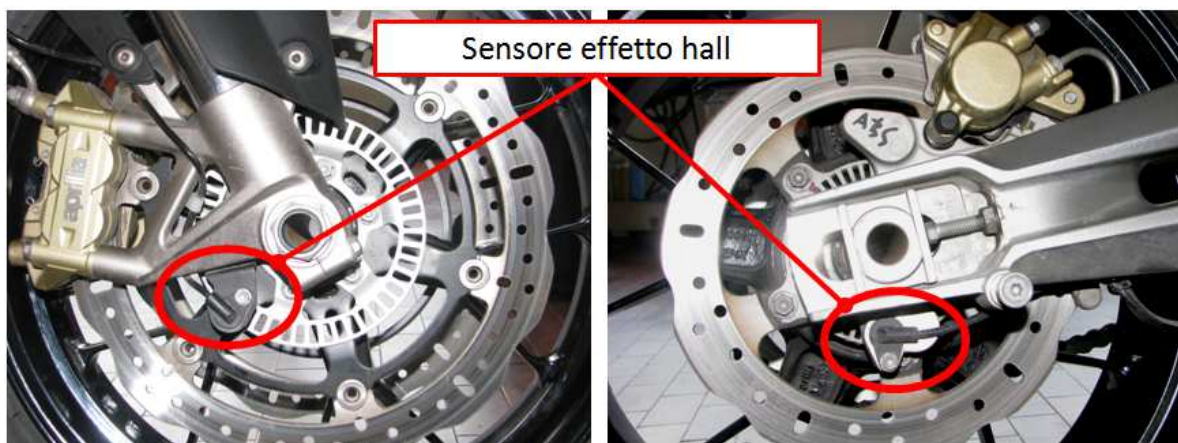


Figura 42 – Sensori di velocità sulla moto



Figura 43 – sensore effetto Hall

Si tratta di semplici sensori, alimentati a 5 o 12 V e dalla semplice connessione essendo dotati solamente di 3 cavi: uno per l'alimentazione, uno per il segnale ed uno per la terra.

2.4.5 Sensore coppia di sterzo

Questo sensore risulta essere la componente più delicata e che ha richiesto maggiori attenzioni per la sua realizzazione. Dovrà essere in grado di rilevare la coppia applicata al manubrio dal pilota e, non essendo un componente disponibile sul mercato, è stato realizzato appositamente per il veicolo.

Le specifiche del sensore impiegato hanno richiesto la sostituzione di alcune parti originali, mantenendo tuttavia inalterata l'ergonomia del manubrio e le geometrie di guida.

Requisito fondamentale è che il sensore sia sensibile a coppie impresse sullo sterzo dal pilota in un range variabile tra pochi Nm (valori tipici del moto stazionario in curva) e oltre 100 Nm (valori tipici di cambi rapidi di traiettoria o manovre d'emergenza).

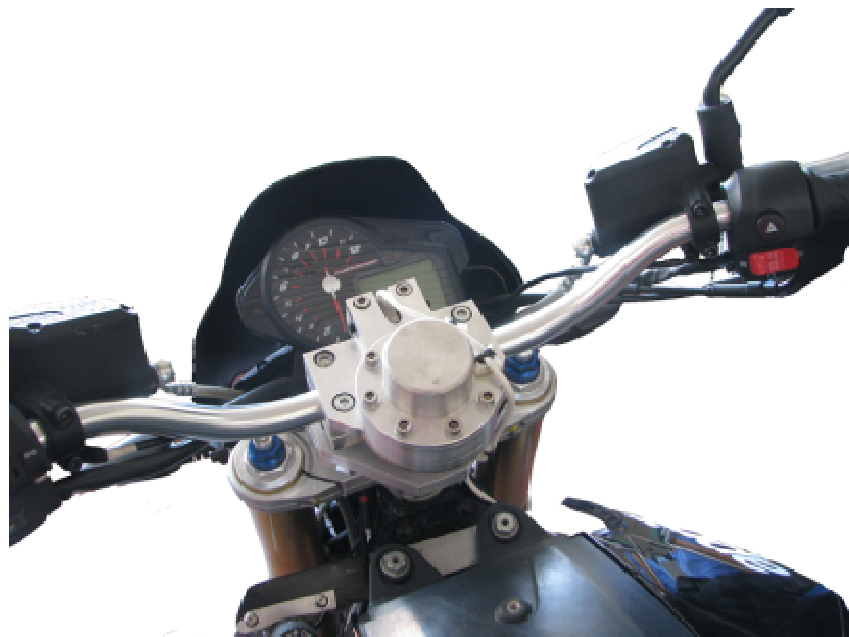


Figura 44 – Sensore coppia di sterzo installato sulla moto

La forza di sterzo è applicata direttamente al manubrio e trasmessa ad una barra estensimetrata (elemento sensibile) con collegamento a ponte di Wheatstone completo (4/4 estensimetri). Questa soluzione verrà mostrata anche successivamente per un altro sensore realizzato per il simulatore trasportabile con le principali caratteristiche di realizzo e collegamento. Per le informazioni sulla teoria dei ponti estensimetrici si è fatto riferimento a [19].

In questo caso il sensore di coppia di sterzo integra un modulo amplificatore messo in comunicazione con il Data Logger tramite un semplice connettore seriale a 9 pin con il quale si fornisce alimentazione al ponte e si gestisce il segnale risultante.

Per determinare il valore della coppia applicata è necessario impiegare un coefficiente correttivo, individuato tramite la procedura seguente.

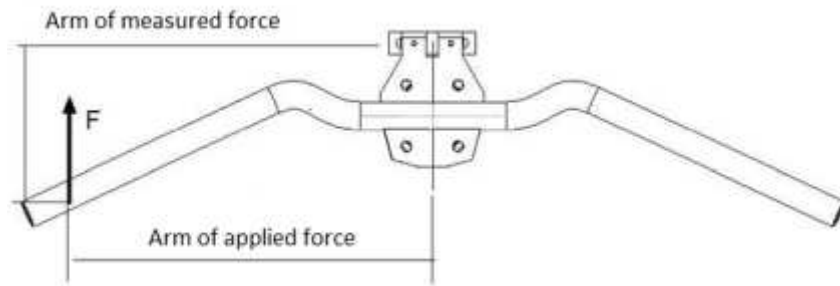


Figura 45 - Bracci delle componenti della coppia di sterzo

A seguito dell'applicazione di una forza al manubrio, la rotazione delle piastre (evidenziate con il colore verde in Figura 46) genera la deformazione della barra dotata di sensore (in rosso in Figura 46), consentendo così di determinare la forza applicata una volta nota la freccia relativa.

La fase progettuale è stata affrontata a partire da una serie di requisiti, tra i quali:

- Alti coefficienti di sicurezza per le parti meccaniche;
- Sicurezza del pilota preservata in caso di rottura della barra sensorizzata;
- Compatibilità con la coppia imposta nelle condizioni operative d'interesse;
- Assenza di effetti di risonanza generati dall'elasticità modificata del "front assembly";
- Alterazioni al comportamento dinamico del veicolo le minori possibili;
- Conservazione della posizione di guida originale.

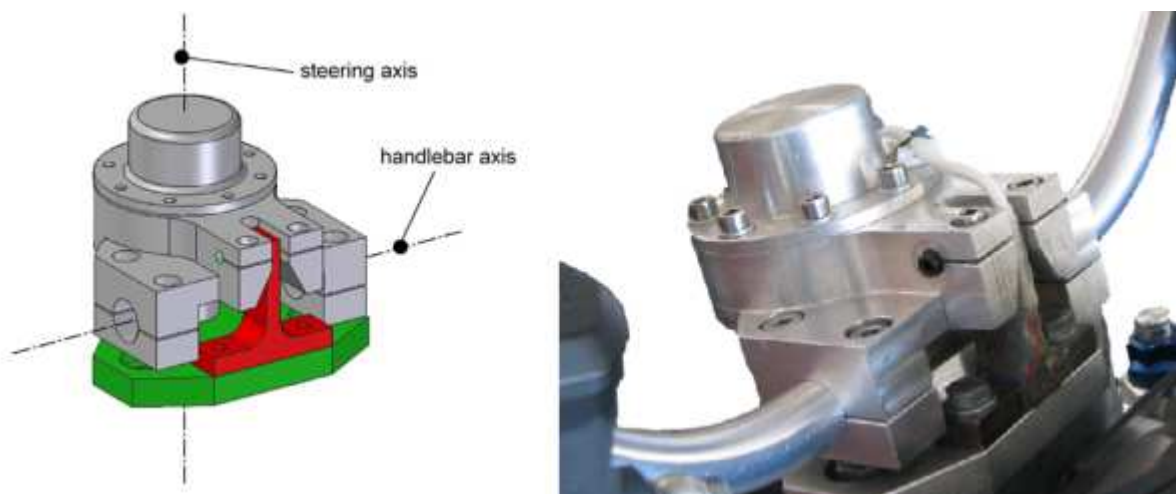


Figura 46 - Sensore coppia di sterzo

Nella progettazione dell'elemento sensibile (barra strumentata) è stato considerato un valore di picco per la coppia di sterzata pari a 125 Nm. La scelta del materiale da adottare è ricaduta sull'acciaio al fine di ridurre i fenomeni isteretici.

La forza di sterzo provoca la flessione della barra, rilevata dagli estensimetri ad essa applicati. Per il ponte di Wheatstone è stata scelta una configurazione 4/4, con un estensimetro in corrispondenza a ciascuna resistenza mostrata in Figura 47.

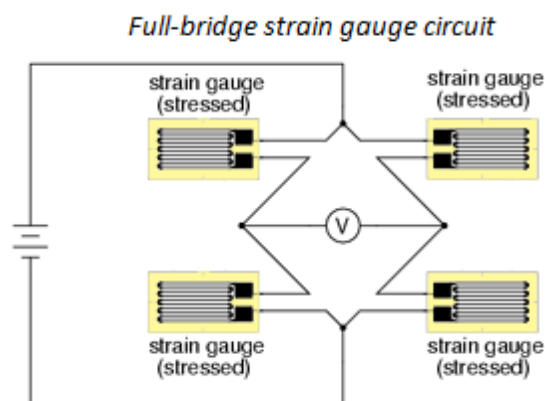


Figura 47 – Configurazione del ponte di Wheatstone a ponte intero

Tra i vantaggi di una tale configurazione, in particolare sono evidenti:

- sensibilità dell'estensimetro quadruplicata;
- compensazione termica completa;
- scarsa sensibilità alle deformazioni diverse da flessione negli elementi tra manubrio e sterzo;
- facilità di sostituzione;
- facilità di taratura;
- predisposizione a potenziometro rotazionale.

In fase di dimensionamento dei componenti critici sono state effettuate delle Analisi agli Elementi Finiti (FEA), con particolare attenzione alla barra dotata di estensimetri ed alla corrispondente deformazione: infatti, ad elevati valori della stessa corrisponde un'elevata sensibilità del sistema di misura ma, allo stesso tempo, viene introdotta un'elasticità che può influenzare la guida del veicolo.

2.4.5.1 Taratura del sensore coppia di sterzo

Sono stati imposti dei carichi pari a 2120 N, equivalenti ad una coppia di 125 Nm in corrispondenza delle viti di serraggio.

I risultati della FEA dimostrano come il posizionamento del ponte di Wheatstone sia ottimale nei riguardi della sensibilità. La taratura degli strumenti è stata effettuata in uno speciale banco prova, in cui la forza peso viene impiegata per la calibrazione. I pesi impiegati sono stati misurati con una bilancia elettronica con incertezza pari a $\pm 1g$.

Tutte le misure sono state effettuate a temperatura ambiente, pari a 22.5 °C.

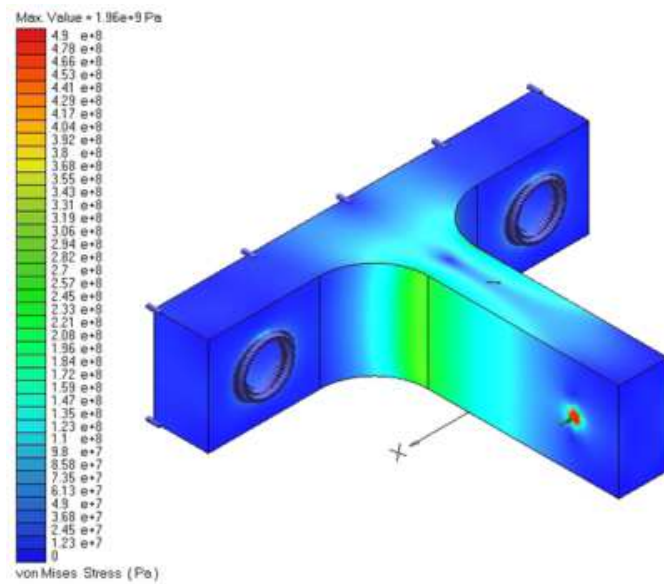


Figura 48 – Risultati dell'analisi FEA sull'elemento sensibile

E' stata eseguita una serie di misure incrementali con pesi applicati alla destra dello strumento; una seconda serie è stata effettuata con pesi applicati alla sinistra in modo da riprodurre il comportamento del pilota alla guida. I dati rilevati dalla strumentazione sono stati acquisiti solo a segnale stabilizzato. Con un segnale stabile, è infatti ottenuta la costanza dei punti acquisiti, risultando di conseguenza possibile il tracciamento della curva di taratura.

In Figura 49 si può notare come le due curve relative alle due serie di dati si sovrappongano: ciò dimostra come gli effetti isteretici del sistema di misura siano trascurabili.

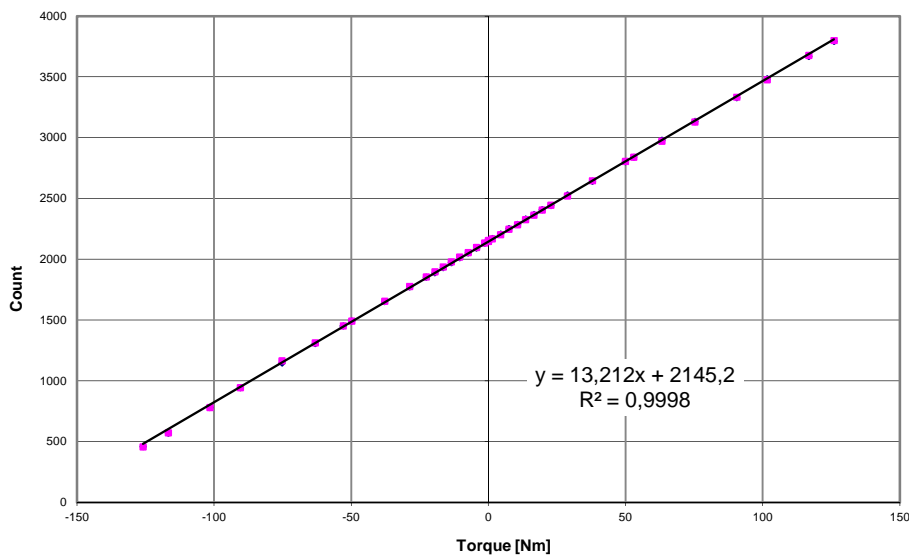


Figura 49 – Curva di taratura per il sensore coppia di sterzo

È evidente come lo strumento sia caratterizzato da comportamento fortemente lineare e non sia sensibile alle forze applicate ortogonalmente, grazie alla qualità e disposizione degli estensimetri adottati.

2.4.6 Sensore angolo di sterzo

La misura dell'angolo di sterzata viene effettuata mediante un potenziometro rotazionale posizionato in corrispondenza all'asse di sterzo, mentre, come appena spiegato, la coppia applicata allo sterzo è rilevata grazie ad un dispositivo espressamente realizzato.

La conoscenza dell'angolo di sterzata durante la manovra si rivela importante nel calcolo di indici che definiscono, ad esempio, il comportamento sovrasterzante o sottosterzante del motociclo.

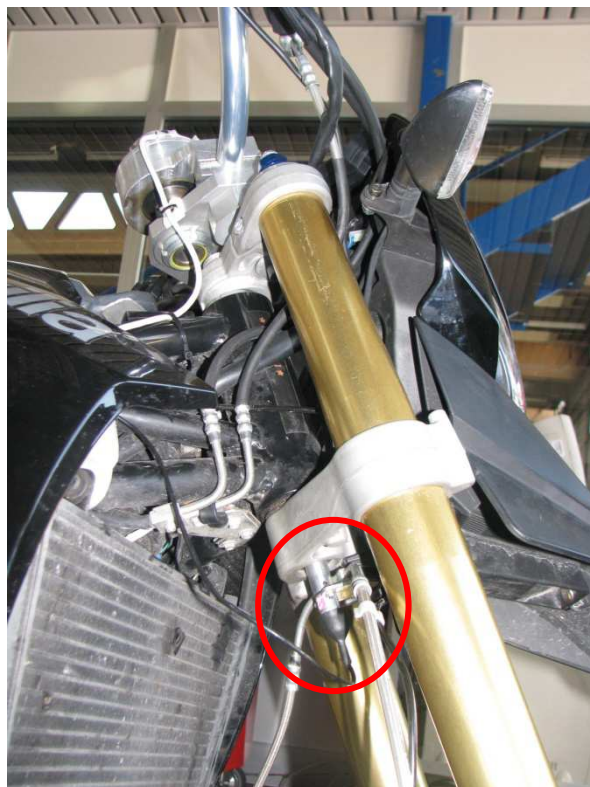


Figura 50 – Sensore angolo di sterzo

Il sensore utilizzato per l'applicazione descritta è un potenziometro angolare magnetico 2D® (Figura 51) a doppio canale, con doppio amplificatore, alta risoluzione ed ampio range a comportamento lineare.

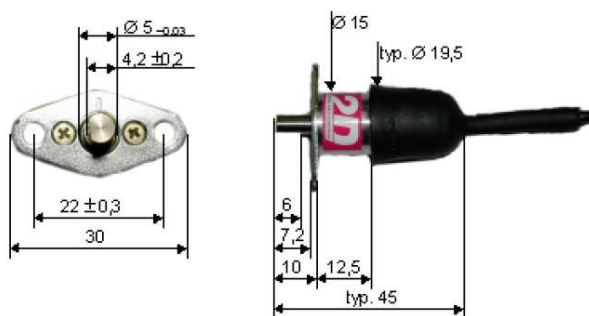


Figura 51 – Potenzimetro rotativo 2D®

La tabella seguente illustra le caratteristiche principali del potenziometro 2D®:

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Supply [V] | 5 V |
| Output range [V] | 0-5 V |
| Output range at high-resolution [°] | ±5° |
| Output range at low-resolution [°] | ±40° |
| Max range of linearity [°] | ±40° |
| Resolution | 16 bit |

Tabella 7 – Specifiche potenziometro

Il sensore è di classe IP65, quindi di tipo impermeabile. L'alimentazione non richiede modulo di condizionamento ed il sensore è collegato direttamente al Data Logger. Nel paragrafo seguente viene descritta la taratura del sensore.

2.4.6.1 Taratura del sensore angolo di sterzo

Essendo il massimo angolo di sterzata pari a ±33°, il campo di utilizzo di riferimento per il sensore è stato fissato a ±40°. La curva di taratura da assegnare al singolo canale è calcolata con le formule seguenti, considerando l'output massimo dello strumento di 0-5V:

$$[^\circ] = \frac{2 \cdot 40[^\circ]}{65536[\text{digits}]} - 40 \qquad [^\circ] = 0.00122 \cdot \frac{[^\circ]}{[\text{digits}]} - 40$$

Ad un settore angolare di 40° viene fatto corrispondere un range di tensione pari a 2.5V: in questo modo alle sterzate verso sinistra (valori negativi dell'angolo, da -40° a 0°) corrisponde un output tra 0 e 2.5V, mentre alle sterzate verso destra (0°-40°) corrisponde il range di tensione 2.5V-5V. La curva di taratura è riportata in Figura 52.

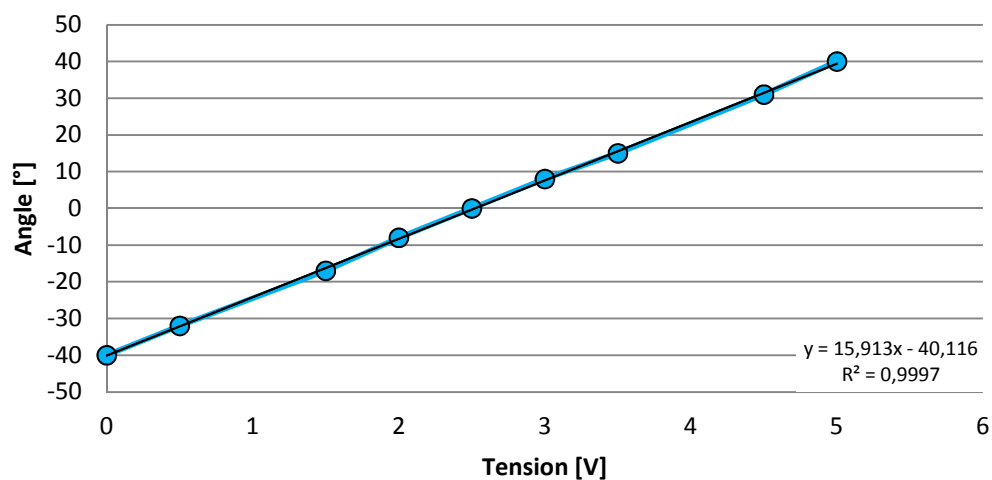


Figura 52 – Curva di taratura angolo di sterzata/tensione di uscita dal potenziometro

2.4.7 Sensore di coppia sulle pedane

Si analizzano ora le caratteristiche della strumentazione installata sulle pedane, utilizzata per determinare le sollecitazioni sul telaio e lo stile di guida del pilota.

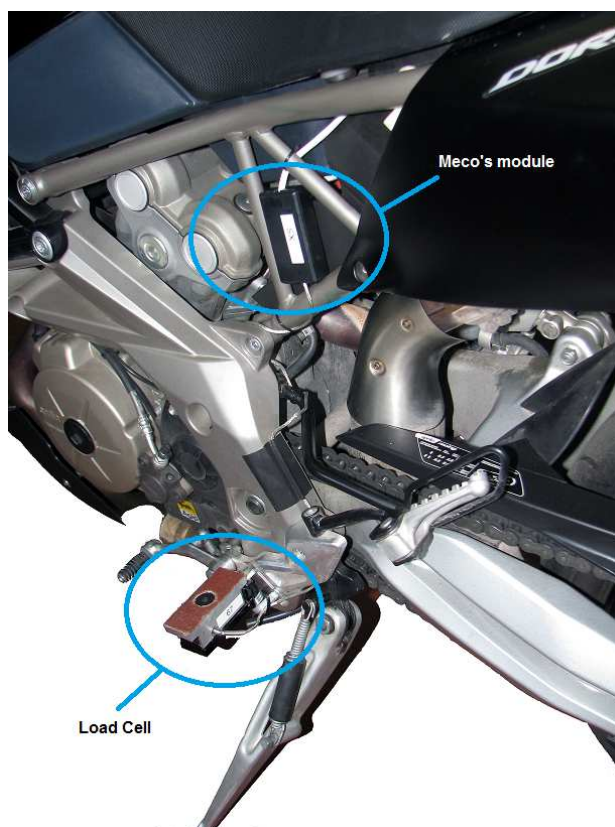


Figura 53 – Pedane strumentate

La strumentazione consta di due celle di carico per le pedane, volte a rilevare le forze applicate. Si è reso necessario modificare le pedane per l'alloggiamento delle celle di carico a compressione, che assicurassero al pilota la stessa posizione sulla sella della configurazione originale. La Figura 54

mostra le pedane realizzate. Il loro peso è di circa 600g, maggiore di quasi 150g rispetto a quello del modello originale; tuttavia, tale incremento è trascurabile ai fini del comportamento dinamico del motociclo. Le celle di carico utilizzate per le pedane sono prodotte da FUTEK INC. Le principali caratteristiche metrologiche del sensore sono riportate di seguito (dati dichiarati dal costruttore):

- Capacity 200 lb \approx 890 N
- Rated output 2mV/V nom.
- Safe overload 150% of R.O.
- Zero Balance \pm 1% of R.O.
- Excitation (VDC or VAC) 18 MAX
- Bridge resistance 350 Ω nom.
- Nonlinearity \pm 0.1% of R.O.
- Hysteresis \pm 0.1% of R.O.
- Connector: LEMO 4 Pin (EGG.OB.304.CLL)
- Cable:#28 AWG, 4 conductor, spiral shielded clear PVC 3 m long



Figura 54 – Cella di carico Futek integrata nella pedana

Adoperando il modulo di condizionamento fornito da FUTEK per l'amplificazione ed il settaggio del segnale non sarebbe stato necessario effettuare la taratura della cella di carico in quanto già effettuata dalla casa madre. Tuttavia, poiché per motivi di costo sono stati utilizzati moduli di condizionamento di diversa provenienza, è stato necessario eseguire una nuova taratura assegnando manualmente i valori di guadagno e di zero.

| | |
|------------|-------------|
| Test Temp | 22.4°C |
| Excitation | 10 Vdc |
| Zero | 0.0009 mV/V |

| | |
|-------------------|--------------|
| Relative Humidity | 52.2% |
| Input Resistance | 396 Ω |
| Output Resistance | 354 Ω |

Tension

| | |
|--------------|-------------|
| Rated Output | 2.2119 mV/V |
|--------------|-------------|

| | |
|-------------|----------------|
| Zero Return | 0.015% of R.O. |
|-------------|----------------|

| | |
|-----------|----------------|
| Linearity | 0.059% of R.O. |
|-----------|----------------|

Compression

| | |
|--------------|-----------------|
| Rated Output | -2.2024 mV/V |
| Linearity | -0.057% of R.O. |

| | |
|-------------|-----------------|
| Zero Return | -0.007% of R.O. |
|-------------|-----------------|

Tabella 8 – Caratteristiche cella di carico Futek

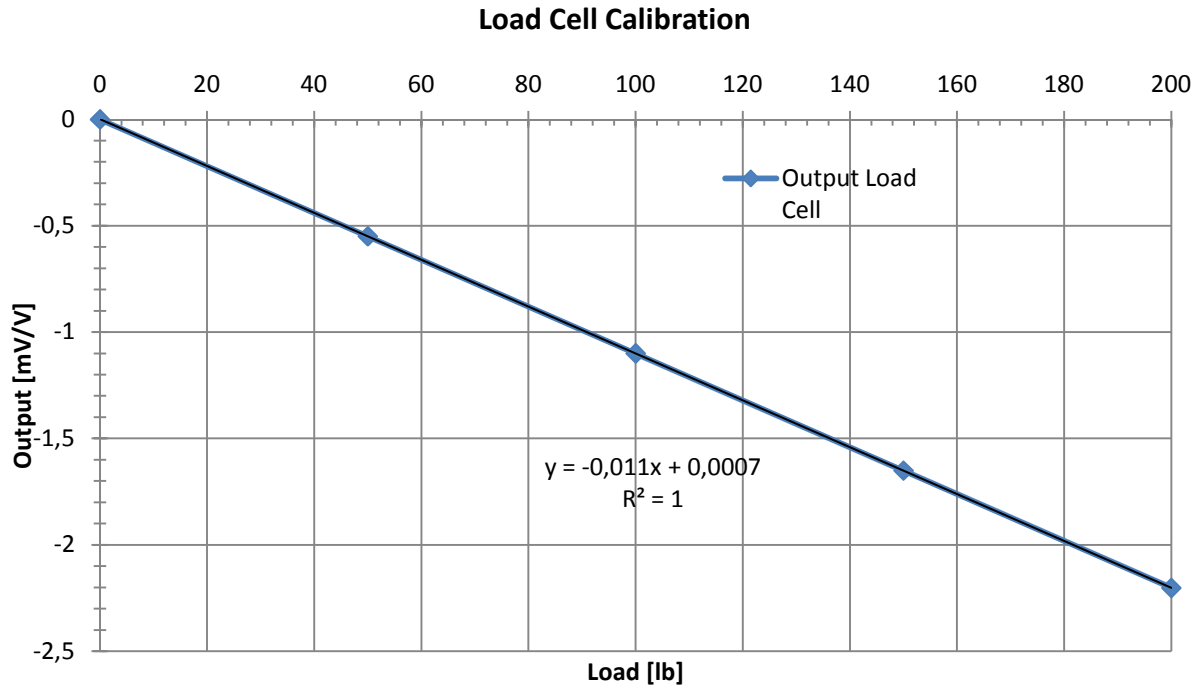


Figura 55 – Curva di taratura della cella di carico

In Figura 56 è riportato lo schema della catena di misura del dinamometro installato. E' stato utilizzato un modulo di condizionamento Mecostain al fine di assicurare una corretta alimentazione e l'amplificazione del segnale di uscita delle celle di carico.

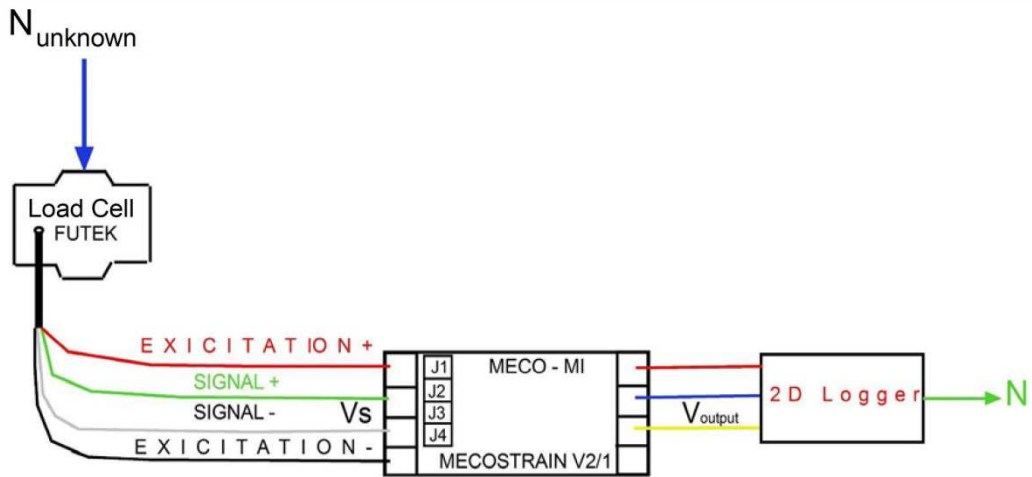


Figura 56 – Schema elettromeccanico del sistema di misura

Il setup del modulo è il seguente:

| |
|---------------------------|
| Supply module 12V dc |
| Supply load cell 5V dc |
| Analog output: $\pm 5Vdc$ |
| Gain: 2mV/V |

La Figura 57 mostra il settaggio del modulo che risulta essere lo stesso affrontato successivamente nella sezione dedicata al sensore di coppia di sterzo del simulatore trasportabile.

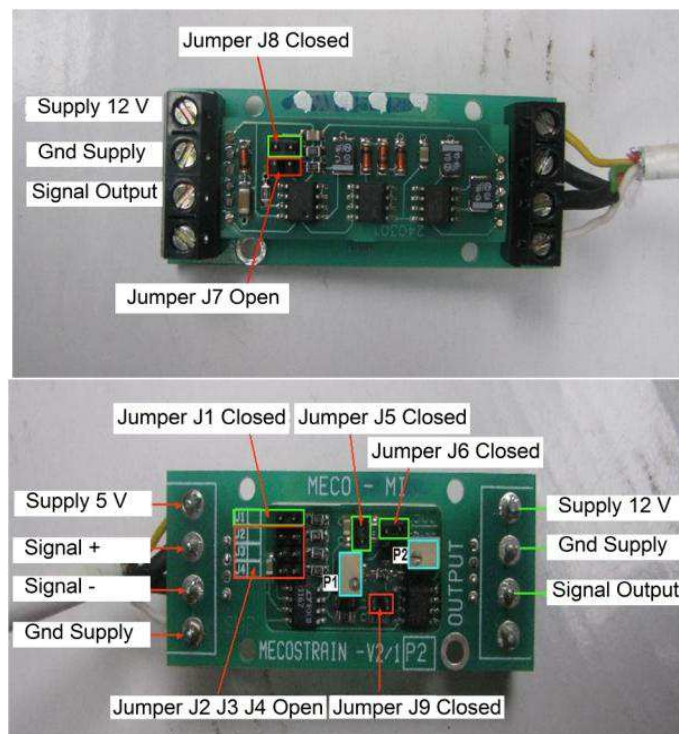


Figura 57 – Modulo di condizionamento Mecostrain. Settaggio dei Jumper J1, J2, J3, J4, J5, J6, J7, J8 e J9 per alimentazione delle celle di carico a 5Vdc, guadagno a 2mV/V e uscita $\pm 5Vdc$

2.4.8 Videocamera

L'Aprilia Dorsoduro è stata equipaggiata con due videocamere: una di esse è preposta al rilevamento del comportamento del pilota, mentre l'altra, posizionata all'anteriore, alla registrazione del contesto stradale. Questo permette in un'ottica di studio comportamentale del pilota in condizioni di manovra particolari.

Le due videocamere sono di tipo *GoPro True HD*, specificamente rivolte ad un utilizzo nel motorsport. Esse integrano un sistema di riduzione delle vibrazioni ed ottica grandangolare.



Figura 58 – Posizionamento delle due videocamere GoPro

2.5 Il simulatore come strumento di ricerca

In generale il lavoro di progettazione e sviluppo di un motociclo, o di un suo componente, costituisce un'attività molto ampia e fortemente multidisciplinare. Soprattutto negli ultimi modelli presenti nel mercato si osserva un sempre maggior utilizzo di componenti elettrici ed elettronici che concorrono al miglioramento di maneggevolezza, sicurezza e prestazioni. Tutti questi sistemi coesistono nel modello completo che li racchiude che è la moto. Ed è innegabile, anche per i motociclisti più puri e tradizionalisti, l'incremento del livello di guida apportato quando tutto il mix di sistemi funziona correttamente.

Ecco allora che, grazie alla creazione di un grande e complesso modello dinamico del motociclo che considera ogni singolo sottosistema, è possibile concentrare lo studio su singole componenti per trovarne le loro massime prestazioni.

Si pensi ad esempio ad un sistema ABS e all'incremento di sicurezza che apporta in frenate di emergenza o in situazioni particolari. Questo sistema ha alla base una sua logica di funzionamento regolata da alcuni parametri che variano a seconda delle condizioni ambientali. Qual è il valore giusto da dare a questi parametri? Qual è la configurazione che mi permette di ottenere lo spazio di frenata minimo?

Con il simulatore è possibile ricreare il modello dinamico di ogni motociclo con cui è possibile svolgere studi dedicati sui parametri per trovare la loro configurazione ottimale. Non è sicuramente l'unica strada percorribile, la soluzione che più si avvicina è quella delle simulazioni al computer, dove però, al momento, il pilota viene rappresentato con un modello che è decisamente troppo semplice e quindi poco veritiero. Il valore aggiunto del simulatore è la possibilità di avere a disposizione il miglior modello di umano possibile, l'umano stesso. Ecco che *l'Human In the Loop* (HIL) semplifica computazionalmente la descrizione di un rider virtuale e allo stesso tempo lo fornisce molto più reale, nello stile di guida e nelle reazioni assunte.

Un'altra soluzione consiste nell'esecuzione sperimentale dei test su motocicli reali. In questo caso il pilota è l'essere umano però i livelli di sicurezza soprattutto in fase iniziale di prototipo sono molto bassi per non parlare delle altissime richieste in termini di costi e tempo necessarie in queste fasi iniziali dello sviluppo.

Questi sono solo alcuni dei motivi principali del coinvolgimento del simulatore di guida in alcuni dei più grandi ed importanti Progetti Europei sulla sicurezza conclusi in questi ultimi due anni.

Il progetto SafeRider (www.saferider-eu.org) è cominciato il 16 Gennaio 2008 e ha migliorato la sicurezza dei motociclisti attraverso l'uso di tecnologie all'avanguardia come i sistemi ADAS (Advanced Driver Assistance System) e IVIS (In-Vehicle Information Systems). Nell'ambiente automotive queste tecnologie hanno già trovato il loro utilizzo e continua il loro lavoro di sviluppo. Il SafeRider intende imparare dai problemi delle applicazioni ADAS/IVIS nelle auto ed estendere queste nuove tecnologie al mondo delle due ruote senza che queste interferiscano con la guida o infastidiscano il pilota compromettendone la sicurezza ed il comfort di guida.

All'interno di questo progetto il simulatore di guida è stato coinvolto per testare i nuovi sistemi ARAS (Advanced Rider Assistance Systems) e OBIS (On-Bikes Information Systems), dal punto di vista della sicurezza, comfort, prestazione ed integrazione dei sistemi [20],[21]. I test svolti al simulatore sono serviti per la realizzazione di prototipi reali con i quali sono stati eseguiti test e le successive analisi dati.

Il progetto 2beSafe (www.2besafe.eu), come accennato ad inizio capitolo, è cominciato ufficialmente il 15 Gennaio 2009 e aveva come scopo principale la ricerca comportamentale ed ergonomica per lo sviluppo di contromisure per migliorare la sicurezza dei motociclisti, compresa la ricerca sulle cause di incidente ed errori umani. Ha coinvolto 29 partner in 14 paesi tra i quali Europa, Israele ed Australia ripartiti tra ricerca accademica ed istituti, associazioni end-users e partner industriali.

All'interno di questo progetto è stata strumentata la Aprilia Dorsoduro descritta al paragrafo 2.4 ed eseguita la validazione al simulatore con le manovre di maneggevolezza descritte dalla specifica del progetto.

Nel corso del mio dottorato sono stati affrontati numerosi studi di varie tipologie, a volte per esigenze del gruppo di ricerca interno, altre volte su richiesta di aziende esterne del settore.

Vengono ora riportati alcuni esempi di studi fatti con il simulatore per nuovi sistemi di ausilio alla guida o per la ricerca delle prestazioni ottimali al variare dei parametri.

2.5.1 Caso di studio: Traction Control

Nel primo capitolo si è visto come il Traction Control stia diventando uno dei sistemi di sicurezza attiva più diffusi sui motocicli dopo il sistema ABS. Per questo motivo diverse case motociclistiche impegnate nello sviluppo ed introduzione di questi sistemi nei loro modelli stanno concentrando le loro risorse in questa direzione.

Di seguito viene riportata una parte di uno studio, effettuato durante il mio dottorato, su una comparativa di logiche di intervento di Traction Control. Dove possibile verrà illustrato brevemente il funzionamento del sistema e come questo permetta, almeno teoricamente, la riduzione dello slittamento della ruota posteriore. Solo dai risultati si potrà valutare la concretezza d'intervento del sistema.

Lo schema funzionale a blocchi del sistema più semplice, il Simple Traction Control (TC) può essere facilmente riassunta nella Figura 59.

Quando lo slip λ (slittamento) della ruota posteriore supera una soglia prestabilita, l'apertura della farfalla (che regola la potenza e quindi la coppia del motore) viene tagliata con una legge lineare dello slip stesso. L'apertura del gas viene moltiplicata per una funzione che vale 1 quando lo slip della ruota posteriore è inferiore al valore prestabilito. Per valori dello slip superiori, l'apertura del gas viene ridotta linearmente. Quando il valore dello slip raggiunge la soglia fissata di slip massimo, la valvola a farfalla viene completamente chiusa e ad essa corrisponde una coppia generata dal motore nulla. Una volta fissata l'apertura della farfalla, la coppia generata viene assunta in base al numero di giri del motore a seconda alla caratteristica del motore stesso.

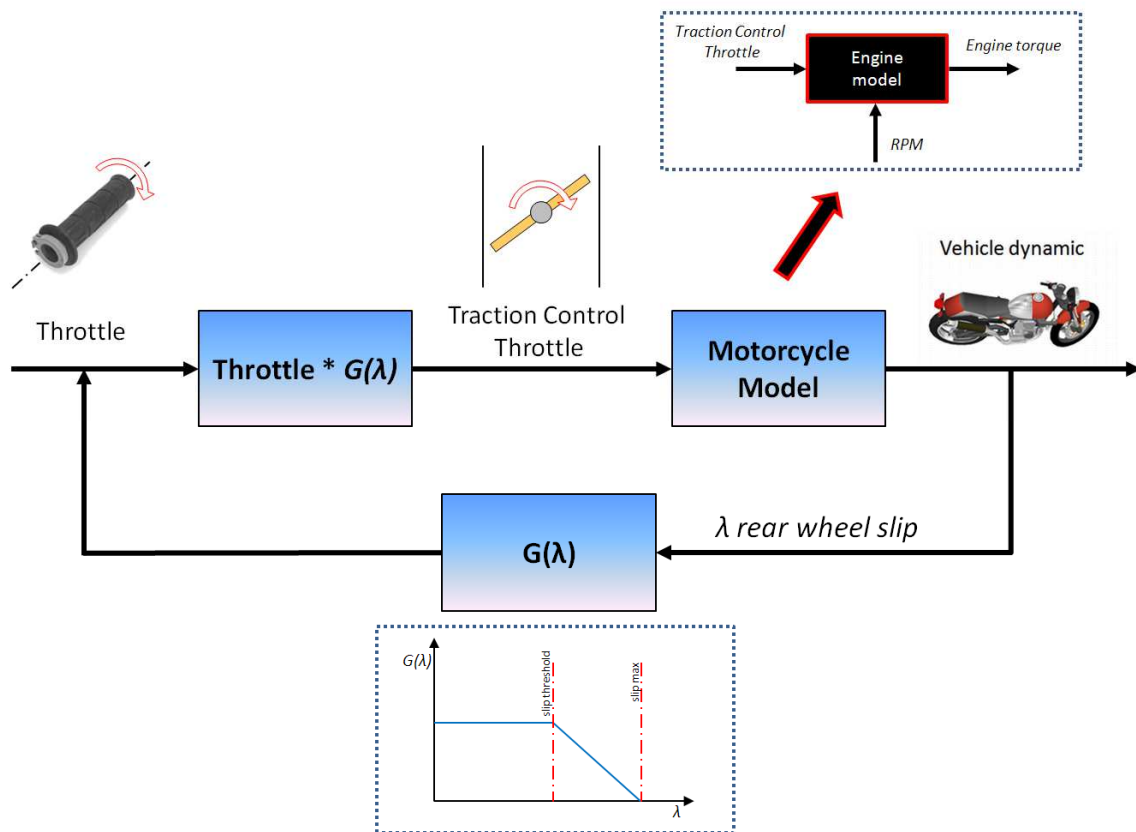


Figura 59 - Diagramma logico TC

I parametri di funzionamento sono:

- $G(\lambda)$: prima di alimentare il motore, ovvero prima di generare la coppia motrice, il valore dell'apertura della farfalla impostata dal pilota (mediante la manopola dell'acceleratore) viene moltiplicato dalla seguente funzione lineare dello slip stesso, di conseguenza limita l'alimentazione del motore e quindi la coppia erogata;
- *Slip threshold*: soglia di attivazione del taglio della farfalla; per valori di slip inferiori a tale soglia l'apertura della farfalla impostata dal pilota è quella che effettivamente alimenta il motore e non avviene alcun taglio all'alimentazione; per valori di slip superiori a tale soglia l'apertura della farfalla, che effettivamente alimenta il motore, è inferiore a quella impostata dal pilota per intervento del sistema di controllo, che la limita secondo la legge $G(\lambda)$;
- *Slip max*: limite massimo assegnato allo slip;
- *Min Speed*: soglia di velocità di abilitazione del controllo (nei test è stata impostata a 0.05 m/s);

Per una migliore comprensione della modalità d'intervento del sistema si possono considerare i grafici seguenti relativi ad una prova svolta sul simulatore con:

- partenza da fermo;
- percorrenza in rettilineo fino ad oltre 1 chilometro;
- aderenza mantenuta costante e pari a $D = 0.7$ ([8],[11],[12],[13]);

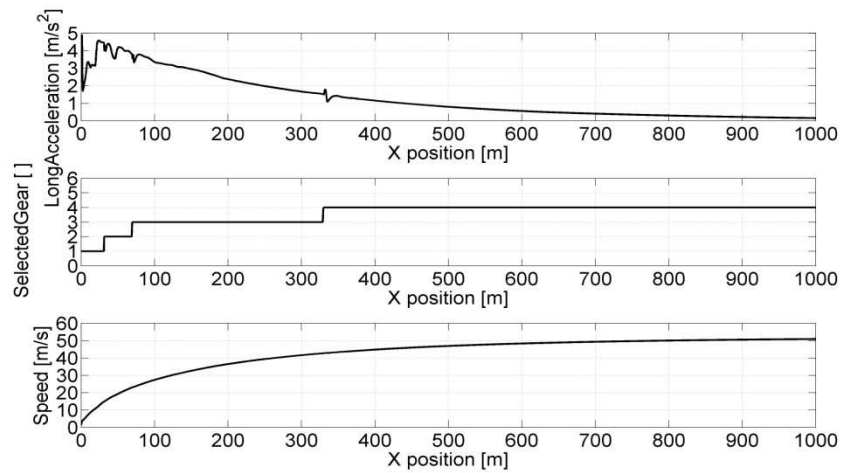
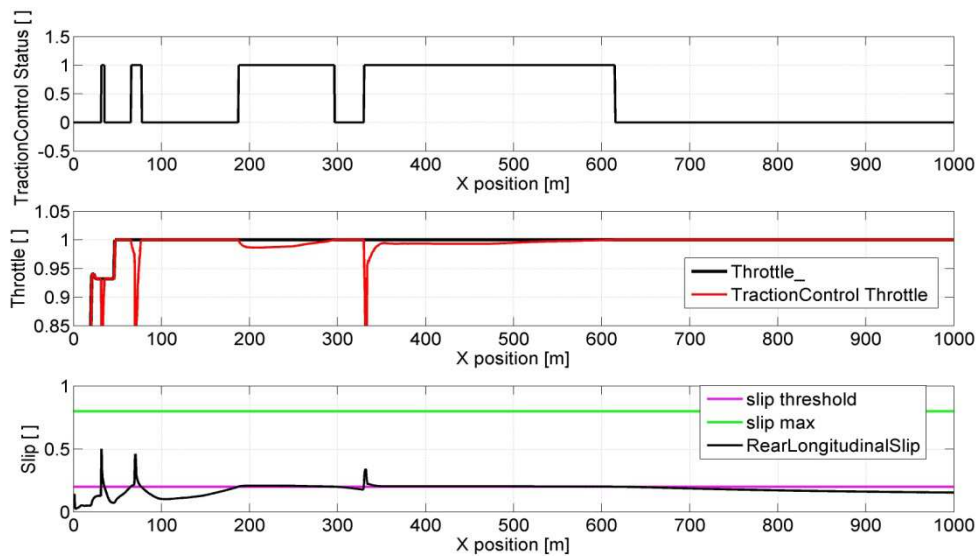


Figura 60 - Modalità di prova test di Traction Control

Il controllo TC entra in gioco con le seguenti variabili:

- *Traction Control Status*: se pari a 0 (controllo disattivo) indica che la coppia erogata dal motore è quella impartita dal pilota senza alcun tipo di taglio, ovvero $G(\lambda)$ pari a 1; nel caso in cui lo status sia pari a 1 significa che il controllo sta intervenendo ed il segnale di apertura della farfalla viene moltiplicato per $G(\lambda)$ che questa volta è minore di 1;
- *Slip*: rappresenta la condizione di attivazione della logica di controllo;
- *Throttle*: valore del potenziometro collegato alla manopola dell'acceleratore;
- *TractionControl_Throttle*: è il valore della farfalla controllata dal sistema che va effettivamente ad alimentare il motore; coincide con quello impostato dal pilota in condizione di OFF, è minore in condizione di ON; il rapporto tra i valori di apertura di farfalla rappresenta la $G(\lambda)$;



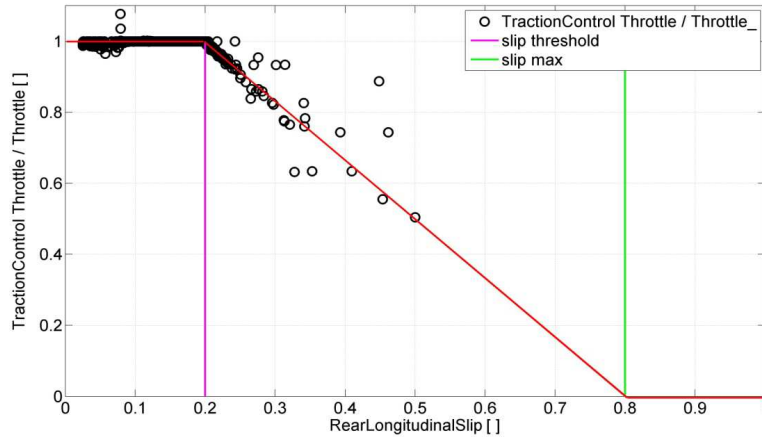


Figura 61 - Grafici riassuntivi test di accelerazione con Simple TC

La seconda logica risulta essere la *Advanced Traction Control (advTC)* e lo schema di funzionamento è riportato in Figura 62.

In questo caso l'acceleratore genera uno slip desiderato attraverso una legge lineare (filtrata con un sistema del primo ordine) ed un controllore PID calcola in ogni istante la coppia motore necessaria per asservire tale richiesta di slip; la coppia effettivamente attuata dal motore è la minore tra quella attualmente erogata dal pilota (funzione della velocità del motore e dall'apertura della farfalla impostata dal pilota) e quella calcolata dal controllore.

I parametri di funzionamento della logica sono:

- *slip target*: funzione di generazione dello slip target, lineare con l'apertura dell'acceleratore selezionata dal pilota; lo slip target selezionato inoltre viene fatto passare attraverso un filtro del primo ordine per limitare le discontinuità dovute a movimenti bruschi dell'acceleratore (ovvero per seguirlo leggermente in ritardo, 0.1-0.2 secondi) e ammorbidire quindi la risposta del motore;
- *target pole*: costante di tempo del filtro del primo ordine (con tempo di assestamento pari a circa 5 volte la costante di tempo) cioè si raggiunge il valore di slip target selezionato dopo $\Delta t = 5 \cdot target\ pole = 5 \cdot 0.02s$ con funzione di trasferimento

$$\frac{1}{1 + TargetPole \cdot s}$$

- *MinSpeed*: soglia di velocità di abilitazione del controllore (impostata come nel TC pari a 0.05 m/s);
- $K_{target\ slip}$: limite massimo assegnato di slip;

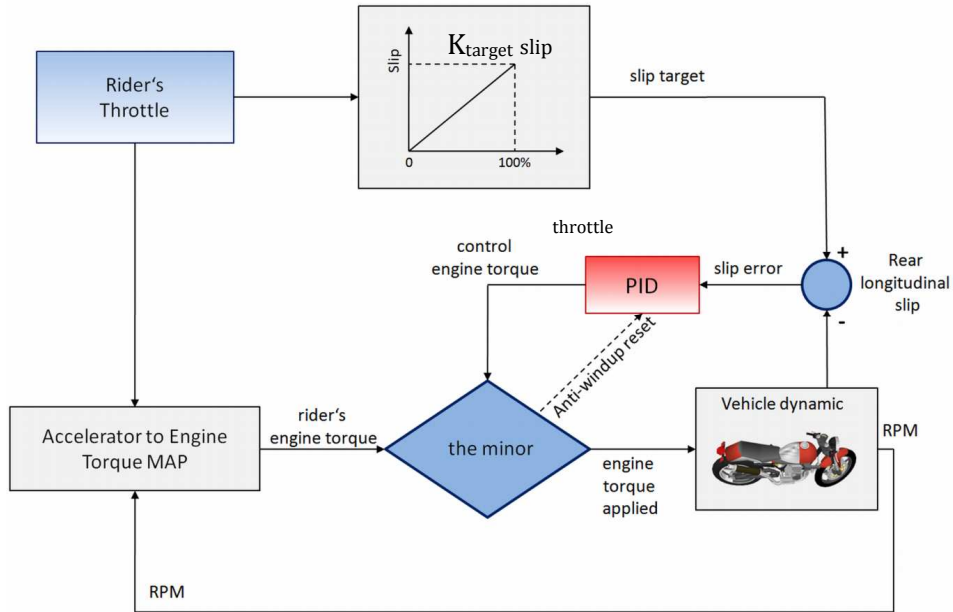


Figura 62 - Diagramma logica advTC

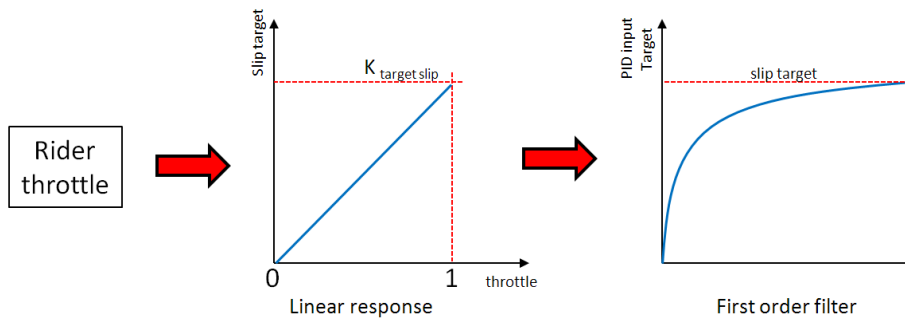


Figura 63 - Funzione di generazione dello slip target

Il controllo advTC governa le seguenti variabili:

- *advTractionControl Status*: se pari a 0 indica la condizione di controllo non abilitato e quindi a tutti gli effetti non c'è alcun taglio di coppia al motore. Si sta verificando una situazione in cui la coppia calcolata dal controllo risulta essere superiore a quella impartita dal rider e quindi il vincolo è costituito a tutti gli effetti dal rider. Se lo status risulta essere pari a 1 invece significa che il controllo è attivo e sta effettivamente tagliando la coppia erogata dal motore.
- *advTractionControl_Slip_target*: è lo slip target impartito dal pilota tramite l'acceleratore e dipende solo ed esclusivamente da questo; con il controllo attivo la coppia del motore viene tagliata in modo da "inseguire" il valore dello slip longitudinale;
- *advTractionControl_EngineTorque*: è la coppia calcolata dal controllore per inseguire il target slip; in condizione di controllo disabilitato coincide con quella erogata dal motore per le attuali

condizioni RPM - % (giri motore - apertura farfalla), ovvero non viene applicata e non avviene taglio di coppia al motore;

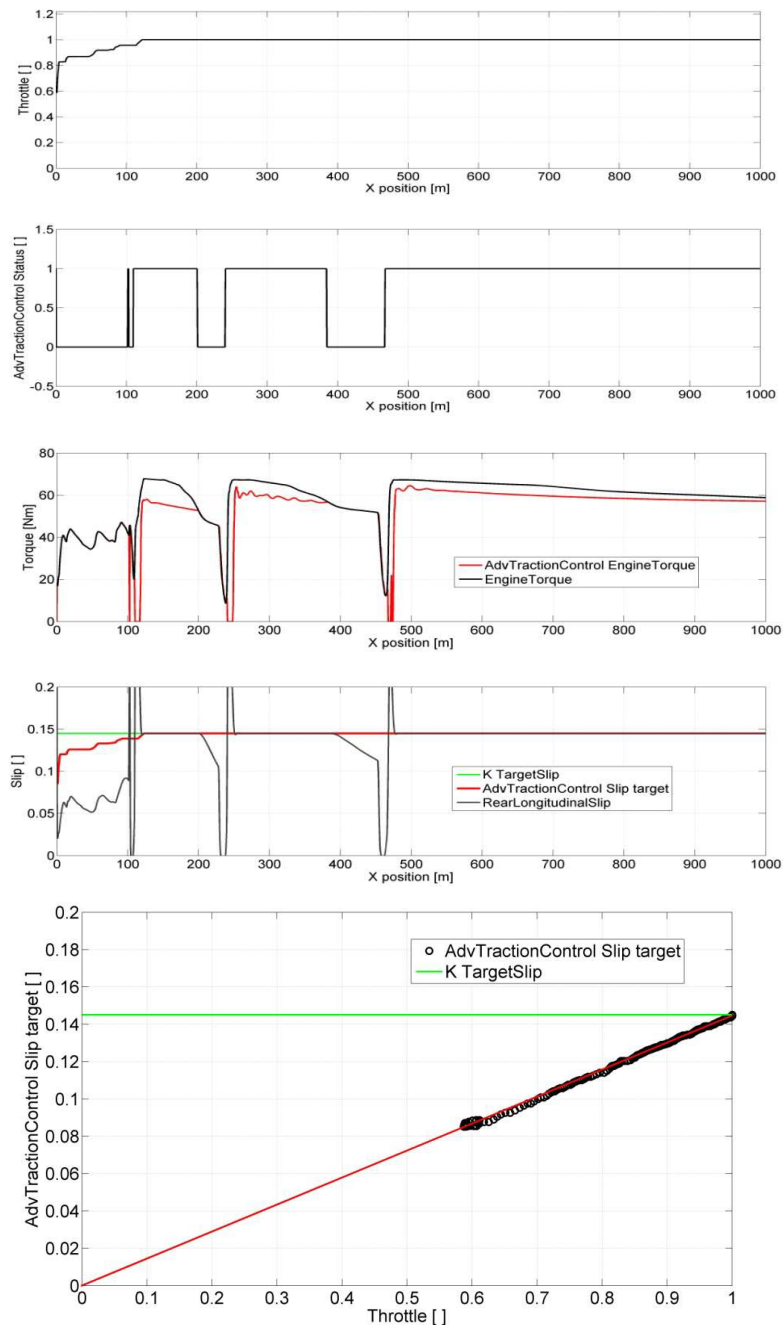


Figura 64 - Grafici riassuntivi test di accelerazione con advTC

Come ultima logica di controllo è stato implementato un algoritmo, sviluppato dal Politecnico di Milano con il contributo del MDRG, di proprietà di una casa motociclistica attualmente presente nel mercato e, per un accordo di riservatezza, non è possibile descriverlo nel dettaglio.

Vengono ora presentati i risultati più interessanti di una comparativa svolta su test di accelerazione con le seguenti modalità di prova:

- partenza da fermo;

- percorrenza in rettilineo fino ad oltre 1 chilometro;
- aderenza (D) mantenuta costante e pari a 0.5 per ricreare le condizioni di bassa aderenza;
- irregolarità stradale simulata nell'ambiente virtuale con una sinusoide;

Per creare il riferimento di prova si considera una strada dritta perfettamente planare. Successivamente i test sono stati ripetuti su irregolarità del manto stradale rappresentate prima da una sinusoide di ampiezza 5 cm e lunghezza d'onda 20 m e poi su una sinusoide di ampiezza 15 cm e lunghezza d'onda 20 m.

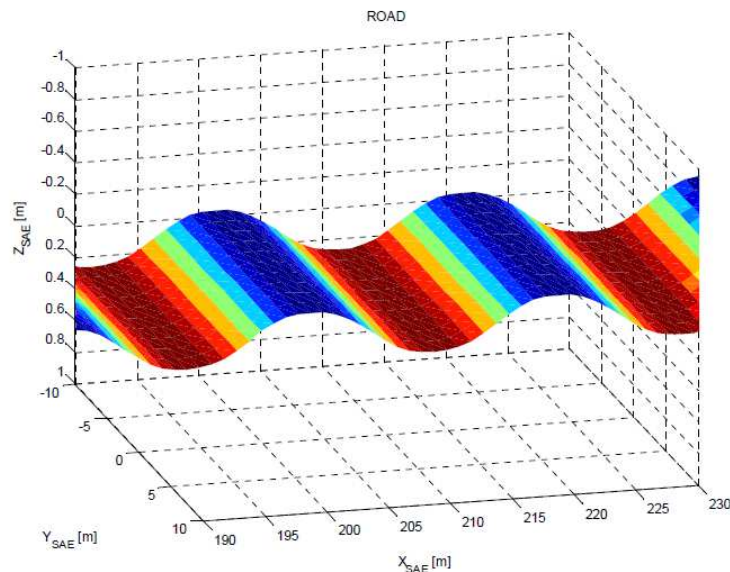


Figura 65 - Particolare dell'irregolarità del manto stradale replicata al simulatore

La zona di prova prevede un tratto iniziale piano nel quale si comincia la manovra di accelerazione, necessario per poter inserire la prima marcia e acquistare velocità, successivamente si incontrano le irregolarità stradali appena definite e si termina la prova con un tratto planare, in modo da distinguere chiaramente dalla telemetria le variazioni del comportamento dinamico tra le due diverse situazioni incontrate.

Per il calcolo dei parametri di prestazione è stato preso in considerazione, per ogni test, un tratto di percorrenza di 1 chilometro a partire dall'istante in cui viene superata la velocità di riferimento di 5 km/h.

Per poter analizzare le fasi di accelerazione, con sistemi di controllo di trazione disinseriti, vengono riportati nei grafici seguenti le grandezze più significative.

Nel primo grafico viene riportato l'andamento dello slip longitudinale della ruota posteriore λ , espresso come:

$$\lambda = \frac{V_{ref} - \omega r}{V_{ref}}$$

Dove V_{ref} è la velocità del veicolo, ω la velocità angolare in rad/s e r il raggio di rotolamento della ruota posteriore. Lo slip varia tra le condizioni di slittamento nullo (0) e di completo slittamento (1). Nel secondo grafico viene riportato l'andamento della velocità del veicolo in km/h per poterne apprezzare la progressione durante lo svolgimento della prova.

Segue il grafico (terzo grafico) nel quale è riportato il rapporto della trasmissione utilizzato (in rosso), il regime di rotazione del motore (in nero) e il valore della soglia del limitatore (linea blu). Questo per poter identificare velocemente le zone nelle quali si arriva al regime massimo di funzionamento con le possibili implicazioni che questo può comportare, come ad esempio un'oscillazione della coppia trasmessa dovuta al taglio della potenza del limitatore. Nel quarto grafico viene riportata l'apertura dell'acceleratore in [%] gestita dal pilota, mentre nell'ultimo grafico (quinto grafico) viene riportata la forza longitudinale posteriore che rappresenta la forza di spinta del motociciclo durante la prova. In basso a sinistra viene riportato anche il valore della deviazione standard della forza di spinta, calcolato nel tratto delle ondulazioni del tracciato.

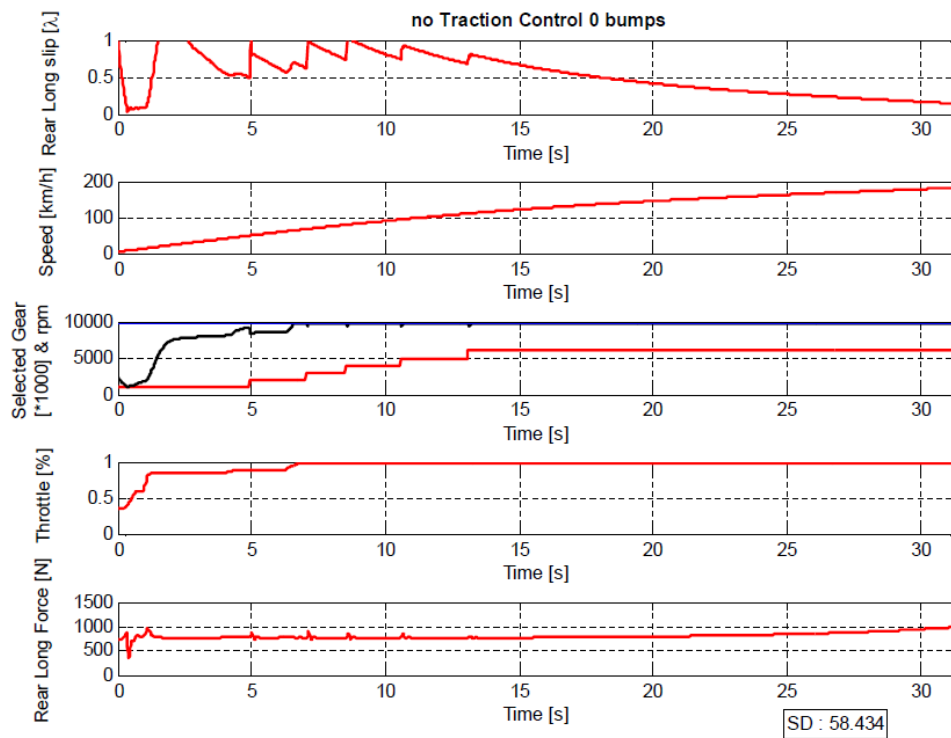


Figura 66 - Prova di accelerazione con controlli disattivati

Per valutare l'efficacia del funzionamento del controllo di trazione TC sono riportati una serie di grafici per una più completa interpretazione della prova.

Nel primo grafico viene tracciato il valore di soglia dello slip target (linea tratteggiata nera) ed il valore dello slip della ruota posteriore durante l'accelerazione. Sono chiaramente distinguibili gli istanti nei quali viene eseguito il cambio marcia con lo slip che tende a zero e, in alcuni casi, riprende valore

oscillando in quanto la logica attiva e disattiva il controllo se lo slip è maggiore o minore di quello di riferimento (ad esempio al secondo 13s).

Nel secondo grafico viene riportato lo stato di funzionamento del controllo. Se assume il valore 1 il controllo di trazione è attivato mentre, se assume valore 0, il sistema viene disattivato.

Nel terzo grafico son riportati i valori della marcia innestata, il regime di rotazione del motore ed il valore del numero di giri del limitatore.

Nel quarto grafico viene riportato il valore della posizione dell'acceleratore comandato dal pilota (linea tratteggiata nera) e di quella comandata dal controllo di trazione che va a diminuire l'apertura della farfalla del motore e quindi a tagliare la coppia trasmessa (linea rossa).

Nell'ultimo grafico (quinto grafico) viene riportato il valore della forza di spinta sulla ruota posteriore durante la prova. Nel riquadro in basso a destra viene riportato il valore della deviazione standard calcolata per la forza longitudinale.

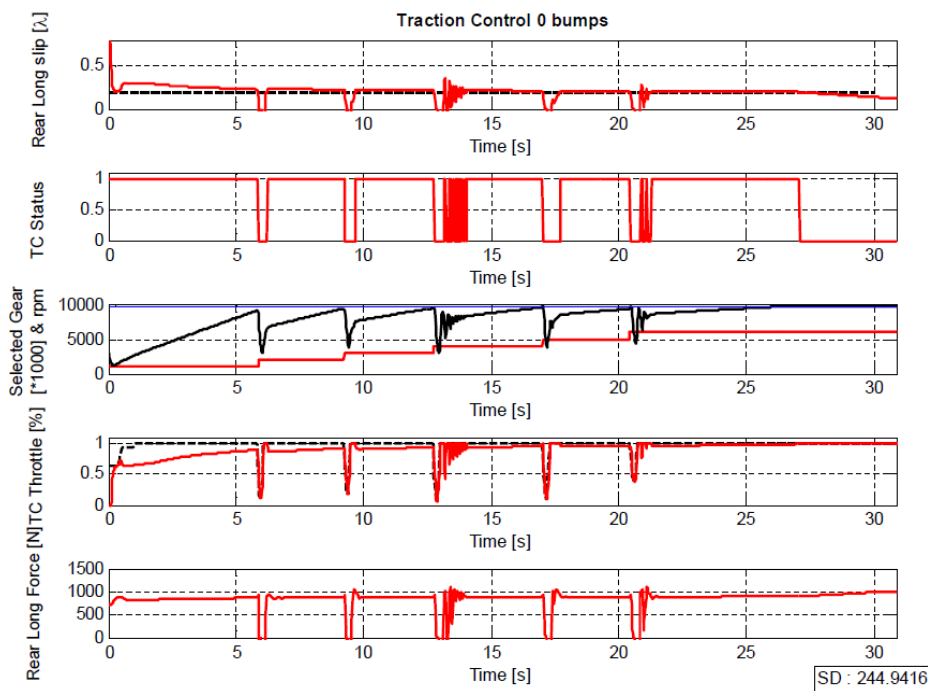


Figura 67 - Prova di accelerazione con TC

Anche in questo caso, per il controllo di trazione Advanced Traction Control, vengono riportati diversi grafici per una migliore interpretazione.

Nel primo viene sempre analizzato il comportamento dello slip longitudinale della ruota posteriore (in rosso) riferito al valore dello slip controllato dal sistema (linea tratteggiata nera). Nel secondo grafico viene riportato lo stato assunto dal sistema, se attivo (1) o disattivo (0). Segue il grafico che riporta la marcia utilizzata nella prova, il regime di rotazione del motore ed il valore del numero di giri massimo imposto dal limitatore.

Nel quarto grafico viene riportata la coppia erogata dal motore (linea tratteggiata nera) e la corrispondente coppia gestita dal controllo (linea rossa).

Sull'ultimo grafico viene riportata la forza longitudinale di spinta con la relativa deviazione standard nel riquadro in basso a destra. Si osservano facilmente gli istanti nei quali viene eseguito il cambio marcia in quanto la forza scende momentaneamente a zero.

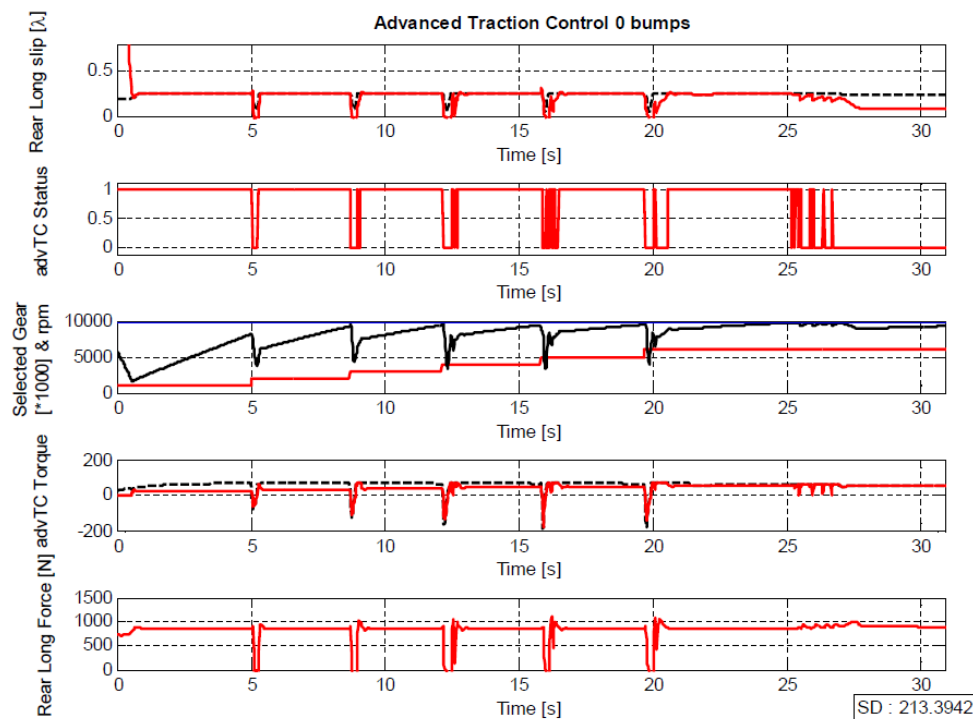


Figura 68 - Prova di accelerazione con AdvTC

Per poter analizzare il comportamento del controllo implementato dal Politecnico di Milano, viene riportato nel primo grafico l'andamento dello slip target (linea tratteggiata nera) e dello slip effettivo (in rosso), generato al verificarsi di specifiche condizioni. Superato un valore di soglia dello slip imposto (λ_{th}), il controllore congela lo stato dell'acceleratore che ha portato a quel valore di scorrimento, andandolo poi ad interpolare con una retta con il valore massimo di slip concesso in corrispondenza della piena apertura della farfalla. Sempre in base allo slip registrato viene calcolata una nuova coppia motrice che bypassa quella impartita dal pilota con l'acceleratore e che ha lo scopo di "inseguire" lo slip target.

Nel secondo grafico è riportato il valore dello stato del controllo; se assume il valore 1 significa che il sistema è attivo e sta calcolando il PTC_slip_target ed il $PTC_EngineTorque_Control$ ed inoltre sta tagliando coppia al motore. Se assumesse valore -1 significa che il sistema è attivo ma sta solamente controllando il valore dello slip e confrontandolo con il valore di soglia.

Nel terzo grafico vengono riportati gli andamenti delle marce utilizzate (in rosso), il regime di rotazione del motore (in nero) ed il relativo valore del limitatore (in blu).

Nel grafico successivo viene riportata la coppia erogata dal motore (linea tratteggiata nera) e la coppia tagliata dal controllo ed effettivamente agente.

Nell'ultimo grafico è riportata la forza di spinta longitudinale della ruota posteriore sempre con la relativa deviazione standard calcolata nel riquadro in basso a destra.

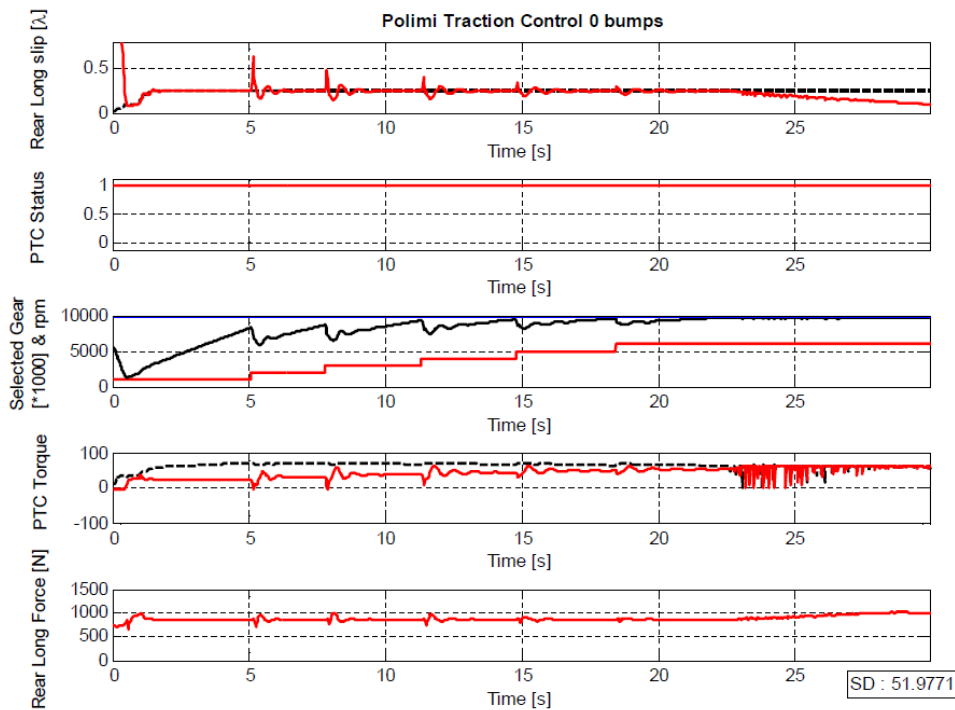


Figura 69 - Prova di accelerazione PolimiTC

Con questo studio si è voluto quantificare non solo le prestazioni delle singole logiche in termini di tempo di percorrenza e velocità finale ma anche dal punto di vista dell'uniformità della forza di spinta gestita dal Traction Control in condizioni critiche come quelle riprodotte nel test. Tanto più elevato sarà il valore della variazione della forza e tanto più irregolare sarà l'accelerazione percepita dal motociclista. Già in queste prime prove su strada piana si può vedere come la terza logica sia quella che regolarizza nel miglior modo la forza di spinta trasmessa.

Illustrate quindi le modalità di rappresentazione per ogni singola prova vengono ora riportate le prove svolte su strada ondulata con ampiezza dell'irregolarità di 5 cm e successivamente di 15 cm.

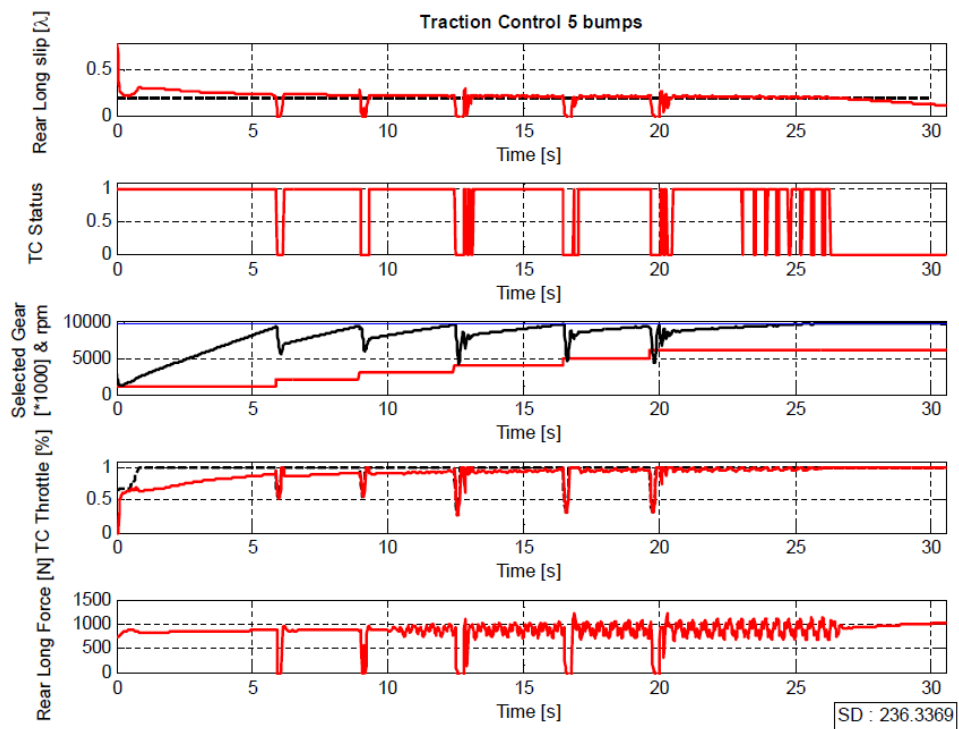
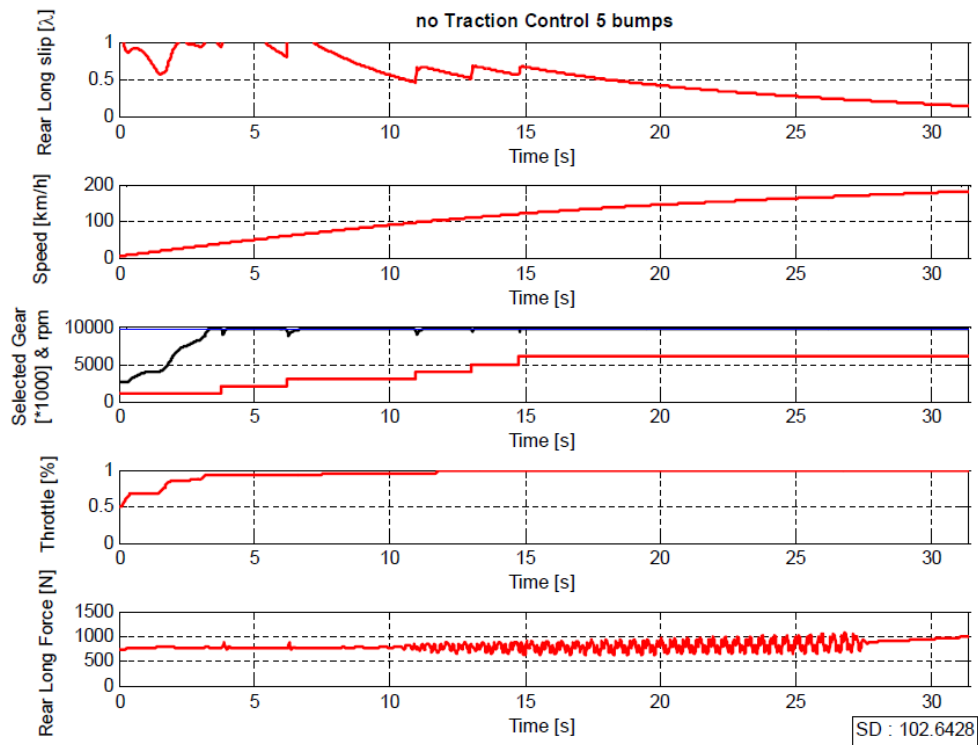


Figura 70 - Prova senza traction control (in alto) e con TC (in basso) su irregolarità di 5 cm

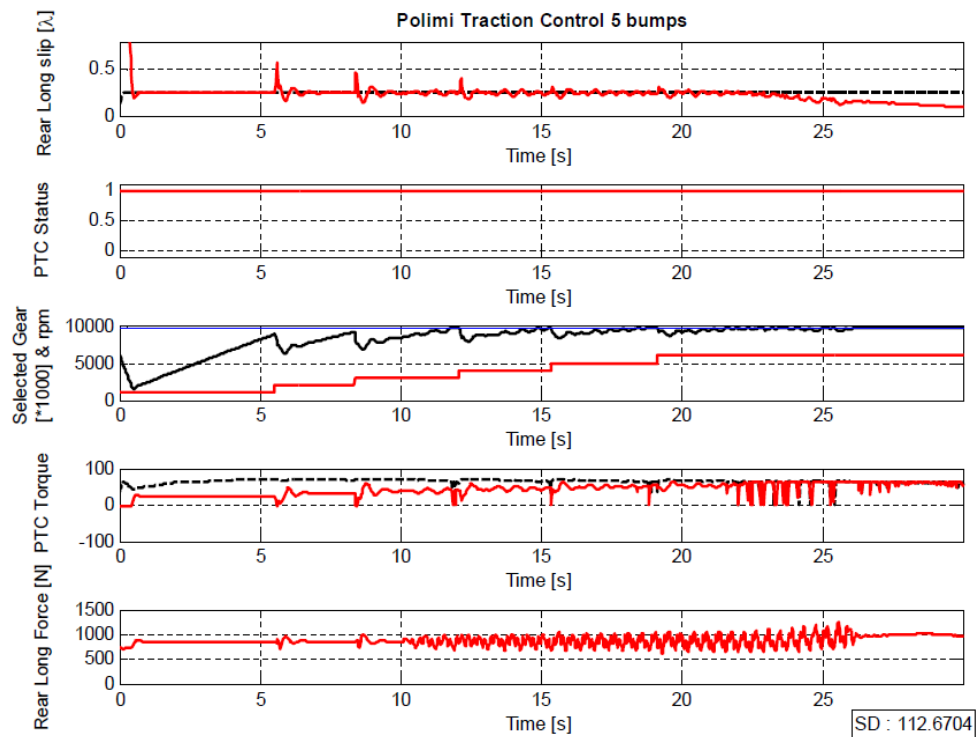
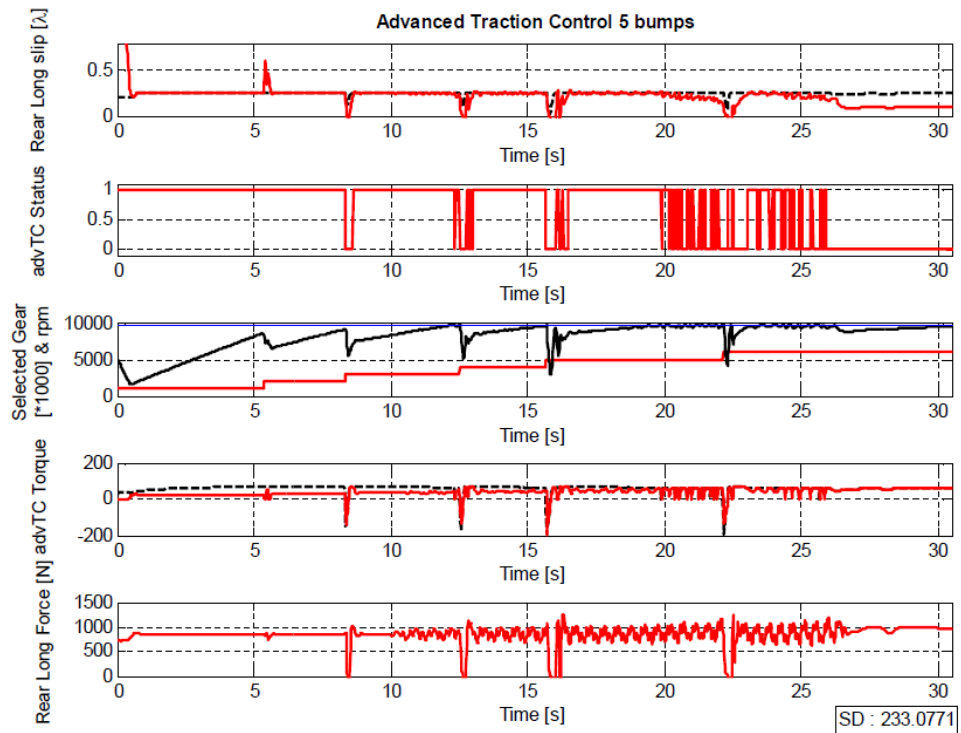


Figura 71 - Provacon advTC (in alto) e PolimiTC (in basso) su irregolarità di 5 cm

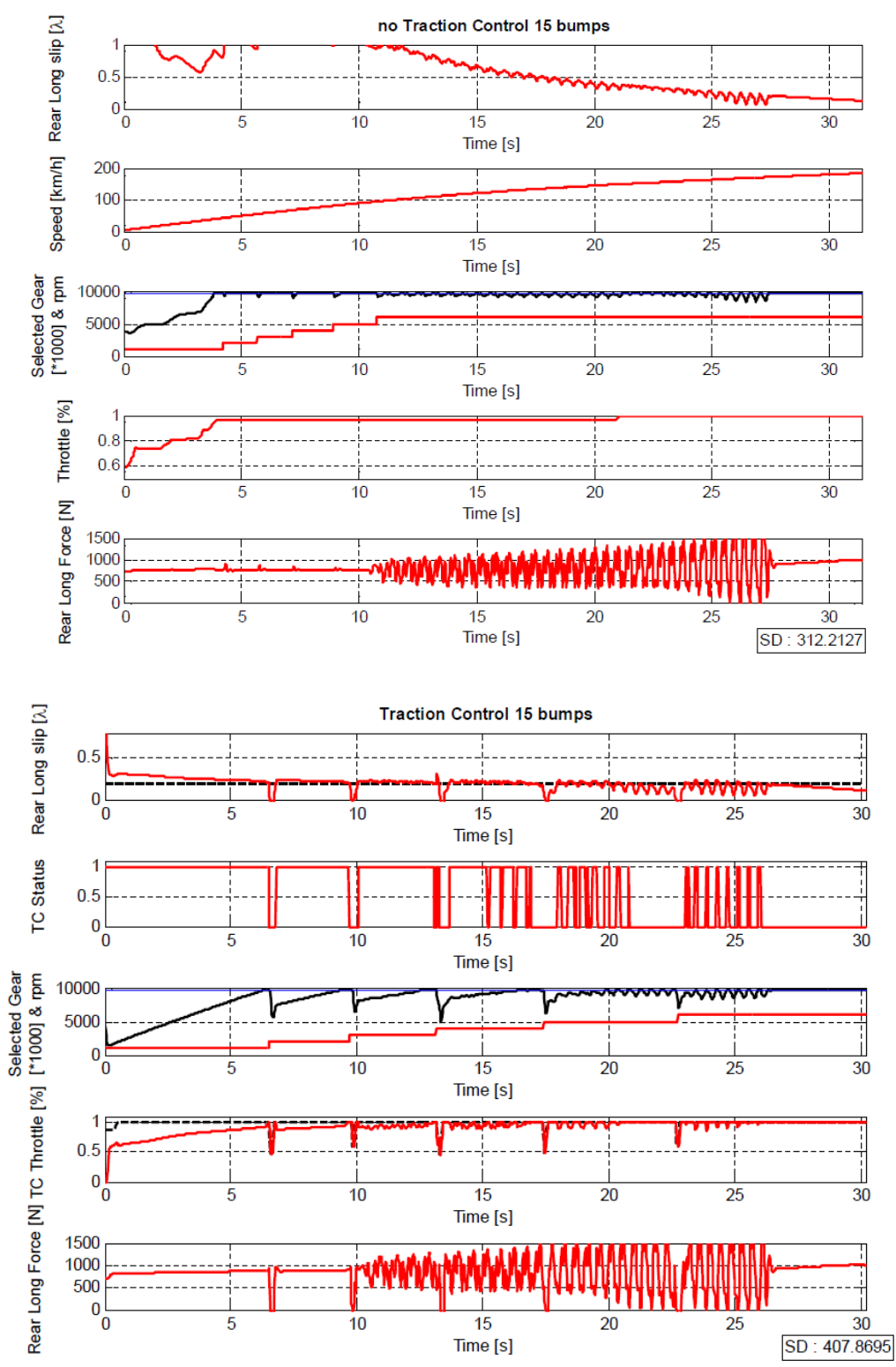


Figura 72 - Prova senza traction control (in alto) e con TC (in basso) su irregolarità di 15 cm

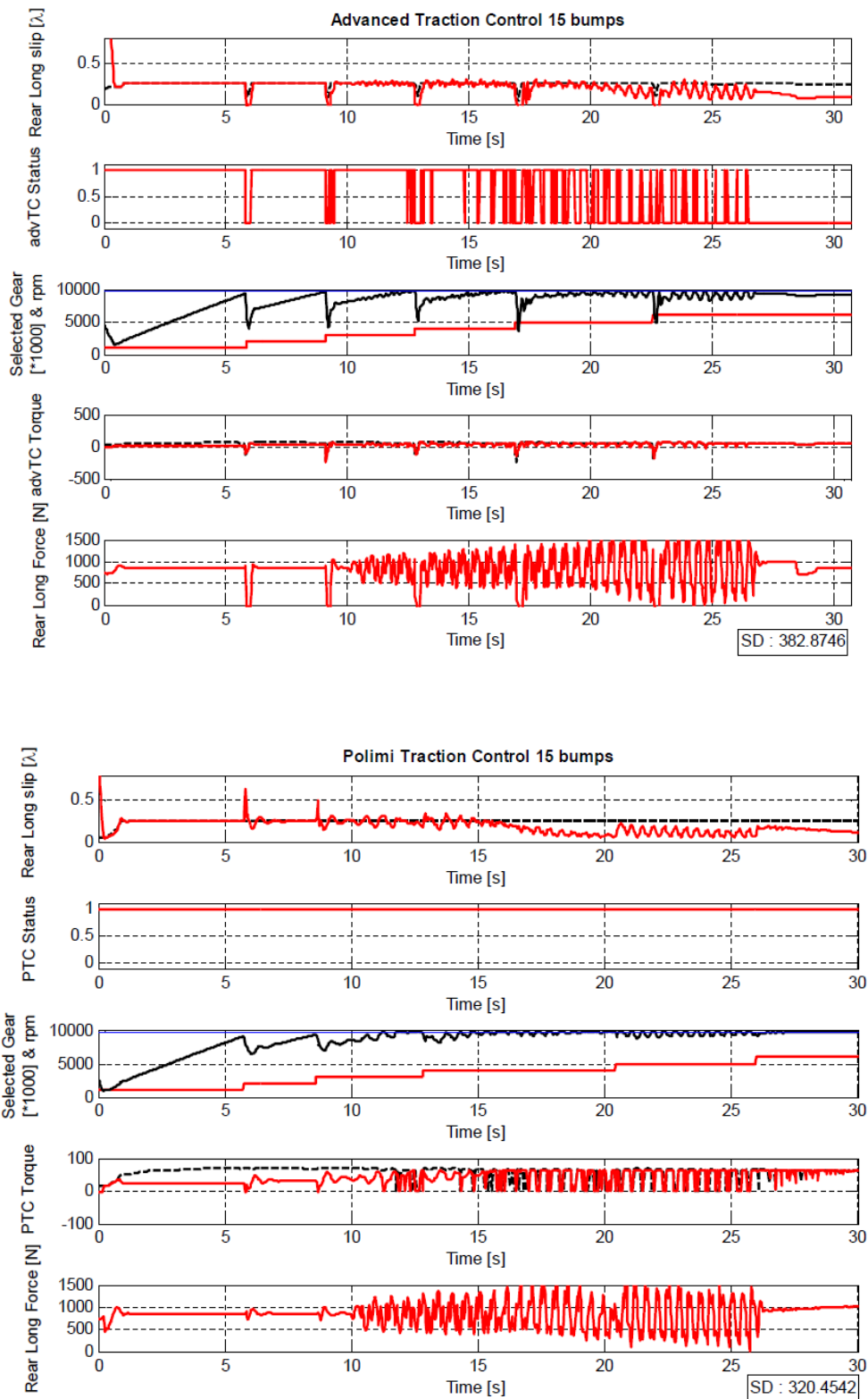


Figura 73 - Provacon advTC (in alto) e PolimiTC (in basso) su irregolarità di 15 cm

Per poter confrontare l'efficacia dell'intervento dei differenti controlli di trazione nelle diverse prove, son stati riportati in Tabella 9 il tempo impiegato per percorrere un chilometro e la deviazione standard calcolata per la forza longitudinale della ruota posteriore, chiamata anche forza di spinta. In

questo modo è possibile valutare l'entità della trazione che assicura il controllo in presenza di scarsa aderenza del fondo stradale e di irregolarità.

| Traction Control Logic | Adherence [D] | Bump [cm] | Time [s] | SD |
|------------------------|---------------|-----------|----------|---------|
| No TC | 0.5 | 0 | 31.414 | 58.434 |
| TC | | | 30.867 | 244.942 |
| advTC | | | 30.903 | 213.394 |
| PolimiTC | | | 29.944 | 51.977 |
| No TC | 0.5 | 5 | 31.418 | 102.643 |
| TC | | | 30.534 | 236.337 |
| advTC | | | 30.510 | 233.077 |
| PolimiTC | | | 29.984 | 112.670 |
| No TC | 0.5 | 15 | 31.398 | 312.213 |
| TC | | | 30.196 | 407.870 |
| advTC | | | 30.712 | 382.875 |
| PolimiTC | | | 30.040 | 320.454 |

Tabella 9 - Prestazioni delle diverse logiche

Si nota subito come il risultato peggiore, in termini di tempo impiegato per percorrere la distanza di un chilometro, si ha, in tutti e tre i casi, per la prova effettuata senza alcun tipo di controllo di trazione. Questo perché lo slip assume un valore elevato per quasi tutta la durata della prova, assicurando così una minor forza longitudinale in grado di far accelerare il veicolo. Tuttavia il range di variazione del tempo impiegato risulta essere limitato ad un piccolo intervallo di poco più di un secondo. Questa motivazione è da ricondurre anche alla forma della curva di Pacejka per lo slip longitudinale. Infatti a bassa aderenza il picco è molto meno accentuato rendendo notevolmente minore il margine di guadagno ottenibile in termini di prestazioni.

Diverso invece il confronto in termini di oscillazione nella forza di spinta. In ogni test la terza tipologia di logica ha permesso di ottenere sempre i risultati migliori e nel minor tempo possibile.

Soprattutto nel caso di strada piana e nelle strade con irregolarità per i casi del Tc e dell'advTC i valori della deviazione standard vengono notevolmente influenzati dagli "upshift spikes" che allargano sensibilmente la campana di Gauss costruita con la distribuzione normale dei dati. Il controllo che risente meno di queste oscillazioni è il controllo sviluppato dal Politecnico del Milano che prevede un controllo di tipo PID che quindi tende a smorzare e ad eliminare gli errori durante il funzionamento. La differenza si riduce nel caso di test effettuati su strada con elevata irregolarità in quanto le variazioni della forza longitudinale dovute alla conformazione della strada fanno passare in secondo piano le oscillazioni delle cambiate.

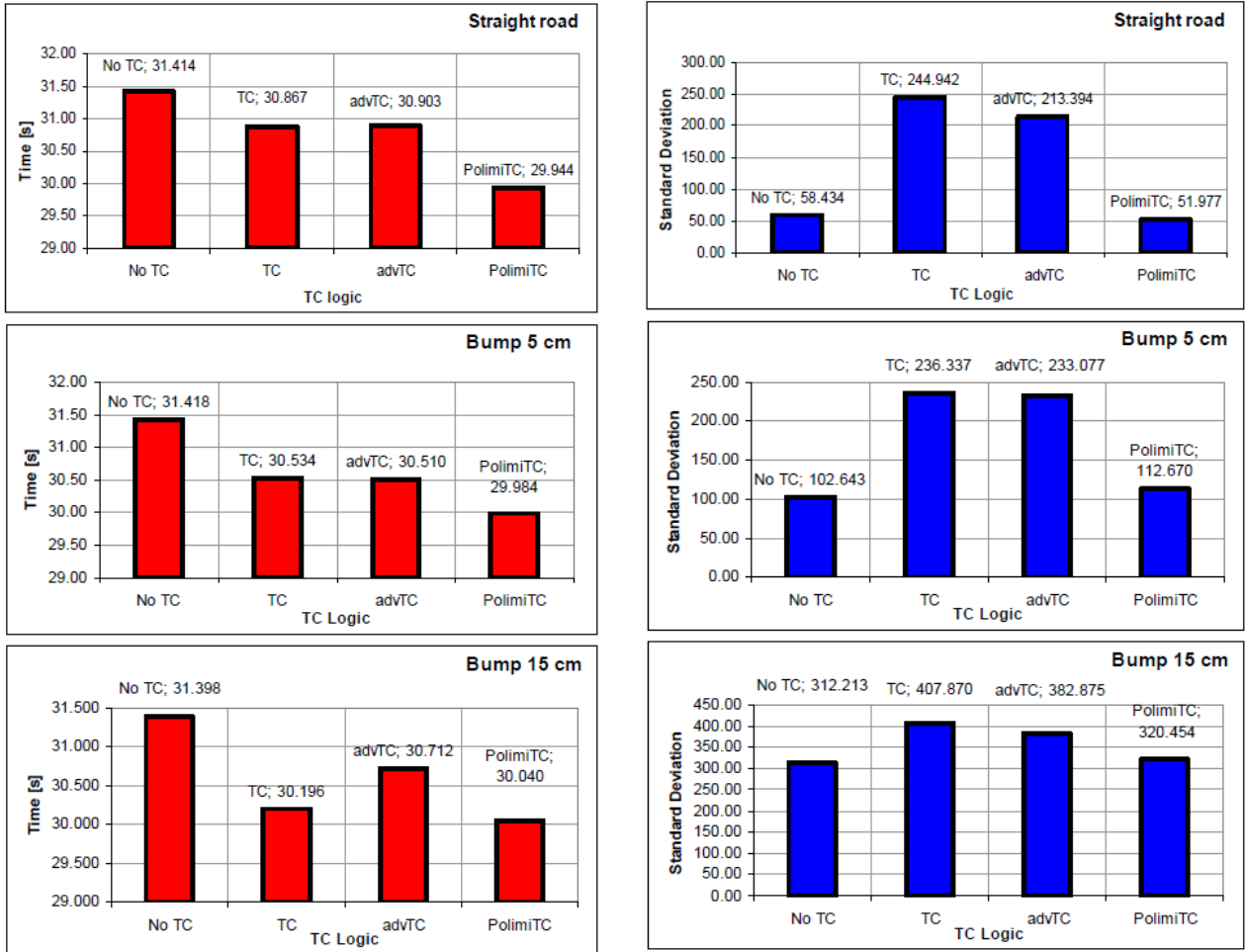


Figura 74 - Grafici riassuntivi delle prestazioni ottenute

Questo vuole essere solamente un esempio di studio che è possibile fare con simulatore. Quello presentato è solamente una parte dello studio svolto sulla tematica traction control, scendendo nel dettaglio a seconda del tipo di analisi da effettuare.

Altro esempio, lo studio delle soluzioni che adattino i parametri di intervento del sistema al variare dell'angolo di rollio, gestendo la parzializzazione con un guadagno non lineare che vale 1 quando il rollio è pari a 0 (condizione ottimale, moto verticale e piena possibilità di accelerazione) e vale 0 per un angolo di rollio pari a circa 54° (Figura 75).

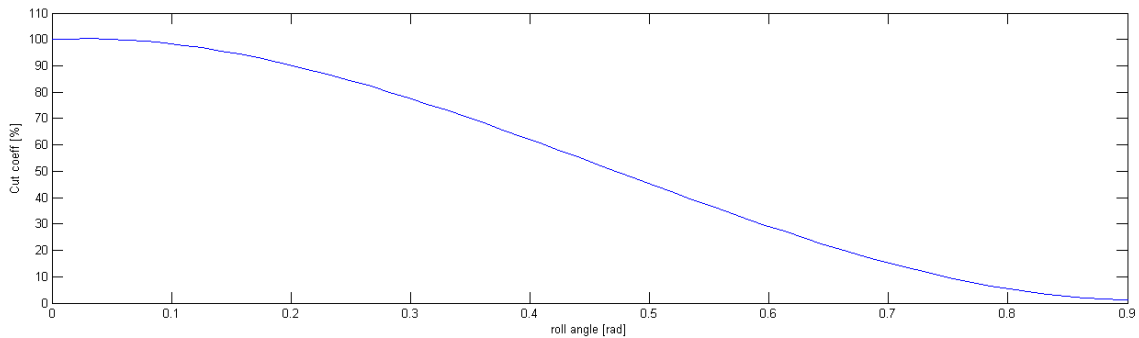


Figura 75 - Legge di taglio RollingTC

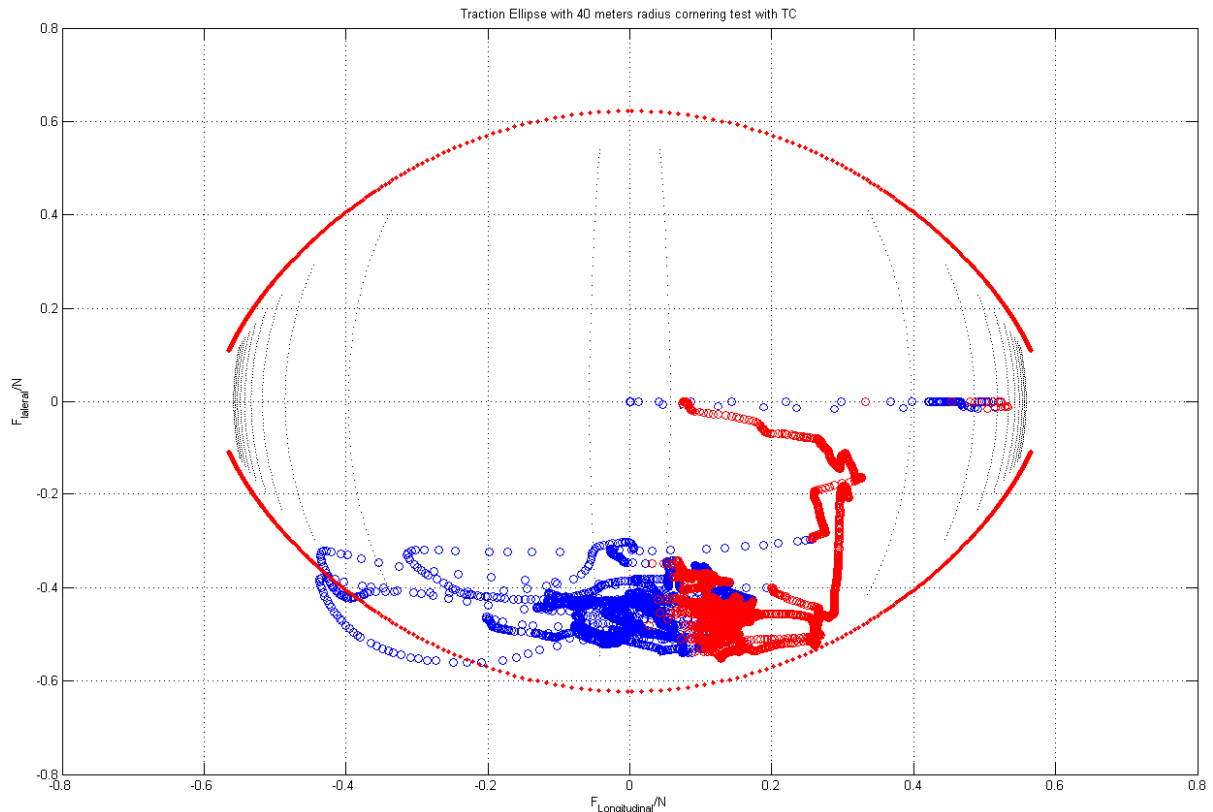


Figura 76 - RollingTC attivo (in rosso) e RollingTC disattivo (blu) in funzione dell'ellisse di trazione

In Figura 76 si riporta, sempre a titolo dimostrativo, i risultati che sono stati cercati con questo studio. In particolare, dai test svolti con bassa aderenza in una manovra tipo steady state, si è voluto evidenziare il potenziale del pneumatico utilizzato con una logica di traction control. Sulle ascisse positive sono riportate tutte le condizioni in cui la ruota posteriore fornisce spinta mentre sulle ascisse negative le condizioni nelle quali la ruota posteriore esercita azione frenante. Nelle ordinate invece viene riportata la capacità del pneumatico di esercitare forze laterali, curve a destra sull'asse positivo mentre curve a sinistra sull'asse negativo.

In rosso vengono evidenziate le condizioni sulle quali il Traction Control risultava essere attivo mentre in blu il controllo risulta essere disattivato. Il risultato è indubbiamente positivo, in quanto la zona rossa più densa si trova sempre all'interno dell'ellisse di trazione e in particolar modo vicino alla capacità massima del pneumatico di generare forza laterale. Questo significa essere vicini al limite del pneumatico oltre al quale si ha scivolamento dello stesso con conseguente probabile caduta.

Nell'asse negativo delle ascisse il controllo non entra mai in azione in quanto si tratta, come già detto, della zona frenante del pneumatico, quindi non sono problemi legati alla trazione del veicolo. Tuttavia si osserva come alcuni punti escano al di fuori dell'ellisse di trazione e questo si traduce in una scivolata al posteriore a causa del freno motore che agisce da freno o addirittura una leggera pinzata ai freni posteriori. Infatti, in condizioni di bassa aderenza bastano basse coppie frenanti per bloccare completamente la ruota, facendo scivolare il retrotreno con la possibile caduta del pilota.

2.6 Il simulatore come strumento per il training

Dalla panoramica svolta finora si intuisce come il simulatore attualmente sia utilizzato più per scopi di ricerca e sviluppo piuttosto che come strumento di training. Tuttavia, viste anche le statistiche sugli incidenti stradali di questi ultimi anni e vedendo purtroppo il quantitativo di veicoli a due ruote coinvolti, sono state ricevute forti pressioni per destinare uno strumento come quello sviluppato dal MDRG alla formazione, inizialmente attraverso campagne di sensibilizzazione. L'obiettivo sarebbe quello di dotare le scuole di guida di strumenti di questo tipo nei quali effettuare le prime prove pratiche e verificare la conoscenza del codice stradale, ritenendo che un approccio di questo tipo è di sicuro più coinvolgente dei metodi attualmente adoperati.

Il concetto di simulatore come strumento di formazione specifica sta prendendo sempre più piede nelle applicazioni più svariate e nelle quali i rischi di danni a persone o cose sono molto elevati. Ad esempio per veicoli speciali utilizzati nelle foreste o boschi questi simulatori sono distribuiti direttamente dalle case produttrici dei veicoli stessi (Figura 77).

REALE



VIRTUALE



Figura 77 - Esempio di simulatore utilizzato per formazione specifica

Esistono già simulatori per le applicazioni più varie, dai trattori stradali ai veicoli militari cingolati passando per macchine operatrici, gru, elicotteri per il trasporto pesante, sottomarini ecc. Ma di simulatori di motocicli per il training solo pochi elementi sono reperibili nel mercato. Si è così deciso di svilupparne uno meno complesso e alla portata anche dei piccoli enti o addirittura privati.

3 STUDIO DI UN NUOVO SIMULATORE DI GUIDA

Quando si pensa al simulatore di guida si associa l'idea di un videogioco più realistico di quelli comuni, aspettandosi anche interazioni fisiche oltre che visive e acustiche. Tuttavia il livello di fedeltà che è in grado di ricreare è l'elemento che fa la differenza tra simulatori per scopi ludici e simulatori utilizzati per la ricerca.

Negli ultimi anni son sempre più diffusi i simulatori, soprattutto automobilistici, in grado di ricreare condizioni di guida vicine alla realtà e per questo motivo cominciano ad attirare l'attenzione di enti ed associazioni con finalità che vanno ben oltre il semplice divertimento. Portiamo l'esempio della Finlandia, in particolare la Finnish Driving School Association ha investito su questo strumento, attrezzando 500 scuole con 90 simulatori di auto, coinvolgendo ben 700 istruttori. Quest'iniziativa ha coinvolto quasi trentamila studenti e tutto questo è stato fatto per aumentare la sicurezza alla guida del conducente. La combinazione simulatore-istruttore permette un apprendimento molto più efficace del codice stradale e del comportamento da tenere alla guida di veicoli, ovviamente in condizioni di totale sicurezza.

Anche la Grecia vanta un'iniziativa simile, quella portata avanti dal CERTH/HIT e che consta di un simulatore di guida per auto, trasportabile. Con questa soluzione è possibile presenziare ad eventi appositamente organizzati con il proprio simulatore solamente con l'ausilio di un mezzo di trasporto come può essere un furgone.

Di diversa concezione la campagna di eventi organizzata dall'associazione italiana ANIA (Fondazione per la Sicurezza Stradale) reclamizzata come "smANIA di sicurezza". Anche in questo caso si tratta di un simulatore di guida per automobili di tipo trasportabile, quindi con la possibilità di poter essere trasportato da un evento all'altro. In questi eventi il conducente viene istruito sul comportamento da tenere in condizioni di emergenza e condizioni ambientali sulle quali non si è soliti guidare (ad esempio su strade bagnate o addirittura ghiacciate).

Tutte queste sono iniziative rivolte alla sicurezza che riguardano però il settore automobilistico. Questo perché i simulatori di motocicli sono molto meno diffusi, addirittura inesistenti se non a livello di ricerca. Da qui l'idea, disponendo di un simulatore che si può definire come lo stato dell'arte dei simulatori di guida motociclistici, di sviluppare un simulatore di guida da poter utilizzare come strumento per il training, per aumentare le capacità di guida soprattutto per i novizi (sono questi infatti i soggetti più a rischio e quelli maggiormente coinvolti negli incidenti stradali) e che sia in grado di aumentare la sicurezza alla guida nel pieno rispetto del codice stradale.

Per poter concretizzare quest'idea è stato necessario fare uno studio dei target da raggiungere, individuare la strada da seguire e soprattutto valutare se fosse fattibile in base alle condizioni economiche e di forza lavoro delle quali si dispone.

3.1 Lo studio di fattibilità

Per poter definire un “piano d’azione” è stato necessario stilare una lista di obiettivi da raggiungere e cercare di definire il più possibile i vincoli del progetto, già dalla fase iniziale.

Ovviamente alcuni risultavano interconnessi tra di loro mentre quelli a sé stanti sono stati studiati approfonditamente, prima di scegliere la strada da seguire.

I requisiti fondamentali del nuovo simulatore consistono in:

- Ingombri ridotti
- Costo ridotto
- Buon compromesso prestazioni/sensazioni
- Sistema modulare

Il punto di partenza è stato lo studio approfondito delle caratteristiche del ben più complicato simulatore SafeBike a 5 gradi di libertà, presente nel laboratorio del Motorcycle Dynamics Research Group dell’Università di Padova.

3.1.1 Scelta dei comandi di Input

Nella sua versione più recente il SafeBike viene comandato, a livello di input, tramite i controlli di acceleratore, del freno anteriore e posteriore, della frizione, del selettore del cambio, del sensore di coppia sul manubrio, del sensore di coppia sulle pedane e del sensore di coppia sulla sella. L’insieme rappresenta il massimo livello raggiungibile in fatto di interazione uomo-simulatore ma non risulta essere né di semplice costruzione e neppure economico.

Sono stati scelti così i comandi di input indispensabili per poter condurre un veicolo a due ruote:

- Acceleratore;
- Freno anteriore e posteriore;
- Sensore di coppia sul manubrio;

Nonostante il numero ridotto di grandezze da considerare esiste un veicolo che si riconosce appieno in queste caratteristiche: è lo scooter, veicolo sempre più diffuso in ambiente urbano e soprattutto tra i giovani.

Destinando il simulatore ad un utilizzo urbano e non prettamente sportivo, è stato possibile trarre il vantaggio di assicurarsi il ridotto movimento del pilota sul veicolo stesso, in quanto difficilmente si vedrà un utilizzatore di scooter spostare il corpo all’interno della curva come siamo abituati a vedere nelle competizioni, evitando così tutte le complicazioni legate all’interpretazione dello stile di guida del pilota da parte del modello matematico.

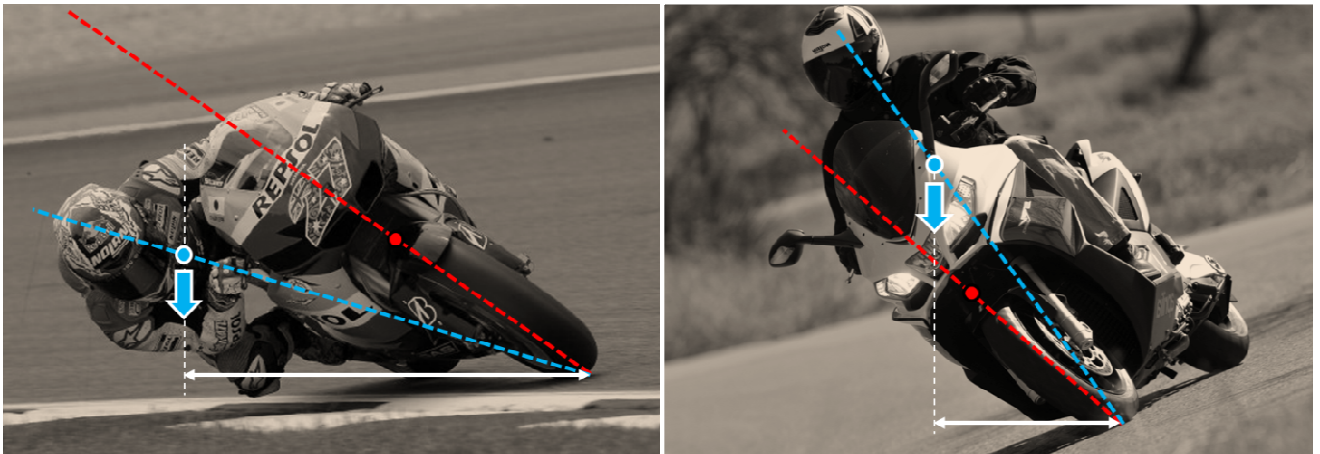


Figura 78 – Comportamenti diversi a seconda dell'utilizzo

Come si vede in Figura 78 a sinistra il pilota si sposta con il corpo all'interno della curva in modo da aumentare il braccio della forza peso che permette di generare un momento che si oppone a quello generato dalla forza centrifuga. Nell'immagine di destra invece, la velocità di percorrenza in curva con uno scooter è minore, quindi anche i momenti in gioco sono minori ed il pilota si comporta in modo "passivo" rispetto al caso precedente. Si osservi, tra l'altro, come l'inclinazione (rispetto alla verticale) del pilota sia addirittura minore di quella del veicolo.

Tutte queste considerazioni hanno permesso di consolidare l'idea base di sviluppare un simulatore di guida motociclistico trasportabile ed in particolare di scooter.

3.1.2 Scelta dei gradi di libertà

La scelta del layout del sistema di movimentazione è stata una fase abbastanza discussa anche con i colleghi del gruppo di ricerca, in quanto risultava essere il frutto di un compromesso tra fedeltà sensoriale ricreata e costo/complessità del sistema.

Anche in questo caso, il punto di partenza consiste nel SafeBike, simulatore in grado di riprodurre il moto di rollio, beccheggio, imbardata, spostamento laterale e rotazione del manubrio attorno all'asse di sterzo. Una così completa configurazione richiede però un'architettura molto complessa del sistema in quanto sono movimenti relativi tra i diversi componenti. In Figura 79 è riportato il modello dello schema del SafeBike dove è possibile riconoscere, oltre al telaio vincolato a terra sulle colonne A2 ed A3, tre diversi telai. In particolare il telaio blu rispetto al telaio fisso fornisce il moto di traslazione laterale ed imbardata, il telaio azzurro rispetto a quello blu fornisce il moto di rollio, il telaio color ciano rispetto a quello azzurro fornisce il moto di beccheggio ed il manubrio rispetto al telaio ciano

fornisce la rotazione del manubrio. Questa soluzione permette di ricreare la movimentazione agendo indipendentemente sui singoli motori e quindi disaccoppiando tutte le leggi del moto. Per contro ne risente la complessità del sistema e la rigidità complessiva dello stesso perché, dovendo passare ogni volta attraverso delle coppie cinematiche, rotoidali o prismatiche a seconda del caso, piccoli giochi vanno a sommarsi su quelli precedenti riducendo, così, la rigidità del sistema. In questo modo anche il feedback ottenuto fisicamente viene alterato dalla realtà in quanto si manifestano, seppur piccoli, fenomeni inerziali chiaramente percepiti dal pilota come non reali.

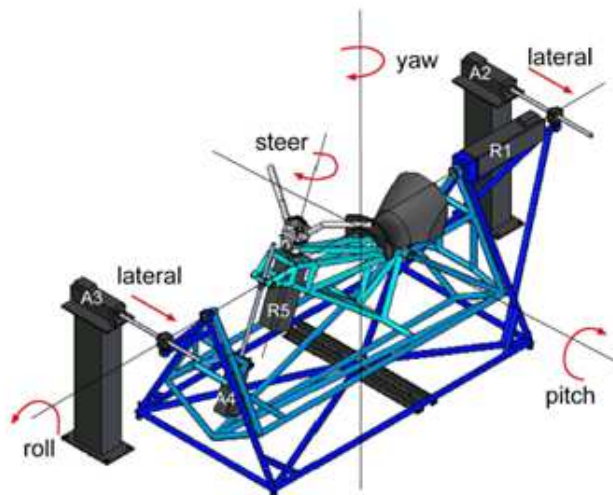


Figura 79 – Gradi di libertà simulatore SafeBike

L'obiettivo è stato a questo punto semplificare i gradi di libertà e allo stesso tempo trovare una soluzione che permetta di avere una buona rigidità della struttura anche a costo di complicare leggermente le leggi del moto da assegnare agli attuatori, dovendo ricreare delle combinazioni lineari di movimento dovute all'accoppiamento dei singoli movimenti.

Passando allo studio dei singoli movimenti, sono stati ritenuti non indispensabili i gradi di libertà di spostamento laterale e rotazione attorno all'asse di sterzo del manubrio, così la scelta è ricaduta sui tre gradi di libertà principali:

- φ grado di libertà di rollio;
- μ grado di libertà di beccheggio;
- ψ grado di libertà di imbardata;

Partendo da questi primi requisiti sono cominciate a nascere le prime idee sul cinematismo di attuazione del sistema, per poter fare delle prime considerazioni su vantaggi e svantaggi di ogni layout. Le idee sono state numerose ma in nessun caso emergeva quella ideale, soprattutto quando venivano

fatte le stime del possibile costo di realizzazione. Per poter riprodurre movimenti attorno ai 3 assi principali servono due o tre attuatori, a seconda della configurazione considerata (se accoppiare o disaccoppiare i moti da riprodurre) e per ognuna delle idee considerate si poneva il problema della realizzazione. Trattandosi di strutture realizzate da zero ci sarebbero state complicazioni legate anche alle lavorazioni meccaniche da eseguire, non potendo disporre di un supporto tecnico adeguato.

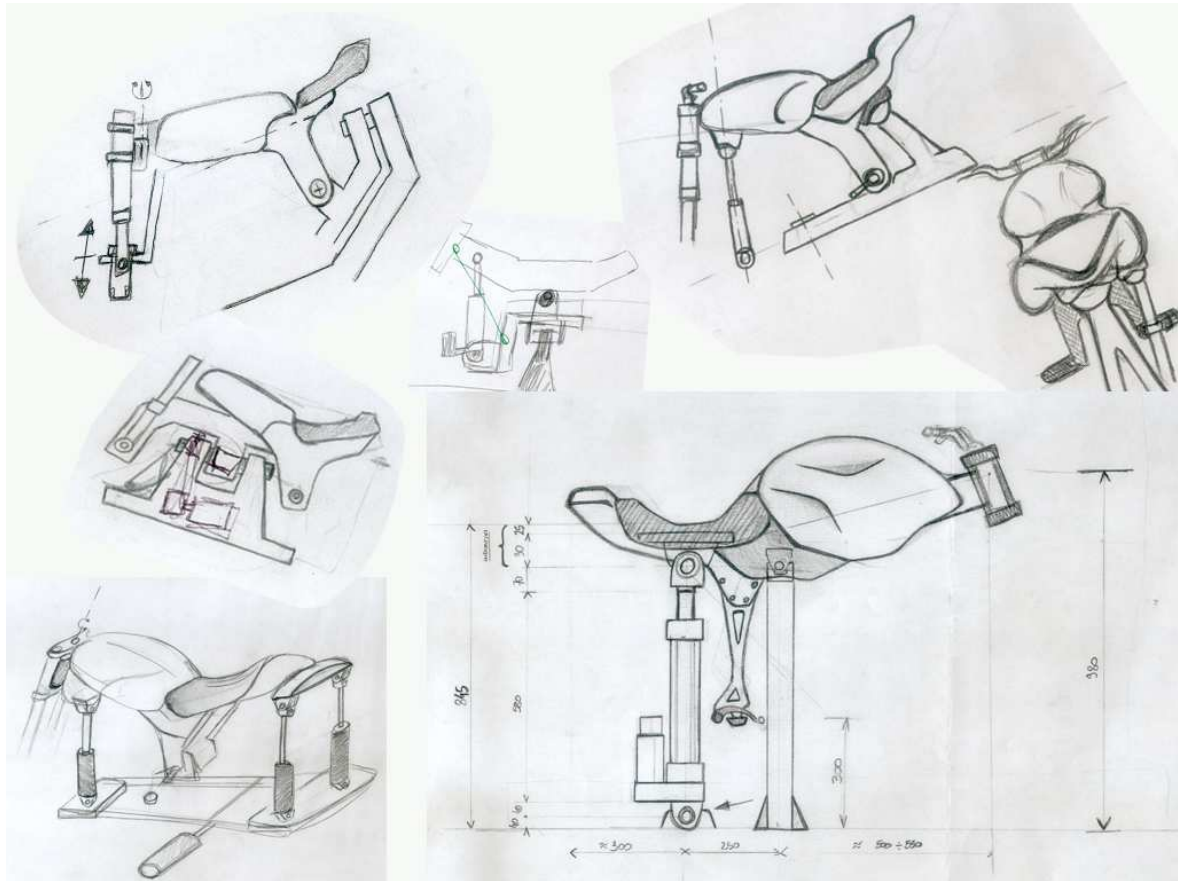


Figura 80 – possibili configurazioni di sistemi a 3 gdl

Per questi motivi si è deciso di cambiare completamente strada e semplificare ulteriormente il sistema. Il movimento attorno all'asse di imbardata è stato il primo ad essere escluso e successivamente anche il movimento di beccheggio. Questo perché il movimento principale che contraddistingue i motocicli è proprio il moto di rollio (si pensi al termine "piega" in gergo motociclistico) ed inoltre gli angoli sia di imbardata che di beccheggio sono di entità minore rispetto a quello di rollio.

Con questa limitazione sicuramente il feedback sensoriale percepito dal pilota alla guida sarà di più basso livello ma allo stesso tempo permette di semplificare notevolmente la struttura di supporto, il sistema di movimentazione e lo studio del cinematismo, abbattendo quindi i costi di materiale e lavorazioni. Inoltre, bisogna tener presente che escludendo questi movimenti dalla catena cinematica di attuazione, la rigidità della struttura verrà aumentata ed i moti di beccheggio e rollio saranno riprodotti ugualmente dal modello dinamico e passati al pilota attraverso un feedback visivo.

L'idea iniziale, tuttavia, non è stata esclusa completamente ed i calcoli che hanno interessato il dimensionamento degli attuatori hanno tenuto in considerazione un futuro sviluppo ed estensione ad un modello a 2 gdl per ritornare successivamente alla condizione originaria di 3 gdl.

3.1.3 Scelta del sistema di attuazione e controllo

Definito, così, il moto di rollio come unico movimento da ricreare nel simulatore si è presentata la scelta della tipologia di attuatore da utilizzare. L'idea dell'attuazione oleodinamica e pneumatica è stata scartata in partenza per motivi di costo, ingombri e necessità di organi ausiliari per il corretto funzionamento.

Ancora una volta si è partiti dal simulatore SafeBike nel quale era stato realizzato un sistema di movimentazione assi tramite motori brushless con viti a ricircolo di sfere e controllo con protocollo di comando Sercos, ampiamente diffuso nelle macchine CNC e descritto in [9]. Una soluzione di questo tipo presenta costi proibitivi per il budget disponibile, componenti elettronici dedicati e complessità ritenuti non necessari per un sistema come quello richiesto per questo simulatore.

Per la scelta della strada da seguire sono stati contattati diversi produttori di attuatori elettromeccanici in modo da poter fare considerazioni specifiche sulla gamma di prodotti disponibili e reperire il maggior numero di informazioni, materiale e documentazione.

3.2 La progettazione

Avendo definito le linee guida da seguire per lo sviluppo del simulatore, si sono calcolati dei parametri legati alla dinamica del motociclo dai quali ricavare poi le caratteristiche necessarie richieste dagli attuatori.

Per non vincolare il progetto alle semplificazioni assunte e quindi rendere possibile un futuro upgrade dell'intero sistema, il dimensionamento degli attuatori è stato condotto su un modello di riferimento a più gradi di libertà, come mostrato in Figura 81. Sono state fissate delle geometrie di riferimento per poter allocare le coppie cinematiche e poter così calcolare momenti e forze in gioco. Il modello resta comunque flessibile essendo questo parametrizzato nelle sue grandezze principali.

Il modello considerato permette i gradi di libertà di rollio, beccheggio, imbardata e traslazioni verticali e sono ricreati grazie all'utilizzo di tre attuatori elettromeccanici.

Si è cercato di mantenere gli assi di rotazione dei singoli movimenti il più vicino possibile al baricentro del sistema simulatore-pilota in modo da ridurre le coppie in gioco, richieste ai motori.

Le manovre che sono state considerate come punto di partenza per ricavare le prestazioni annesse sono state:

- Lateral Fall
- Weave
- Wheelbase effect

- Pitch
- Roll max & Pitch max

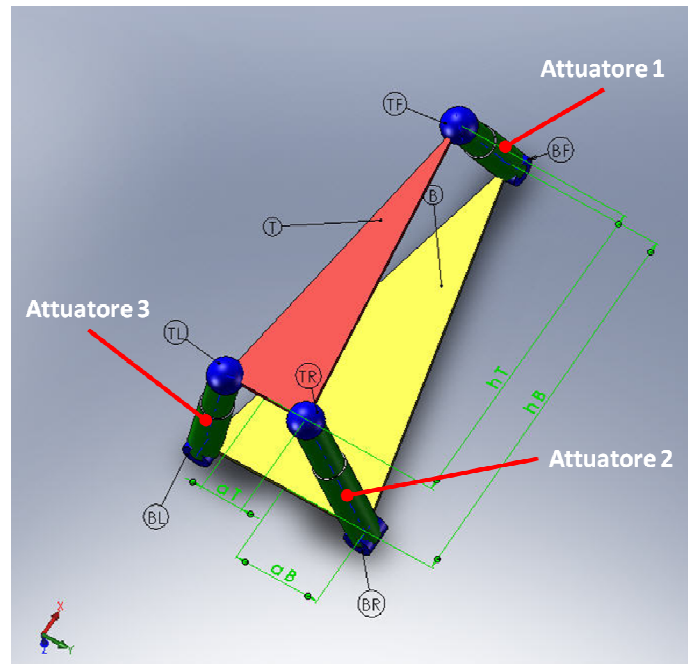


Figura 81 – Modello del simulatore a 3 gdl

In Tabella 10 sono raccolti i calcoli principali per ottenere le caratteristiche per gli attuatori e si può osservare come, evidenziati in rosso, siano i valori dei parametri fissati in partenza (quindi come esigenza di prestazione) mentre i valori evidenziati in verde siano quelli ricavati (quindi come richiesta di caratteristica).

Ad esempio, considerando la prima manovra, *Lateral Fall (caduta laterale)*, si osserva come sia stato introdotto come requisito un angolo di rollio di 18° ed una velocità angolare di rollio di $60^\circ/s$.

In questo modo si ritiene che la dinamica ricreata dal simulatore sia sufficiente per ricreare sensazioni simili legate ad una caduta laterale nella realtà.

Da queste richieste è possibile calcolare il periodo (o sottomultiplo del periodo nel caso di interesse) partendo dalle semplici equazioni del moto armonico:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad \text{e} \quad \dot{\varphi}(t) = \omega \varphi_0 \cdot \text{cos}(\omega t)$$

Per semplificare i calcoli e poter così stimare l'ordine di grandezza della frequenza, consideriamo il caso di piccoli spostamenti per cui $\text{sen}(\omega t) = 0$ e $\text{cos}(\omega t) = 1$ da cui:

$$\dot{\varphi}_0 = \varphi_0 \omega = \varphi_0 (2\pi f)$$

e

$$f = \frac{\dot{\varphi}}{2\pi\varphi}$$

Il calcolo della frequenza viene analizzato e considerato in particolar modo per la riproduzione di un fenomeno come il *Wheelbase Effect* o per simulare l'instabilità nota con il nome di *Weave*. In questo modo infatti si ricava il valore della frequenza che l'attuatore dovrà essere in grado di riprodurre. Ricavando successivamente l'accelerazione (come termine assoluto) derivando la $\dot{\phi}$ ottengo:

$$\ddot{\phi}_0 = \phi_0 \cdot \omega^2 = \phi_0(2\pi f)^2$$

Così facendo sono quindi in grado di conoscere gli spostamenti, le velocità e le accelerazioni angolari oltre alle frequenze dei vari moti considerati. Successivamente avendo impostato delle dimensioni per la geometria del sistema e dei valori simili a quelli reali per quanto riguarda i momenti d'inerzia, sono in grado di stimare l'entità del carico richiesto all'attuatore, la corsa, la velocità e l'accelerazione lineare.

In riferimento alla Figura 81, suppongo ora l'attuatore 1 di lunghezza fissa, che equivale ad una colonna alla cui estremità sia presente un giunto cardanico; in questo modo permetto solamente 2 gradi di libertà, il rollio e il beccheggio. In particolare, quando l'attuatore 2 e l'attuatore 3 si muovono in fase, si genera un moto di beccheggio, mentre se vengono mossi in controfase si genera un moto di rollio. Una combinazione lineare dei due movimenti genererà, sul simulatore, un movimento che è la somma dei due moti base. Questa configurazione sarà sicuramente lo step successivo che coinvolgerà il simulatore, passando da uno a due gradi di libertà.

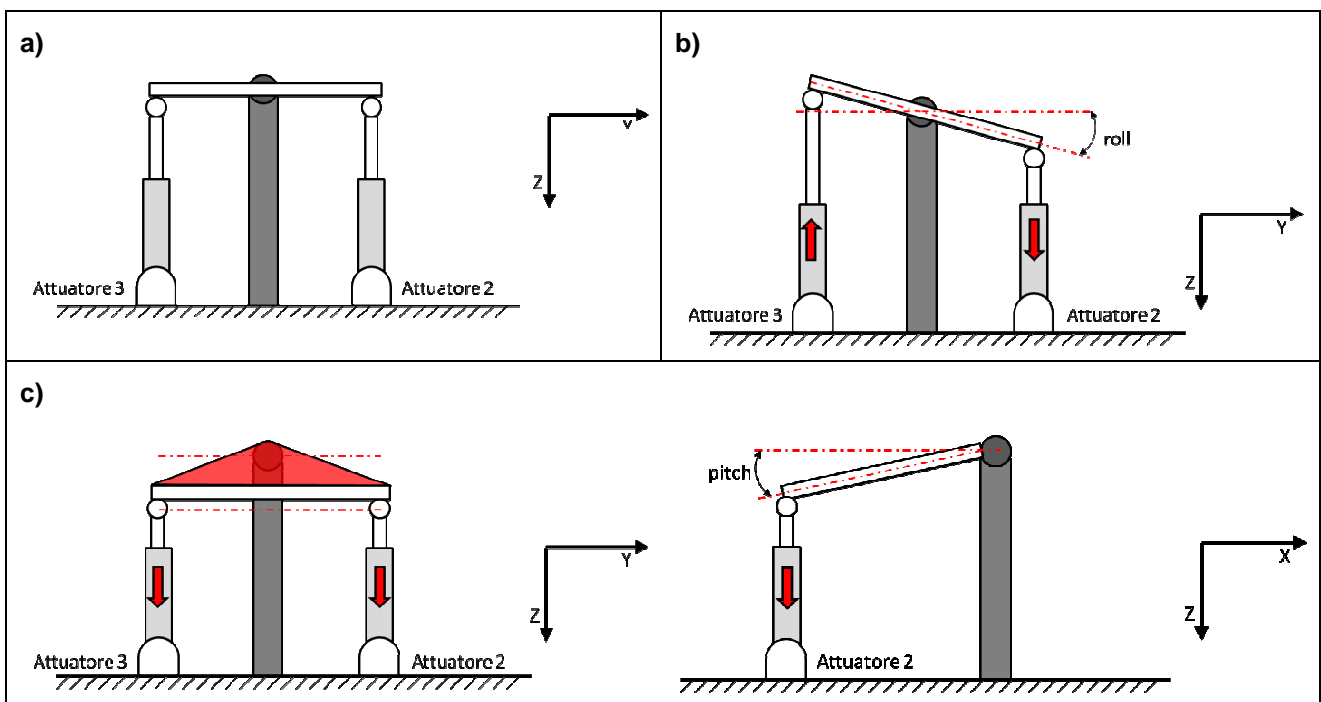


Figura 82 – Configurazioni modello base: a) statica a 0; b) attuatori in controfase, moto di rollio; c) attuatori in fase, moto di beccheggio

| | | Inertia | | | | roll | | | | | |
|------------------|-----------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------|--------------------|---------|------------------------|-----------------------|
| Manoeuvre | Interasse Roll [m] | Interasse Pitch [m] | I _{xx} | I _{yy} | I _{zz} | φ ₀ | | φ _{0_dot} | | φ _{0_dot_dot} | |
| | | | | | | [deg] | [rad] | [deg/s] | [rad/s] | [deg/s ²] | [rad/s ²] |
| Lateral fall | 0.15 | 0.25 | 15 | 30 | 30 | 18.00 | 0.31 | 60.00 | 1.05 | 200.00 | 3.49 |
| Weave | | | | | | 2.00 | 0.03 | 31.42 | 0.55 | 493.48 | 8.61 |
| Wheelbase effect | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pitch | | | | | | | | | | | |
| Max_pitch | | | | | | | | | | | |
| Max_roll | | | | | | 17.57 | 0.31 | 190.99 | 3.33 | 2075.93 | 36.23 |

| | | pitch | | | | | | Actuator | | | |
|------------------|----------------|-------|--------------------|---------|------------------------|-----------------------|------|----------|--------|----------|--------------|
| Manoeuvre | μ ₀ | | μ _{0_dot} | | μ _{0_dot_dot} | | f | F | stroke | velocity | acceleration |
| | [deg] | [rad] | [deg/s] | [rad/s] | [deg/s ²] | [rad/s ²] | | | | | |
| Lateral fall | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.53 | 349.07 | 0.046 | 0.157 | 0.524 |
| Weave | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.50 | 861.29 | 0.005 | 0.082 | 1.292 |
| Wheelbase effect | 2.00 | 0.03 | 37.70 | 0.66 | 710.61 | 12.40 | 3.00 | 1488.30 | 0.009 | 0.164 | 3.101 |
| Pitch | 13.75 | 0.24 | 60.00 | 1.05 | 261.80 | 4.57 | 0.69 | 548.31 | 0.060 | 0.262 | 1.142 |
| Max_pitch | 13.75 | 0.24 | 114.59 | 2.00 | 954.93 | 16.67 | 1.33 | 2000.00 | 0.060 | 0.500 | 4.167 |
| Max_roll | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.73 | 3623.19 | 0.046 | 0.500 | 5.435 |

Tabella 10 – Calcolo delle caratteristiche richieste per gli attuatori

Stimati quindi i carichi necessari per raggiungere le prestazioni prefissate, è stata eseguita una ricerca sul web dei prodotti disponibili sul mercato.

Al termine, sono stati organizzati degli incontri con l'azienda AutomationWare, con sede vicina alla Facoltà di Ingegneria Meccanica dell'Università di Padova anche nell'ottica di una futura assistenza e possibile sviluppo del simulatore. Infatti, trattandosi di un'applicazione particolare, la collaborazione con l'azienda è stata fondamentale.

Il prodotto consigliato da AutomationWare è un attuatore elettromeccanico che fa parte della linea MechForce. Si tratta di un prodotto per applicazioni pesanti, nelle quali devono essere garantite le massime prestazioni.

La procedura di dimensionamento dell'attuatore è stata eseguita con la supervisione di un ingegnere di sviluppo prodotto dell'azienda, in quanto i calcoli da loro richiesti portavano alla determinazione della vita dell'attuatore in cicli o in chilometri percorsi. Per il simulatore invece è stata fatta una stima in ore di utilizzo, venendo utilizzato in modo non continuativo ma "ad evento". Inoltre, considerazione non trascurabile, i loro calcoli consideravano un utilizzo dell'attuatore su tutta la corsa prestabilita mentre in questo caso le corse sono limitate nell'intorno della posizione di zero del simulatore.

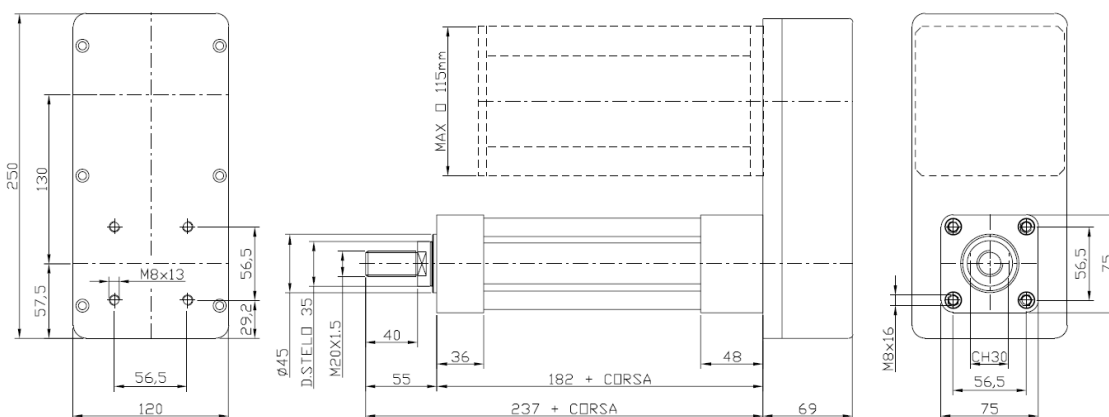
Le specifiche soddisfatte dall'attuatore sono le seguenti:

- Velocità lineare massima : 0.5 m/s
- Accelerazione lineare massima 2 m/s²
- Carico statico 800 N
- Carico dinamico massimo 3000 N
- Corsa 350 mm

Il prodotto che soddisfa queste caratteristiche e la durata di 5000 ore da noi richiesta ricade nel MechForce 63, con vite a ricircolo di sfere 20*10mm (10 mm corrisponde al passo della vite).

Le dimensioni principali dell'attuatore sono riportate nella figura sottostante.

Motorizzazione rinviata per motori con quadro max 115mm



MECHFORCE 63

| Vite a ricircolo di sfere | | ISO G7 | | |
|--|----------|---------|---------|---------|
| Diametro x Passo | [mmxmm] | 25x5 | 25x10 | 25x25 |
| Precisione fino a 300mm | [mm] | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| Carico C ₀ e C _{din} cuscinetti e viti | | | | |
| Carico statico C ₀ viti | [N] | 40.900 | 32.700 | 32.200 |
| Carico statico C ₀ cuscinetti | [N] | 25.000 | 25.000 | 25.000 |
| Carico dinamico C _{din} viti | [N] | 15.700 | 16.500 | 21.000 |
| Carico dinamico C _{din} cuscinetti | [N] | 29.800 | 29.800 | 29.800 |
| Velocità massima (motore 3000rpm rapporto i=1) | | | | |
| Velocità massima | [mm/sec] | 250 | 500 | 1.250 |
| Corsa massima | [mm] | 600 | 600 | 600 |
| Motorizzazione Diretta (Rapp. Rid. i=1) | | | | |
| Corsa lineare per 1 giro albero motore | [mm] | 5 | 10 | 25 |
| Fattore di forza (N di spinta per 1 Nm di coppia) | | 1.068 | 534 | 267 |
| Motorizzazione rinviata (Rapporto Rid. i=1) | | | | |
| Corsa lineare per 1 giro motore i=1 | [mm] | 5 | 10 | 25 |
| Fattore di forza (N di spinta per 1 Nm di coppia) | [N/Nm] | 1.010 | 505 | 251 |
| Motorizzazione con RE (Rapp. Rid. i=xx) | | | | |
| Corsa lineare per 1 giro albero motore | [mm] | 5/xx | 10/xx | 25/xx |
| Velocità massima (motore 3000rpm rapporto i=xx) | [mm/sec] | 250/xx | 500/xx | 1250/xx |
| Fattore di forza (N di spinta per 1 Nm di coppia) | [N/Nm] | 1000*xx | 500*xx | 200*xx |
| Percorrenza teorica con motorizzazione diretta | | | | |
| Carico assiale | | 3.000 | 3.000 | 3.000 |
| Coppia motrice corrispondente | [Nm] | 2,8 | 5,6 | 11,2 |
| Percorrenza teorica della vite | [km] | 716,6 | 1.663,8 | 6.860,0 |
| Carico assiale | | 6.000 | 6.000 | 6.000 |
| Coppia motrice corrispondente | | 5,6 | 11,2 | 22,5 |
| Percorrenza teorica della vite | | 89,6 | 208,0 | 857,5 |
| Carico assiale | | 9.000 | 9.000 | 9.000 |
| Coppia motrice corrispondente | [Nm] | 8,4 | 16,9 | 33,7 |
| Percorrenza teorica della vite | [km] | 26,5 | 61,6 | 254,1 |

CARATTERISTICHE TECNICHE ATTUATORE

Figura 83 - Caratteristiche tecniche attuatore MechForce63

Assieme all'attuatore elettromeccanico la stessa azienda ha fornito anche il motore Brushless ed il relativo drive di controllo.

| Motorizzazioni e driver Brushless suggerite | | | | | | | | | | |
|---|------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------|---------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|
| Modelli | L | Inerzia | L _{con freno} | Inerzia | coppia | N. giri | Inom (1x230Vac) | Modello driver | Inom (3x400Vac) | Modello driver |
| | [mm] | [10 ⁻⁶ kgm ²] | [mm] | [10 ⁻⁶ kgm ²] | [Nm] | [rpm] | [Arms] | | [Arms] | [Arms] |
| Q 60 1,4 3000 1x230 o 3x400 | 130 | 30 | | | 1,4 | 3000 | 1,5 | CDE-2,4-230 | 0,8 | CDE-2,2-400 |
| Q 60F 1,4 3000 1x230 o 3x400 | | | 161 | 47 | 1,4 | 3000 | 1,5 | CDE-2,4-230 | 0,8 | CDE-2,2-400 |
| Q 82 3 3000 1x230 o 3x400 | 163 | 140 | | | 3 | 3000 | 2,8 | CDE-4,0-230 | 1,6 | CDE-2,2-400 |
| Q 82F 3 3000 1x230 o 3x400 | | | 214 | 170 | 3 | 3000 | 2,8 | CDE-4,0-230 | 1,6 | CDE-2,2-400 |
| Q 100 6 3000 1x230 o 3x400 | 192 | 330 | | | 6 | 3000 | 4,9 | CDE-7,1-230 | 3,1 | CDE-4,1-400 |
| Q 100F 6 3000 1x230 o 3x400 | | | 239 | 400 | 6 | 3000 | 4,9 | CDE-7,1-230 | 3,1 | CDE-4,1-400 |

Tabella 11 - Modello motore Brushless e driver di azionamento

Il motore è stato dotato anche di freno comandato direttamente dal drive ed è montato sull'asse del rotore. Questo agisce quando non è presente alimentazione oppure quando viene assegnato il messaggio di sblocco via software. Ad ogni modo, è stato installato uno switch che permetterà di cambiare da un azionamento manuale del freno ad un azionamento automatico e gestito dal programma del simulatore.

Il drive di controllo è prodotto dalla LTi Drives ed il modello utilizzato per il nostro azionamento è il CDE3000 BG1 con i seguenti dati di targa:

| CDE 32.004 , C2.4 | |
|--------------------------|-----------------|
| IN | 230 V AC |
| | 50/60Hz 7.3A |
| OUT | 3x0-230V 4.0A |
| | 1.6 kVA 0-400Hz |

Tabella 12 – Dati di targa drive CDE3000

Le caratteristiche complessive del drive di controllo ed lo schema elettrico con tutti i collegamenti nel dettaglio sono contenuti, scaricabili direttamente, nel sito internet del costruttore (<http://drives.lti.com/>) ed esulano dallo scopo di questo lavoro. Vengono tuttavia evidenziate le porte di comunicazione di interesse per il corretto funzionamento del simulatore.

Innanzitutto i comandi controllati con il drive sono segnali forniti a 24V e sono:

- ENPO: comando di attivazione della potenza (ENable POver); se portato a livello 1 è attivo il controllo di posizione del motore. In questo stato il LED giallo lampeggia. Per disabilitare un allarme (LED rosso acceso) portare a 0 e poi di nuovo a 1 questo segnale; questo è il caso in qui con il simulatore si vada a fine corsa, il circuito viene aperto e la potenza viene disattivata. In questo modo il motore viene arrestato ed entra in funzione il freno che blocca la posizione;
- ISDSH: comando di arresto; normalmente a livello 1 (24V), se portato a 0 arresta il motore;
- CAN – Master: attraverso la seriale X5 con i collegamenti realizzati appositamente per comunicare nella rete CAN (Controller Area Network) si rende possibile la gestione del motore direttamente con il computer tramite le informazioni contenute negli appositi messaggi di input. Il software è stato predisposto per comunicare con protocollo CAN-bus in modo da controllare agevolmente il motore in real-time.
- ISD00: corrisponde al sensore di zero; è un ingresso utilizzato per la ricerca dello zero dell'asse.
- freno: attraverso la morsettiera X9 viene comandato il freno posizionato sul motore;
- alimentazione: attraverso la morsettiera X1 viene fornita la corrente a 220V AC

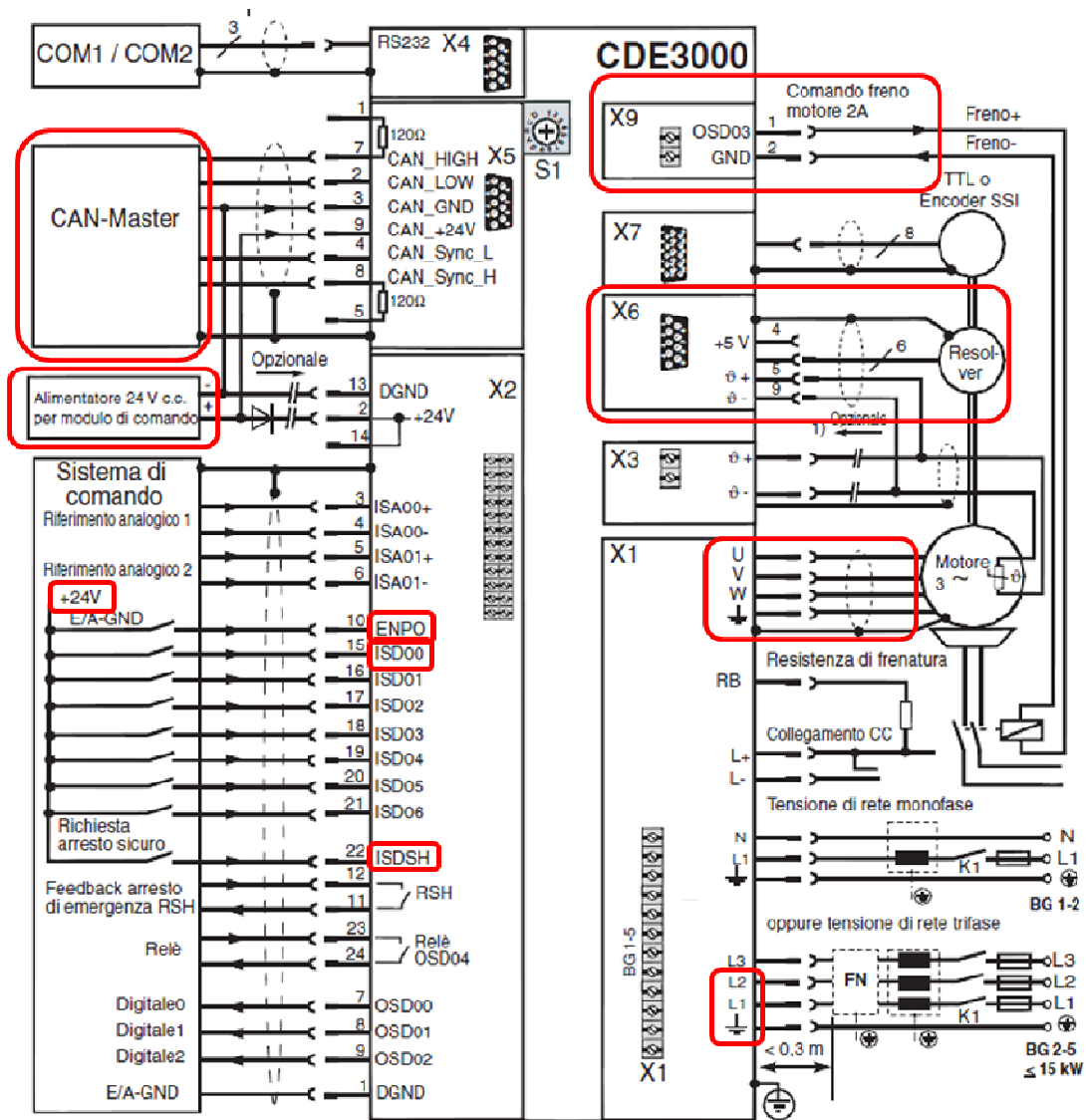


Figura 84 – Collegamenti elettrici drive di controllo

Definiti quindi attuatore, motore e drive di controllo è stato costituito il sistema di azionamento che provvederà a fornire il moto di rollio al simulatore.

3.2.1 Il mock-up

Il mock-up (o modello) del simulatore è stato realizzato sulla base di un veicolo presente all'interno del laboratorio, sul quale erano state testate delle sospensioni innovative in passato, e che ormai risultava essere un veicolo obsoleto, non funzionante e neppure utilizzabile per la circolazione su strada.

Il veicolo interessato è un Piaggio X9 500 come quello riportato nella figura seguente:



Figura 85 – Piaggio X9 500: punto di partenza per la realizzazione del mock-up

Lo scooter è stato interamente smontato nelle sue singole componenti per permettere un rilevamento manuale delle dimensioni del telaio e poter così cominciare la progettazione in ambiente CATIA dell'intero simulatore.

Una volta ricreato il modello tridimensionale del telaio, sono state studiate le geometrie sulle quali posizionare l'asse di rollio del veicolo in accordo con le considerazioni preliminari affrontate durante lo studio di fattibilità.

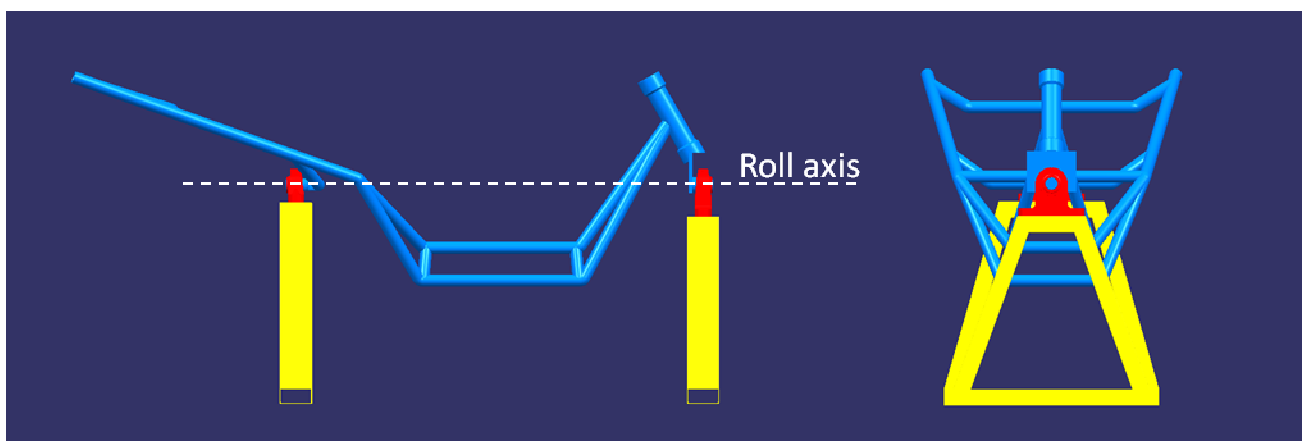


Figura 86 – posizionamento dell'asse di rollio con supporti cuscinetto

Il telaio è stato modificato per permettere l'alloggiamento dei perni necessari a costituire l'asse di rollio del simulatore.

La zona del canotto di sterzo è stata lavorata per poter fissare il sensore di coppia di sterzo, realizzato appositamente, in modo da non alterare la posizione di guida del pilota quando è seduto in sella.

3.2.2 Il basamento

Determinate le geometrie ed ingombri del telaio, è stato affrontato il problema del fissaggio ad un sistema di riferimento fisso che costituisca la base.

I requisiti che questo componente deve rispettare sono:

- Trasportabilità;
- Solidità della struttura;
- Funzione come pedana di accesso;

Per rendere trasportabile il simulatore serve che il basamento sia leggero e compatibile per la presa e la movimentazione con sistemi di logistica, quali muletti industriali o i più comuni trans pallet. Il concetto di leggerezza non sempre è in accordo con quello di solidità, infatti solamente alcuni materiali possono soddisfare contemporaneamente entrambe le richieste. Anche in questo caso si è trattato di trovare un compromesso per la struttura che costituirà il basamento.

La soluzione più rapida, comoda e relativamente economica consiste nell'utilizzare un pallet in metallo sul quale costruire tutta la struttura del simulatore (vedi Figura 87) . Le misure disponibili in commercio però non soddisfano le richieste ed inoltre la superficie in lamierino non risultava essere sufficientemente rigida per poter ancorare gli attuatori.

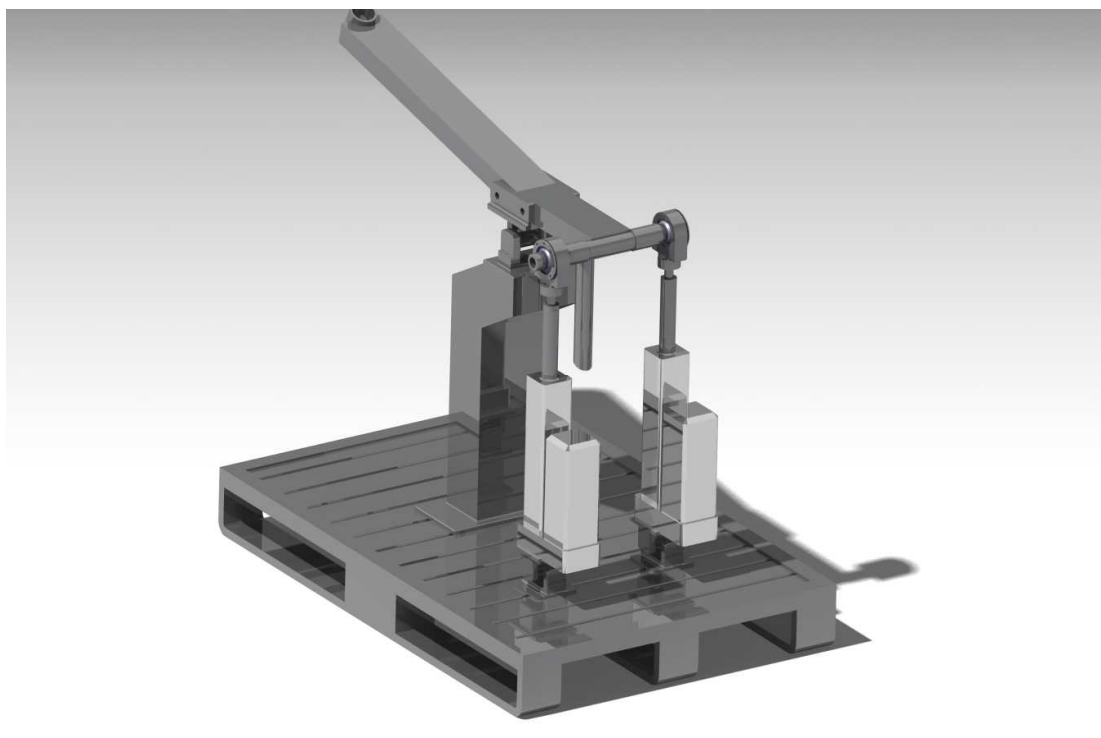


Figura 87 – Concept di simulatore a 2 gdl; particolare del pallet in metallo

Per questo motivo si è pensato di realizzare una struttura apposita, utilizzando dei profili in alluminio modulabili dell'azienda produttrice tedesca ITEM. Questo prodotto possiede la peculiarità di assemblare tra loro i diversi componenti ottenendo una struttura iniziale, completamente modificabile, sulla quale fare successivi miglioramenti. Inoltre, trattandosi di profilati in alluminio, il peso dell'intera struttura riesce ad esser contenuto in valori accettabili.

All'interno del sito internet dell'azienda è possibile trovare tutte le informazioni sui diversi prodotti e di conseguenza scaricare dei modelli CAD compatibili con il modellatore solido utilizzato, in modo da agevolare le fasi di progettazione.

Il prodotto scelto per realizzare le strutture del simulatore consiste nel Profilato 8 80x80 leggero, la cui sezione viene di seguito riportata.

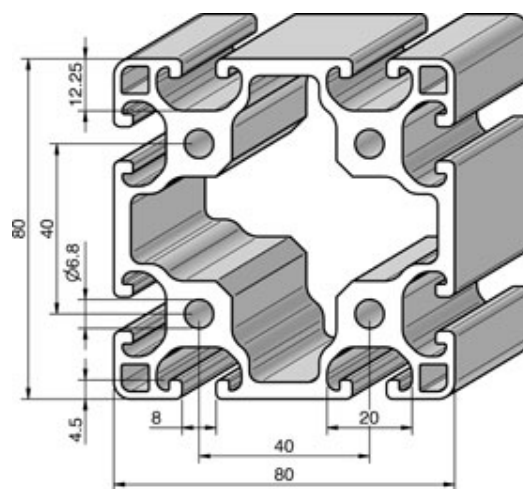
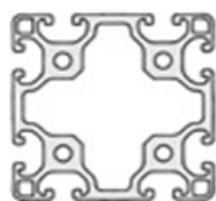


Figura 88 – Sezioni e quote principali ITEM 80x80 leggero



Profilato 80x80 leggero
N. dell'articolo: 0.0.265.80

| | | | |
|------------------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------------|
| | Altezza | 80 | [mm] |
| | Larghezza | 80 | [mm] |
| | Sezione trasversale | 19.75 | [cm ²] |
| | I_x | 134.06 | [cm ⁴] |
| | I_y | 134.06 | [cm ⁴] |
| | $I_{torsione}$ | 82.91 | [cm ⁴] |
| | W_x | 33.51 | [cm ³] |
| | W_y | 33.51 | [cm ³] |
| | Peso specifico | 5.33 | [kg/m] |
| | Materiale | AlMgSi0.5F25 | indurito a caldo |
| R_m | | 245 | [N/mm ²] |
| $R_{p0,2}$ | | 195 | [N/mm ²] |
| ρ | | 2.7 | [kg/dm ³] |
| E | | 70000 | [N/mm ²] |
| G | | 26000 | [N/mm ²] |

Tabella 13 - Caratteristiche Profilato 8 80x80 leggero, naturale

Nel sito, vengono fornite anche tutte le caratteristiche del prodotto per agevolare il calcolo di strutture, come verrà mostrato per il caso specifico del sostegno per il sistema di visualizzazione.

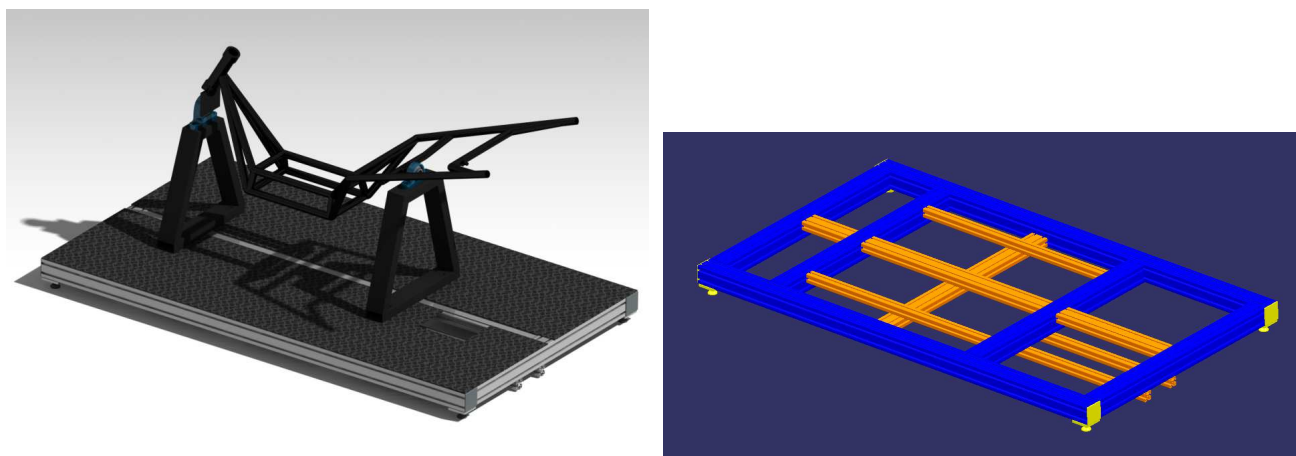


Figura 89 - Struttura portante del simulatore (blu), strutture per il basamento e supporto attuatore (arancio)

La Figura 89 mostra la struttura costituita con i profilati ITEM e una vista d'assieme del telaio ancorato alla base. In particolare il basamento è stato realizzato con dei profili 80x80 (evidenziati in blu) in modo da garantire la rigidità e solidità richiesta del simulatore. Su quest'intelaiatura è stato possibile poi utilizzare altri componenti della stessa ITEM per creare il piano d'appoggio sul quale costruire la pedana di carico ed il punto di attacco dell'attuatore elettromeccanico (evidenziati in arancio).

Con una struttura concepita in questo modo è possibile l'utilizzo di strumenti di logistica classici per spostare agevolmente il mock-up del simulatore. La presenza di piedini regolabili in altezza permette inoltre l'adattabilità anche a pavimentazioni non perfettamente planari.

3.2.3 Il sistema di audio-video

Un simulatore non si può definire tale se non è in grado di riprodurre anche sensazioni acustiche e visive all'altezza. Per soddisfare queste esigenze la riproduzione acustica è stata affidata ad un sistema Dolby Surround 5.1 con altoparlanti disposti frontalmente e sotto alla struttura del simulatore. Il subwoofer dedicato per la generazione dei bassi è stato posizionato frontalmente in posizione centrale per coinvolgere direttamente il pilota alla guida. Il suono del motore, perché di questo si tratta quando si parla di motori, è stato preso dal simulatore SafeBike nel quale, al tempo, era stato registrato direttamente da una Ducati 1098, campionato ad intervalli di 1000 giri al minuto per 30 secondi ciascuno. In questo modo, dopo un'interpolazione tra i vari campioni, è possibile riprodurre un suono verosimile a quello di una moto reale per ogni regime di rotazione del motore [22]. Oltre al feedback sonoro dei giri motore è stato installato anche un feedback sensoriale sotto alla sella. Si tratta di un rotore sbilanciato che lega il numero di giri agli rpm del motore del veicolo virtuale. In questo modo è possibile ricreare la vibrazione caratteristica del motociclo in funzione, direttamente sul pilota in accordo con quanto percepito uditivamente.

Il sistema di visualizzazione, invece, risulta essere un elemento fondamentale nella costituzione di un simulatore di guida perché è l'unico in grado di fornire la percezione non correlata al movimento autonomo [23],[24],[25]. Con "sistema visivo" si intende la capacità di "illudere" la mente di compiere una determinata azione anche quando questa non avvenga veramente o nella sua completezza.

Inoltre il pilota deve essere "immerso" quanto più possibile nella scena, e la riproduzione della vista laterale risulta essere quella che apporta il maggior contributo in termini di percezione della velocità. L'angolo visivo caratteristico dell'uomo è in media di 120° in direzione verticale e 200° in orizzontale con una sovrapposizione di 120° tra i due occhi. La rappresentazione grafica del simulatore deve essere in grado di coprire quest'area. Il parametro che misura l'angolo visivo sotteso dallo schermo da un punto di vista è detto Field Of View (FOV) e dipende dalla dimensione dello schermo e dalla distanza dall'occhio dell'osservatore.

Con la soluzione attuale si realizza un FOV di circa 150° in orizzontale e di circa 50° in direzione verticale. Si tratta di limiti imposti dalla tipologia di schermi utilizzati per la riproduzione visiva.

Prima che l'immagine venga effettivamente mandata sullo schermo, il software di simulazione genera l'informazione che deve essere inviata ad ogni singolo dispositivo. Per questo motivo, il computer principale, incaricato dell'integrazione del modello matematico della dinamica del motociclo, provvede anche alla gestione della visualizzazione sullo schermo centrale mentre un secondo computer gestisce

l'ambiente grafico sugli schermi laterali. In questo modo è possibile gestire le proprietà grafiche degli schermi laterali regolandone la distorsione, prima responsabile della sensazione di velocità.

Per poter trovare le condizioni che più si avvicinano alla realtà sono stati eseguiti numerosi test che hanno coinvolto diversi piloti i quali restituivano un feedback sulle sensazioni percepite. È stato interessante osservare come, con alcune configurazioni il fenomeno noto con il nome *sickness* (nausea) sia stato ampiamente riscontrato e sia stato necessario anche interrompere il test, per il malessere accentuato del tester.

Lo studio ha permesso di trovare una configurazione ottimale del filtro di Washout (vedi Figura 11) in maniera da ricreare le sensazioni agendo contemporaneamente sul sistema grafico e sul sistema inerziale.

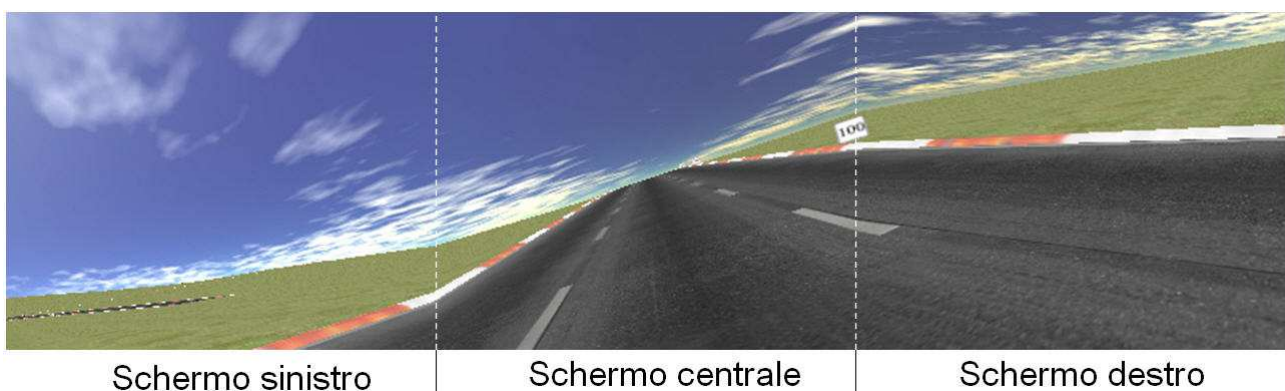


Figura 90 – Gestione delle viste nell'ambiente virtuale

Solo grazie alle sensazioni visive percepite è possibile il controllo e la gestione di un veicolo durante la guida. Risulta di primaria importanza ricreare fedelmente la realtà perché, in base alle informazioni passate al pilota tramite la vista, questi reagirà di conseguenza.

3.2.3.1 La struttura del sistema di visualizzazione

La soluzione adottata per soddisfare le esigenze grafiche consiste nell'utilizzo di tre televisori di grandi dimensioni. La scelta, per motivi puramente economici, è caduta sul modello LG 50PK350, televisore al plasma da 50 pollici con risoluzione 1920*1080 tramite connessione HDMI. In Tabella 14 sono riportate le caratteristiche geometriche e di massa del televisore, necessarie per dimensionare la struttura di sostegno. Anche in questo caso sono state avanzate diverse ipotesi di realizzo in fase iniziale e la soluzione che è stata adottata risulta essere in linea con la strada scelta per la realizzazione del basamento del simulatore.

| DIMENSIONI SCHERMO LG 50PK350 | | |  |
|--------------------------------|---------|------|--|
| <i>Larghezza</i> | 1171.4 | [mm] | |
| <i>Altezza</i> | 720.9 | [mm] | |
| <i>Profondità</i> | 55.3 | [mm] | |
| <i>Massa</i> | 28.9 | [kg] | |
| <i>Interasse fori supporto</i> | 400 | [mm] | |
| <i>Peso</i> | 283.509 | [N] | |
| <i>altezza CoG TV</i> | 1800 | [mm] | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Tabella 14 – Caratteristiche geometriche televisore LG 50PK350

In base alle caratteristiche riportate in Tabella 13, per quanto riguarda i profilati ITEM 80x80, e a quelle sopra riportate per quanto riguarda il televisore, sono state svolte delle verifiche di sollecitazione sul layout della struttura considerata.

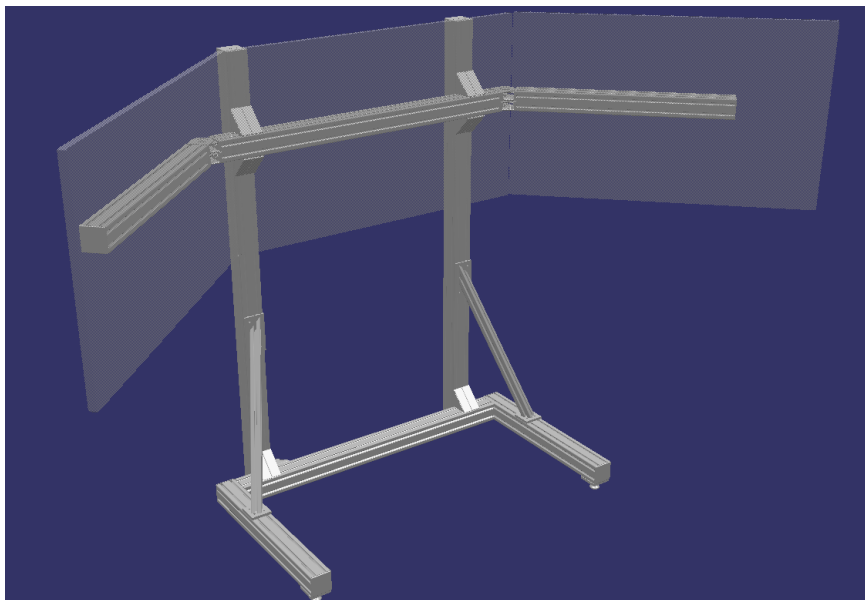


Figura 91 – layout struttura di sostegno schermi

Sono state individuate le sezioni maggiormente sollecitate e sono state eseguite delle verifiche di resistenza a livello strutturale dei profilati. In ogni situazione considerata, il peso del televisore che va a gravare sulla struttura è stato maggiorato del 50% per ragioni di sicurezza. Nella figura seguente con P viene evidenziato il carico agente per un televisore, evidenziato in rosso quando genera flessione ed in giallo quando genera torsione. Inoltre con 3P viene considerata la forza-peso dei 3 televisori per il calcolo delle colonne di sostegno a flessione.

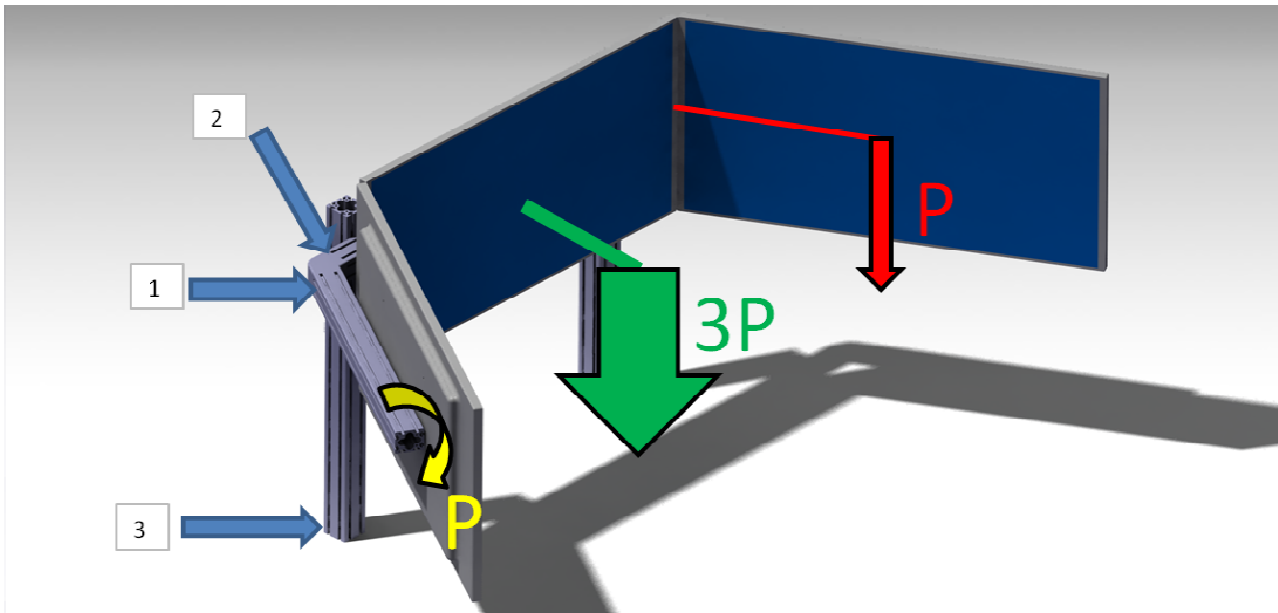


Figura 92 - carichi agenti considerati per il dimensionamento

Per la verifica della sezione 1 viene calcolato il momento flettente agente dalla:

$$\begin{aligned}
 M_{f1} &= (P \cdot C_s) \cdot b_1 \\
 &= 283.509 \cdot 1.5 \cdot 650 \\
 &= 276421.28 \text{ [N}\cdot\text{mm]}
 \end{aligned}$$

dove b_1 corrisponde al braccio tra la sezione di incastro ed il baricentro del televisore (stimato geometricamente). Noto quindi il momento flettente agente è possibile calcolare il valore della σ di flessione potendo disporre del modulo di resistenza a flessione fornito dall'azienda produttrice dei profilati.

$$\sigma_1 = \frac{M_{f1}}{W_x} = \frac{276421.28}{33.51 \cdot 10^3} = 8.25 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Sotto questo carico agente si può stimare, inoltre, la freccia di deflessione generata con la:

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{1}{3} \frac{PL^3}{EI} \\
 &= \frac{1}{3} \frac{283.509 \cdot 1.5 \cdot 650^3}{70000 \cdot 134.06 \cdot 10^4} \\
 &= 0.4148 \text{ [mm]}
 \end{aligned}$$

Per il calcolo a torsione invece viene considerato un momento torcente agente pari a

$$\begin{aligned}
 M_{t1} &= (P \cdot C_s) \cdot b_2 \\
 &= 283.509 \cdot 1.5 \cdot 70 \\
 &= 29768.45 \text{ [N}\cdot\text{mm]}
 \end{aligned}$$

Con il momento torcente definito posso quindi calcolarmi lo sforzo τ di taglio agente con la:

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{M_{t1}}{I_p} \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \\ &= \frac{29768.45}{82.91 \cdot 10^4} \cdot \sqrt{40^2 + 40^2} \\ &= 2.03 \text{ [N/mm}^2\text{]}\end{aligned}$$

Allo stesso modo del caso di flessione posso calcolarmi anche in questo caso la rotazione ϑ generata dal momento torcente con la:

$$\begin{aligned}\vartheta &= \frac{M_{t1}}{GI_p} \cdot L \\ &= \frac{2.03}{26000} \cdot 650 \\ &= 0.0508 \text{ [}^\circ\text{]}\end{aligned}$$

Dalle due sollecitazioni appena calcolate è possibile stimare la tensione complessiva agente utilizzando la formula di Von Mises:

$$\begin{aligned}\sigma_{eq} &= \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} \\ &= \sqrt{8.25^2 + 3 \cdot 2.03^2} \\ &= 8.97 \text{ [N/mm}^2\text{]}\end{aligned}$$

Quindi dai calcoli appena riportati possiamo confermare che essendo $8.97 \ll 195 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ il profilato ITEM 80x80 soddisfa appieno la situazione di carico finora studiata.

Per la verifica della sezione 2 viene considerato agente solamente il momento torcente che risulta essere pari a 552842.55 [Nmm] e genera una τ di 37.72 N/mm^2 . I presupposti anche in questo caso sono quelli di una maggiorazione del 50% del carico agente e una condizione, che mai si verificherà nella realtà, di angolo pari a 90° tra i televisori. In questo modo nei calcoli posso considerare il braccio più lungo possibile nel layout considerato.

La rotazione della sezione, sempre considerata piana, risulta essere pari a 0.2902° ad una distanza di 200mm dall'incastro.

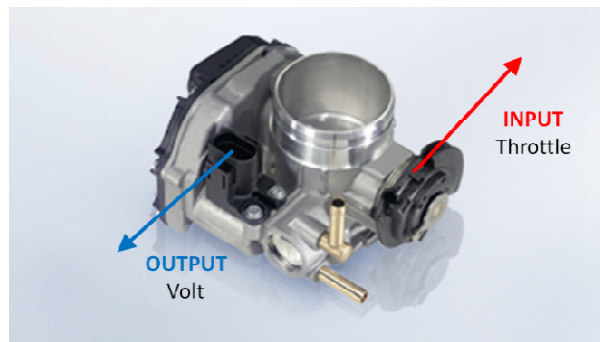
Per il calcolo a flessione della sezione 3 vengono considerati agenti le forze peso di tutti e tre i televisori (sempre maggiorate di un 50%), producendo un momento flettente di 533974.32 [Nmm] , con una σ di $15.93 \text{ [N/mm}^2\text{]}$. La freccia prodotta dai tre televisori a 1.8 metri dal suolo risulta essere pari a 3.08 mm.

3.2.4 I sensori

Facendo riferimento alle richieste stilate in fase di fattibilità, i parametri di input che sono stati considerati per lo sviluppo del nuovo simulatore sono:

- Acceleratore;
- Freno anteriore;
- Freno posteriore;
- Coppie di sterzo;

La soluzione adottata per il comando di apertura del gas è stata trovata smontando lo scooter in fase di rilevamento delle geometrie. Al momento di separare il blocco motore dal telaio si è osservato che la valvola a farfalla, che regola la portata di aria di alimentazione, nella realtà è dotata di un potenziometro rotativo coassiale all'asse di rotazione della valvola stessa. Nello scooter questo sensore serve a regolare la portata di carburante che l'iniettore dovrà provvedere a fornire alla camera di combustione mentre nel nostro caso servirà per fornire il segnale in Volt sulla parzializzazione dell'apertura del comando del gas.



Per quanto riguarda, invece, i sensori di pressione da utilizzare per il segnale del freno posteriore e del freno anteriore sono stati scelti dei sensori AST (American Sensor Technologies, www.astensors.com) con un range di pressione 0-25 bar. Il segnale che viene fornito in output è un segnale di tensione variabile tra 1 e 6 Volt.

In Tabella 15 sono riportate le caratteristiche del connettore di cui è provvisto il sensore di pressione e i colori dei cavi di collegamento realizzati per mettere in comunicazione il sensore con la scheda di acquisizione.

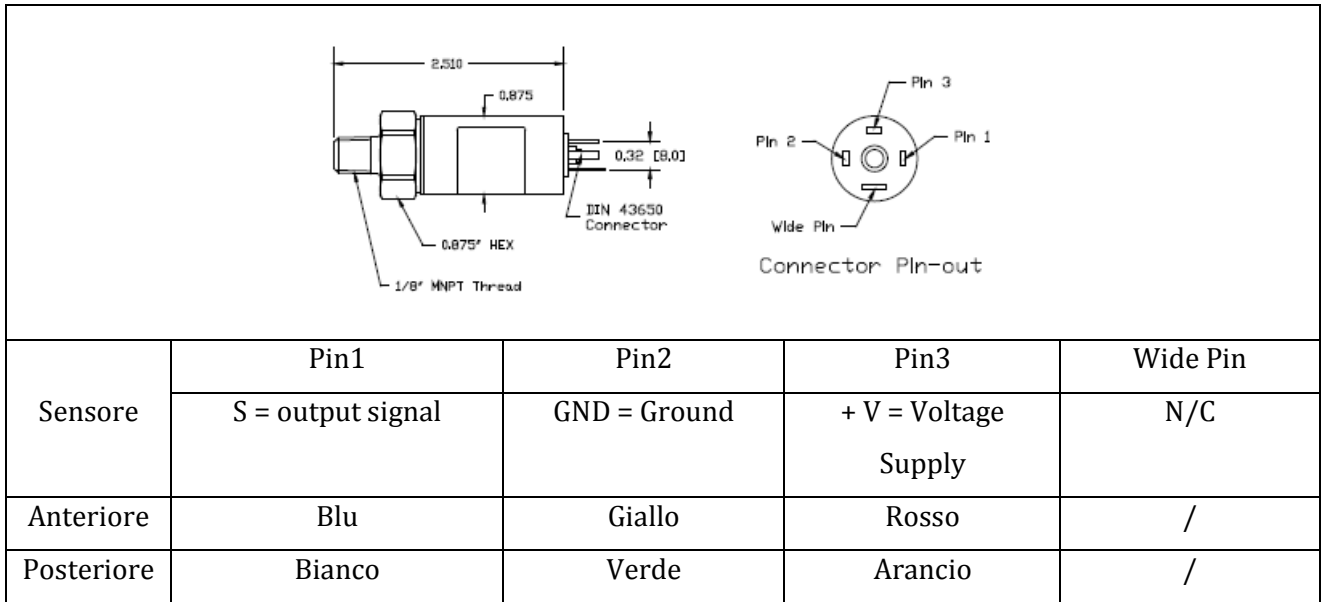


Tabella 15 - Connettore e connessioni sensori di pressione

Di seguito vengono riportati i grafici con le rette di taratura dei sensori di pressione ottenuti dai dati raccolti in Tabella 16.

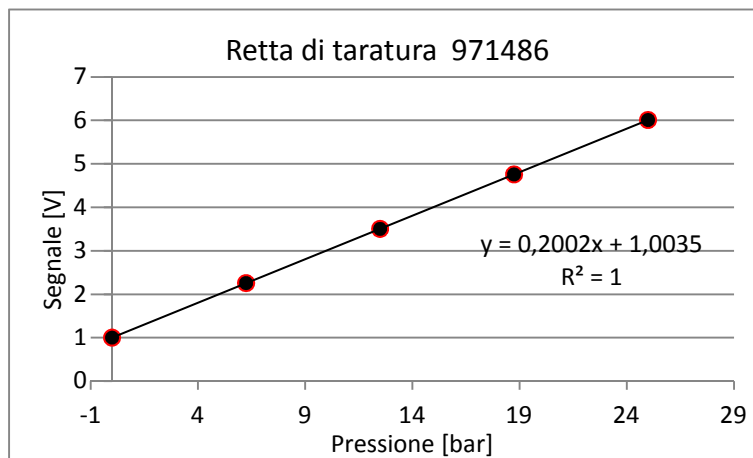
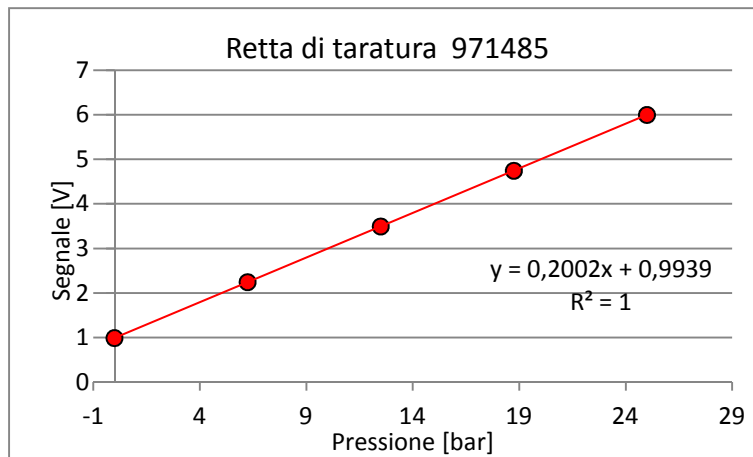


Figura 93 - Rette di taratura dei due sensori di pressione

AST4000A00025B6E0000

AST4000A00025B6E0000

| | | |
|------------------|------------|------|
| Serial | 971486 | |
| Date | 06-29-2011 | |
| Test Voltage [V] | 16.889 | |
| Pressure [bar] | Output [V] | |
| -0.001 | 1.003 | |
| 6.25 | 2.257 | |
| 12.5 | 3.504 | |
| 18.75 | 4.757 | |
| 25 | 6.01 | |
| Accuracy | 0.04% | BFSL |

| | | |
|------------------|------------|------|
| Serial | 971485 | |
| Date | 06-29-2011 | |
| Test Voltage [V] | 16.889 | |
| Pressure [bar] | Output [V] | |
| -0.001 | 0.993 | |
| 6.25 | 2.247 | |
| 12.5 | 3.496 | |
| 18.75 | 4.747 | |
| 25 | 6 | |
| Accuracy | 0.04% | BFSL |

Tabella 16 – Taratura dei sensori di pressione

Per completare la sezione dedicata all'acquisizione dei segnali di input, resta da illustrare la soluzione scelta per il sensore coppia di sterzo.

3.2.4.1 Il sensore coppia di sterzo

Negli anni passati, per alcuni studi ove era richiesta la conoscenza del valore della coppia applicata attraverso il manubrio, erano stati realizzati all'interno del laboratorio del MDRG, degli appositi sensori costituiti da estensimetri. Sono stati quindi consultati i relativi documenti che hanno portato alla luce considerazioni di chi, prima di me, si era trovato ad affrontare problemi simili. L'idea più semplice e banale per realizzare un sensore di questo tipo ricade nell'applicazione degli estensimetri direttamente sul manubrio, utilizzandolo quindi anche da elemento sensibile. Questo permetterebbe infatti di rilevare il valore della coppia applicata direttamente dal pilota.

A causa però della geometria a volte complessa del manubrio spesso capita di rilevare dei segnali che non sono relativi ad una coppia pura (ad esempio solo la coppia attorno all'asse di sterzo) ma sono il risultato di accoppiamenti di momenti che non agiscono lungo un asse prefissato.

Per poter disaccoppiare le coppie agenti è stato realizzato un sensore che agisse direttamente sull'asse di sterzo (Mz) e sull'asse perpendicolare a questo (Mx). È stata necessaria la modifica fisica del canotto di sterzo per alloggiare il sensore come si vede in Figura 94. La possibilità di applicare gli estensimetri direttamente sul manubrio è stata inoltre scartata per la strana forma dei manubri tipici degli scooter.

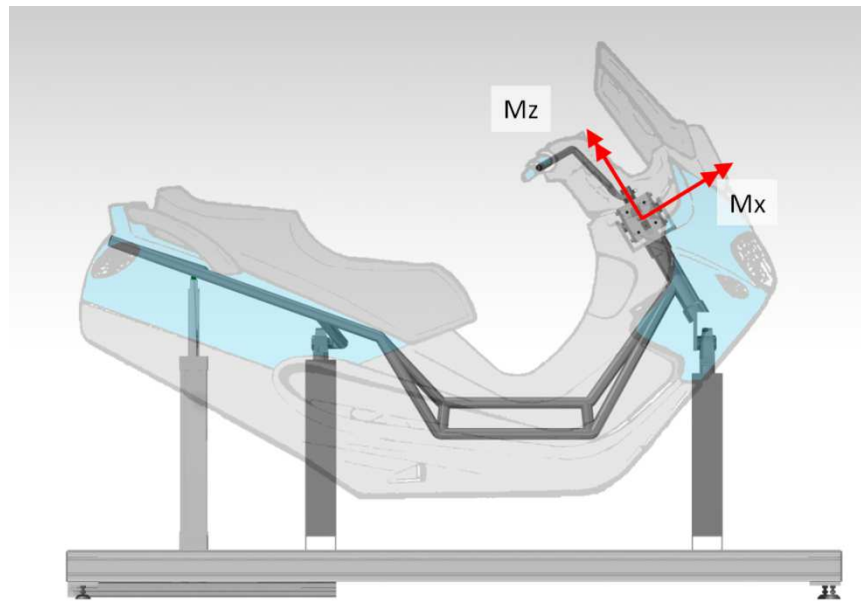


Figura 94 - Coppie di sterzo rilevate dal sensore

Dopo aver scelto la strada del sensore dedicato, si è in primo luogo definita l'idea e, successivamente, si è fatto il modello tridimensionale sempre in ambiente CATIA.

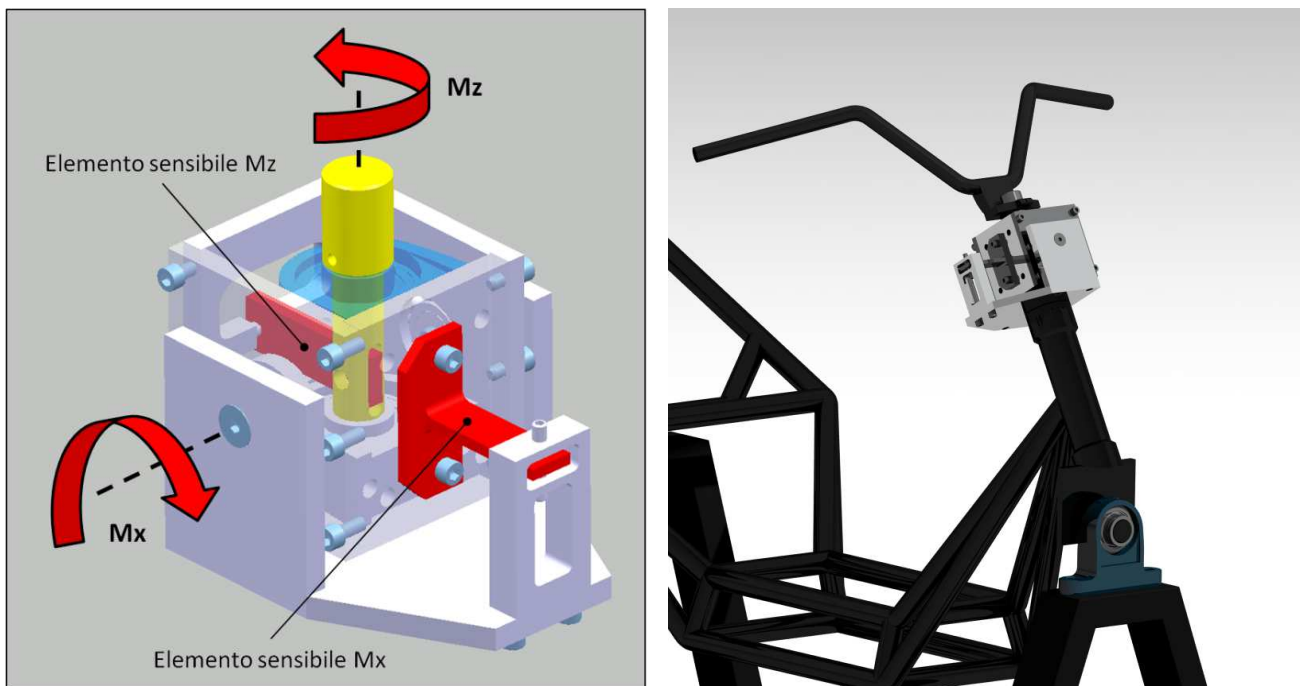


Figura 95 – Torsionmetro: assi per Mx ed Mz e vista complessiva

La parte più delicata del sensore è sicuramente l'elemento sensibile nel quale sono stati incollati gli estensimetri. Prima di procedere all'incollaggio sono state fatte delle semplici analisi FEM sull'elemento trave anche per approfondire le conoscenze del modulo Analysis presente in CATIA.

Per quanto riguarda gli elementi sensibili M_x ed M_z si tratta di semplici barrette incastrate ad un estremo e sottoposte a flessione. In accordo con quanto risultato dall'analisi FEM, gli estensimetri verranno in seguito posizionati in prossimità dell'incastro. Si osserva nell'elemento M_z come ci sia una concentrazione di tensioni in corrispondenza del foro che tuttavia viene ridotta per il sistema di fissaggio adottato della barretta sull'albero coassiale all'asse di sterzo e sul quale verrà ancorato il manubrio. Nella realtà la barretta sarà incastrata anche per un breve tratto oltre al foro, proprio nella zona interessata dalla concentrazione di tensioni. Il problema invece non si pone per l'elemento sensibile M_x .

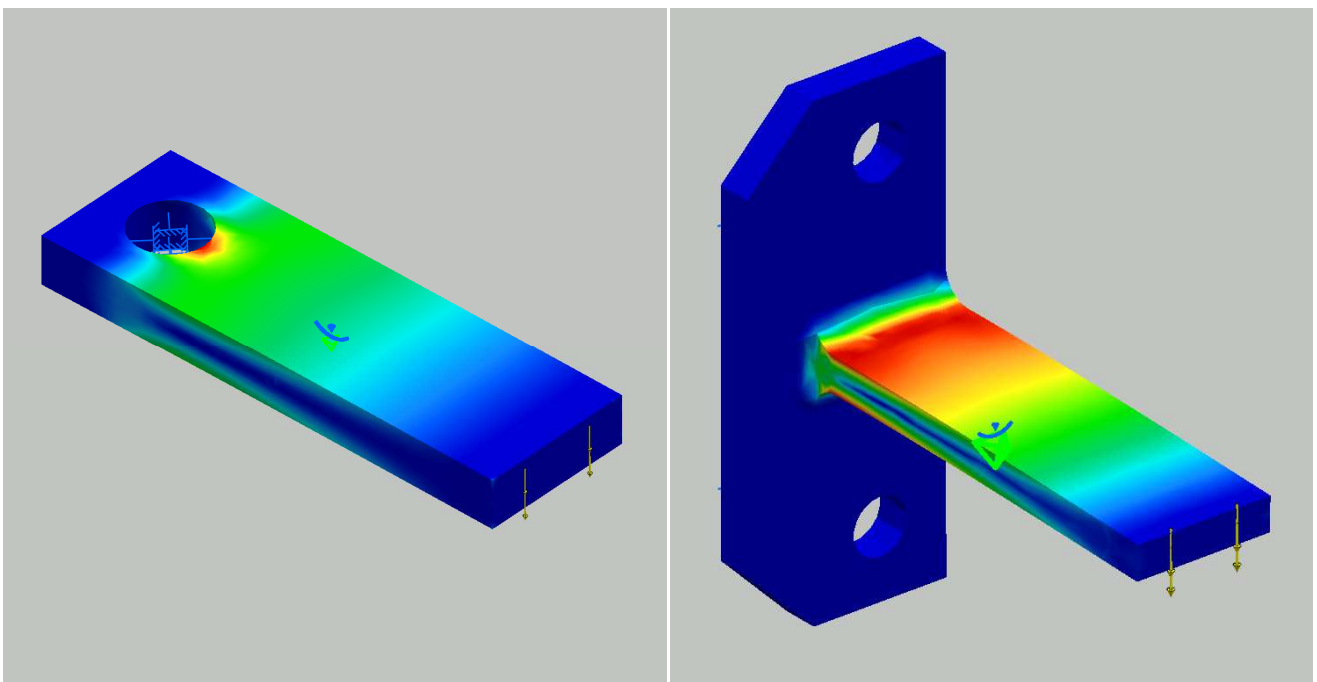


Figura 96 – Andamento delle tensioni negli elementi sensibili M_z (a sinistra) ed M_x (a destra)

Tra i due elementi sensibili il caso più critico risulta essere l' M_z in quanto le coppie in gioco sono notevolmente superiori. I calcoli di resistenza sono stati effettuati per verificare gli elementi ad una coppia di 100 Nm e la freccia ottenuta risulta essere di 0.4 mm mentre la rotazione è di 0.534 gradi. Tuttavia, per preservare l'elemento da carichi impulsivi accidentali, sono stati inseriti dei fincorsa meccanici che ne limitano il movimento dell'elemento.

Si descrive ora l'applicazione degli estensimetri, il loro collegamento e successivamente la taratura del ponte estensimetrico senza volersi soffermare sulla teoria della misura tramite estensimetri.

Ogni estensimetro deve essere collegato correttamente con degli appositi cavi di segnale secondo lo schema del Ponte di Wheatstone come mostrato in Figura 47. In serie al ponte deve essere collegato un modulo di condizionamento del segnale con il quale sia possibile settare il guadagno, la regolazione dello zero semplicemente agendo sui jumper, come evidenziato in Figura 57.

Nella pagina seguente sono riportati gli schemi con i colori rappresentativi dei collegamenti tra faccia superiore e faccia inferiore dell'elemento sensibile. In particolare gli estensimetri 1 e 3 andranno incollati sulla stessa faccia mentre gli estensimetri 2 e 4 su quella opposta. Dalla basetta contenente i quattro cavi (A, B, C e D) si collega il modulo di condizionamento dal lato Input mentre dal lato Output sarà sufficiente semplicemente collegare alimentazione, segnale e massa (come mostrato in basso in Tabella 17).

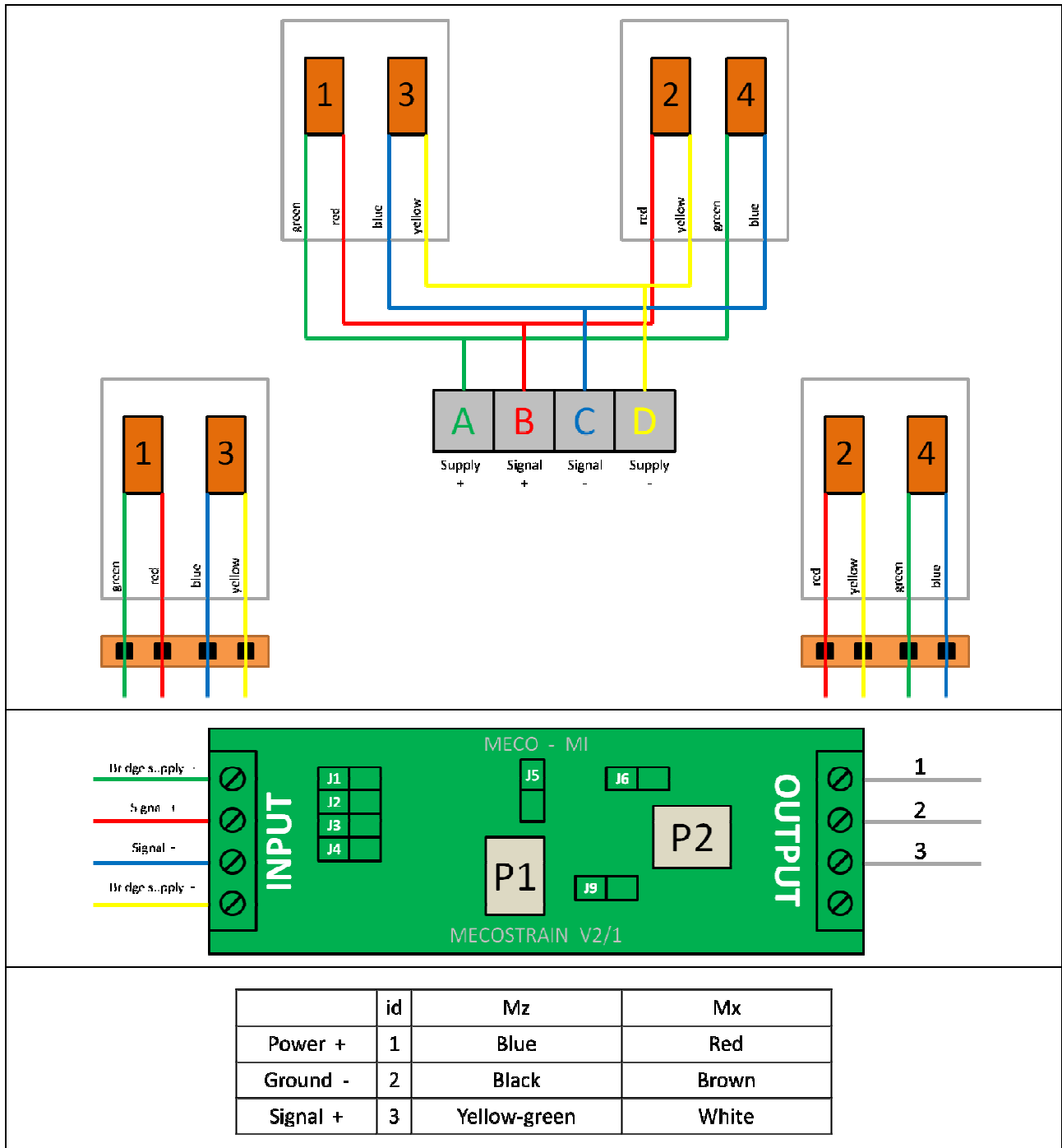


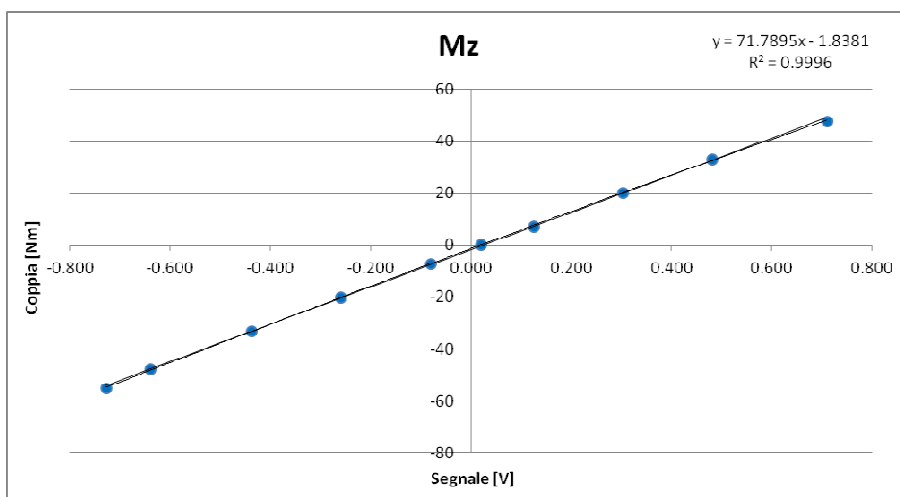
Tabella 17 – Informazioni e schemi collegamento dei ponti estensimetrici Mx ed Mz

Il segnale entra direttamente come input, nel modello matematico attraverso la scheda di acquisizione dedicata. Una volta verificata la bontà di esecuzione dei collegamenti del ponte estensimetrico, e che tutto funzionasse correttamente, è stata fatta la taratura dei due ponti indipendentemente. Inizialmente il ponte dedicato ad Mz era stato settato sul modulo di acquisizione con una sensibilità di 3mV/V ma in questo modo non si era in grado di assicurare il segnale per tutto il campo di variazione della coppia: si sarebbe arrivati a saturazione prima del valore massimo prefissato. Per questo motivo la sensibilità del modulo di condizionamento è stato ridotto a 10mV/V ed in questo modo è stata eseguita la calibrazione del ponte. La sensibilità di 3mV/V invece è stata mantenuta per il ponte Mx sul quale erano richieste coppie inferiori (sull'ordine dei 60-70 Nm).

| MZ Modulo Mecco settato a 10mV/V | | | | | |
|----------------------------------|----------|----------|---------|---------|--------|
| Braccio (m): | | 0.325 | | | |
| Carico | | | Letture | Letture | Ki |
| (kg) | (N) | (Nm) | (V) | 3mV/V | (Nm/V) |
| -17.301 | -169.654 | -55.1374 | -0.728 | -2.427 | 83.295 |
| -15.001 | -147.1 | -47.8074 | -0.640 | -2.133 | 72.935 |
| -10.401 | -101.992 | -33.1475 | -0.439 | -1.463 | 72.691 |
| -6.341 | -62.1798 | -20.2084 | -0.261 | -0.870 | 71.883 |
| -2.281 | -22.3675 | -7.26943 | -0.081 | -0.270 | 71.975 |
| 0 | 0 | 0 | 0.02 | 0.067 | x |
| 2.281 | 22.36749 | 7.269433 | 0.125 | 0.417 | 69.233 |
| 6.341 | 62.17985 | 20.20845 | 0.302 | 1.007 | 73.102 |
| 10.401 | 101.9922 | 33.14747 | 0.48 | 1.600 | 72.691 |
| 15.001 | 147.0998 | 47.80744 | 0.71 | 2.367 | 63.739 |

| MX Modulo Mecco settato a 3mV/V | | | | | |
|---------------------------------|----------|----------|---------|--------|--|
| Braccio (m): | | 0.325 | | | |
| Carico | | | Letture | Ki | |
| (kg) | (N) | (Nm) | (V) | (Nm/V) | |
| -24.201 | -237.315 | -77.1274 | -3.54 | 21.246 | |
| -19.601 | -192.207 | -62.4674 | -2.85 | 21.246 | |
| -15.001 | -147.1 | -47.8074 | -2.16 | 21.559 | |
| -10.401 | -101.992 | -33.1475 | -1.48 | 21.931 | |
| -6.341 | -62.1798 | -20.2084 | -0.89 | 22.700 | |
| -2.281 | -22.3675 | -7.26943 | -0.32 | 22.717 | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | x | |
| 2.281 | 22.36749 | 7.269433 | 0.295 | 24.642 | |
| 6.341 | 62.17985 | 20.20845 | 0.886 | 21.893 | |
| 10.401 | 101.9922 | 33.14747 | 1.5 | 21.073 | |
| 15.001 | 147.0998 | 47.80744 | 2.19 | 21.246 | |
| 19.601 | 192.2074 | 62.46741 | 2.89 | 20.943 | |
| 24.201 | 237.315 | 77.12738 | 3.61 | 20.361 | |

Tabella 18 – Tabelle di taratura dei ponti Mz ed Mx



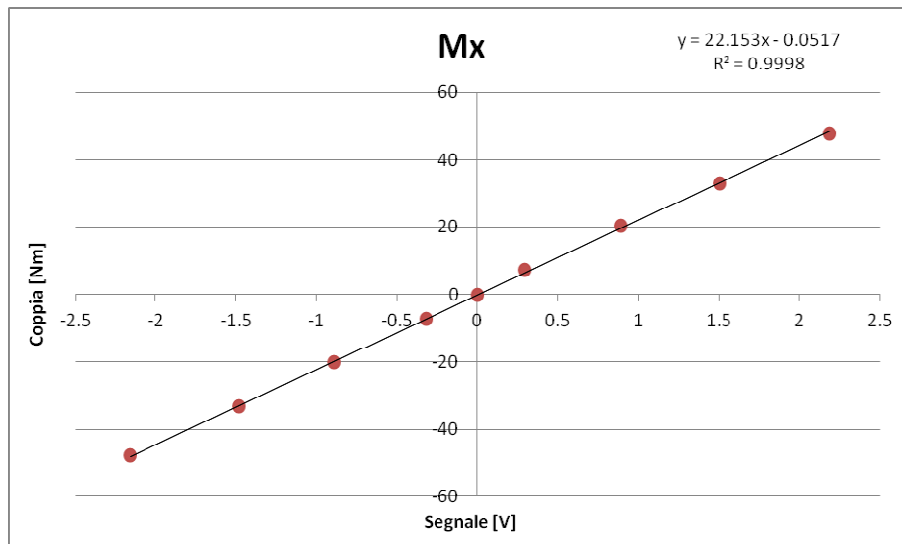


Figura 97 – Rette di taratura dei ponti estensimetri Mz ed Mx

3.2.5 La gestione del sistema

Il cuore del simulatore sta nel computer che deve essere in grado di gestire gli input derivanti dai sensori, calcolare la dinamica del motociclo in real time e, attraverso il filtro di washout, assegnare e gestire tutti gli output del sistema. Trattandosi di un applicazione in real-time la velocità computazionale è fondamentale per assicurare fluidità nella simulazione.

Il sistema di calcolo e gestione è affidato ad una Workstation dotata di processore Intel Core i7-2600 da 3.4 GHz , 8 Gb di memoria ram DDR3, hard disk da 500Gb e due schede video dedicate N560GTX – T1 Twin FrozrII da 1 Gb ciascuna. Questo perché ogni scheda permette la gestione di due monitor e nel nostro caso le uscite video da gestire sono tre. Inoltre la Workstation è stata provvista di router wireless per poter comunicare con la rete, soluzione utilizzata soprattutto in fase di sviluppo e per l'esportazione della telemetria per la post-analysis dei dati.

Per poter ottimizzare i calcoli il software è stato sviluppato appositamente in modo da poter allocare determinati processi su singoli core. Ad esempio il modello della moto, la grafica, il suono, l'acquisizione, il controllo del motore ed il filtro di washout lavorano ognuno sul proprio processore, mentre la gestione degli scenari ed il controllo della vibrazione sotto alla sella vengono gestiti entrambi da un altro core.

Sul computer è stata montata una scheda di acquisizione con interfaccia PCI prodotta dalla tedesca BMCM (www.bmcm.de/us). La scheda PCI-Base II presenta la possibilità di scegliere i moduli di acquisizione (M1) e di controllo (M2) a seconda delle proprie esigenze e di inserirli semplicemente sulla scheda PCI fornita.

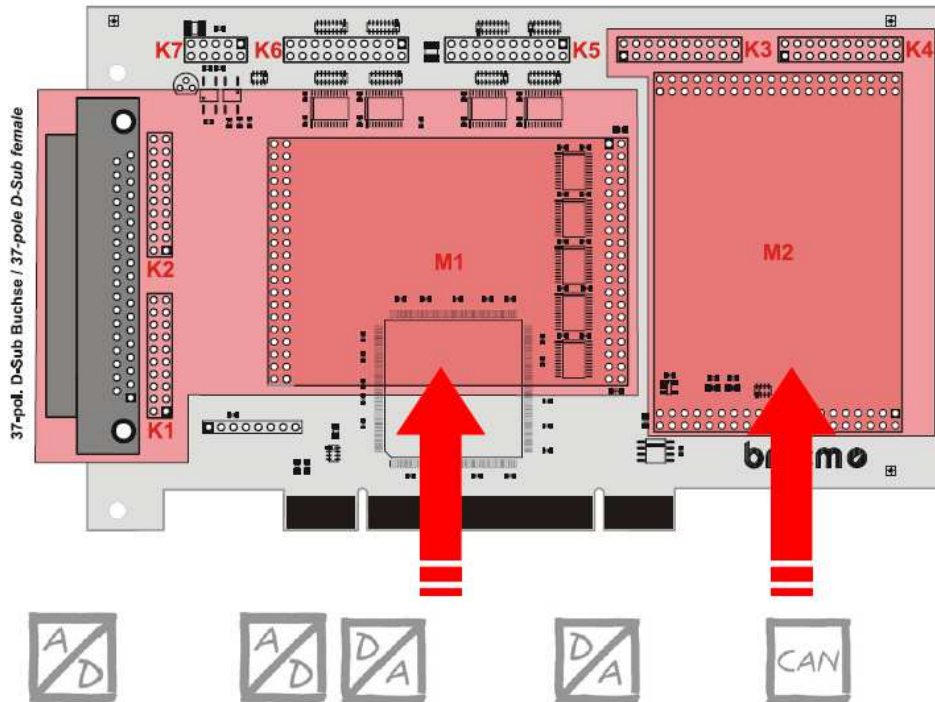


Figura 98 – Scheda acquisizione BMCM PCI-Base II

Il modulo di gestione degli input (MAD16f) permette l'acquisizione di 16 canali analogici single-ended oppure 8 in collegamento differenziale con un campionamento massimo fino a 500 kHz con risoluzione fino a 16 bit. I segnali analogici possono essere misurati in quattro differenti range di tensione ($\pm 1V$, $\pm 2V$, $\pm 5V$ e $\pm 10V$). Per ogni canale di acquisizione può essere impostato il campo di tensione più idoneo.

Il modulo di controllo (MDA16-4i), invece, è in grado di generare 4 segnali con risoluzione 16 bit nel range di tensione $\pm 10V$ e fino a 100kHz, impostabili da software.

Entrambi i moduli comunicano attraverso un connettore seriale a 37 pin, che è stato cablato nel seguente modo:

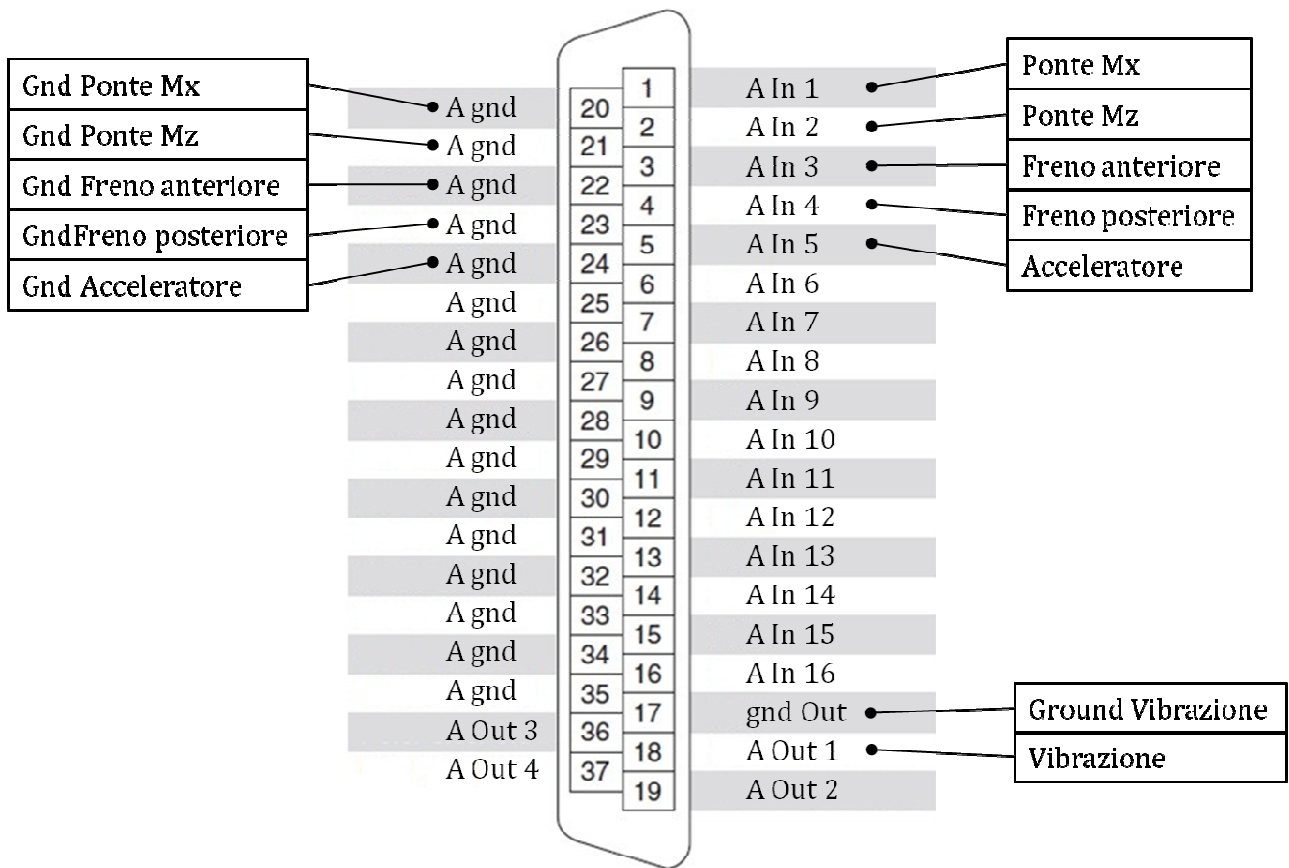


Figura 99 – Connettore 37 pins per la scheda di acquisizione

Per agevolare le connessioni di segnale, i diversi sensori vengono raccolti in 3 cavi a seconda della tipologia. In questo modo risulta semplice l'operazione di assemblaggio e disassemblaggio del simulatore semplicemente collegando il connettore con tutti i cavi alla workstation. Ogni sensore però deve venire anche alimentato con una tensione a 12 V: per questo è stato predisposto un alimentatore stabilizzato che attraverso un altro connettore fornisce alimentazione ai sensori.

| Schema collegamenti cavi sensori | | | |
|----------------------------------|--------------|-----------|-------------------------|
| Cavo 1 | bianco | Signal Mx | Ponti estensimetrici |
| | marrone | Ground | |
| | giallo_verde | Signal Mz | |
| | rosso | Power + | |
| | blu | Power + | |
| | nero | Ground | |
| Cavo 2 | bianco | Signal | Pressure sensors |
| | marrone | Power + | |
| | giallo_verde | Ground | |
| | rosso | Power + | |
| | blu | Signal | |
| | nero | Ground | |
| Cavo 3 | giallo_verde | Ground | Throttle |
| | marrone | Signal | |
| | nero | Power+ | |

Tabella 19 – Schema connessioni dei sensori

3.2.6 Il quadro elettrico

Per utilizzare il simulatore serve alimentare tutti i dispositivi, illustrati fino ad ora, dall'attuatore elettromeccanico al suo drive di controllo, dal sistema Dolby Surround ai tre televisori incaricati della grafica, dal computer ai sensori, e così via. Inoltre bisogna considerare che devono essere presenti tre tipi diversi di alimentazione:

- 220 V AC per l'attuatore, il computer, i televisori ed il sistema audio;
- 24 V DC per il drive di controllo ed il freno dell'attuatore;
- 12 V DC per i sensori;

Per questo motivo si è pensato di realizzare un quadro elettrico in grado di fornire tutte queste utenze in sicurezza. Pensato in un'ottica di trasportabilità, è stato realizzato un piccolo armadio portatile contenente tutti i sistemi di alimentazione e la workstation stessa.

L'armadio fornisce anche ulteriori punti di attacco corrente nel caso sia necessario collegarsi con un portatile o qualsiasi altro strumento.

Nello schema elettrico è già stato considerato lo sviluppo del progetto e la possibile estensione del simulatore a 2 o più gradi di libertà.

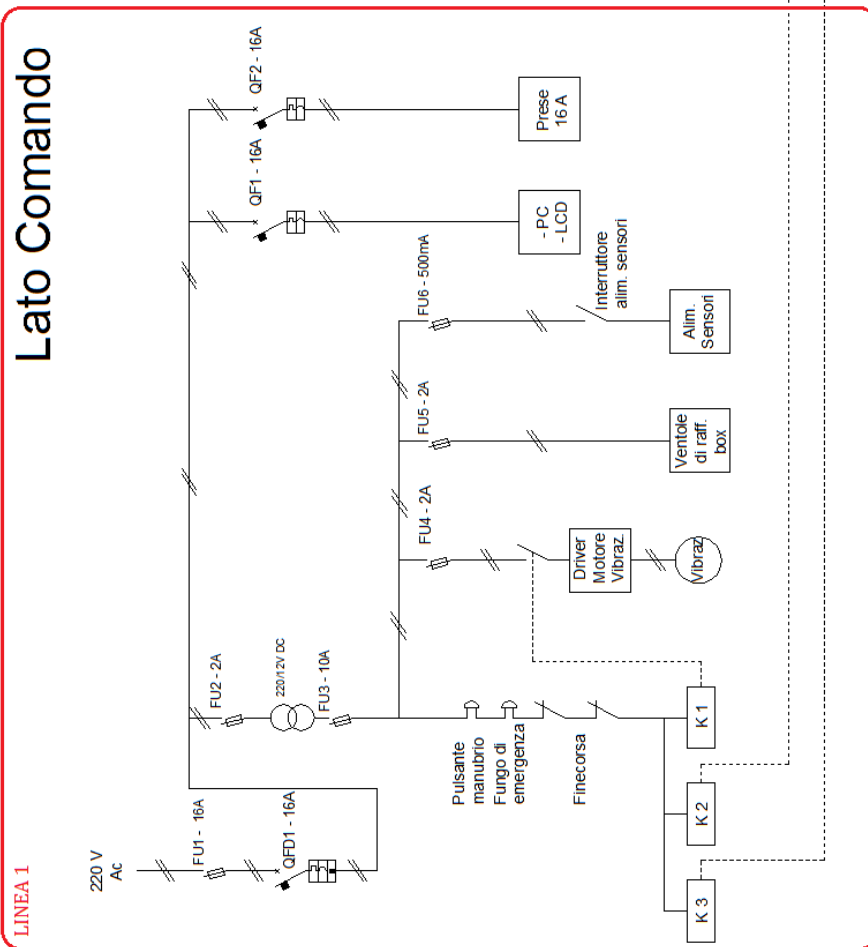
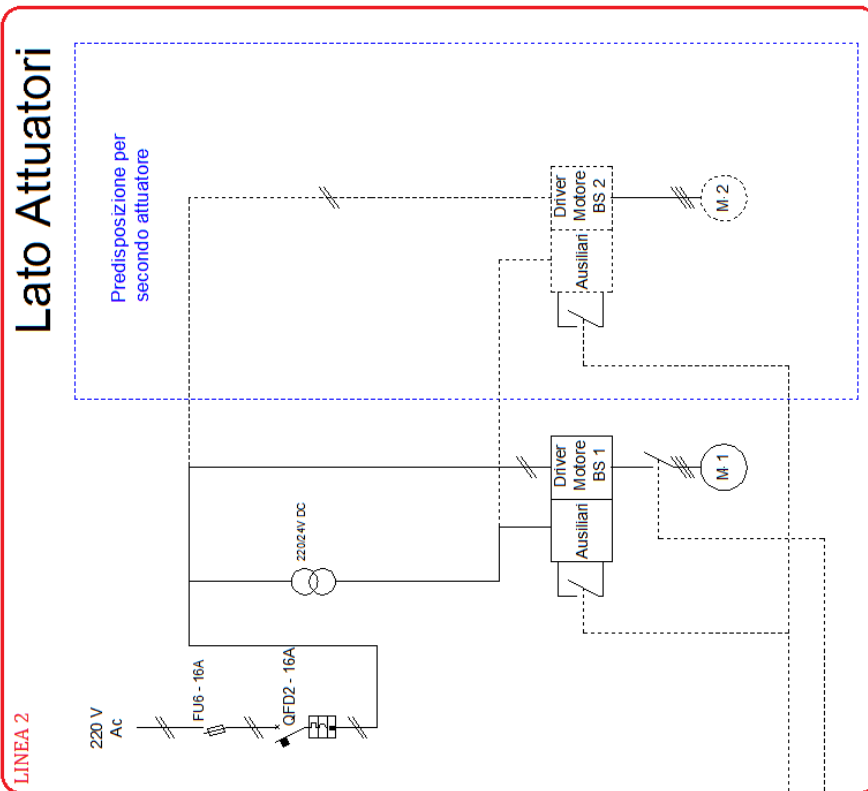


Figura 100 – Schema elettrico gestione utenze

In Figura 100 è evidenziato il sistema sul quale si è scelta un'alimentazione con due linee separate, a 220 V AC da 16 A l'una, poiché la potenza installata era superiore ai 3kW. L'alternativa consisteva nell'utilizzo di un'alimentazione trifase ma questa possibilità è stata da subito scartata per motivi di reperibilità. Infatti solamente le attività produttive o grandi aziende dispongono di questa rete e se il simulatore è stato pensato come strumento trasportabile da un luogo all'altro è opportuno utilizzare la fonte di approvvigionamento dell'energia più comune, per l'appunto la corrente alternata a 220V, di casa.

La Linea 1 gestisce tutti i dispositivi di comando e di servizio come la Workstation, gli schermi, il sistema audio, il drive di controllo della vibrazione sotto sella e l'eventuale punto di aggancio di corrente per l'utente. La Linea 2 invece è dedicata esclusivamente al sistema di attuazione, quindi all'attuatore ed al suo controllore. Per ognuna delle due linee sono state dimensionate le adeguate protezioni come gli interruttori magnetotermici differenziali ed i relativi fusibili.

Sul simulatore, in previsione di possibili rotture dei tamponi di finecorsa, sono stati introdotti degli interruttori di finecorsa che, in caso di angolo di rollio eccessivo, aprano il circuito di potenza dell'attuatore arrestandone il funzionamento e bloccando così il mock up nella posizione raggiunta con il freno. Questo infatti entra in funzione quando viene a mancare l'alimentazione.

Per motivi di sicurezza, essendo questo simulatore destinato ad un uso pubblico, è stato provvisto di un pulsante di emergenza (un classico fungo d'emergenza) che, anche in questo caso, vada a bloccare il mock up del simulatore nella situazione raggiunta al momento dell'apertura del contatto.

Per rendere più selettivo il sistema in caso di guasto, è stato scelto di suddividere la Linea 1 in tre sottosistemi:

- utenze a 12V DC;
- alimentazione Workstation e schermi;
- presa ausiliaria di corrente;

Allo stesso modo la linea 2 è stata divisa in 2 parti, una per ogni attuatore.

Per semplificare le operazioni di accensione e spegnimento dell'intero sistema, i comandi principali sono stati installati su un quadro esterno al carrello.

Tutti i componenti principali finora descritti sono stati modellati in CATIA per poter avere un'idea concreta di come sarebbe stato il simulatore e solo dopo aver trovato la soluzione che più soddisfacesse le esigenze imposte, si è proceduti alla realizzazione di tutti i sistemi.

Il risultato ottenuto al computer si presenta come nelle immagini di seguito riportate.

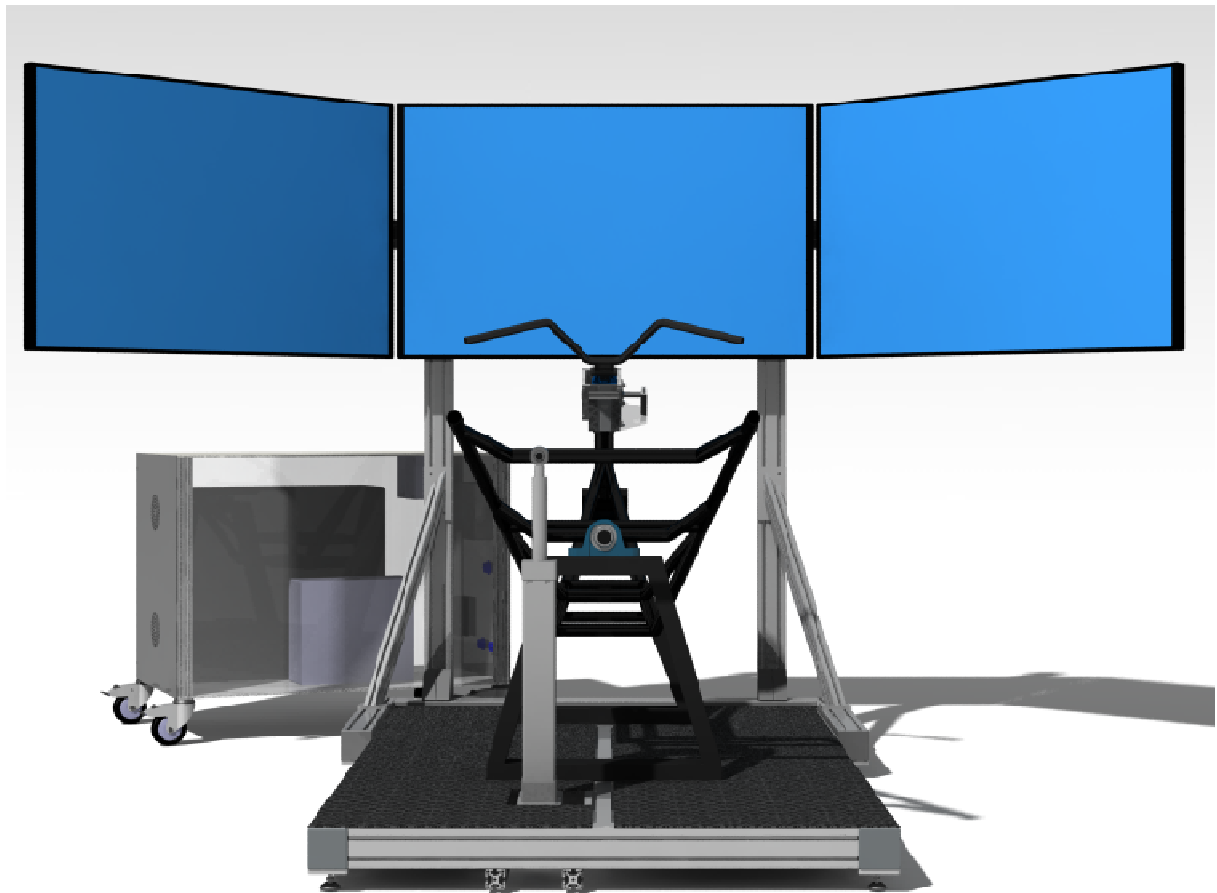


Figura 101 – Simulatore modellato virtualmente in ambiente CATIA

Nella realtà, il simulatore si presenta come nelle immagini riportate sotto.



Figura 102 – Il simulatore nella realtà

3.3 I test di collaudo

Completata l'opera di realizzazione dell'intero simulatore in tutte le sue parti, le attenzioni si sono rivolte alla validazione del modello, per decretare se si tratta di uno strumento in grado di ricreare correttamente la dinamica del motociclo. In questa sezione vengono evidenziati diversi comportamenti tipici dei veicoli a due ruote, per evidenziare come vengono gestiti dal simulatore. In tutti i casi riportati, i segnali di input (ad esempio la coppia di sterzo) corrispondono ai segnali dei sensori montati sul mock-up, i quali monitorano i reali comandi impartiti dal pilota, mentre gli output (ad esempio velocità, angolo di rollio, ecc.) sono i valori restituiti dal modello multibody. I risultati sono stati validati e verranno presentati all'*International Conference on Mechatronics* in programma ad inizio 2013 [26].

3.3.1 Counter Steering

In questo test ci si concentra principalmente sulla tipica manovra di controsterzo (*counter steering*) che il pilota esercita per entrare in curva. In particolare, il pilota entra in curva a 21 m/s che corrispondono a circa 75 km/h. In Figura 103 si vede chiaramente il picco di coppia di sterzo di 10 Nm rivolto verso l'esterno della curva. Come conseguenza di questa manovra iniziale il veicolo inizia a rollare all'interno della curva e raggiunge uno stato stazionario, in curva, ad un angolo di 0.67 radianti con una coppia al manubrio di circa 5 Nm. Successivamente, preparandosi per l'uscita di curva e a raddrizzare il veicolo per tornare in rettilineo, il pilota sterza all'interno della curva con un picco di coppia di sterzo di -8Nm. È interessante osservare che ci sono simulatori di motocicli (e videogiochi) nei quali il pilota non applica questa coppia di controsterzo per entrare in curva, addirittura basta girare il manubrio nella direzione di percorrenza della curva per eseguire correttamente la manovra. È chiaro che questi non sono strumenti consigliabili per l'addestramento in quanto insegnano un comportamento errato per l'esecuzione della manovra.

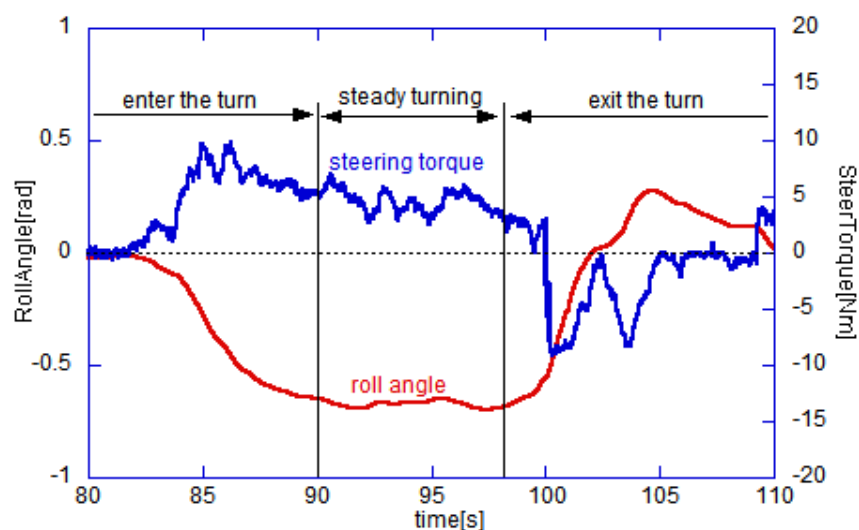


Figura 103 – Manovra di controsterzo in entrata di curva

3.3.2 Frenata in curva

Quando si frena con il freno anteriore, in curva, con un motociclo, il veicolo tende a ridurre il suo angolo di rollio senza il bisogno che il pilota applichi una variazione significativa della coppia di sterzo. Questo è un comportamento tipico ed è dovuto alla forma del pneumatico anteriore. Lo stesso fenomeno non si presenta nel caso di una ruota ipotizzata lenticolare (come ad esempio in una bicicletta). In pratica la forza frenante all'anteriore genera un momento addizionale attorno all'asse di sterzo che tende a girare il manubrio all'interno della curva, generando così una forza centrifuga aggiuntiva che riduce l'angolo di rollio. Il braccio della forza frenante dipende dalla forma della carcassa dello pneumatico. Il simulatore riproduce perfettamente questo comportamento perché considera un modello di pneumatico che considera anche la forma della gomma. In Figura 104 è mostrato il caso di frenata in curva con uno pneumatico standard (in questo modello di motociclo la forma del pneumatico anteriore viene approssimato correttamente con un toroide di raggio 0.063m). Il pilota entra in una curva a sinistra e al secondo 68 si può considerare in manovra di curva stazionaria.

A 70 secondi il pilota frena con il freno anteriore, di conseguenza il rollio del veicolo si riduce significativamente. È interessante osservare come il segnale della coppia di sterzo non presenti alcun tipo di azione (riconoscibile come un picco negativo di coppia al manubrio) che potrebbe giustificare l'improvvisa riduzione dell'angolo di rollio. In Figura 105 è riportato il caso di una manovra identica utilizzando però una ruota modellata con un toroide di raggio 0.001m, in pratica ipotizzando una ruota lenticolare. Il pilota quindi frena con la ruota anteriore a 72.5 secondo trovandosi all'incirca con lo stesso valore dell'angolo di rollio e di coppia al manubrio. In questo caso non sono presenti effetti significativi sull'angolo di rollio dal momento che in questa situazione la forza frenante agisce in un punto avente braccio nullo e di conseguenza non genera alcun momento attorno all'asse di sterzo.

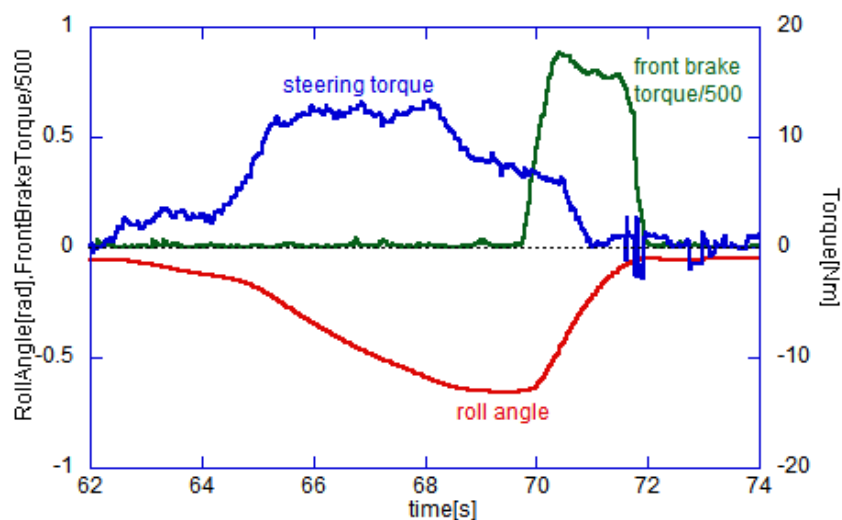


Figura 104 – Frenata in curva con gomma standard

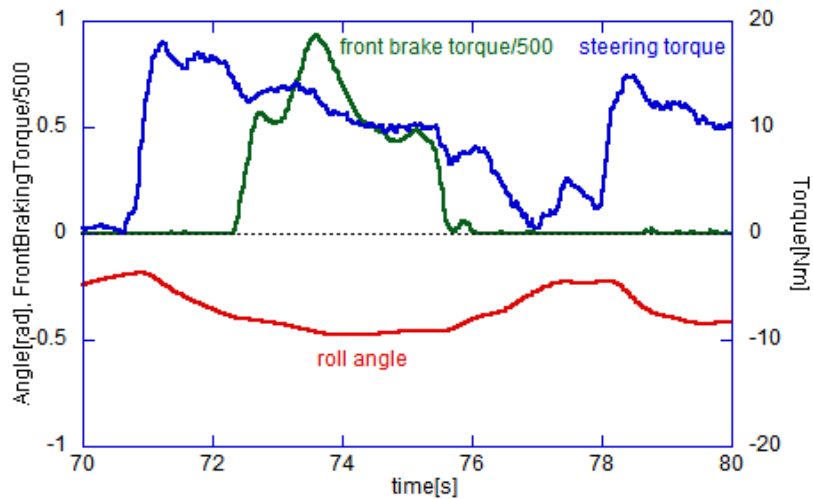


Figura 105 – Frenata in curva con gomma lenticolare

3.3.3 Scivolamento in curva

In questo test si vuole evidenziare l'accoppiamento tra le forze longitudinale e laterale generate dallo pneumatico. Senza entrare nel dettaglio [8], la forza d'attrito che uno pneumatico è in grado di generare è limitata: quando è richiesta una forza longitudinale, la massima forza laterale disponibile si riduce e la stessa forza laterale sarà prodotta con slip laterali più elevati, senza tuttavia eccedere dalla massima forza d'attrito che è possibile generare. Il simulatore riproduce perfettamente anche questo fenomeno. In Figura 106 il pilota sta guidando su una curva a destra con un angolo di rollio di 0.5 radianti e ad una velocità di 25 m/s (circa 90 km/h). Lo slip laterale è ridotto perché la maggior parte della forza laterale è generato dalla spinta di rollio. Al secondo 146 il pilota accelera bruscamente: di conseguenza lo slip longitudinale cresce improvvisamente fino a 0.75 al secondo 147 (slittamento longitudinale).

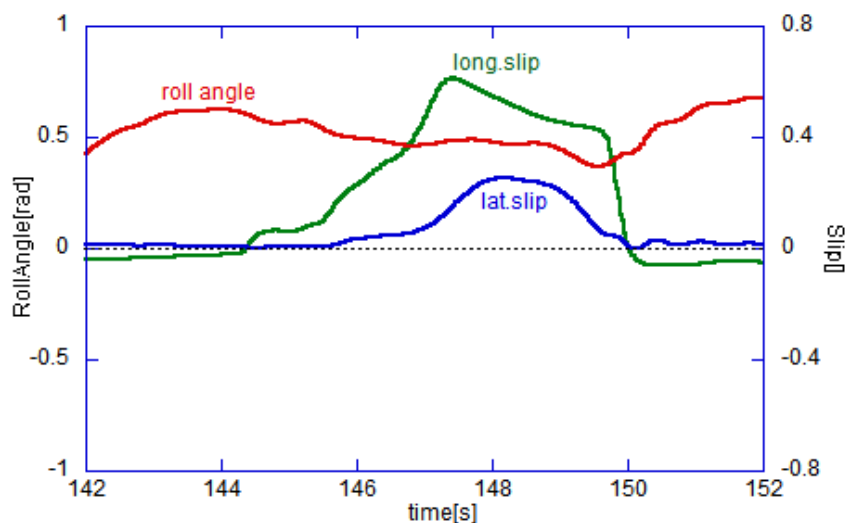


Figura 106 – Scivolamento in curva della ruota posteriore

Contemporaneamente, dovuto all'accoppiamento delle forze dello pneumatico, lo slip laterale della ruota aumenta e la gomma posteriore inizia a scivolare lateralmente raggiungendo un picco di 0.3 radianti al secondo 148. (mentre in condizioni di guida normale è minore di 0.1 radianti). Quando il pilota riduce l'apertura del gas, cioè la richiesta di forza longitudinale (secondo 149), torna nuovamente disponibile il contributo di forza laterale e lo slip si riduce velocemente.

3.3.4 Instabilità di Weave

Le instabilità sono dei fenomeni molto importanti perché nel caso in cui il pilota non sia preparato nel gestire la situazione, sicuramente nasce una situazione di pericolo che porterà alla caduta del veicolo. Il simulatore è in grado di riprodurre anche questo comportamento. In questo test il pilota sta viaggiando in rettilineo e sta accelerando. Quando viene raggiunta la velocità di 41 m/s (circa 150 km/h) inizia l'oscillazione di Weave a circa 4 Hz e si osserva come al secondo 31 il pilota perde il controllo del veicolo (virtuale) ed il test venga interrotto. Per agevolare l'instaurarsi di questa instabilità si è agito sui parametri del veicolo virtuale, in particolare spostando verso il retrotreno il baricentro del veicolo ed aumentando il valore di smorzamento dell'ammortizzatore di sterzo. Le condizioni per instaurare questo tipo di instabilità nel veicolo originale non si presentavano. Tuttavia ci sono dei veicoli in commercio, che per errate condizioni di carico (ad esempio variazioni del baricentro e del tensore d'inerzia) o per particolari condizioni di moto possono innescare l'instabilità di weave.

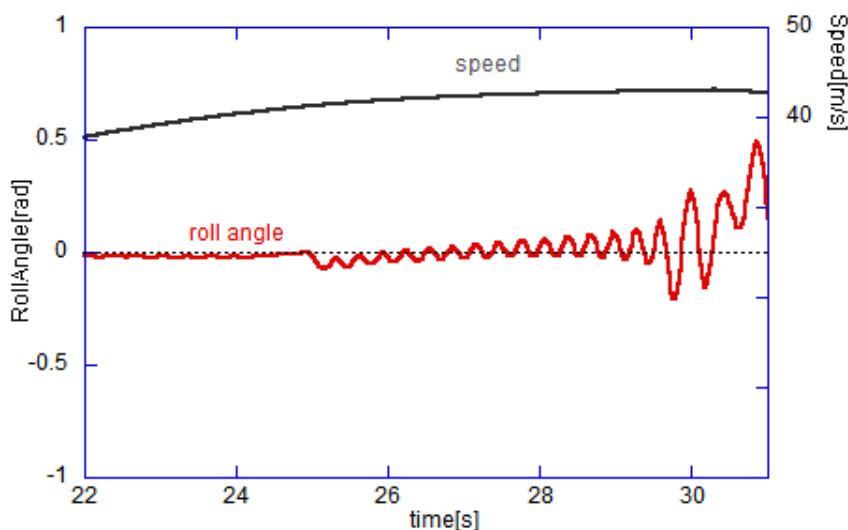


Figura 107 – Instabilità di Weave

3.3.5 Instabilità di Wobble

Oltre all'instabilità di weave, su un motociclo, si possono verificare le condizioni che portano ad un'altra instabilità, il wobble. Anche in questo caso è stato verificato se il simulatore è in grado di ricreare questa situazione. Nel test il pilota sta viaggiando in moto rettilineo e accelera fino a

raggiungere una velocità di circa 22 m/s (circa 80 km/h). Successivamente il pilota rimuove le mani dal manubrio e lascia che il veicolo deceleri naturalmente come conseguenza della resistenza aerodinamica e del freno motore. Alla velocità di 15 m/s appare l'instabilità di wobble che in questo caso si mantiene in un ciclo che inizia al secondo 30 (velocità di 11 m/s). Per mostrare questa instabilità è stata variata la rigidità strutturale del telaio, come previsto in accordo con la letteratura [15]. Tuttavia ci sono molti veicoli in commercio dove l'instabilità si presenta non appena vengono rimosse le mani dal manubrio. In particolare, a causa della struttura degli scooter, è possibile il verificarsi di vibrazioni di wobble poco smorzate o addirittura instabili per basse velocità (10-20 m/s) e con guida senza mani.

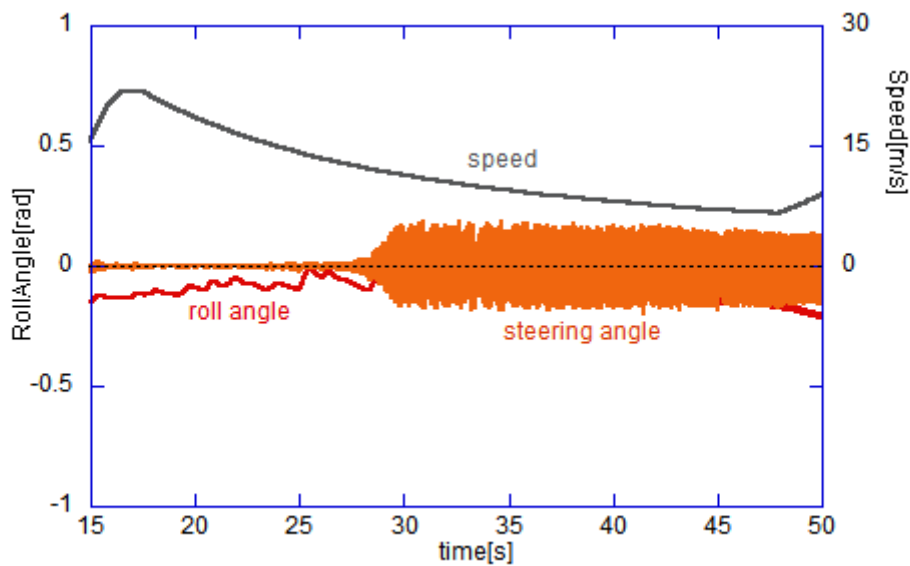


Figura 108 - Instabilità di Wobble

4 CONCLUSIONI

Il grande lavoro che ha coinvolto il simulatore di guida motociclistico in questi ultimi anni ha portato al raggiungimento di importanti risultati e traguardi. Il mio lavoro si è suddiviso principalmente in due grandi studi. Il primo dedicato allo studio dei parametri di guida del SafeBike, il simulatore di guida già presente nel simulatore, e alla sua ottimizzazione fino a raggiungere un livello riconosciuto anche dalle più prestigiose università del mondo specialistiche nel campo della dinamica dei veicoli.

Nella seconda parte, il lavoro si è incentrato sulla progettazione e realizzazione di un nuovo simulatore di guida motociclistico trasportabile. Questa fase non sarebbe stata possibile senza avere un punto di partenza saldo ed affidabile come è il SafeBike.

Il SafeBike è stato coinvolto in parecchi studi per le analisi prestazionali, sia a livello dinamico per quanto riguarda le caratteristiche di maneggevolezza dei veicoli a due ruote, sia a livello di sensazioni fisiche percepite da diversi piloti coinvolti in campagne di test dedicati.

La fase della validazione oggettiva ha visto la necessità di strumentare una motocicletta, con una serie di sensori dedicati, per poter riprodurre delle manovre tipiche di maneggevolezza quali lo slalom, il cambio di corsia e la manovra di curvatura in regime stazionario. Successivamente, la moto è stata replicata nelle sue caratteristiche geometriche ed inerziali come modello virtuale all'interno del simulatore e sono state ripetute le stesse manovre con le stesse geometrie di prova per studiarne il comportamento dinamico.

Lo studio dedicato sulla comparativa prestazionale ha permesso di ottenere degli indici tipici, presenti in letteratura che, analizzati tra loro, hanno permesso di constatare che il simulatore riproduce un comportamento dinamico simile a quello di una moto reale. Questi test sono stati preziosi in quanto hanno permesso di portare allo scoperto quei punti critici che risultavano essere i limiti del simulatore. In particolare la sensazione di velocità percepita risultava essere inferiore a quella reale. Di conseguenza il pilota è portato ad aumentare la velocità con conseguenti difficoltà di guida collegate ad essa, in primis lo sforzo che il pilota deve compiere sul manubrio per poter compiere la manovra prefissata. Da qui le principali differenze nei calcoli degli indici prestazionali svolti.

La fase della validazione soggettiva, invece, ha previsto una campagna di test con circa venti motociclisti ai quali, al termine delle prove, veniva chiesto di compilare un questionario sulle sensazioni percepite alla guida. I preziosi risultati raccolti hanno permesso di evidenziare molti punti deboli del simulatore.

Innanzitutto il passaggio dalla configurazione grafica da uno schermo frontale a tre schermi per una visione panoramica è stato fondamentale per il coinvolgimento nell'ambiente virtuale e per poter adattare più facilmente lo stile di guida del pilota. Con questa soluzione sono stati risolti, anche se non completamente, i problemi di percezione della velocità.

Il secondo lavoro che ha ricevuto ottimi feedback dai risultati dei questionari è stato lo studio dei parametri del filtro di washout: elemento che genera gli output da assegnare ai diversi strumenti, siano questi grafici, acustici o di movimentazione. Si è trattato di un lavoro di affinamento dei guadagni assegnati alle diverse variabili.

Altro punto critico emerso è stata la bassa interazione del comportamento del pilota in sella al simulatore in quanto questo veniva inizialmente gestito solamente tramite il manubrio dotato di sensore. Per i tester più dinamici ed estroversi, che pensavano di poter guidare in curva spostandosi con il corpo in stile moto da corsa, hanno raccolto purtroppo solo grandi delusioni. Questo ha evidenziato la necessità di ampliare le interazioni pilota-moto per la guida del simulatore, espandendo così gli input di guida a sensori montati sotto alla sella e sulle pedane. I risultati ottenuti sono stati sorprendenti in quanto ora è possibile guidare il simulatore anche senza mani.

Giunti ad un livello ritenuto il massimo, ottenibile da layout disponibile, è stato possibile prelevare tutte le conoscenze acquisite in questo studio e poterle utilizzare per la seconda parte del mio lavoro di dottorato: la realizzazione del simulatore di guida trasportabile.

Questa attività ha richiesto una notevole quantità di tempo in fase iniziale per prevedere anche tutte le possibilità di aggiornamento e sviluppo per il futuro. Sono già state considerate infatti le estensioni del simulatore a modelli a 3 o 4 gradi di libertà, step che potrebbero venire considerati nei prossimi lavori. Perché possa esser definito trasportabile il simulatore deve essere semplice, di facile installazione e agevolare le manovre di carico-scarico. Per questo motivo l'intero sistema consta della struttura che porta il simulatore, una struttura che sostiene i tre schermi da 50 pollici ed un carrello contenente il computer, il drive di controllo dell'attuatore e tutti i componenti elettrici.

La struttura del simulatore è stata costruita con dei profilati in alluminio modulari, rendendo così le prossime modifiche il più semplice possibile. Sono stati realizzati appositamente i sensori per la coppia di sterzo al manubrio ma si è dovuto modificare parte del telaio originale dello scooter per poter alloggiare il dispositivo.

Anche per quanto riguarda la struttura che sostiene gli schermi sono stati utilizzati gli stessi profilati in alluminio, utilizzando delle cerniere che durante la fase di trasporto permettono di ridurre le dimensioni.

All'interno del carrello è presente il computer, contenente il cuore del simulatore con tutto il modello matematico del SafeBike opportunamente rivisitato, il drive di controllo dell'attuatore che, connesso al computer tramite una scheda CAN, permette in controllo in real-time del simulatore, l'impianto elettrico che gestisce separatamente tutti i dispositivi presenti nel sistema per rendere il sistema stesso più flessibile, più sicuro ed agevolarne la manutenzione.

Il simulatore trasportabile è quindi stato testato per verificare le prestazioni dinamiche riproducibili ed il livello di simulazione che è in grado di generare. I risultati sono stati molto positivi.

4.1 Eventi di partecipazione

Il simulatore di guida trasportabile è stato presentato per la prima volta, in una versione non ancora completamente collaudata alla Notte delle Ricerche organizzata nel Settembre 2011 presso il giardino interno del Palazzo del Bo dell'Università di Padova. In quest'occasione ogni facoltà poteva presentare i propri lavori di ricerca ed il simulatore è stato sicuramente un protagonista attirando l'interesse del pubblico che aveva la possibilità di vederlo in azione. I parametri di funzionamento non erano ancora stati oggetto di ottimizzazione e anche a livello hardware sono sorti piccoli problemi. L'esperienza è stata fondamentale per poter correggere proprio questi punti deboli e testare il simulatore in vista della presentazione ufficiale che è stata tenuta durante la 69° Esposizione Internazionale del Motociclo (EICMA) in programma a Novembre 2011 presso la Fiera di Milano. Per l'occasione è stata organizzata una conferenza stampa aperta agli operatori del settore nel quale il simulatore è stato presentato per le sue caratteristiche e possibilità e con il quale sono stati effettuati dei test di prova.



Figura 109 - Presentazione ufficiale Simulatore Trasportabile alla 69° edizione dell'EICMA

Il grande successo riscosso dal simulatore a Milano ha richiesto la presenza del simulatore anche alla 70° edizione dell'EICMA tenutasi in Novembre 2012, in particolare per far provare al pubblico la differenza in frenata a bassa aderenza con e senza l'uso dell'ABS, ed in accelerazione su fondo bagnato con e senza l'uso del Traction Control.

Per gli esperti del settore che hanno saputo cogliere la differenza non ovvia del simulatore di guida motociclistico rispetto ad un videogioco, le sensazioni trasmesse sono state molto positive e questo ha confermato il potenziale del simulatore oltre a fornire non poca soddisfazione a chi l'ha realizzato.

4.2 Sviluppi futuri

Come gran parte dei progetti di ricerca, non c'è mai fine al margine di miglioramento. Questo però spesso è legato alle disponibilità economiche del gruppo e al fatto di poter contare di un gruppo di ricerca attivo che abbia la voglia e l'entusiasmo di affrontare una nuova sfida, quella del miglioramento. Sicuramente non si tratta di una strada facile da seguire ma che, se portata a termine, ritorna grandi soddisfazioni anche a livello professionale.

Per quanto riguarda il simulatore di guida trasportabile, il primo step sul quale si dovrà lavorare sarà la predisposizione della sella per poter acquisire i trasferimenti di carico impartiti dal rider; si prospetta una strada simile a quella seguita per il SafeBike anche se, in questo caso, la geometria dello scooter ne complicherà la realizzazione.

Successivamente sarà opportuno ampliare i gradi di libertà del simulatore, inserendo anche il movimento di beccheggio oltre al rollio già presente. Il computer è già stato predisposto per poter gestire i nuovi attuatori che verranno installati.

Un ulteriore upgrade che può esser implementato per aumentare la sensazione di velocità, consiste nell'utilizzo di un generatore eolico che riproduca sensazioni aerodinamiche simili alla realtà proporzionali alla velocità del veicolo. Recenti studi sono stati fatti dal professor Ichiro Kageyama della Nihon University in Giappone [23] ed i risultati possono essere implementati anche nel simulatore del MDRG con i relativi benefici.

5 BIBLIOGRAFIA

- [1] Kearns H., Kidd D., *Sicurezza stradale: gli incidenti stradali nell'UE sono diminuiti dell'11% nel 2010* - Commissione Europea – Comunicato Stampa;
- [2] Report Istat, *Incidenti stradali dei veicoli a 2 ruote Anno 2010*, 24 Aprile 2012
- [3] Dekra Automobil GmbH, *Report sulla sicurezza stradale in moto 2010*;
- [4] http://www.dainese.com/it_it/d-air/ website del marchio Dainese S.p.A;
- [5] S.Rota, *Analisi di un sistema ABS per motocicli al variare dei parametri di funzionamento e dell'aderenza*, Tesi di Laurea Magistrale, 2009;
- [6] BOSCH ABS, *Futuro e sicurezza su due ruote*, Comunicato stampa Bosch – 8 Luglio 2011;
- [7] Thomas Opferkuch, *Dall'ABS al Motorcycle Traction Control* – Presentazione di Bosch GmbH all'Università di Padova, 20/05/2012;
- [8] V. Cossalter, *Motorcycle Dynamics* – Second Edition, LULU editore 2006;
- [9] M.Maso, *Realizzazione di un simulatore di guida motociclistico* – Tesi di dottorato in Ingegneria Industriale, 2008;
- [10] V.Cossalter, R.Lot, *An Advanced Multibody model for the analysis of Motorcycle Dynamics. 2009*
- [11] H.B. Pacejka, *Tyre model for vehicle dynamics analysis*, Swets & Zeitlenger, Amsterdam 1991
- [12] H.B. Pacejka, J.M. Besselink, *Magic Formula Tyre Model with Transient Properties*, Vehicle System Dynamics, V.27, 1997;
- [13] H.B.Pacejka, *Tyre and Vehicle Dynamics*, SAE International, 2005, ISBN:978-7680-1702-1, Chapters 3 & 11;
- [14] R.Lot, M.Massaro, *A Combined model of Tire and road surface for the dynamic analysis of motorcycles handling*, FISITA 2006 Japan;
- [15] V.Cossalter, R.Lot, M.Massaro, *The influence of frame compliance and rider mobility on the scooter stability*”, Vehicle System Dynamics, Vol.45, n°4, pp313 - 326;
- [16] M.Massaro, R.Lot, V.Cossalter, *On engine-to-slip modelling for motorcycle traction control design*, JAUTO 1575R2, 2011;
- [17] V.Cossalter, R.Lot, M.Massaro, *The chatter of racing motorcycles*, Vehicle System Dynamics 46:4, pp. 339-353;
- [18] V.Cossalter, R.Lot, S.Rota, *Objective and Subjective Evaluation of an advanced Motorcycle Riding Simulator*, ETRR 2010;

- [19] K.Hoffmann, *Introduzione alla tecnica di misura con gli estensimetri*, edizione italiana a cura di MauroFilippini, HBM (Hottinger Baldwin Masstechnik GmbH, Darmstadt) 2008;
- [20] V.Huth, F.Biral, O.Martin, R.Lot, *Comparison of two warning concepts of an intelligent Curve Warning System for motorcyclists in a simulator study*, *Accident Analysis and Prevention* 44(1):118-25, 2012;
- [21] E.D. Bekiaris, A.Spadoni, S.Nikolaou, *SAFERIDER Project: new safety and comfort in Powered Two Wheelers*, 2nd Conference on Human System Interactions, HSI '09, art no. 5091045, pp600-602, 2009;
- [22] R.Sartori, *Progetto e Sviluppo di sistemi di controllo attivi e passivi per la sicurezza stradale del motoveicolo* – Tesi di Dottorato in Ingegneria Industriale XXII° Ciclo;
- [23] A.Watanabe, I.Kageyama, Y.Kuriyagawa, *Coisntruction of Riding Simulator for Two-wheeled Vehicle Handling*, 6-7 Settembre 2012, Driving Simulation Conference 2012, Paris (France);
- [24] Th.Brandt, J.Dichgans, E.Koenig, *Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception*, *Expl. Brain Res*,26 476-491;
- [25] Frank M.Cardullo, *Motion and Force Cueing in a Vehicle Simulator* – Seminario presso l'Università di Padova, 11 Luglio 2007;
- [26] M.Massaro, V.Cossalter, R.Lot, S.Rota, M.Ferrari, R.Sartori, M.Formentini, *A Portable Driving Simulator for Single-Track Vehicles*, Internation Conference on Mechatronics, IEEE, Vicenza 2013;

RINGRAZIAMENTI

Scontati sono i ringraziamenti alla mia famiglia e a tutti quelli che hanno vissuto con me bei momenti in questi anni. Grazie anche a te, Vale, che sei stata la mia valvola di sfogo nei momenti più concitati.

Volevo quindi ringraziare sinceramente i professori Vittore Cossalter, Roberto Lot e Alberto Doria per aver creato nel tempo un gruppo di ricerca tra i più dinamici del mondo, il Motorcycle Dynamics Research Group. Senza la loro voglia di dedicarsi alle attività dei tesisti, prima, e dottorandi, poi, non si sarebbero raggiunti numerosi risultati di successo. Senza la loro guida il giovane ricercatore inesperto si troverebbe spiazzato di fronte ai numerosi bivi delle decisioni.

Ho apprezzato molto l'affiatamento con i miei colleghi dai quali ho imparato molto, non solo a livello di conoscenza, ma anche di collaborazione. In particolare grazie a Matteo Formentini per le 1001 attività diverse affrontate assieme e per la determinazione trasmessa nell'affrontare i problemi, a Roberto Sartori "pazzoide informatico" che mi ha sempre aiutato a risolvere mille problemi, a Matteo Massaro per la sua infinita conoscenza teorica e la scarsa praticità, a quel Roby Pego andato in Austria a fare Jodel e al mio compagno di dottorato Mauro Tognazzo. Agli altri dottorandi in corso d'opera, Marco, Davide, Max, Enrico auguro loro tanti successi nella vita. Se lo meritano.