



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Anno Accademico 2022/2023

Sessione di Laurea ottobre 2023

Valutazione della dinamica di guida dei veicoli attraverso test oggettivi sperimentali

Relatore:

Mauro Velardocchia

Candidato:

Paolo Seita

Sommario

Nel corso degli anni le case costruttrici di automobili hanno saputo sviluppare nuove tecnologie, dimostrandosi in grado di ridurre i consumi e di migliorare le prestazioni dei propri veicoli, sotto tutti i punti di vista. Uno degli aspetti che ha ricoperto maggiore importanza negli ultimi due decenni è senza dubbio la rumorosità prodotta dai veicoli: l'introduzione di motori dapprima ibridi e successivamente completamente elettrici ha spinto le case automobilistiche a concentrarsi maggiormente sui rumori provenienti dagli altri elementi del veicolo, tra i quali quello generato dal rotolamento degli pneumatici sull'asfalto, la rumorosità delle singole componenti (tra cui quelle meccaniche), oppure l'effetto dell'aria che investe la carrozzeria del veicolo durante il proprio avanzamento.

L'insieme di questi aspetti ha spinto il settore automotive ad approfondire le analisi relative alle percezioni sensoriali sperimentate dagli occupanti del veicolo: queste sono strettamente collegate alle performance dal punto di vista del comfort di guida (la cui trattazione si riconduce all'analisi della dinamica verticale) ed alle performance legate alla dinamica laterale, attraverso l'analisi dell'intero sistema di sterzo di qualsiasi veicolo, indipendentemente dal fatto che esso sia dotato di propulsore termico, ibrido oppure elettrico.

In questo contesto è stato sviluppato il presente progetto di tesi, svolto presso l'azienda Danisi Engineering, che pone come obiettivo l'analisi di due aspetti fondamentali sopra elencati, relativi alla dinamica del veicolo: "Steering feeling performances" & "Ride comfort performances".

L'attività svolta all'interno dell'azienda, iniziata durante il periodo di tirocinio curricolare e proseguita successivamente con la stesura della tesi, ha previsto la produzione di due documenti denominati "Design Verification Plan" relativi ai due argomenti elencati in precedenza, necessari all'azienda al fine di possedere una guida completa per quanto riguarda la progettazione e l'analisi, attraverso determinati test da eseguire, di un veicolo a ruote: attraverso i documenti prodotti è possibile arrivare ad esprimere una valutazione oggettiva, basata su dati numerici, del sistema di sterzo e delle prestazioni in ambito di dinamica verticale e quindi comfort di guida.

Al fine di produrre una documentazione esauriente e strutturata è stato estremamente importante elaborare ed analizzare una serie di dati acquisiti da alcune sessioni di test in pista, svolte in concomitanza con il progetto di tesi, con l'obiettivo di determinare le caratteristiche di un veicolo per

conto di un'azienda cliente. Infatti, i risultati ottenuti hanno permesso di completare il documento attraverso diversi grafici utili alla comprensione degli aspetti analizzati, oltre ad aver fornito un punto di partenza per la determinazione delle variabili più importanti e più complesse da analizzare.

Inoltre, è stato fondamentale aver frequentato regolarmente l'azienda, in quanto al suo interno è stato possibile osservare quotidianamente i veicoli sui quali veniva installata la strumentazione di misura, al fine di ottenere i dati durante le sessioni di test. In questo modo è stato possibile conoscere ed apprendere determinati aspetti dei dispositivi di misura difficilmente reperibili altrimenti.

Infine, sebbene i due argomenti siano stati trattati in due periodi diversi, per poter produrre due documenti distinti e specifici, è necessario definire il loro intrinseco collegamento al fine di garantire una valutazione oggettiva quanto più possibile completa del veicolo analizzato o progettato, a partire dalla sicurezza, passando per il comfort percepito ed arrivando al feeling di guida.

Indice

1 Stato dell'arte	7
1.1 Introduzione Sistema di sterzo	7
1.2 Sistema di sterzo meccanico	7
1.3 Assistenza idraulica	8
1.4 Assistenza elettrica	9
1.5 Dinamica verticale (Ride comfort)	10
2 Sistema di sterzo	12
2.1 Componenti del sistema	12
2.1.1 Colonna di sterzo	12
2.1.2 Torsion damper	12
2.1.3 Albero intermedio	13
2.1.4 Pignone e cremagliera	13
2.1.5 Barra di torsione	14
2.2 Hydraulic Power Steering (HPS)	15
2.3 Electric Power Steering (EPS)	16
2.3.1 EPSapa	16
2.3.2 EPSc	17
3 Asse di sterzo	18
3.1 Geometria dell'asse di sterzo	18
3.1.1 Angoli di Caster e King-Pin	19
3.1.2 Braccio longitudinale e trasversale	20
4 Steering Feeling – Design Verification Plan	21
4.1 Check preliminari del veicolo	21
4.1.1 Telaio e sospensioni	21
4.1.2 Pneumatici	22
4.2 Strumentazione di misura	22
4.2.1 Sensore di coppia volante ed angolo volante	23
4.2.1.1 Type 1	23
4.2.1.2 Type 2	24

4.2.1.3 Inerzia del volante.....	24
4.2.3 Sensore di velocità del veicolo	26
4.2.4 Sensore di accelerazione laterale	26
4.2.5 Sensore di velocità angolare e angolo di deriva	27
4.2.6 Sensore di Slip angle	28
4.2.7 Sensore di traiettoria del veicolo	28
4.2.8 Sensore di altezza dal suolo.....	28
4.2.9 Sensore di forze sul tirante dello sterzo	28
4.3 Canali raccolti	29
4.4 Parametri del veicolo.....	30
4.4.1 Condizioni di carico del veicolo	30
4.4.2 Valutazione del CoG	31
4.5 Check degli strumenti di misura	33
4.6 Manovre eseguite.....	34
4.6.1 Steering cycle.....	34
4.6.2 Manovra sinusoidale	37
4.6.2.1 Condizioni pre-test.....	37
4.6.2.1 Manovra eseguita	38
4.6.3 Manovra Slow Ramp.....	40
4.6.4 Manovra di sweep in frequenza	42
4.6.5 Colpo di sterzo (Step steer)	44
4.7 Elaborazione dati e risultati e report finale.....	46
4.7.1 Report cicli di sterzo	46
4.7.1.1 Angolo di sterzo.....	46
4.7.1.2 Coppia volante	47
4.7.1.3 Forze sui tiranti dello sterzo	50
4.7.2 Report manovra sinusoidale.....	52
4.8.2 Report manovra di Ramp steer	52
4.8.3 Report manovra di Step steer	53
4.8.4 Report relativo alla risposta in frequenza	54
4.8.5 Report manovre IPG Car Maker	55

5 Dinamica verticale	64
5.1 Modello a 4 gradi di libertà	64
6 Design Verification Plan	70
6.1 Check preliminari del veicolo	70
6.1.1 Telaio e sospensioni.....	70
6.1.2 Pneumatici	70
6.2 Strumentazione di misura	72
6.2.1 Sensore di accelerazione tri-assiale cuscino/schienale sedile	72
6.2.2 Sensore di accelerazione volante/telaio/guide sedile	73
6.2.3 Sensore di accelerazione porta-mozzi e duomi.....	75
6.2.4 Sensore di velocità del veicolo (rilevata da giri ruota)	76
6.2.5 Amplificatori di segnale	77
6.2.6 Acquisition board.....	77
6.3 Canali raccolti	78
6.4 Parametri del veicolo.....	79
6.5 Esecuzione test.....	80
6.5.1 Superfici per test random.....	80
6.5.2 Superfici per test in transitorio.....	81
6.6 Analisi dei risultati	82
6.6.1 Applicazione dei filtri di percezione umana	82
6.6.2 Analisi dei test in regime transitorio	84
6.6.3 Analisi dei test random.....	86
7 Conclusioni	88
Bibliografia	90

Capitolo 1

Stato dell'arte

1.1 Introduzione Sistema di sterzo

Il sistema di sterzo rappresenta senza dubbio uno dei componenti più importanti all'interno di un veicolo, in quanto consente di stabilirne la direzione di avanzamento desiderata dal conducente semplicemente tramite l'azionamento del volante.

Nonostante l'applicazione di un determinato comando volante possa risultare semplice, l'intero sistema di sterzo si presenta come un elemento sofisticato, composto da molteplici componenti, avente la responsabilità di garantire la giusta direzionalità al veicolo evitando di compromettere l'incolumità degli occupanti. Per questi motivi nel corso degli anni sono stati eseguiti molteplici studi al fine di migliorare le prestazioni e la sicurezza dei sistemi di sterzo dei veicoli: a partire da sistemi di sterzo puramente meccanici si è arrivati a sviluppare sistemi di servoassistenza idraulici oppure elettrici.

1.2 Sistema di sterzo meccanico

I sistemi di sterzo tradizionali sono costituiti dai seguenti elementi, riportati in figura 1:

- un volante (1), che rappresenta l'elemento d'interfaccia tra il conducente ed il veicolo ed il cui azionamento permette di eseguire una traiettoria curvilinea oppure una manovra di parcheggio;
- un piantone (2), posto in collegamento con il volante mediante giunti meccanici, che trasmette il comando dal volante alla scatola di sterzo;
- la scatola di sterzo (3), costituita generalmente da un sistema pignone-cremagliera, tramite la quale viene convertito il moto da rotatorio a rettilineo, azionando di conseguenza i tiranti;
- i tiranti (4), i quali trasmettono le forze ricevute dalla scatola di sterzo al fuso a snodo, rendendo così possibile eseguire le varie manovre di sterzo;
- il fuso a snodo (5), che contiene il mozzo ruota ed è l'elemento responsabile della rotazione delle ruote.

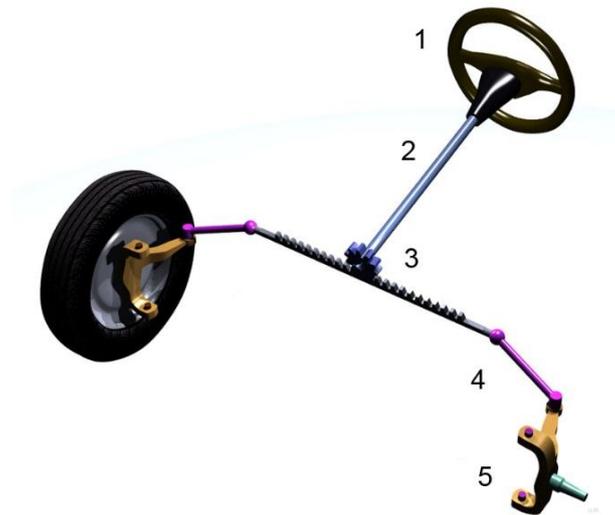


Figure 1 - Sistema di sterzo meccanico

I sistemi di sterzo meccanici presentano un limite, costituito dagli elevati valori di coppia volante richiesti al conducente del veicolo al fine di imprimere un comando al veicolo, in particolare nelle manovre eseguite a velocità di avanzamento del veicolo nulla o comunque contenuta, come nelle manovre di parcheggio.

1.3 Servoassistenza idraulica

Al fine di rendere più semplice l'applicazione di qualsiasi comando da parte del conducente al veicolo, a partire dagli anni 50 del Novecento sono stati introdotti due sistemi di servoassistenza. Il primo è denominato "Hydraulic power steering" (HPS) e si differenzia dal sistema di sterzo meccanico per la presenza di una pompa idraulica ad alta pressione, la quale entra in funzione nel momento in cui viene eseguita una manovra di sterzo, inviando una determinata quantità d'olio ad una delle due camere presenti, a seconda della direzione del comando ed in maniera proporzionale all'angolo impresso al volante.

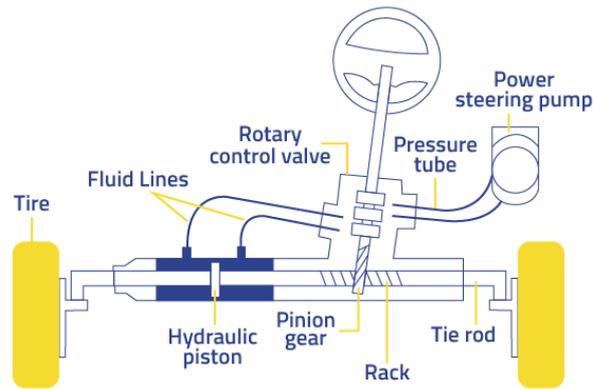


Figure 2 - Sistema di sterzo assistito idraulicamente

Come si può notare dalla figura 2, in un sistema HPS vengono mantenuti gli elementi di un sistema di sterzo tradizionale, ai quali viene aggiunto un circuito idraulico, il quale oltre al vantaggio relativo alla riduzione della forza necessaria per compiere le manovre di sterzo, presenta un importante svantaggio, costituito dall'assorbimento di notevoli quantità di potenza dal motore del veicolo, essendo azionato direttamente da questo. In questo modo ogni volta in cui viene eseguita una manovra di sterzo aumentano i consumi e di conseguenza le emissioni di inquinanti.

1.4 Servoassistenza elettrica

Il sistema di servoassistenza elettrica, denominato "Electric power steering" (EPS), è stato introdotto nella produzione delle automobili di serie a partire dai primi anni Duemila, con lo scopo di permettere al conducente di eseguire qualsiasi tipo di manovra senza la necessità di applicare coppie volante troppo elevate, garantendo una riduzione di consumi rispetto al sistema HPS e soprattutto non dipendendo da una pompa in alta pressione. In particolare, un sistema EPS prevede, oltre agli elementi presenti nel sistema di sterzo meccanico, un motorino elettrico collegato al piantone dello sterzo e comandato da una centralina. L'azionamento di questo dispositivo avviene attraverso un sensore che misura la resistenza opposta alla rotazione e tramite un comando da parte della centralina garantisce determinati valori di forza e coppia volante.



Figure 3 - Sistema di sterzo assistito elettricamente

Dalla figura 3 è possibile individuare la presenza del motorino elettrico citato sopra, posto lungo il piantone. Tuttavia, sono presenti in commercio anche configurazioni di EPS con il motorino elettrico posto in corrispondenza dell'accoppiamento pignone-cremagliera.

1.5 Introduzione alla dinamica verticale (Ride comfort)

Il secondo aspetto analizzato all'interno di questa tesi è rappresentato dal comportamento di un veicolo dal punto di vista della dinamica verticale. Questo elemento è fondamentale in quanto influisce direttamente sulle condizioni degli occupanti del veicolo: il comfort del conducente e dei passeggeri rappresenta la conseguenza dei due moti di traslazione lungo l'asse verticale (asse Z) e di rotazione della massa sospesa intorno all'asse di beccheggio del veicolo (asse Y), in seguito all'attraversamento di ostacoli (quali dossi o traversine) o in generale in seguito a qualsiasi condizione di avanzamento del veicolo, oltre che alle vibrazioni degli elementi interni al veicolo come il motore termico. È quindi fondamentale sviluppare un sistema in grado di trasmettere i moti sopra elencati in modo da non procurare conseguenze alla salute degli occupanti del veicolo.

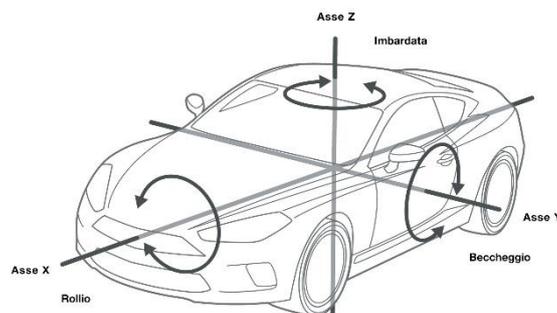


Figure 4 - Sistema di coordinate e moti di rotazione del veicolo

I parametri che vengono analizzati sono le frequenze dei moti di oscillazione e di rotazione della massa sospesa nelle varie situazioni di guida, poiché devono essere in seguito filtrate secondo le ampiezze di banda che impattano maggiormente sulla percezione e sulla salute umana.

Capitolo 2

Sistema di sterzo

2.1 Componenti del sistema

Analizzando in maniera approfondita il sistema di sterzo di un veicolo è possibile verificarne la complessità e la presenza di un elevato numero di componenti, i quali verranno introdotti e descritti in questo capitolo.

2.1.1 Colonna di sterzo

Rappresenta il componente che trasmette il comando all'intero sistema di sterzo e di conseguenza al veicolo, a partire dal comando impresso sul volante da parte del guidatore. Il collegamento della colonna con il telaio del veicolo è garantito da due cuscinetti e da una serie di elementi viscosi, responsabili degli attriti viscosi, i quali sono direttamente proporzionali alla velocità angolare dell'albero.



Figure 5 - Colonna di sterzo

2.1.2 Torsion damper

Questo elemento interrompe la continuità della trasmissione del sistema di sterzo smorzando le vibrazioni torsionali e longitudinali impresse dall'asse anteriore del veicolo al volante e può essere presente in due tipologie differenti:

- Elemento elastico interposto tra un tubo interno ed uno esterno (rispettivamente collegati a volante e giunto cardanico);
- Collegamento esterno tra i due tubi.

2.1.3 Albero intermedio

Tramite la presenza di due giunti cardanici la colonna di sterzo viene collegata all'albero intermedio e quest'ultimo viene messo in collegamento con l'albero inferiore. Questo elemento è il responsabile del rispetto delle tolleranze del sistema di sterzo, tramite un componente in grado di regolare la propria lunghezza. Inoltre, un ulteriore elemento posto circa a metà dell'albero garantisce il collegamento con la cuffia di tenuta, dove si trova il lubrificante necessario al sistema pignone-cremagliera.



Figure 6 - Albero intermedio dello sterzo

2.1.4 Pignone e cremagliera

La trasmissione del comando di sterzo si sviluppa ulteriormente tramite l'accoppiamento tra pignone (collegato all'albero inferiore) e cremagliera, sulla quale agirà una forza dipendente principalmente dalla coppia di sterzo impressa dal guidatore.

Alcuni elementi come l'accoppiamento in corrispondenza della cuffia di tenuta generano delle forze viscosse che si oppongono al comando di sterzo. Inoltre, lo stesso accoppiamento pignone-cremagliera genera una componente d'attrito a causa del contatto tra i denti dei due elementi ed a causa dello strisciamento della cremagliera sulla propria guida.

Sono infine presenti due boccole che delimitano la corsa della cremagliera sulla guida.



Figure 7 – Cremagliera

2.1.5 Barra di torsione

Questo elemento viene utilizzato al fine di ottenere il corretto azionamento della servoassistenza: viene misurato l'angolo di torsione della barra (attraverso l'utilizzo di sensori che possono essere ottici oppure magnetici) e il valore rilevato viene sfruttato dal sistema di servoassistenza, il quale risponderà erogando una quantità di coppia necessaria ad eseguire la specifica manovra.

Valori medi di rigidità della barra si attestano intorno ai 2 Nm/° arrivando ad un angolo di torsione massimo intorno ai 5°.

La barra di torsione si trova in posizione interna ad uno degli alberi del sistema di sterzo, in particolare può trovarsi in corrispondenza dell'albero superiore (EPSc) oppure di quello inferiore (EPSapa).

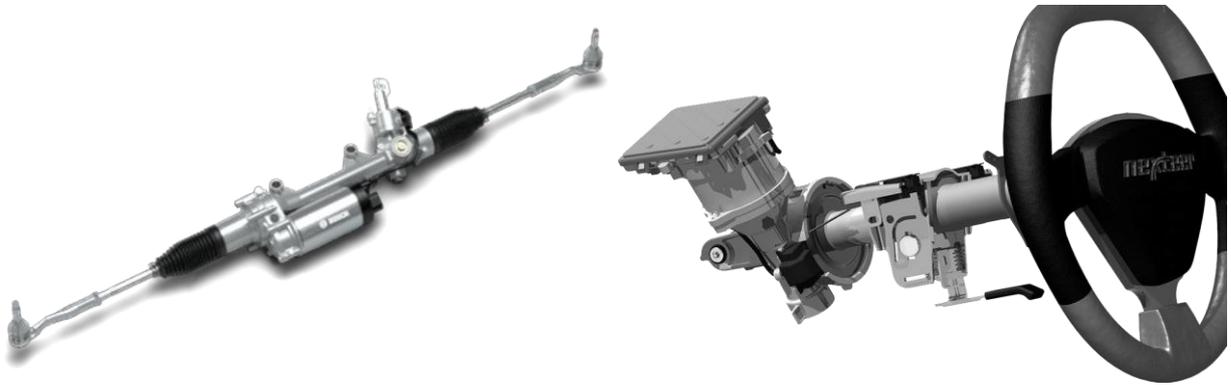


Figure 8 - EPSapa (sinistra) & EPSc (destra)

2.2 Hydraulic Power Steering (HPS)

Il sistema di servoassistenza idraulica presenta un circuito idraulico composto da due camere, le quali vengono alternativamente messe in pressione a seconda del segno dell'angolo di torsione della torsion bar. Il livello di pressione generato all'interno delle camere viene definito dal sistema attraverso l'utilizzo della mappa contenente la Hydraulic boost curve, mentre nella camera opposta la pressione corrisponde a quella atmosferica (1 bar).

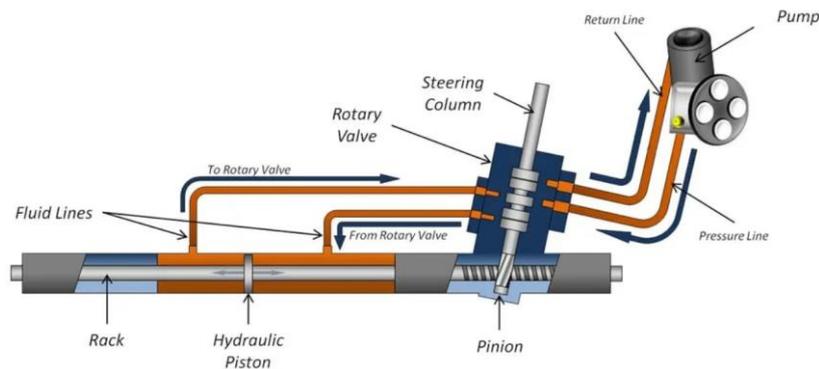


Figure 9 - Schema HPS

La mappa di Hydraulic boost curve si articola in tre segmenti

- Highway: in questa zona le coppie trasmesse allo sterzo da parte del guidatore sono ridotte, di conseguenza la pressione con cui viene alimentata una delle due camere mantiene dei valori contenuti;
- City: questa zona è contraddistinta da coppie di sterzo intermedie, per cui anche la pressione di boost sarà superiore;
- Parking: corrisponde all'ultima zona ed è caratterizzata da coppie volante più elevate, le quali comportano pressioni di boost elevate, al fine di permettere al guidatore di completare le manovre di parcheggio senza dover applicare coppie e forze estreme.

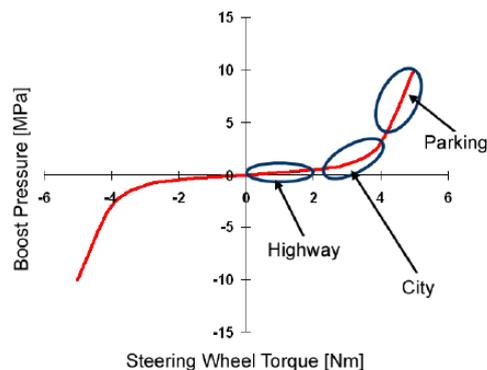


Figure 10 - Hydraulic boost curve

2.3 Electric Power Steering (EPS)

La servoassistenza elettrica si suddivide in tre tipologie, differenti tra loro dal punto di vista della collocazione del motore elettrico, il quale si può disporre in corrispondenza della colonna di sterzo, in corrispondenza del pignone oppure della cremagliera.

2.3.1 EPSapa

L'Electronic Power System axial parallel drive garantisce la servoassistenza elettrica agendo direttamente sulla cremagliera tramite una cinghia ed un accoppiamento vite-madrevite a ricircolo di sfere. La corrente che alimenta il motore elettrico viene calcolata a partire dall'angolo di torsione rilevato sulla torsion bar e viene moltiplicata per la costante di coppia del motore elettrico, fornendo in questo modo il valore di coppia che viene applicato al sistema da parte della servoassistenza.

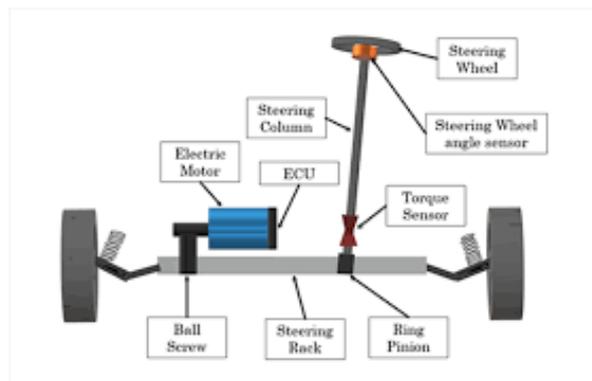


Figure 11 - Schema EPSapa

Nella figura sottostante è possibile individuare il comportamento del sistema di servoassistenza, il quale interviene in maniera sempre più importante al diminuire della velocità "V" del veicolo, in quanto nelle manovre di parcheggio risulterebbe molto più impegnativo riuscire a eseguire le manovre di sterzo desiderate dal guidatore in caso di sistema di sterzo puramente meccanico.

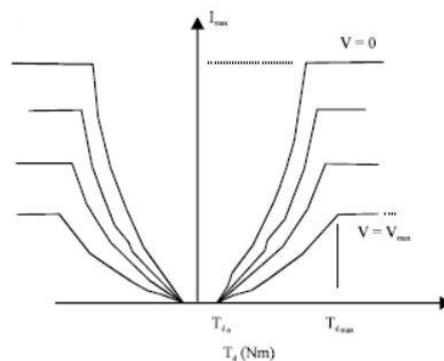


Figure 12 - EPSapa boost curve

2.3.2 EPSc

Questo sistema garantisce la servoassistenza erogando la quantità di coppia richiesta sulla colonna in corrispondenza della colonna di sterzo oppure del pignone.

EPSc alla colonna

In questa tipologia di servoassistenza la barra di torsione si trova nella colonna di sterzo, in corrispondenza del primo albero del sistema e la coppia viene trasmessa attraverso una cinghia collegata alla colonna superiore ed all'albero del motore elettrico.

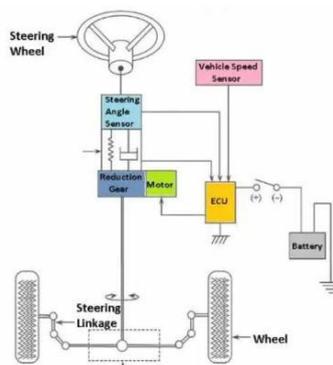


Figure 13 - Schema EPSc alla colonna

EPSc al pignone

In questo sistema la barra di torsione si trova nella zona dell'accoppiamento tra pignone e cremagliera e la coppia di sterzo viene trasmessa attraverso una cinghia che collega l'albero del motore elettrico e l'albero del pignone.

La coppia di servoassistenza viene erogata a partire dall'angolo di torsione della torsion bar, che impone il livello di corrente, il quale viene moltiplicato per la costante di coppia del motore elettrico, ottenendo così il dato di uscita.

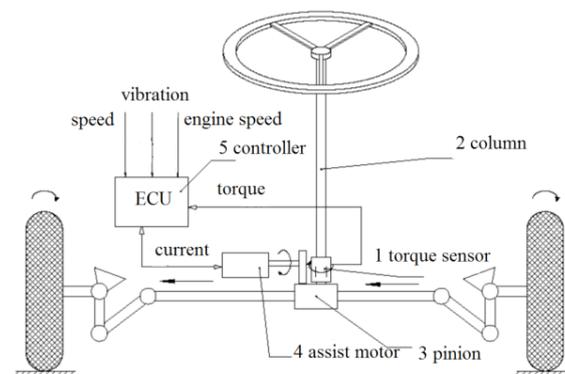


Figure 14 - Schema EPSc al pignone

Capitolo 3

Asse di sterzo

3.1 Geometria dell'asse di sterzo

Le ruote sterzanti di un veicolo (generalmente le ruote anteriori) ruotano intorno ad un asse che non è né perpendicolare al suolo né attraversa il centro dell'impronta di contatto tra pneumatico ed asfalto. L'asse di sterzo della ruota viene definito infatti come l'elemento geometrico generato dal collegamento virtuale tra i punti di attacco dell'upper control arm (UCA) e del lower control arm (LCA) della sospensione con la ruota.

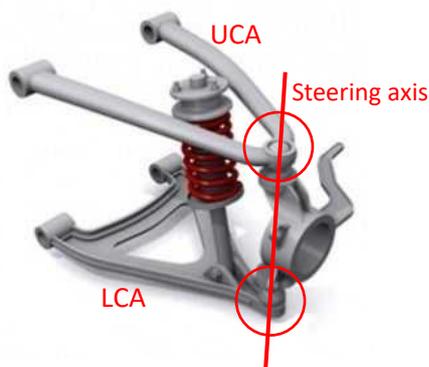


Figure 15 - Asse di sterzo

Definito l'asse di sterzo è possibile individuare una serie di variabili geometriche legate all'azionamento dello sterzo per eseguire qualsiasi manovra, considerando il sistema di riferimento comunemente utilizzato (mostrato nella figura sottostante) per descrivere la dinamica dei veicoli.

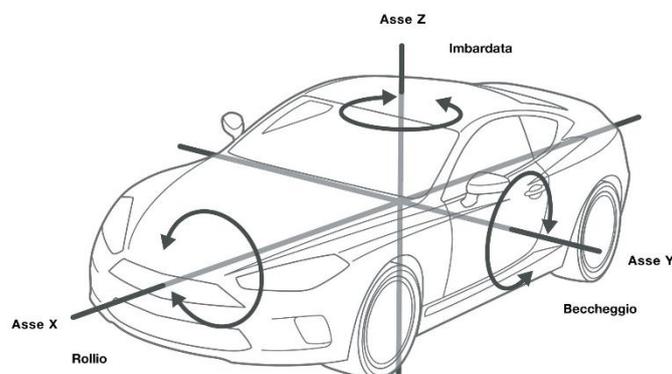


Figure 16 - Assi di riferimento

3.1.1 Angoli di Caster e King-Pin

Rappresentano due dei principali parametri correlati all'asse di sterzo e sono individuati come segue:

- *Caster angle* (ν): rappresenta l'angolo tra l'asse di sterzo della ruota ed il piano verticale visto ponendosi a lato del veicolo (piano XZ). Assume un valore positivo nel caso in cui il prolungamento dell'asse di sterzo incontra l'asfalto ad un valore della coordinata X maggiore rispetto al valore della coordinata X del centro ruota, oppure assume un valore negativo nel caso opposto; talvolta può essere pari a zero.

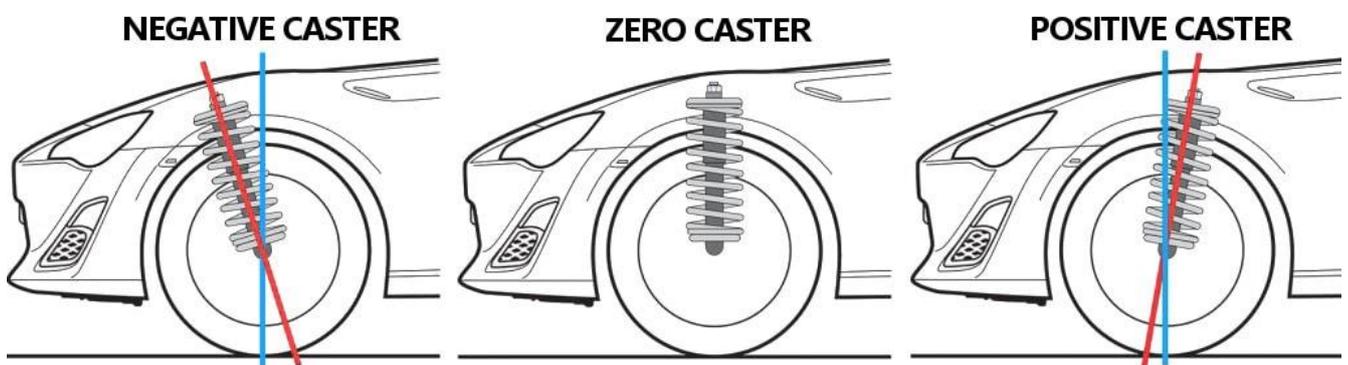


Figure 17 - Caster angle

- *King-Pin angle* (λ): rappresenta l'angolo tra l'asse di sterzo della ruota ed il piano verticale longitudinale (piano YZ).

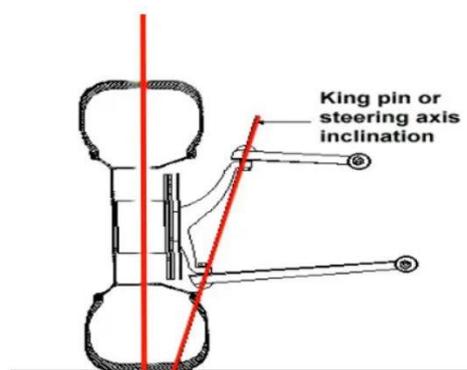


Figure 18 - King-pin angle

Entrambi gli angoli sopra elencati contribuiscono a generare il momento di autoallineamento delle ruote (e di conseguenza dell'intero sistema di sterzo), il quale viene definito in questo modo in quanto contribuisce a ripristinare le condizioni di stabilità del veicolo, con le quattro ruote allineate, ed è da tenere in considerazione nel calcolo delle coppie trasmesse lungo l'intero sistema di sterzo.

3.1.2 Braccio longitudinale e braccio trasversale

Rappresentano le ulteriori due variabili geometriche legate all'asse di sterzo dei veicoli e sono definite come segue:

- *Braccio longitudinale* (b_l): rappresenta la distanza tra le coordinate X del punto di contatto dello pneumatico con l'asfalto e del punto di incontro tra l'asse di sterzo e l'asfalto;
- *Braccio trasversale* (b_t): rappresenta la distanza tra le coordinate Y del punto di contatto dello pneumatico con l'asfalto e del punto di incontro tra l'asse di sterzo e l'asfalto.

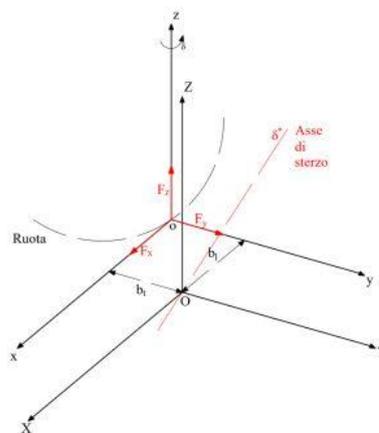


Figure 19 - Braccio longitudinale e braccio trasversale

A partire dai due bracci appena descritti e dalle forze trasmesse tra asfalto e pneumatici e tra pneumatici e veicolo è possibile individuare ulteriori momenti relativi all'asse di sterzo:

- M_{ZF_x} : è il momento generato dalle forze longitudinali moltiplicate per il braccio trasversale;
- M_{ZF_y} : è il momento generato dalle forze laterali moltiplicate per il braccio longitudinale;
- M_{XF_z} : è il momento generato dalle forze verticali moltiplicate per il braccio longitudinale;
- M_{YF_z} : è il momento generato dalle forze verticali moltiplicate per il braccio trasversale.

La somma dei quattro momenti sopra elencati e del momento di auto-allineamento M_z costituiscono il momento totale relativo all'asse di sterzo.

Capitolo 4

Steering feeling – Design Verification Plan

Una volta noti gli aspetti più importanti che definiscono il sistema di sterzo di un veicolo, è necessario impostare una procedura ben strutturata che fornisca come output una serie di parametri oggettivi ai quali riferirsi in fase di progettazione.

A tale scopo nasce l'esigenza di compilare un Design Verification Plan (DVP) che contenga una serie di indicazioni molto dettagliate relativamente alla tipologia di test a cui sottoporre il veicolo, stabilendo i parametri in maniera oggettiva in modo da garantire la validità dei risultati a livello assoluto.

In questo capitolo verrà descritto l'intero percorso necessario per svolgere determinati test al fine di ottenere i parametri oggettivi elencati in precedenza.

4.1 Check preliminari del veicolo

Il primo passo da compiere è costituito dal controllo di tutti gli aspetti del veicolo, a partire dalle condizioni del propulsore, passando dalle condizioni di integrità del telaio, arrivando agli pneumatici, i quali devono possedere determinate caratteristiche. Tutti gli aspetti verranno elencati nei prossimi paragrafi.

4.1.1 Telaio e sospensioni

Prima di poter eseguire i test sul veicolo è necessario verificarne l'integrità dell'intero telaio, controllando che non siano avvenuti cedimenti strutturali in alcuna zona e che siano rispettate le caratteristiche attraverso le quali il veicolo è stato omologato e fabbricato. Inoltre, è necessario verificare che l'intero sistema di sospensioni (anteriori e posteriori) sia in condizioni adeguate, ovvero non presenti anomalie o non abbia componenti eccessivamente usurati, che possano mettere a repentaglio l'incolumità del test driver e dell'eventuale ingegnere a bordo del veicolo durante i test. Infine, è necessario eseguire un controllo ulteriore relativamente al sistema di sterzo, analizzando non soltanto elementi come la servoassistenza, il sistema pignone-cremagliera ed i tiranti, ma anche i cuscinetti, le boccole, la barra di torsione e gli alberi di sterzo.

4.1.2 Pneumatici

Un ulteriore aspetto molto importante è costituito dalla verifica delle condizioni degli pneumatici al momento del test, in quanto devono rispettare le seguenti caratteristiche:

- È necessario dapprima verificare che il treno di pneumatici utilizzato sia conforme alle specifiche della vettura sottoposta al test;
- Gli pneumatici dovrebbero essere nuovi oppure, nel caso in cui fossero già stati usati, devono possedere le condizioni adeguate a poter essere utilizzati, non presentando quindi segni di eccessiva usura e/o danneggiamento;
- Qualora gli pneumatici fossero già stati utilizzati in precedenza al test, lo spessore del battistrada deve essere comunque superiore ai 2,5 mm e non deve presentare difformità oltre che segni di eccessiva usura;
- La pressione di gonfiaggio deve rispettare le indicazioni riportate nel libretto del veicolo oppure i valori previsti dalle indicazioni relative al test da svolgere, qualora presenti;
- Nel caso in cui vengano montati pneumatici nuovi è necessario eseguire un rodaggio, rispettando le modalità imposte dalla prova da effettuare oppure dall'ente/azienda che si occupa di svolgere il test. L'azienda Danisi Engineering adotta una procedura che prevede una fase in cui gli pneumatici vengono utilizzati per condizioni di guida quotidiana all'interno della zona riservata al test, prestando attenzione a non danneggiarne o provocarne usura eccessiva; dopodiché vengono eseguite delle manovre specifiche come l'esecuzione di movimenti sinusoidali, con ampiezza dell'onda crescente da un ciclo all'altro, per un numero di volte stabilito, in modo da rodare anche la parte esterna e la spalla degli pneumatici.

4.2 Strumentazione di misura

Per poter eseguire i test richiesti è necessario utilizzare:

- Un pacchetto di sensori da installare a bordo del veicolo;
- Un data logger per poter raccogliere i dati durante le sessioni di test;
- Un acquisition computer equipaggiato con i software dedicati alla raccolta ed all'elaborazione dei dati ottenuti;
- Una fonte di alimentazione elettrica (power supply).

Nei prossimi paragrafi verranno introdotti e descritti i sensori installati a bordo del veicolo per raccogliere i dati richiesti dai test.

È necessario specificare che tutti i sensori devono essere installati rispettando le indicazioni del fornitore al fine di ottenere dati considerati validi (qualora un sensore non venga installato nella posizione di default oppure non rilevi una variabile direttamente devono essere effettuate delle correlazioni al fine di ottenere un livello sufficiente di accuratezza dei risultati ottenuti), inoltre è necessario registrare la storia temporale di ogni sensore attraverso un sistema di registrazione multi-channel. All'interno del documento di proprietà di Danisi Engineering sono riportati anche i valori entro i quali operano i sensori impiegati, oltre alle tolleranze che possono essere accettate per considerare valide le prove effettuate.

4.2.1 Sensore di coppia volante ed angolo volante

Il sensore in questione misura la coppia volante e l'angolo volante della massa sospesa, impressi dal driver nelle varie manovre di test.

I sensori più utilizzati per la misura dell'angolo volante sono potenziometri multi-turn oppure degli encoder digitali, installati dietro il volante del veicolo; per quanto riguarda la coppia volante vengono utilizzate celle di carico per la coppia oppure anche in questo caso encoder digitali.

Di conseguenza l'utilizzo di encoder digitali rappresenta una soluzione in grado di rilevare entrambe le grandezze desiderate, le quali possono essere ricavate in due modalità differenti, illustrate in seguito.

4.2.1.1 Type 1

In questa specifica il sensore viene montato sopra il volante del veicolo, senza la necessità di doverlo rimuovere, e viene installato un secondo volante che sarà quello utilizzato dal driver.



Figure 20 - Sensore di coppia volante ed angolo volante Type 1

In questo caso l'installazione del volante aggiuntivo è semplice e non richiede molto tempo, inoltre con questa configurazione non vengono imposte limitazioni relativamente alla rotazione del volante e vengono preservate le funzioni originali del volante e del sistema di airbag.

4.2.1.2 Type 2

Adottando questa soluzione, per raccogliere i dati sull'albero superiore dello sterzo viene installato l'encoder, al quale viene sovrapposto un volante compatibile al posto di quello originale del veicolo.



Figure 21 - Sensore di coppia volante ed angolo volante Type 2

In questo caso l'installazione risulta maggiormente complicata in quanto è necessario rimuovere il volante originale per poter installare quello compatibile. Questo aspetto è compensato dal vantaggio relativo al calcolo dell'inerzia del volante (aspetto approfondito nel prossimo paragrafo), oltre al fatto di riprodurre le condizioni più simili a quelle di guida reale.

4.2.1.3 Inerzia del volante

Come detto nel paragrafo precedente, le due tipologie sopra riportate differiscono principalmente dal punto di vista del calcolo dell'inerzia del volante, la quale viene calcolata come segue:

$$\begin{cases} I_{wheel} = m_{wheel} \cdot R^2 \\ I_{spoke} = \frac{1}{3} \cdot m_{spoke} \cdot L^2 \end{cases} \quad (1)$$

Dove:

- I_{wheel} rappresenta l'inerzia del volante;
- I_{spoke} rappresenta l'inerzia della singola razza del volante;

Considerando un volante tradizionale dotato di tre razze come nell'immagine sotto:



Figure 22 - Volante di guida tradizionale

L'inerzia totale del volante viene calcolata nel seguente modo:

$$\begin{cases} L = R \\ I = I_{wheel} + 3 \cdot I_{spoke} = R^2(m_{wheel} + m_{spoke}) \end{cases} \quad (2)$$

Osservando l'equazione (2) è noto come nel caso in cui vengano utilizzati due volanti differenti l'inerzia sarà maggiore, in quanto sarà la somma delle singole inerzie, ciascuna ottenuta dalla somma di quella della corona del volante e delle tre razze.

L'inerzia del volante rappresenta un aspetto cruciale in quanto può influenzare in maniera importante lo sforzo applicato dal pilota, relativamente alla quantità di coppia applicata al volante per completare le varie manovre: una maggiore inerzia implicherà una richiesta di coppia maggiore da parte del test driver.

Nel caso in cui l'inerzia totale del volante venga alterata è necessario riportare il valore ottenuto in seguito alle modifiche nel documento del test.

4.2.3 Sensore di velocità del veicolo

Per rilevare la velocità di avanzamento del veicolo, aspetto molto importante, è necessario installare un trasduttore di velocità longitudinale il più vicino possibile al punto di riferimento del veicolo (generalmente corrispondente al centro di massa). Il trasduttore più comunemente utilizzato, riportato nell'immagine sottostante, è di tipo "contactless" e si basa sul principio ottico, con estremi valori di accuratezza.



Figure 23 - Sensore ottico di velocità del veicolo Kistler

4.2.4 Sensore di accelerazione laterale

L'accelerazione laterale può essere misurata attraverso un accelerometro dotato di una sufficiente accuratezza entro una certa ampiezza di banda, che include le condizioni di steady-state.

L'accelerometro viene installato su una piattaforma stabilizzata da un sistema giroscopico.

L'accelerazione centripeta può essere ottenuta come il prodotto della velocità orizzontale moltiplicata per la velocità di imbardata, differendo rispetto all'accelerazione laterale per il coseno dell'angolo di deriva. Questo fattore di correzione può essere applicato nel processamento dei dati, anche se talvolta viene ignorato in quanto ci si trova di fronte ad angoli di deriva sufficientemente ridotti.



Figure 24 - Sensore di accelerazione laterale

4.2.6 Sensore di Slip angle

L'angolo di deriva delle ruote può essere misurato direttamente da trasduttori ottici oppure può essere ottenuto calcolando la differenza tra l'angolo di deriva riferito alle ruote anteriori e posteriori ed i rispettivi angoli di sterzo.

4.2.7 Sensore di traiettoria del veicolo

La traiettoria del veicolo viene rilevata attraverso un GPS come quello mostrato nell'immagine sottostante, il quale fornisce una semplice misurazione della velocità del veicolo e delle posizioni nel sistema di coordinate terrestri, ad una frequenza di campionamento di 20 Hz.

La traiettoria può essere determinata integrando le componenti di velocità lungo gli assi X e Y oppure ottenuta direttamente dallo spostamento negli assi X e Y.



Figure 27 - Global Positioning System (GPS)

4.2.8 Sensore di altezza dal suolo

L'altezza dal suolo del veicolo viene rilevata direttamente attraverso l'installazione lungo il veicolo di tre oppure quattro sensori ottici senza contatto come quello riportato nell'immagine sottostante.



Figure 28 - Sensore di altezza dal suolo

4.2.9 Sensore di forze sul tirante dello sterzo

I dati relativi alle forze sui tiranti dello sterzo non vengono raccolti principalmente per analizzare le performance del sistema di sterzo, ma è possibile utilizzarli per svolgere un'attenta analisi al fine di sviluppare un nuovo modello di veicolo: a partire da una scatola di sterzo già esistente, grazie ai valori di forza sui tiranti è possibile scegliere la cremagliera e dimensionare l'intero sistema.



Figure 29 - Sensore di forze sul tirante dello sterzo

4.3 Canali raccolti

Dopo aver elencato e descritto i sensori utilizzati per raccogliere i dati relativi alle performance del sistema di sterzo, in questo paragrafo vengono riportati i canali che vengono raccolti con le relative tolleranze ammesse nella misurazione.

Variable	Range	Maximum overall error	Bandwidth (-3 dB)
Steering wheel angle	$\pm 720^\circ$	$\pm 1^\circ$ for angles $< 50^\circ$ $\pm 2^\circ$ for $50^\circ < \text{angles} < 180^\circ$ $\pm 4^\circ$ for angles $> 180^\circ$	0/100 Hz
Steering wheel torque	± 10.0 [Nm]	$\pm 0,01$ kgm for torque < 1 kgm $\pm 0,03$ kgm for torque > 1 kgm	0/100 Hz
Lateral acceleration	± 2.0 [g]	± 0.015 [g]	0/200 Hz
Longitudinal acceleration	± 2.0 [g]	± 0.015 [g]	0/200 Hz
Yaw rate	± 50 [°/s]	$\pm 0,3^\circ/s$ for $\omega < 20^\circ/s$	0/100 Hz
Roll rate	± 50 [°/s]	$\pm 1^\circ/s$ for $\omega > 20^\circ/s$	0/100 Hz
Pitch rate	± 50 [°/s]		0/100 Hz
Vehicle speed	0/150 [km/h]	± 1 km/h up to 100km/h ± 2 km/h for vel > 100 km/h	0/10 Hz
Sideslip angle	± 10 [°]	$\pm 0.3^\circ$	0/10 Hz
Height from ground	100/900 mm	0.3 mm	0/100 Hz

Tabella 1 - Variabili raccolte e loro caratteristiche

Analizzando i parametri della tabella riportata sopra è possibile individuare l'estrema precisione dei sensori utilizzati, dalla terza colonna si evince infatti che l'errore massimo tollerato corrisponde a valori intorno al 5% sebbene in alcuni casi il range di misura sia molto ampio, come nel caso dell'angolo volante, il quale varia in un intervallo di 1400° totali, oppure come nel caso della velocità del veicolo, la quale può arrivare fino a 150 km/h durante determinate manovre nelle sessioni di test.

Per quanto riguarda la quarta colonna, ovvero quella relativa all'ampiezza di banda, è necessario definire il significato assunto dal valore di gain, pari a -3 dB: si tratta del guadagno ottenuto tra i segnali di potenza in input ed in output, considerato che in ambito elettronico la potenza in uscita considerata per determinare l'ampiezza di banda corrisponde a metà della potenza in ingresso. L'equazione sottostante descrive analiticamente quanto riportato sopra:

$$\begin{cases} P_o = 0.5 \cdot P_i \\ Gain (dB) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_o}{P_i}\right) \end{cases} \quad (3)$$

4.4 Parametri del veicolo

Prima di eseguire i test su qualunque veicolo è necessario svolgere un'ulteriore serie di misurazioni oltre a definire alcune condizioni, quali ad esempio quelle di carico al momento delle prove. Questi aspetti verranno descritti nei paragrafi seguenti.

4.4.1 Condizioni di carico del veicolo

È necessario verificare le condizioni di carico degli assali del veicolo prima di eseguire i test desiderati, a partire da tre possibili condizioni:

- Standard 1: veicolo senza pilota al suo interno, con carico di carburante (è immediato comprendere come questo standard non possa essere adottato nel caso di veicoli convenzionali in quanto non è previsto il conducente);
- Standard 2: veicolo con pilota al proprio interno e con carico di carburante;
- Standard 3: veicolo con pilota, carico di carburante e peso esterno al proprio interno (questo caso è rappresentativo per i veicoli commerciali in quanto componenti aggiuntive all'interno del veicolo rappresentano il payload generalmente trasportato).

4.4.2 Valutazione del CoG

Il CoG (center of gravity), noto anche come centro di massa, può essere ottenuto a partire dalle seguenti grandezze:

- Passo del veicolo L [m];
- Massa front right corner M_{fr} [kg];
- Massa front Left corner M_{fl} [kg];
- Massa rear right corner M_{rr} [kg];
- Massa rear left corner M_{rl} [kg];

Il CoG assume notevole importanza ai fini della dinamica del veicolo in quanto viene utilizzato come origine del sistema di riferimento ausiliario del veicolo.

L'origine dell'asse Y viene assunta generalmente a metà carreggiata del veicolo (immaginando di dividere simmetricamente il veicolo in due metà, una sinistra ed una destra); mentre l'origine dell'asse X, relativo all'assale anteriore è ottenuto dalla seguente formula:

$$X_{CG} = L \cdot \frac{M_{rear}}{M_{front} + M_{rear}} \quad (4)$$

Dove:

$$\begin{cases} M_{front} = M_{fr} + M_{fl} \\ M_{rear} = M_{rr} + M_{rl} \end{cases} \quad (5)$$

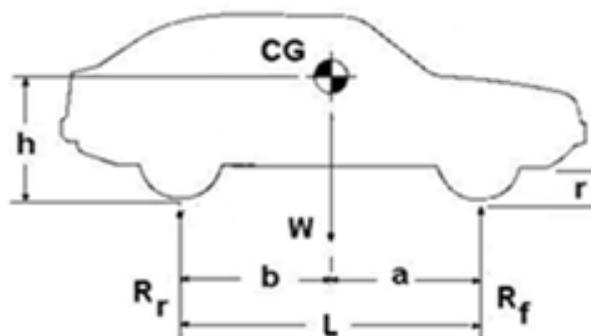


Figure 30 - Principali parametri di un veicolo

Il passo del veicolo viene misurato generalmente dal driver prima dell'esecuzione delle manovre di test con un sistema di misurazione laser.



Figure 31 - Sistema di misurazione laser

Le masse dei quattro corner sono rilevate attraverso un sistema di quattro bilance, sopra le quali vengono poste le quattro ruote, generalmente spostando il veicolo in modo che questo salga sopra il sistema di misurazione.

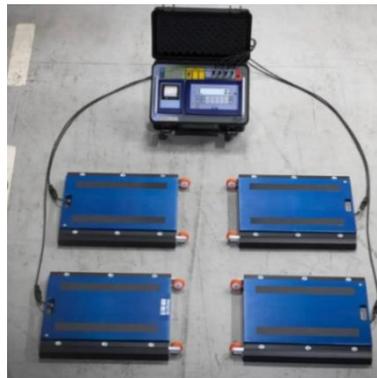


Figure 32 - Bilance per rilevare le masse dei corner

4.5 Check degli strumenti di misura

L'ultimo passo da compiere prima di poter eseguire i test è costituito dal controllo eseguito sulla strumentazione di misura, in quanto è necessario verificare che tutti i sensori rilevino correttamente le grandezze misurate. Questi controlli vengono eseguiti in due differenti modalità:

- Veicolo fermo (velocità 0 km/h), ma motore acceso;
- Veicolo in movimento.

I check eseguiti sono i seguenti:

- **Angolo volante:** deve risultare positivo se viene azionato il volante verso destra;
- **Coppia volante:** deve risultare positiva se viene azionato il volante verso destra;
- **IMU:** verifica della congruenza delle accelerazioni e delle velocità angolari durante semplici manovre a bassa velocità;
- **Velocità del veicolo (misurata dalla testa ottica):** conducendo il veicolo fino ad una velocità di 50 km/h la differenza tra il valore misurato e quello rilevato dal GPS deve essere inferiore all'1%;

4.6 Manovre eseguite

Al fine di ottenere dati significativi dai sensori installati sul veicolo testato è necessario eseguire una serie di manovre standardizzate all'interno dell'azienda oppure descritte dalle normative ISO di riferimento.

Per ognuna delle manovre elencate e descritte di seguito, verranno inoltre riportati i risultati ottenuti dalle rispettive simulazioni eseguite attraverso il software "IPG Car Maker", con lo scopo di attestare la validità e la correttezza degli output a partire dai valori e dai parametri di input, imposti dalle normative o talvolta dall'ente che esegue i test.

L'utilizzo di software di simulazione si inserisce in un contesto estremamente importante, legato ovviamente alla riduzione dei costi: ottenere questo tipo di dati non comporta necessariamente l'utilizzo di veicoli reali che debbano essere testati in pista, bensì è sufficiente riprodurre le condizioni della manovra (caratteristiche del veicolo, dell'asfalto, del meteo e del driver) all'interno di un ambiente virtuale.

Non è tuttavia affatto semplice riuscire ad ottenere correlazioni precise e significative tra i risultati ottenuti attraverso sessioni di test su pista o su strada e quelli ottenuti dalle simulazioni, a tal proposito le aziende e gli enti del settore Automotive che si occupano della dinamica del veicolo investono in maniera importante nell'acquisto e nell'utilizzo di simulatori di guida (siano essi statici o dinamici) come ha effettuato Danisi Engineering, con successo: in questo modo la correlazione risulta più semplice oltre che molto significativa, in quanto lo stesso driver impegnato nelle condizioni di prova su strada o su pista, si occuperà anche di effettuare varie manovre e sessioni al simulatore fornendo, oltre ad una serie innumerevole di dati agli ingegneri ed ai tecnici specializzati per esprimere valutazioni oggettive, anche le proprie valutazioni soggettive, tramite le quali potrà essere verificata la correlazione dei dati da analizzare.

4.6.1 Steering cycle

La seguente manovra riguarda l'utilizzo del volante, esaminando la catena di sterzo, e viene eseguita in due condizioni differenti: nel primo caso il veicolo è fermo ma con il motore acceso, nel secondo caso il veicolo procede a velocità ridotta.

Ogni ciclo completo consiste nell'azionamento del volante fino ad arrivare alla completa rotazione in entrambe le direzioni.

La procedura standard per eseguire lo steering cycle consiste nelle seguenti fasi:

- Attivare l'acquisitore dati;
- Mantenere il veicolo con zero gradi volante per cinque secondi, acquisendo eventuali offset;
- Azionare il volante verso destra raggiungendo il massimo valore possibile, mantenendo la velocità di sterzata quanto più costante possibile;
- Riportare il volante in posizione neutrale, mantenendo la velocità di sterzata costante;
- Eseguire la stessa manovra descritta nel terzo punto verso sinistra;
- Riportare il volante in posizione neutrale, mantenendo la velocità di sterzata costante;
- Acquisire un altro offset della durata di cinque secondi.

Nell'immagine riportata sotto viene mostrato l'angolo volante applicato dal driver nel tempo (rimuovendo l'offset). I valori sono normalizzati.

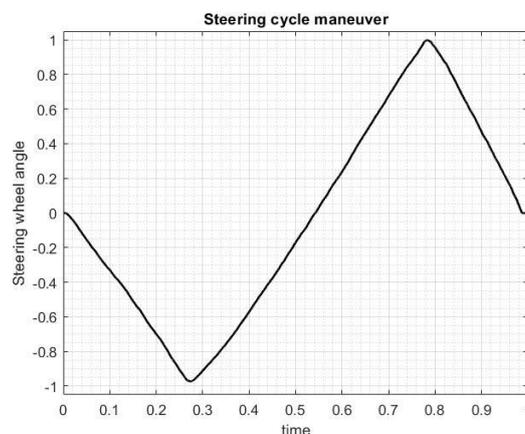


Figure 33 - Manovra di Steering cycle

La stessa manovra è stata riprodotta tramite IPG Car Maker, ed è riportata nell'immagine seguente: in questo caso si può osservare l'estrema precisione nell'esecuzione della manovra, in quanto gli andamenti dei tre tratti si mantengono costanti ed uguali (seppur ovviamente con segni opposti a seconda del verso di azionamento del volante). In questo modo la velocità angolare del volante, ottenuta derivando nel tempo l'angolo volante, viene mantenuta costante durante le varie fasi della manovra.

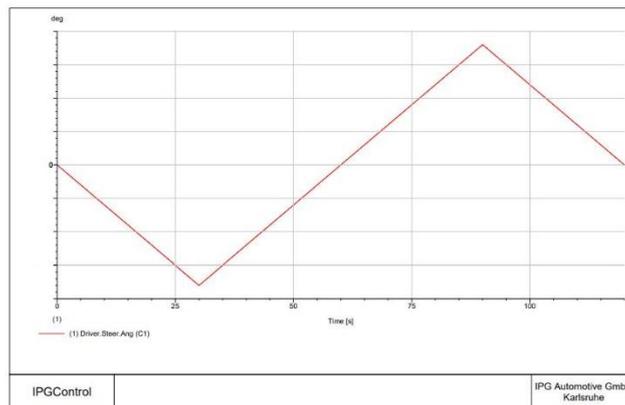


Figure 34 - Manovra di Steering cycle eseguita su IPG Car Maker

4.6.2 Manovra sinusoidale

La seguente manovra consiste nell'azionamento del volante alternativamente verso destra e verso sinistra, arrivando ad un determinato valore di angolo volante (che deve essere lo stesso per entrambe le direzioni), mantenendo sia la velocità del veicolo sia la frequenza di azionamento del volante costanti.

Per poter eseguire la manovra in maniera corretta è necessario verificare alcune variabili, descritte sotto.

4.6.2.1 Condizioni pre-test

L'accelerazione laterale può essere determinata in due modalità:

- Direttamente dai valori di output mostrati nel display a bordo del veicolo, grazie alla relazione tra angolo volante ed accelerazione laterale;
- A partire da ridotti angoli volante, eseguendo una serie di cicli aumentando l'angolo volante in modo costante di alcuni gradi ogni ciclo (ad esempio 5° per ciclo), dopodiché valutando l'angolo volante necessario per raggiungere l'accelerazione laterale necessaria per svolgere la manovra.

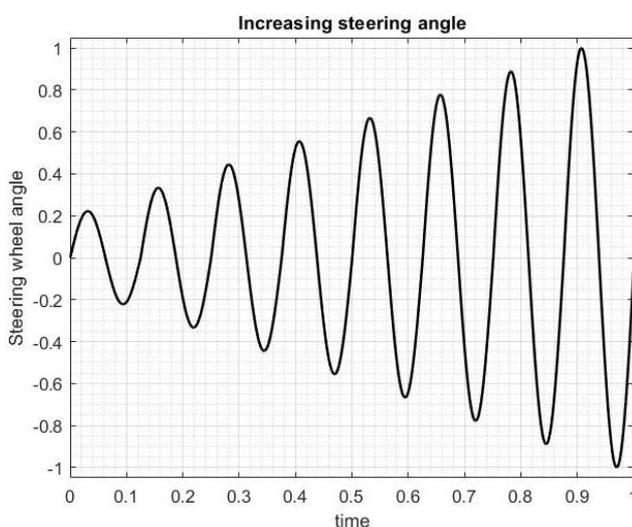


Figure 35 – Manovra per individuare l'angolo di sterzo

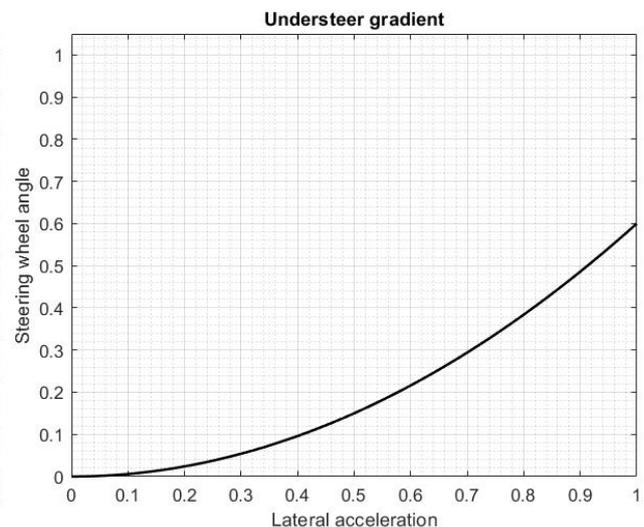


Figure 36 – Understeer gradient

La velocità può essere monitorata in due modi:

- Attraverso un rilevatore di velocità all'interno del software acquisitore di dati;
- Tramite un display installato all'interno del veicolo.

La frequenza viene indicata al driver attraverso un metronomo installato all'interno del veicolo.

4.6.2.2 Manovra eseguita

È necessario che vengano eseguiti almeno venti cicli sinusoidali per ogni velocità di esecuzione della prova. L'angolo volante prestabilito deve garantire il raggiungimento di valori di accelerazione laterale massimi tra 0,2 g e 0,25 g: l'ampiezza dell'angolo impresso al volante varia a seconda delle caratteristiche del veicolo sottoposto al test, sebbene i valori generalmente rientrino nell'ordine dei 15° ad una velocità di avanzamento pari a 120 km/h e 30° ad una velocità di 60 km/h, mentre i valori delle frequenze del ciclo si attestano tra 0,2 Hz e 2 Hz (rispettivamente tra 5 s e 0,5 s).

La procedura standard per eseguire la manovra sinusoidale consiste nelle seguenti fasi:

- Portare il veicolo ad una velocità prestabilita;
- Iniziare ad acquisire i dati dai sensori;
- Acquisire un offset (zero gradi volante) per circa 3s;
- Iniziare la serie di oscillazioni azionando il volante prima verso destra e poi verso sinistra, arrivando al valore di angolo volante prestabilito;
- Mantenere la velocità di avanzamento del veicolo costante e proseguire ad azionare il volante, proseguendo nella manovra compatibilmente con la lunghezza del tracciato di test;
- Acquisire un offset per circa 3s;
- Terminare l'acquisizione dati dai sensori.

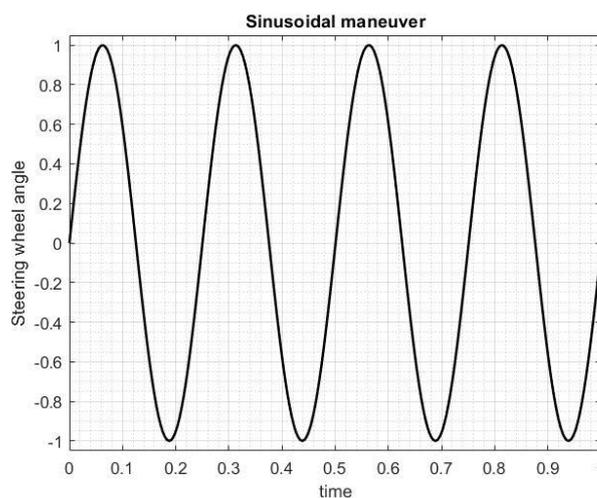


Figure 37 - Manovra sinusoidale

La manovra sinusoidale viene riprodotta sul software di simulazione IPG Car Maker: anche in questo caso è possibile notare il livello estremo di precisione nell'esecuzione della manovra, in quanto il grafico sotto riportato rappresenta l'angolo volante del veicolo nel tempo, misurato ed acquisito in tempo reale durante la simulazione della prova.

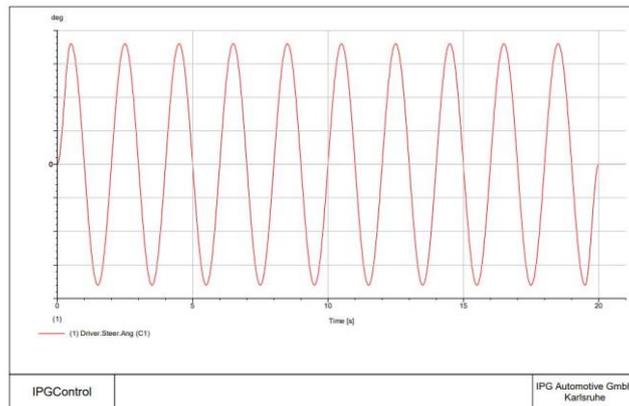


Figure 38 – Manovra sinusoidale eseguita su IPG Car Maker

4.6.3 Manovra Slow Ramp

La seguente manovra consiste nell'attuazione del volante aumentandone progressivamente l'angolo ad una velocità costante (generalmente al di sotto dei $20^\circ/s$) mantenendo anche la velocità del veicolo costante. Questa manovra determinerà una traiettoria a spirale del veicolo, con un raggio di curvatura progressivamente decrescente.

La procedura standard per eseguire la manovra di Slow Ramp è la seguente:

- Portare il veicolo ad una velocità prestabilita;
- Iniziare ad acquisire i dati dai sensori;
- Acquisire un offset (zero gradi volante) per circa 3s;
- Aumentare progressivamente l'angolo volante ad una velocità costante, inferiore o pari a $20^\circ/s$;
- Mantenere la velocità di avanzamento del veicolo costante e proseguire con la manovra per un periodo di tempo non inferiore ai 20 secondi;
- Acquisire un offset per circa 3s;
- Terminare l'acquisizione dati dai sensori.

È necessario eseguire la manovra in entrambe le direzioni (destra e sinistra).

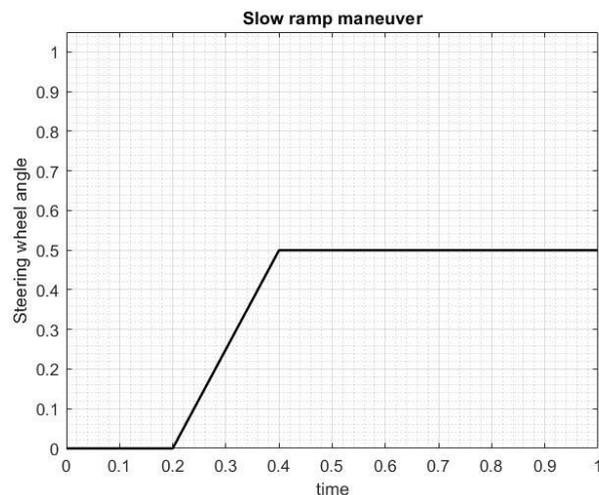


Figure 39 - Manovra Slow Ramp

La manovra di Slow Ramp viene implementata in ambiente IPG Car Maker, ottenendo anche in questo caso un risultato estremamente preciso, come si può osservare dall'immagine sottostante, dove viene riportato l'angolo volante in funzione del tempo.

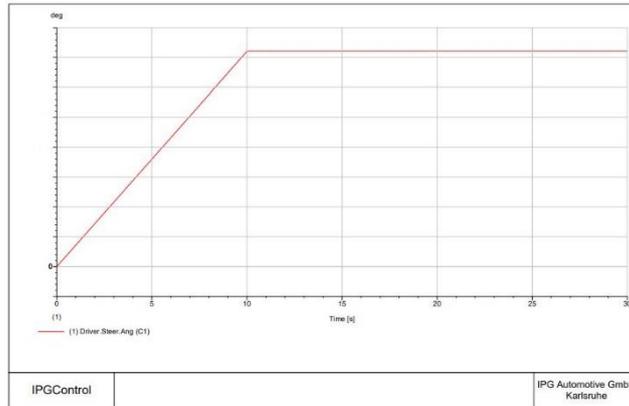


Figure 40 - Manovra Slow Ramp eseguita su IPG Car Maker

4.6.4 Manovra di sweep in frequenza

La seguente manovra consiste nell'azionamento dello sterzo in modo da ottenere una sinusoide ad ampiezza costante ma ad una frequenza crescente in maniera lineare, all'interno di una finestra indicativamente tra gli 0,2 Hz e i 2 Hz.

La procedura standard per eseguire la manovra di sweep in frequenza è la seguente:

- Portare il veicolo ad una velocità prestabilita;
- Iniziare ad acquisire i dati dai sensori;
- Acquisire un offset (zero gradi volante) per circa 3s;
- Iniziare la manovra azionando ripetutamente il volante applicando angoli prestabiliti verso destra e verso sinistra, iniziando ad una frequenza di azionamento di circa 0,2 Hz;
- Mantenere la velocità di avanzamento del veicolo costante e proseguire con la manovra aumentando la frequenza di azionamento del volante fino ad arrivare a 2 Hz;
- Acquisire un offset per circa 3s;
- Terminare l'acquisizione dati dai sensori.

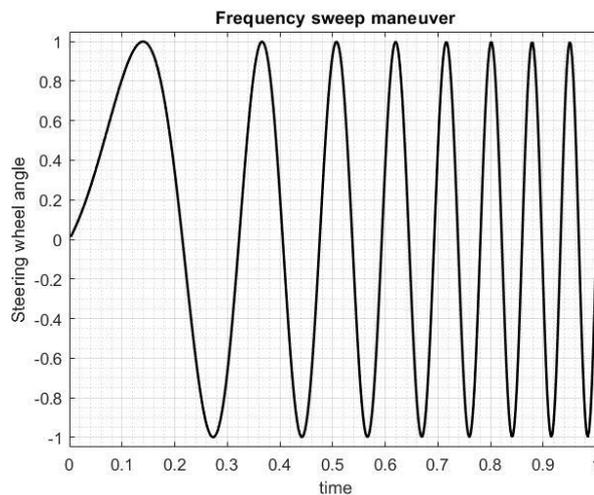


Figure 41 - Manovra di sweep in frequenza

La manovra di sweep in frequenza viene eseguita attraverso IPG Car Maker, permettendo di ottenere un andamento dell'angolo volante in funzione del tempo come segue.

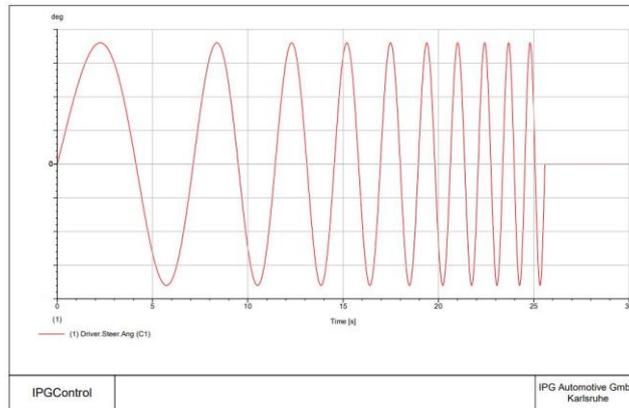


Figure 42 - Manovra di sweep in frequenza su IPG Car Maker

4.6.5 Colpo di sterzo (Step steer)

La seguente manovra consiste nell'azionamento del volante imprimendo un angolo volante target in un tempo molto breve (con velocità di azionamento del volante superiori a $100^\circ/s$) mantenendo la velocità di avanzamento del veicolo costante.

La procedura standard per eseguire la manovra di Step steer è la seguente:

- Portare il veicolo ad una velocità prestabilita;
- Iniziare ad acquisire i dati dai sensori;
- Acquisire un offset (zero gradi volante) per circa 3s;
- Eseguire la manovra raggiungendo angoli volante prestabiliti ad una velocità di azionamento prestabilita, tra $100^\circ/s$ e $500^\circ/s$. Il driver può vedere gli angoli di riferimento attraverso un apposito goniometro coassiale al volante, come riportato nell'immagine sottostante;



Figure 43 - Segni di riferimento per angolo volante

- Mantenere l'angolo raggiunto per un tempo prestabilito;
- Acquisire un offset per circa 3s;
- Terminare l'acquisizione dati dai sensori.

È necessario eseguire la manovra in entrambe le direzioni (destra e sinistra).



Figure 44 - Manovra di Step steer

Anche per quanto riguarda la manovra di Steep steer infine viene riportato di seguito il segnale dell'angolo volante acquisito durante la simulazione della prova su IPG Car Maker.

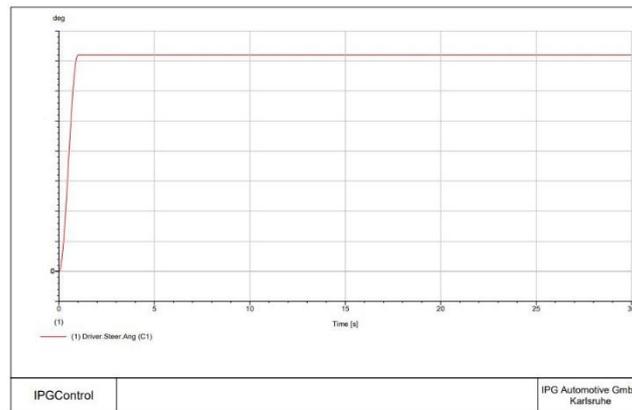


Figure 45 - Manovra di Step steer su IPG Car Maker

4.7 Elaborazione dati e risultati e report finale

Dopo aver svolto i test oggettivi sulle performance del sistema di sterzo, i dati fondamentali per la relativa caratterizzazione vengono raccolti e dopodiché processati.

All'interno di questo paragrafo verranno illustrati i risultati ottenuti da una serie di manovre di "Steering cycles", eseguite a due velocità differenti, sullo stesso veicolo.

Per motivi di confidenzialità non vengono riportati i valori delle grandezze analizzate.

4.7.1 Report Cicli di sterzo

Analizzando i grafici riportati sotto è possibile osservare la manovra di sterzo che viene eseguita dal driver, l'angolo volante, le forze trasmesse ai tiranti dello sterzo e la coppia volante applicata.

4.7.1.1 Angolo di sterzo

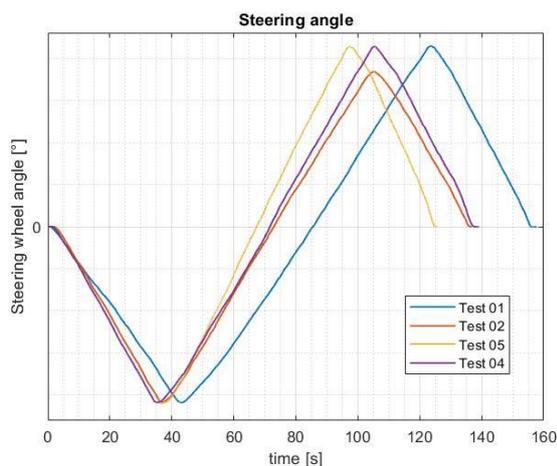


Figure 46 - Angolo di sterzo alla velocità 1

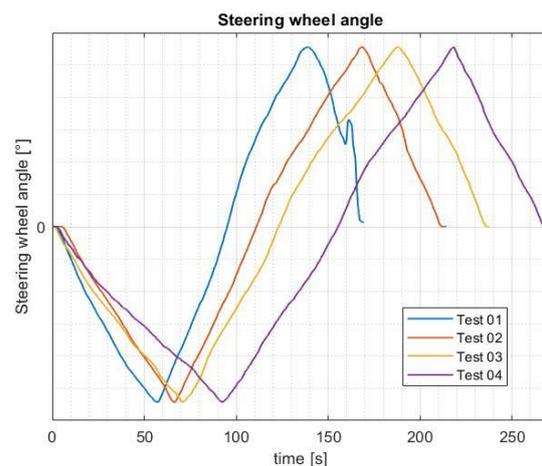


Figure 47 - Angolo di sterzo alla velocità 2

Nei due grafici riportati sopra è possibile identificare la tipologia di manovra eseguita:

- Il driver inizia ad applicare una determinata quantità di coppia volante azionando quest'ultimo verso sinistra (valori di angolo volante negativi) ad una velocità predeterminata, raggiungendo il finecorsa del sistema di sterzo;
- Una volta raggiunto il massimo valore di angolo volante, il driver inizia ad applicare il comando di sterzo nella direzione opposta (verso destra) mantenendo la velocità di azionamento quanto più possibile costante, fino a raggiungere il finecorsa opposto del sistema di sterzo;
- Infine, viene applicato un ulteriore comando al volante, mantenendo la velocità di azionamento costante, fino a ripristinare un valore di angolo volante pari a 0°.

4.7.1.2 Coppia volante

I grafici riportati sotto rappresentano i valori di coppia volante applicati dal driver durante le manovre: è possibile osservare come la coppia rimanga pressoché costante durante l'applicazione del comando di sterzo in entrambe le direzioni, mentre il cambiamento di segno rappresenta il momento in cui il volante viene azionato nel verso opposto (la presenza di tratti caratterizzati da andamento ondulatorio è giustificata dalle caratteristiche del sensore della coppia volante e dalla presenza della servoassistenza, la quale interviene sulla coppia complessiva applicata al volante, come definito nel Capitolo 1); i due picchi di coppia invece sono riconducibili ai finecorsa del sistema raggiunti dal driver durante la manovra, di conseguenza non sono effettivamente indicativi riguardo i valori di coppia raggiunti e in fase di post processing vengono eliminati, in quanto andrebbero ad influire in maniera significativa senza rappresentare un dato utile al fine di dimensionare o valutare un determinato sistema di sterzo.

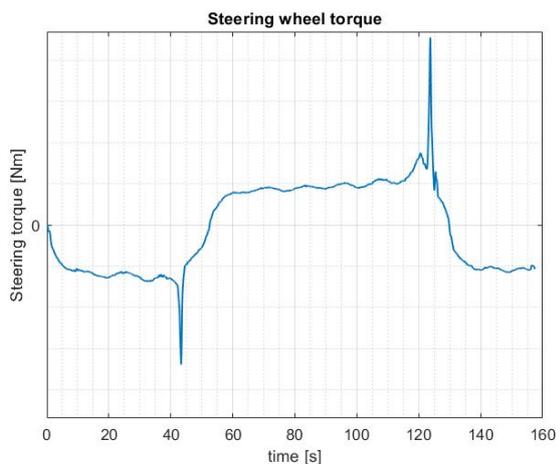


Figure 48 - Coppia volante alla velocità 1

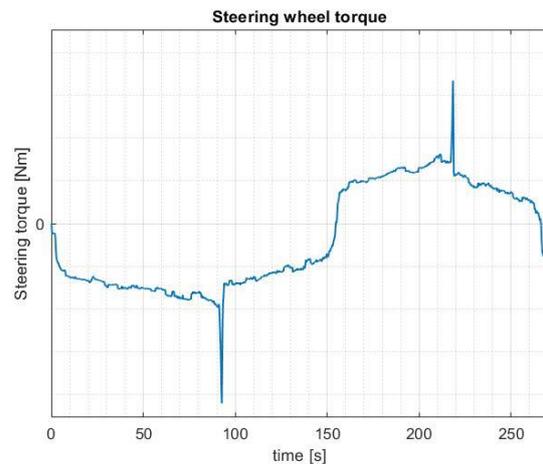


Figure 49 - Coppia volante alla velocità 2

Gli stessi grafici vengono riprodotti in ambiente di simulazione tramite il software introdotto in precedenza, per verificare la correttezza dei risultati ottenuti attraverso le prove in pista e per poter effettuare delle correlazioni.

In particolare, dalle immagini riportate sotto è possibile notare come l'andamento della coppia volante ottenuto su IPG Car Maker sia pressoché identico a quello ottenuto dalle prove in pista. Per motivi di riservatezza non è possibile riportare in questo documento un confronto numerico, ma è estremamente importante verificare l'attendibilità dei risultati di output ricavati dal software di

simulazione utilizzato, in quanto per le altre manovre elencate in precedenza sono stati presi in considerazione i risultati delle simulazioni, non effettuando quindi test in pista.

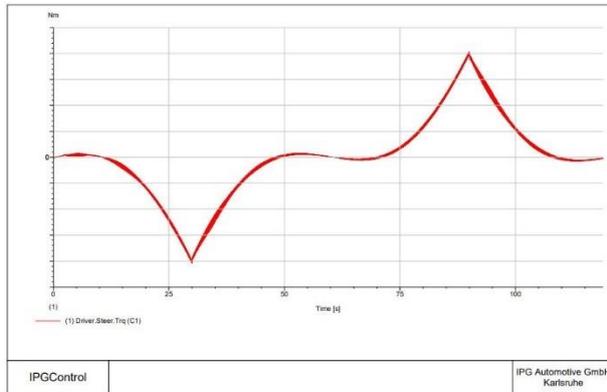


Figure 50 - Coppia volante alla velocità 1 su IPG Car Maker

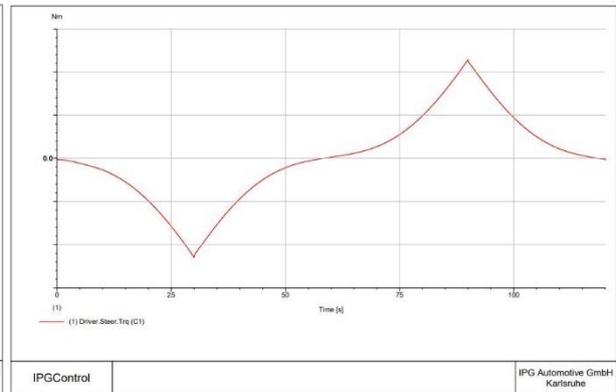


Figure 51 - Coppia volante alla velocità 2 su IPG Car Maker

Nelle immagini sotto riportate viene mostrata la relazione che intercorre tra l'angolo volante e la coppia volante impressa, ad entrambe le velocità di avanzamento del veicolo durante la prova. Nell'immagine di sinistra è possibile notare un ciclo di isteresi piuttosto ampio, dovuto principalmente alla velocità di avanzamento del veicolo relativamente ridotta, di conseguenza le coppie volante necessarie a riportare il volante in condizione neutrale saranno notevoli.

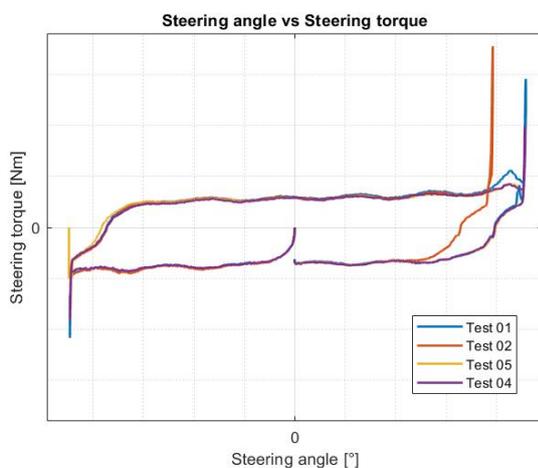


Figure 52 - Coppia volante/Angolo volante alla velocità 1

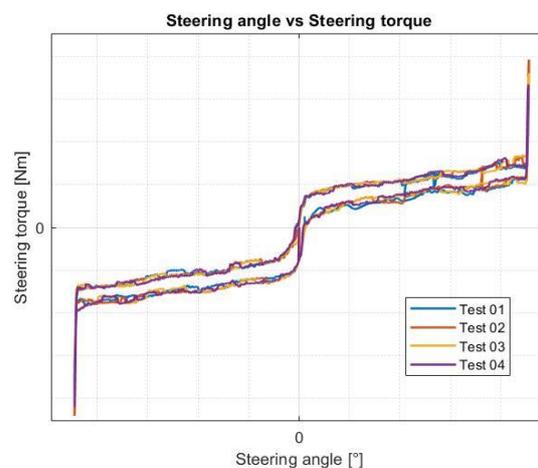


Figure 53 - Coppia volante/Angolo volante alla velocità 2

Un ulteriore aspetto da sottolineare è quello relativo alla presenza di più prove sovrapposte nello stesso grafico: in questo modo è possibile osservare la precisione con cui vengono eseguite le varie prove (nella figura 52 il 'Test 2' è l'unico ad essere caratterizzato da un andamento leggermente diverso, riconducibile al sensore dell'angolo volante).

I parametri oggettivi calcolati dal grafico sono l'area del ciclo e la pendenza a determinati valori di angolo volante.

Anche in questo caso viene proposto un confronto con i risultati ottenuti dalla simulazione: è possibile osservare come nel caso dei grafici ricavati da IPG Car Maker non sia presente il fenomeno di isteresi, aspetto riconducibile al mancato inserimento sul software dei dati relativi alla rigidità degli elementi che compongono il sistema di sterzo.

Nei risultati delle simulazioni non viene evidenziata la quantità di coppia aggiuntiva richiesta al pilota per azionare lo sterzo passando da un verso all'altro; questo aspetto non è stato implementato in questa situazione in quanto non erano note tutte le caratteristiche del veicolo sottoposto ai test ed inoltre non era fondamentale ai fini dell'elaborato finale, ma è possibile ottenere dei risultati più significativi in caso di necessità, inserendo sul software i parametri richiesti.

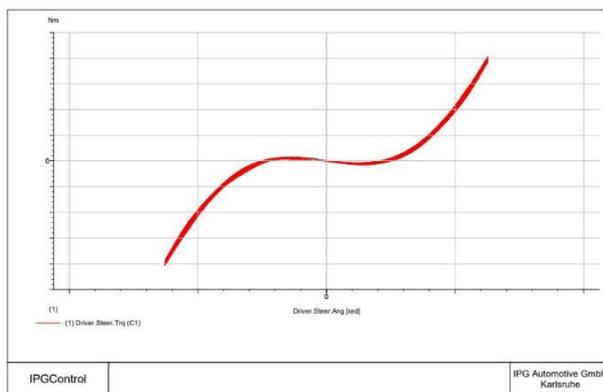


Figure 54 – Coppia volante/Angolo volante alla velocità 1 su IPG Car Maker

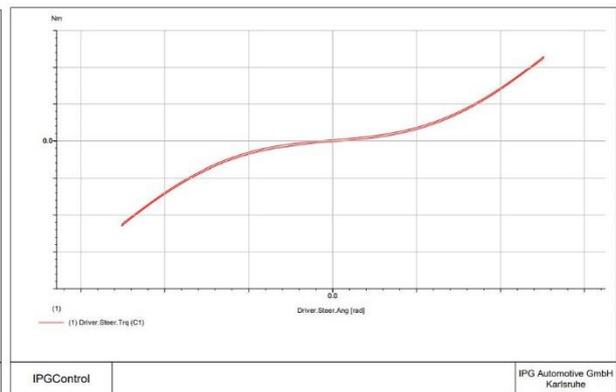


Figure 55 – Coppia volante/Angolo volante alla velocità 2 su IPG Car Maker

L'andamento globale della coppia volante in funzione dell'angolo è riconducibile e paragonabile ai risultati ottenuti su pista, quindi l'unica differenza rimane quella relativa all'assenza del fenomeno di isteresi.

4.7.1.3 Forze sui tiranti dello sterzo

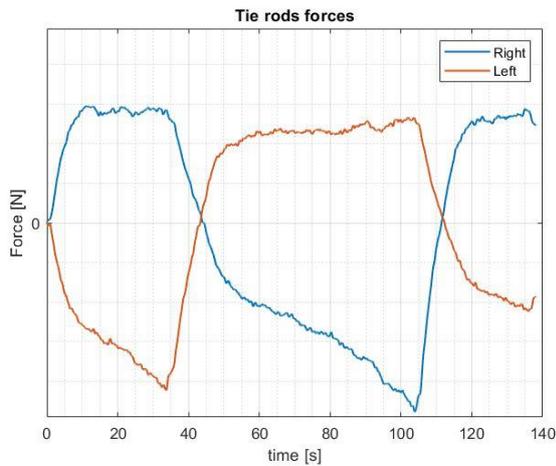


Figure 56 - Forze sui tiranti alla velocità 1

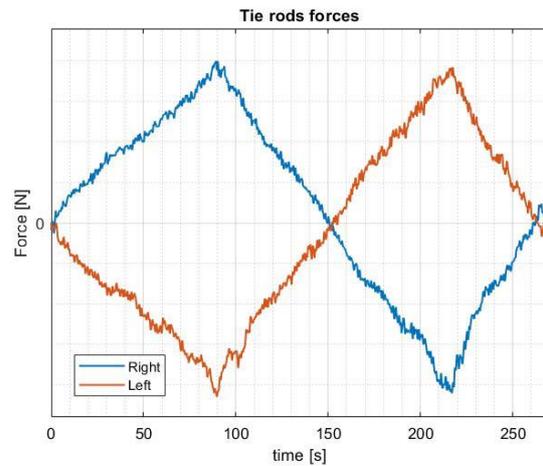


Figure 57 - Forze sui tiranti alla velocità 2

Nelle immagini riportate sopra viene riportato l'andamento delle forze sui tiranti (destro e sinistro) dello sterzo, alle due velocità di avanzamento del veicolo alle quali sono state eseguite le prove. In questo caso per agevolare la comprensione dei grafici è stata riportata una sola ripetizione della manovra. Il comportamento asimmetrico dei due tiranti, molto più evidente nell'immagine 47, è riconducibile ad un'asimmetria del sistema di sterzo e del veicolo in generale, causata dalla presenza di altre componenti del veicolo e dal fatto che il sistema di sterzo dei veicoli presenta un'asimmetria dal punto di vista costruttivo.

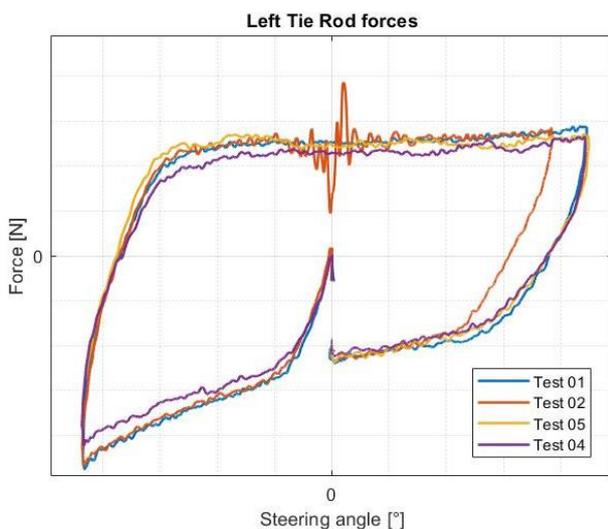


Figure 58 - Angolo volante/Forze tirante sinistro velocità 1

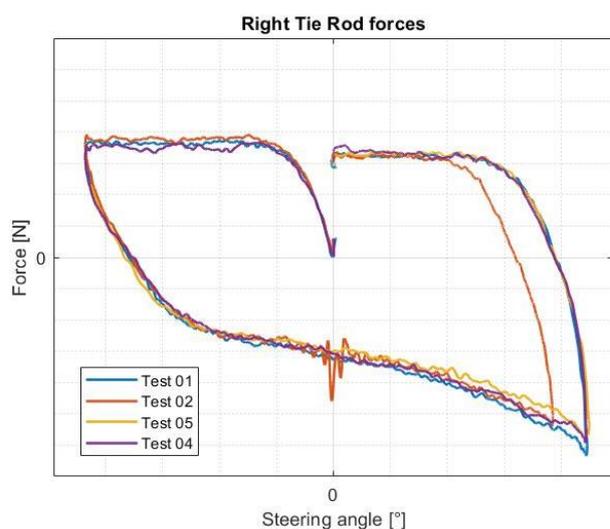


Figure 59 - Angolo volante/Forze tirante destro velocità 1

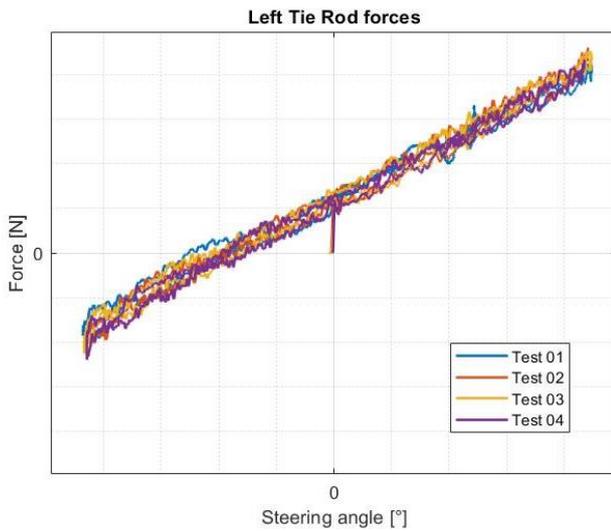


Figure 60 - Angolo volante/Forze tirante sinistro velocità 2

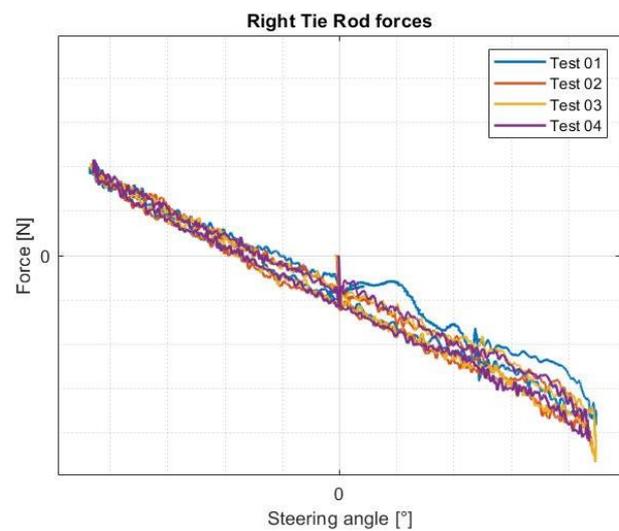


Figure 61 - Angolo volante/Forze tirante destro velocità 2

I quattro grafici riportati sopra mostrano i valori di forze sui tiranti dello sterzo, alle due velocità di esecuzione delle prove, al variare dell'angolo volante.

Come osservato in precedenza attraverso i grafici relativi ai valori di coppia, anche nel caso delle forze sui tiranti dello sterzo è possibile osservare il ciclo d'isteresi, specialmente alla velocità inferiore di esecuzione della prova.

I parametri oggettivi calcolati dal grafico sono l'area del ciclo e la pendenza a determinati valori di angolo volante.

4.7.2 Report manovra sinusoidale

In questo paragrafo vengono riportati i risultati finali dei test oggettivi riguardo le performance del sistema di sterzo analizzato: a partire da ogni singola manovra vengono estrapolati alcuni dati fondamentali per fornire una valutazione oggettiva, come mostrato in seguito.

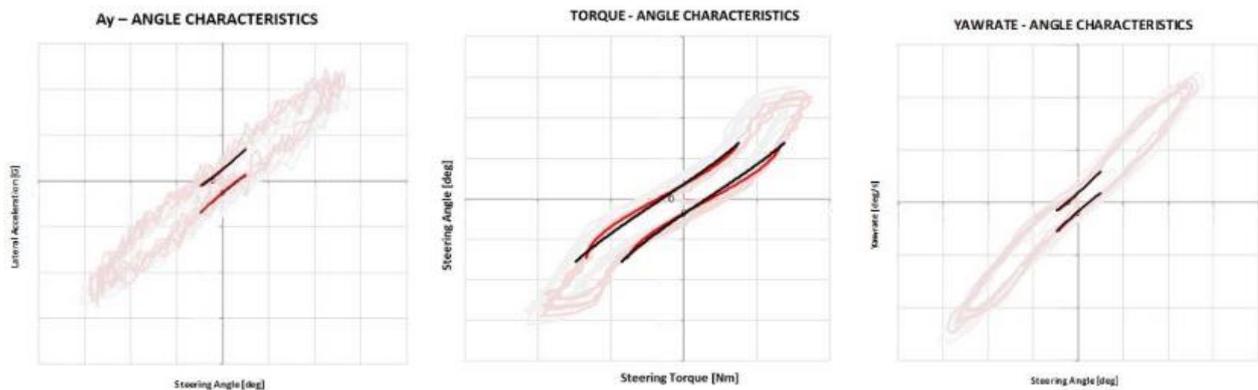


Figure 62 - Risultati manovra sinusoidale

L'analisi dei cicli riportati sopra è basata su diversi parametri, in particolare:

Tramite i grafici riportati nell'immagine 53 si rileva usualmente:

- Ampiezza del ciclo in senso orizzontale attorno al centro;
- Ampiezza del ciclo in senso verticale attorno al centro;
- Pendenze locali, che rappresentano il guadagno del sistema.

4.8.2 Report manovra di Ramp steer

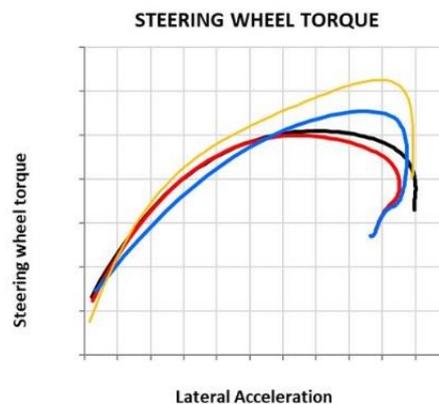


Figure 63 - Risultati manovra di Ramp steer

Attraverso questa manovra vengono valutati i valori massimi di coppia applicata al volante ed i corrispondenti valori di accelerazione laterale ottenuti: usualmente viene valutato se il picco di coppia volante corrisponde al valore massimo di accelerazione laterale.

4.8.3 Report manovra di Step steer

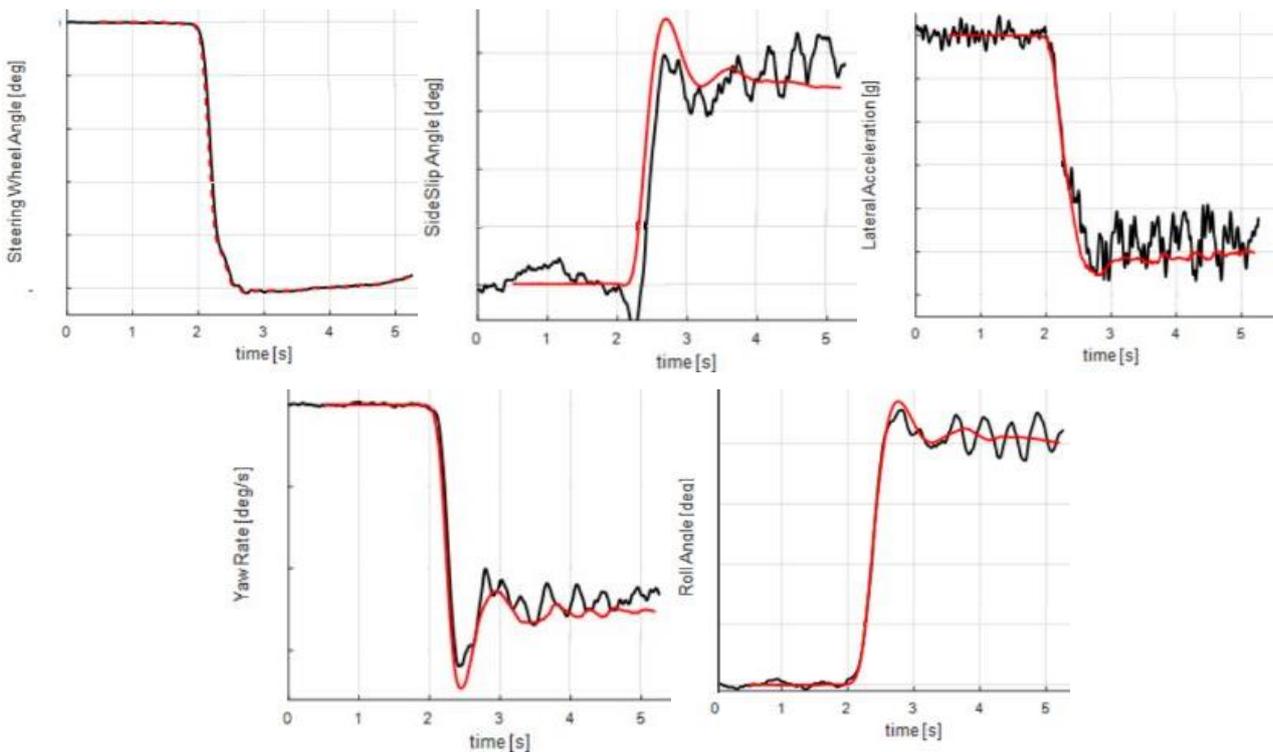


Figure 64 - Risultati manovra di Step steer

Attraverso questa manovra è possibile valutare una serie di parametri nelle tre fasi della manovra:

- Transitorio iniziale;
- Stato stazionario;
- Rilascio sterzo (se presente).

I parametri solitamente calcolati sono i valori medi nel tratto stazionario, i tempi di ritardo nel transitorio ed i valori picco-picco nelle oscillazioni libere a fine manovra.

Le grandezze solitamente considerate sono:

- Accelerazione laterale A_y ;
- Velocità di imbardata $\dot{\psi}$;
- Angolo d'assetto β ;
- Velocità d'assetto $\dot{\beta}$;

4.8.4 Report relativo alla risposta in frequenza

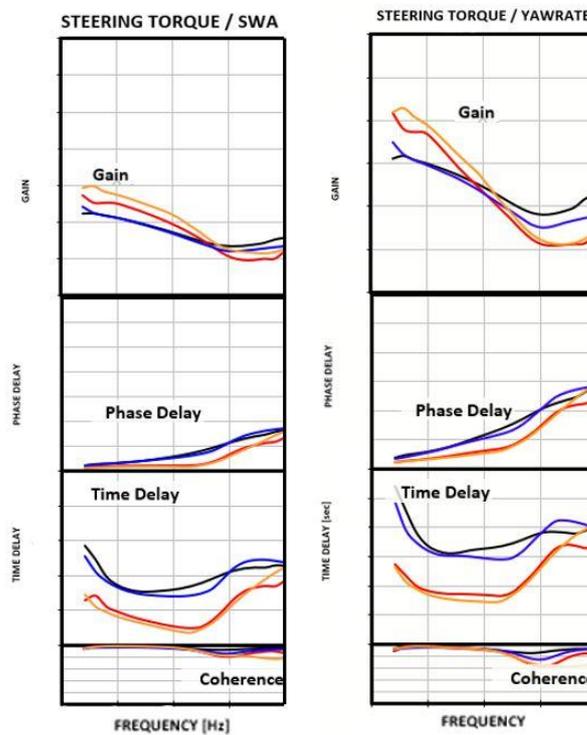


Figure 65 - Risultati della risposta in frequenza

Viene valutata la risposta in frequenza, in particolare per quanto riguarda le caratteristiche della coppia volante, relativamente all'angolo volante ed allo yaw-rate. Nel grafico riportato sopra sono mostrati i parametri fondamentali di questo tipo di analisi:

- Guadagno (Gain), che mette in relazione la variabile in ingresso (angolo volante a sinistra e yaw-rate a destra) e quella in uscita (coppia volante);
- Ritardo di fase, il quale aumenta all'aumentare delle frequenze;
- Ritardo temporale;
- Coerenza, attraverso cui è possibile valutare la validità dell'analisi svolta.

4.8.5 Report manovre IPG Car Maker

Relativamente alle manovre elencate in precedenza, sono state effettuate delle analisi ulteriori in seguito alla creazione di diversi plot tramite il software di simulazione utilizzato: per ognuna delle manovre sono state prese in considerazione tre differenti velocità di avanzamento del veicolo per osservare quanto questo parametro possa influenzare le forze e le coppie necessarie dal conducente per eseguire le differenti prove.

Più precisamente ogni manovra è stata implementata in ambiente simulativo facendo in modo che tra le tre prove cambiasse unicamente il parametro legato alla velocità di avanzamento del veicolo, mantenendo costanti quindi gli altri parametri di input come l'angolo volante ed il tempo necessario a raggiungerlo e la frequenza di azionamento.

Le velocità di avanzamento del veicolo sono le seguenti:

- 10 km/h;
- 30 km/h;
- 50 km/h.

La scelta di eseguire le simulazioni delle manovre a queste velocità deriva dalla necessità di comprendere il comportamento del veicolo testato nelle condizioni in cui vengono impiegati maggiormente i veicoli, ovvero in contesti urbani, nei quali le velocità sono ridotte: tutti i veicoli dovrebbero quindi possedere ottime caratteristiche di manovrabilità nel contesto appena descritto. Tuttavia, è possibile effettuare comparazioni anche a velocità di avanzamento del veicolo superiori nelle manovre in cui ciò è possibile, al fine di possedere un quadro globale relativo al comportamento del veicolo che si vuole analizzare oggettivamente.

Manovra sinusoidale

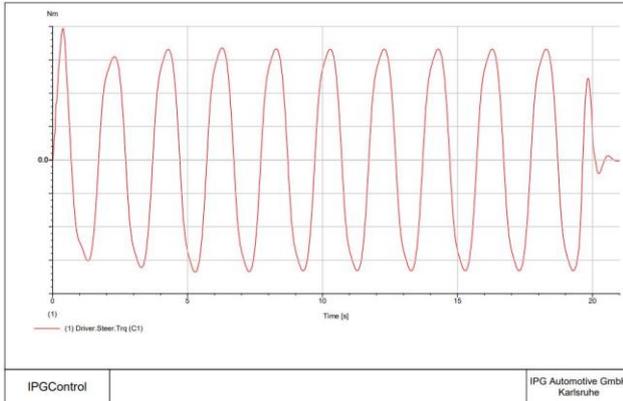


Figure 66 - Coppia volante @ 10 km/h

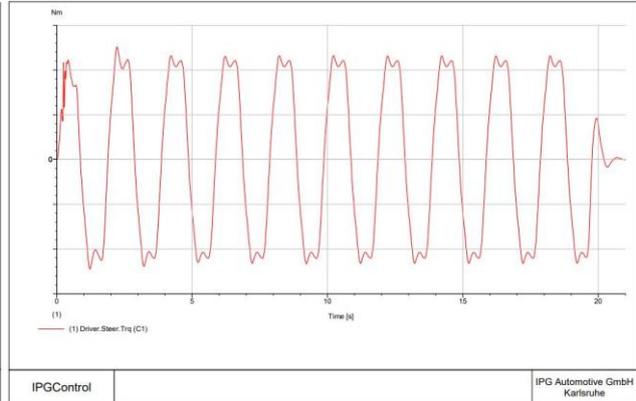


Figure 67 - Coppia volante @ 30 km/h

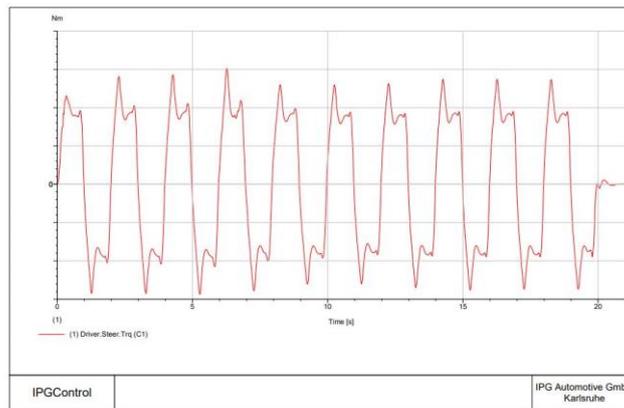


Figure 68 - Coppia volante @ 50 km/h

Le figure riportate sopra evidenziano principalmente due aspetti:

- Il primo è meno evidente in quanto in questo documento non vengono riportate le scale dei valori di coppia volante in gioco, ma dai risultati si può notare come all'aumentare della velocità aumentano i valori di coppia richiesti al fine di eseguire la manovra sinusoidale, in particolare passando da 10 a 30 km/h la coppia massima richiesta triplica, salvo aumentare in maniera decisamente più contenuta passando a 50 km/h. Un'ipotesi verosimile è data dal comportamento degli pneumatici che trasmettono le forze tra il veicolo e l'asfalto, in quanto sono caratterizzati da una rigidità che è dapprima lineare, mentre tende ad un asintoto al raggiungimento di determinate forze e velocità, in particolare nel caso in cui sia le forze laterali sia quelle longitudinali abbiano un valore significativo.

Dalla figura 69 si può notare quanto appena descritto, in particolare sull'asse delle ascisse il parametro Longitudinal Slip è indicativo della velocità del veicolo, di conseguenza

spostandosi verso destra la velocità aumenta e come si può vedere le due forze che possono essere trasmesse arrivano ad assumere un valore asintotico.

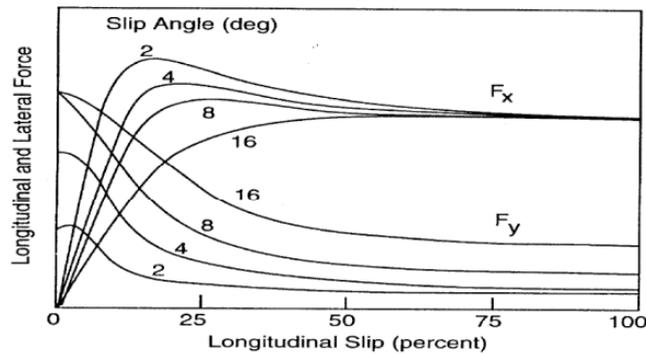


Figure 69 - Forze longitudinali e laterali in funzione della velocità

- Il secondo elemento da evidenziare consiste nell'andamento della coppia volante, ed è probabilmente riconducibile al primo, in quanto a 10 km/h in corrispondenza dei picchi la curva è ben raccordata, segno di un valore di forza trasmessa ben al di sotto dell'asintoto; passando a 30 km/h in corrispondenza dei picchi di coppia è possibile individuare un comportamento non del tutto regolare da parte della coppia applicata, elemento che denota un comportamento differente del veicolo a causa delle maggiori forze in gioco. Infine, a 50 km/h questo aspetto viene ulteriormente accentuato.

Manovra Slow ramp

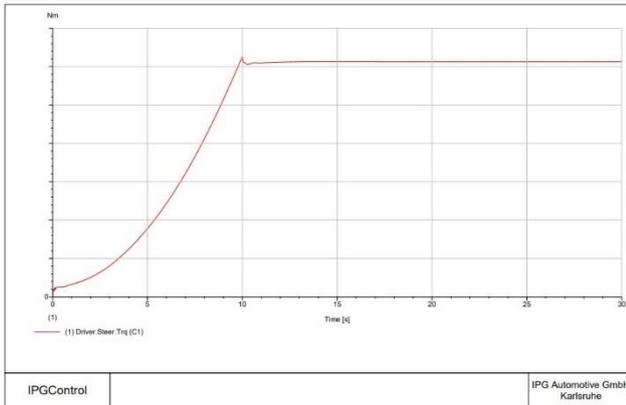


Figure 70 - Coppia volante @ 10 km/h

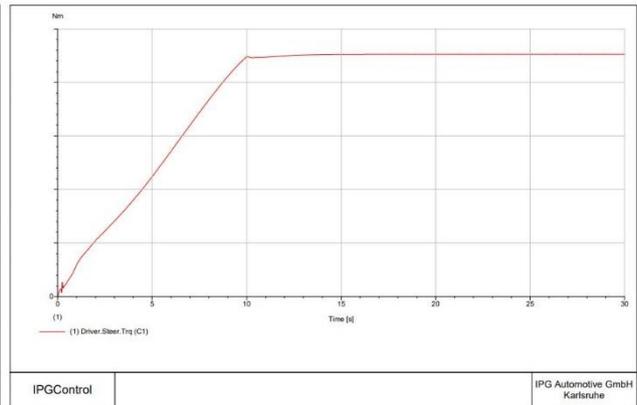


Figure 71 - Coppia volante @ 30 km/h

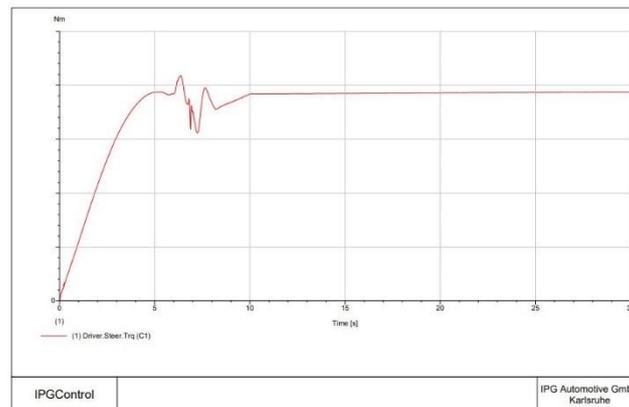


Figure 72 - Coppia volante @ 50 km/h

Questa manovra evidenzia come alle basse velocità l'energia richiesta al sistema per completare la manovra sia complessivamente minore, in quanto l'area sottesa nel caso di velocità pari a 10 km/h è inferiore agli altri casi (oltre a raggiungere un picco di coppia minore): nella prima fase della manovra (figura 69) si può osservare come ad un aumento dell'angolo volante non corrisponde un aumento proporzionale della coppia, bensì questo si verifica solo dopo un certo numero di secondi. Alla velocità di 50 km/h invece è possibile osservare un comportamento particolare, in quanto il valore di coppia subisce un calo prima di assestarsi al valore stazionario: questo aspetto è dovuto alle condizioni di instabilità in cui si trova il veicolo, in quanto gli viene imposto un angolo volante molto elevato ad una velocità non del tutto ridotta, quindi la combinazione di forze longitudinali e laterali supera un valore di soglia, il quale determina un transitorio di instabilità, che impone al driver di imprimere una minor coppia volante.

Manovra di sweep in frequenza

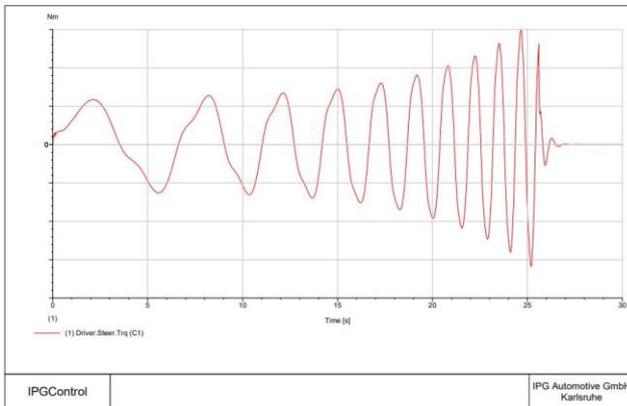


Figure 73 - Coppia volante @ 10 km/h

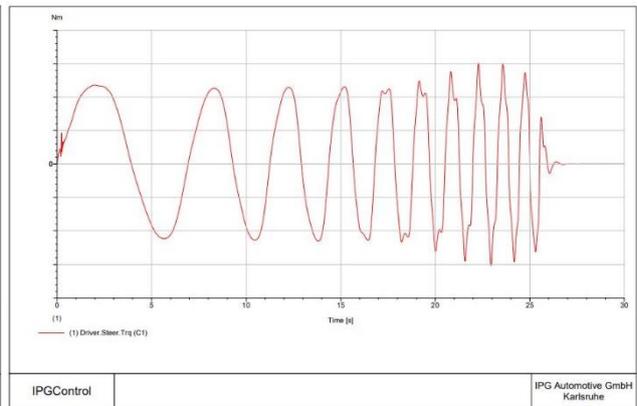


Figure 74 - Coppia volante @ 30 km/h

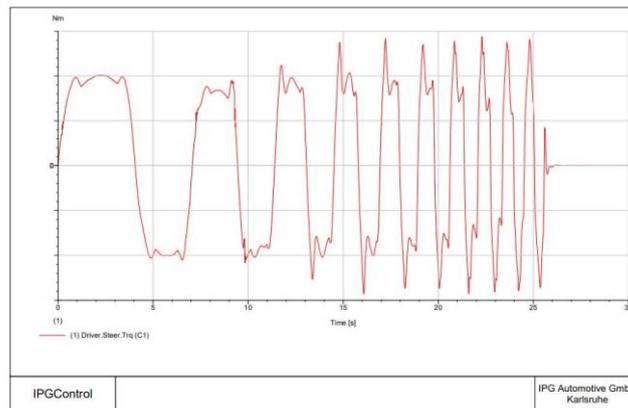


Figure 75 - Coppia volante @ 50 km/h

Nella manovra di sweep in frequenza si ripropone in primo luogo il fenomeno evidenziato in precedenza relativamente alla manovra sinusoidale: all'aumentare della velocità i picchi di coppia volante assumono un andamento irregolare, conseguenza di un sistema sicuramente meno stabile a causa dei maggiori valori di forze trasmesse tra la superficie stradale e la vettura. L'aspetto particolare in questo caso si può attribuire all'esecuzione della manovra a 30 km/h, in quanto inizialmente l'andamento della coppia è regolare e ben raccordato, ma all'aumentare della velocità di azionamento del volante si nota il comportamento descritto sopra, riconducibile anche alle costanti di tempo del sistema, il quale viene sollecitato ad una frequenza crescente, la quale supera in un determinato frangente il limite per cui il sistema riesce a rispondere in maniera stabile e precisa.

Infine, anche nel caso della manovra di sweep in frequenza, i valori di coppia volante aumentano all'aumentare della velocità di avanzamento del veicolo, riproponendo lo stesso andamento descritto in precedenza, caratterizzato da valori di picco simili tra i due casi a 30 e 50 km/h.

Per quanto riguarda la manovra di sweep sono state effettuate inoltre delle ulteriori analisi, relative all'analisi in frequenza dei valori di coppia applicati per eseguire la manovra: è stata ottenuta la trasformata di Fourier del segnale di coppia volante per le tre velocità di avanzamento del veicolo, ottenendo i seguenti risultati.

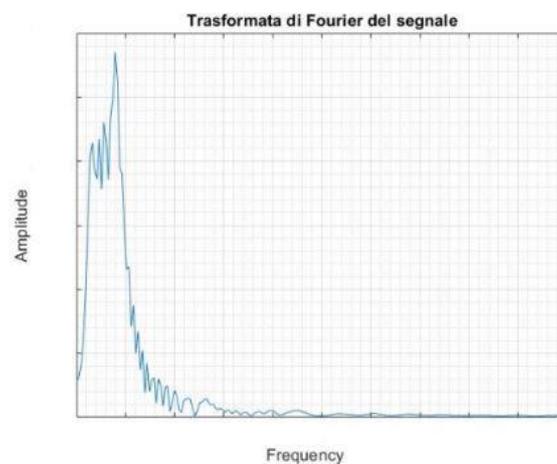


Figure 76 – Trasformata di Fourier del segnale @ 10 km/h

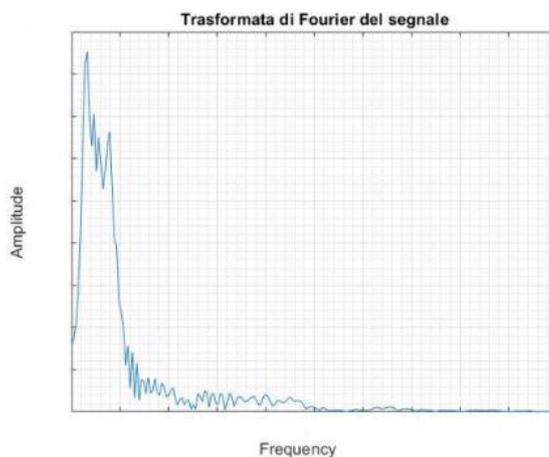


Figure 77 – Trasformata di Fourier del segnale @ 30 km/h

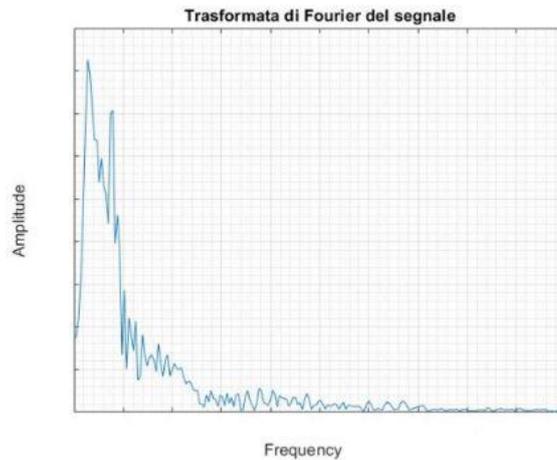


Figure 78 – Trasformata di Fourier del segnale @ 50 km/h

Nei tre grafici riportati sopra è possibile osservare un andamento simile della trasformata di Fourier (FFT), in quanto a variare non sono le frequenze di applicazione del comando, bensì i valori di coppia, a tal proposito infatti è possibile valutare l'immagine riportata sotto.

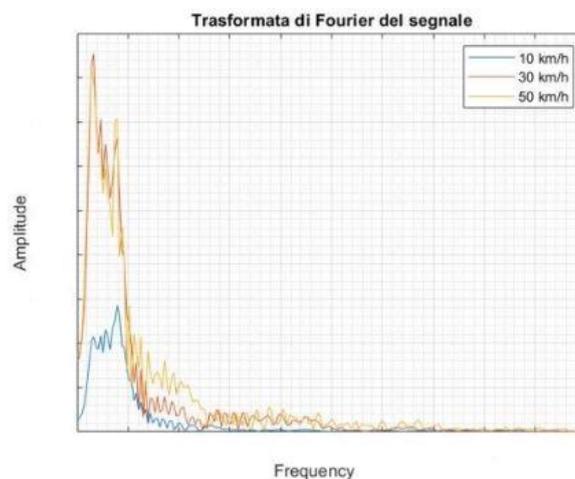


Figure 79 - Confronto FFT alle differenti velocità del veicolo

Incrementando la velocità di avanzamento il contenuto energetico aumenta: nell'intervallo tra 0 Hz e 5 Hz (valori dovuti al fatto che in fase di simulazione le frequenze di azionamento del sistema di sterzo sono state impostate all'interno di questo intervallo) si osservano valori elevati d'intensità della FFT, i quali aumentano corrispondentemente della velocità del veicolo, in quanto è necessaria una quantità di coppia sempre più elevata per eseguire la manovra richiesta, mentre all'aumentare delle frequenze non viene applicata alcuna coppia volante e di conseguenza l'intensità tende a zero.

Manovra Step steer

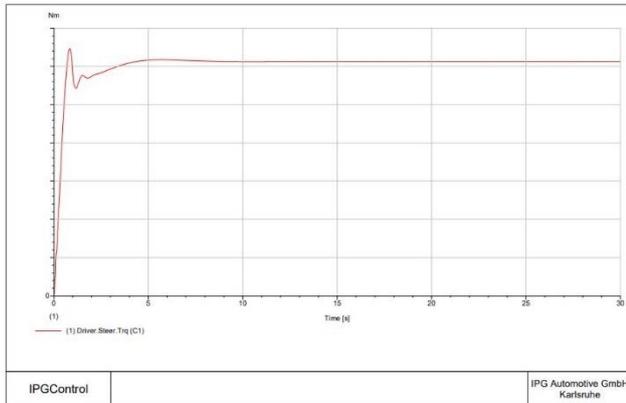


Figure 80 - Coppia volante @ 10 km/h

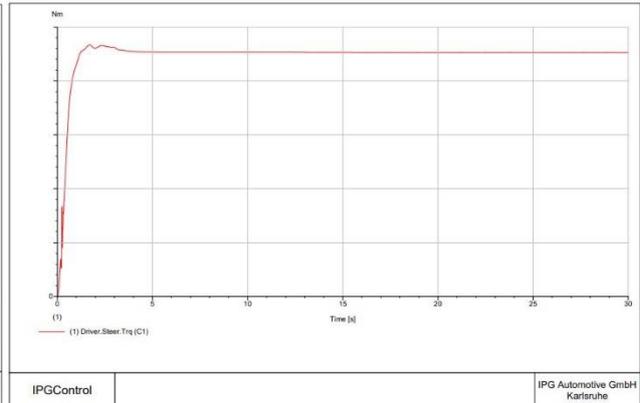


Figure 81 - Coppia volante @ 30 km/h

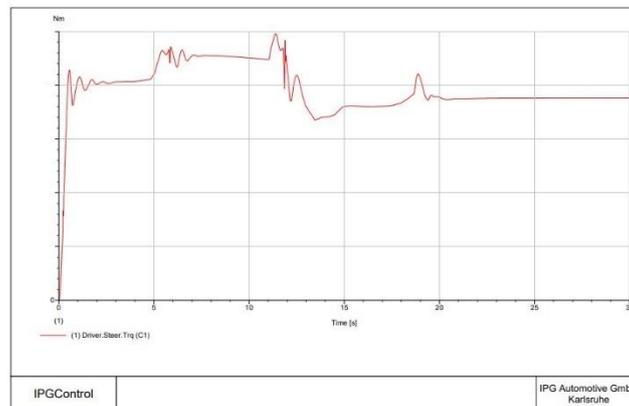


Figure 82 - Coppia volante @ 50 km/h

Infine, vengono riportati i risultati relativi alla manovra di step steer, i quali confermano quanto detto in precedenza: all'aumentare della velocità di avanzamento dapprima la coppia volante aumenta in modo netto, triplicando nuovamente tra 10 e 30 km/h, oltre invece tende ad un asintoto, mantenendo valori simili arrivando a 50 km/h.

L'ulteriore aspetto ben visibile è anch'esso una conferma, in quanto si ripropone un andamento di coppia volante molto irregolare alla velocità di avanzamento del veicolo di 50 km/h: anche in questa manovra il sistema per via della velocità e delle forze trasmesse più elevate si trova a non rispondere più in maniera lineare, ma a causa nuovamente delle costanti di tempo delle singole componenti (pignone, cremagliera, volante, EPS eccetera) manifesta una risposta irregolare, impiegando un discreto quantitativo di tempo prima di portarsi alla situazione di equilibrio finale della prova.

In conclusione, sebbene le simulazioni analizzate sopra siano state effettuate a scopo principalmente didattico, è possibile evidenziare un denominatore comune: all'aumentare della velocità del veicolo risulta progressivamente più articolata l'esecuzione delle manovre e conseguentemente le forze e le coppie in gioco assumono valori dapprima superiori, salvo poi tendere ad un asintoto.

Capitolo 5

Dinamica verticale

Analizzare il comportamento di qualsiasi veicolo in una determinata situazione di guida non è un aspetto semplice, inoltre nel caso in cui l'analisi si sposti nell'ambito della dinamica verticale il processo risulta ancora più complicato: come verrà mostrato nei seguenti capitoli, l'analisi delle accelerazioni trasmesse agli occupanti del veicolo deve essere effettuata nel dominio del tempo ed anche nel dominio delle frequenze.

Nel corso degli anni sono stati effettuati molti studi sui moti di scuotimento verticale e di beccheggio, in particolare nel modo in cui questi vengono percepiti dagli occupanti del veicolo: è noto come le frequenze e le intensità dei due moti elencati possano influenzare le condizioni di salute dei passeggeri e del conducente.

5.1 Modello a quattro gradi di libertà

Per inquadrare il discorso da un punto di vista analitico è necessario introdurre un modello semplificato che consenta di comprendere l'argomento affrontato.

Viene dunque definito un modello di veicolo dotato di quattro gradi di libertà, adottando l'ipotesi semplificativa di considerare il veicolo simmetrico rispetto al piano definito dagli assi X e Z, in modo da poter trascurare la componente di rollio.

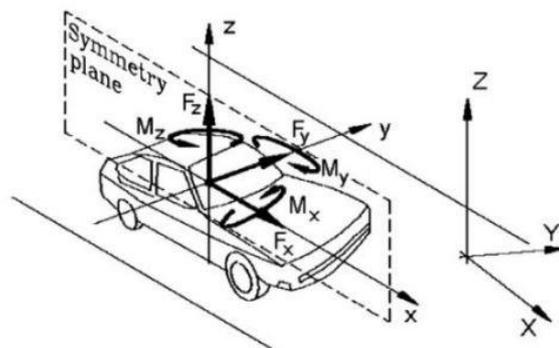


Figure 83 - Sistema di coordinate del veicolo

Vengono dunque utilizzate le seguenti quattro coordinate:

- $z_s(t)$ rappresenta lo spostamento verticale del centro di massa G ;
- $\vartheta(t)$ rappresenta l'angolo di beccheggio della massa sospesa m_s ;
- $z_1(t)$ rappresenta lo spostamento verticale delle masse non sospese all'asse anteriore;
- $z_2(t)$ rappresenta lo spostamento verticale delle masse non sospese all'asse posteriore.

Le grandezze sopra elencate sono assolute e sono misurate a partire dalla configurazione di equilibrio statico del veicolo, inoltre i valori degli spostamenti sono considerati positivi verso l'alto e il valore dell'angolo di beccheggio è assunto positivo in senso orario.

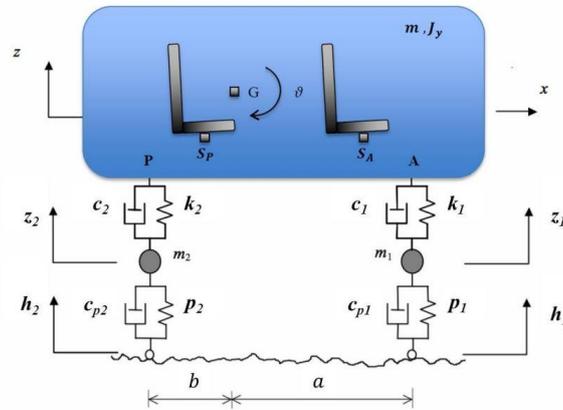


Figure 84 - Modello veicolo a 4 gradi di libertà

I parametri indicati nella figura riportata sopra sono i seguenti:

- m indica la massa sospesa;
- J_y indica il momento d'inerzia della massa sospesa, relativamente all'asse Y, calcolato rispetto al centro di gravità G ;
- m_1 indica la somma delle masse non sospese dell'assale anteriore (ruote, pneumatici, freni, parte della sospensione);
- m_2 indica la somma delle masse non sospese dell'assale posteriore (ruote, pneumatici, freni, parte della sospensione);
- k_1 indica la rigidezza delle sospensioni anteriori;
- k_2 indica la rigidezza delle sospensioni posteriori;
- p_1 indica la rigidezza verticale degli pneumatici anteriori;
- p_2 indica la rigidezza verticale degli pneumatici posteriori;
- c_1 indica il coefficiente di smorzamento viscoso degli ammortizzatori anteriori;
- c_2 indica il coefficiente di smorzamento viscoso degli ammortizzatori posteriori;
- c_{p1} indica il coefficiente di smorzamento degli pneumatici anteriori;
- c_{p2} indica il coefficiente di smorzamento degli pneumatici posteriori;
- a indica la distanza tra il centro di gravità del veicolo ed il centro delle ruote anteriori (semi-passo anteriore);
- b indica la distanza tra il centro di gravità del veicolo ed il centro delle ruote posteriori (semi-passo posteriore);

- $L = a + b$, indica la distanza tra il centro delle ruote anteriori e quello delle ruote posteriori (passo del veicolo).

Per poter svolgere dei calcoli è necessario fornire come dati di input gli spostamenti verticali h_1 e h_2 , relativi rispettivamente ai punti di contatto delle ruote con l'asfalto (indicati con A_1 e A_2) a causa di comportamenti irregolari del manto stradale su cui si trova il veicolo.

Assumendo inoltre l'asfalto come non deformabile, lo stesso spostamento verticale subito dall'assale anteriore verrà riprodotto sull'assale posteriore dopo un istante di tempo legato alla velocità del veicolo ed al passo:

$$\begin{cases} h_2(t) = h_1(t - \tau) \\ \tau = \frac{L}{V} \\ L = a + b \end{cases} \quad (4)$$

Dove:

- τ rappresenta il ritardo tra l'istante in cui viene trasmesso l'input all'assale anteriore e quello in cui viene trasmesso all'assale posteriore;
- V rappresenta la velocità di avanzamento del veicolo.

Inoltre, vengono definite le forze F scambiate tra le masse non sospese e la massa sospesa e le forze N scambiate tra le masse non sospese ed il terreno.

A questo punto è possibile implementare un sistema di equazioni che permette di valutare i moti descritti inizialmente.

Equazioni di congruenza:

$$\begin{cases} z_1 = z_s + a \cdot \vartheta \\ z_2 = z_s - b \cdot \vartheta \end{cases} \quad (5)$$

Equazioni di equilibrio dinamico:

$$\begin{cases} m_s \cdot \ddot{z}_s = F_1 + F_2 \\ J_y \cdot \ddot{\vartheta} = F_1 \cdot a - F_2 \cdot b \\ m_1 \cdot \ddot{y}_1 = N_1 - F_1 \\ m_2 \cdot \ddot{y}_2 = N_2 - F_2 \end{cases} \quad (6)$$

Equazioni costitutive:

$$\begin{cases} F_1 = k_1 \cdot (y_1 - z_1) + c_1 \cdot (\dot{y}_1 - \dot{z}_1) \\ F_2 = k_2 \cdot (y_2 - z_2) + c_2 \cdot (\dot{y}_2 - \dot{z}_2) \\ N_1 = p_1 \cdot (h_1 - y_1) \\ N_2 = p_2 \cdot (h_2 - y_2) \end{cases} \quad (7)$$

Attraverso le varie sostituzioni e semplificazioni è possibile ottenere le equazioni del moto del sistema dinamico, attraverso quattro equazioni differenziali del secondo ordine, le quali possono essere espresse in forma matriciale come segue:

$$[M] \cdot \{\ddot{w}\} + [C] \cdot \{\dot{w}\} + [K] \cdot \{w\} = \{F(h(t))\} \quad (8)$$

Dove:

- $\{q\} = (z_s, \vartheta, z_1, z_2)^T$ corrisponde al vettore delle coordinate

$$- [M] = \begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_Y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix}$$

$$- [C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & c_2 b - c_1 a & -c_1 & -c_2 \\ c_2 b - c_1 a & c_1 a^2 + c_2 b^2 & c_1 a & -c_2 b \\ -c_1 & c_1 a & c_1 + c_{p1} & 0 \\ -c_2 & -c_2 b & 0 & c_2 + c_{p2} \end{bmatrix}$$

$$- [K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & k_2 b - k_1 a & -k_1 & -k_2 \\ k_2 b - k_1 a & k_1 a^2 + k_2 b^2 & k_1 a & -k_2 b \\ -k_1 & k_1 a & k_1 + p_1 & 0 \\ -k_2 & -k_2 b & 0 & k_2 + p_2 \end{bmatrix}$$

$$- \{F(h(t))\} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ p_1 & 0 \\ 0 & p_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ c_{p1} & 0 \\ 0 & c_{p2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{Bmatrix} = [K_h] \cdot \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{Bmatrix} + [C_h] \cdot \begin{Bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{Bmatrix}$$

Le tre matrici $[M]$, $[C]$, $[K]$ sono simmetriche, inoltre quella di massa è anche diagonale.

Per studiare la risposta del veicolo soggetto all'eccitazione da parte della strada, viene analizzata la risposta in frequenza: entrambi gli assali vengono sottoposti ad un'eccitazione armonica, che rappresenta una semplificazione iniziale delle reali sollecitazioni trasmesse durante le situazioni di guida.

Il vettore degli spostamenti è quindi il seguente:

$$\{h(t)\} = \begin{Bmatrix} h_1(t) \\ h_2(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{Bmatrix} \cdot e^{i\Omega t} \quad (9)$$

Dove:

- H_1 è il termine reale;
- H_2 è il termine complesso, avendo lo stesso modulo di H_1 ma avendo un ritardo di fase dovuto al ritardo con cui viene sollecitato l'assale posteriore rispetto all'anteriore.

Quindi:

$$\begin{cases} h_1(t) = h_0 \cdot e^{i\Omega t} \\ h_2(t) = h_0 \cdot e^{i\Omega(t-\tau)} = \frac{h_0}{e^{i\Omega\tau}} e^{i\Omega t} \\ \tau = \frac{L}{V} \end{cases} \quad (10)$$

Riportando la relazione tra frequenza spaziale e temporale:

$$\begin{cases} \Omega = \bar{\Omega}V = 2\pi \frac{V}{\lambda} \\ \phi = \Omega\tau = 2\pi \frac{VL}{\lambda V} = 2\pi \frac{L}{\lambda} \end{cases} \quad (11)$$

Quindi:

$$h_2(t) = \frac{h_0}{e^{i \cdot 2\pi L / \lambda}} e^{i\Omega t} \quad (12)$$

Sostituendo, il vettore di input è il seguente:

$$\{h(t)\} = \begin{Bmatrix} h_1(t) \\ h_2(t) \end{Bmatrix} = \{H\} \cdot e^{i\Omega t} = \begin{Bmatrix} h_0 \\ \frac{h_0}{e^{i \cdot \frac{2\pi L}{\lambda}}} \end{Bmatrix} e^{i\Omega t} \quad (13)$$

Il ritardo genera un vettore complesso $\{H\}$ che viene applicato al sistema dinamico. Il ritardo dell'angolo di fase ϕ è proporzionale al rapporto tra il passo del veicolo e la lunghezza d'onda del profilo stradale.

Derivando nel tempo il vettore spostamento h si ottengono velocità ed accelerazione:

$$\begin{cases} \{\dot{h}\} = i\Omega \cdot \{H\} \cdot e^{i\Omega t} \\ \{\ddot{h}\} = (i\Omega)^2 \cdot \{H\} \cdot e^{i\Omega t} = -\Omega^2 \cdot \{H\} \cdot e^{i\Omega t} \end{cases} \quad (14)$$

La risposta del sistema stazionario all'eccitazione armonica sarà anch'essa armonica:

$$\begin{cases} \{q\} = \{Q\} \cdot e^{i\Omega t} \\ \{\dot{q}\} = i\Omega \cdot \{Q\} \cdot e^{i\Omega t} \\ \{\ddot{q}\} = -\Omega^2 \cdot \{Q\} \cdot e^{i\Omega t} \end{cases} \quad (15)$$

Dove $\{Q\}$ è un vettore complesso che permette di indicare la differenza di fase tra le coordinate.

Sostituendo le espressioni riportate sopra nelle equazioni del moto si ottiene:

$$-\Omega^2 [M]\{Q\}e^{i\Omega t} + i\Omega [C]\{Q\}e^{i\Omega t} + [K]\{Q\}e^{i\Omega t} = [K_h]\{H\}e^{i\Omega t} + [C_h]i\Omega\{H\}e^{i\Omega t} \quad (16)$$

Raccogliendo:

$$(-\Omega^2 [M] + i\Omega [C] + [K])\{Q\} = ([K_h] + i\Omega [C_h])\{H\} \quad (17)$$

Infine, pre-moltiplicando entrambi i lati dell'equazione per l'inverso della matrice contenuta nelle parentesi tonde nell'equazione sopra riportata a sinistra, si ottiene la risposta del sistema a livello di spostamento:

$$\{Q\} = (-\Omega^2 [M] + i\Omega [C] + [K])^{-1} \cdot ([K_h] + i\Omega [C_h]) \cdot \{H\} \quad (18)$$

Relativamente alle accelerazioni:

$$\{\ddot{Q}\} = -\Omega^2 \cdot \{Q\} \quad (19)$$

Considerando ad esempio un profilo stradale caratterizzato da una lunghezza d'onda λ ed una velocità del veicolo costante e pari a $V = x/t$ è possibile individuare l'eccitazione del sistema dinamico:

$$h(x) = h_0 \cdot e^{i\frac{2\pi x}{\lambda}} = h_0 \cdot e^{i\frac{2\pi Vt}{\lambda}} = h_0 \cdot e^{i2\pi ft} = h_0 \cdot e^{i\Omega t} \quad (20)$$

Quindi la frequenza dell'eccitazione armonica è proporzionale alla velocità del veicolo V ed inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda del profilo stradale λ :

$$f = \frac{V}{\lambda} \quad (21)$$

Capitolo 6

Design Verification Plan

6.1 Check preliminari del veicolo

Il primo passo da compiere è costituito dal controllo di tutti gli aspetti del veicolo, a partire dalle condizioni del propulsore, passando dalle condizioni di integrità del telaio, arrivando agli pneumatici, i quali devono possedere determinate caratteristiche. Tutti gli aspetti verranno elencati nei prossimi paragrafi.

6.1.1 Telaio e sospensioni

Prima di poter eseguire i test sul veicolo è necessario verificarne l'integrità dell'intero telaio, controllando che non siano avvenuti cedimenti strutturali in alcuna zona e che siano rispettate le caratteristiche attraverso le quali il veicolo è stato omologato e fabbricato. Inoltre, è necessario verificare che l'intero sistema di sospensioni (anteriori e posteriori) sia in condizioni adeguate, ovvero non presenti anomalie o non abbia componenti eccessivamente usurati, che possano mettere a repentaglio l'incolumità del test driver e dell'eventuale ingegnere a bordo del veicolo durante i test. Infine, è necessario eseguire un controllo ulteriore relativamente al sistema di sterzo, analizzando non soltanto elementi come la servoassistenza, il sistema pignone-cremagliera ed i tiranti, ma anche i cuscinetti, le boccole, la barra di torsione e gli alberi di sterzo.

6.1.2 Pneumatici

Un ulteriore aspetto molto importante è costituito dalla verifica delle condizioni degli pneumatici al momento del test, in quanto devono rispettare le seguenti caratteristiche:

- È necessario dapprima verificare che il treno di pneumatici utilizzato sia conforme alle specifiche della vettura sottoposta al test;

- Gli pneumatici dovrebbero essere nuovi oppure, nel caso in cui fossero già stati usati, devono possedere le condizioni adeguate a poter essere utilizzati, non presentando quindi segni di eccessiva usura e/o danneggiamento;
- Qualora gli pneumatici fossero già stati utilizzati in precedenza al test, lo spessore del battistrada deve essere comunque superiore ai 2,5 mm e non deve presentare difformità oltre che segni di eccessiva usura;
- La pressione di gonfiaggio deve rispettare le indicazioni riportate nel libretto del veicolo oppure i valori previsti dalle indicazioni relative al test da svolgere, qualora presenti;
- Nel caso in cui vengano montati pneumatici nuovi è necessario eseguire un rodaggio, rispettando le modalità imposte dalla prova da effettuare oppure dall'ente/azienda che si occupa di svolgere il test. L'azienda Danisi Engineering adotta una procedura che prevede una fase in cui gli pneumatici vengono utilizzati per condizioni di guida quotidiana all'interno della zona riservata al test, prestando attenzione a non danneggiarne o provocarne usura eccessiva; dopodiché vengono eseguite delle manovre specifiche come l'esecuzione di movimenti sinusoidali, con ampiezza dell'onda crescente da un ciclo all'altro, per un numero di volte stabilito, in modo da rodare anche la parte esterna e la spalla degli pneumatici.

6.2 Strumentazione di misura

Per poter eseguire i test richiesti è necessario utilizzare:

- Un pacchetto di sensori da installare a bordo del veicolo;
- Un data logger per poter raccogliere i dati durante le sessioni di test;
- Un acquisition computer equipaggiato con i software dedicati alla raccolta ed all'elaborazione dei dati ottenuti;
- Una fonte di alimentazione elettrica (power supply).

Nei prossimi paragrafi verranno introdotti e descritti i sensori installati a bordo del veicolo per raccogliere i dati richiesti dai test.

È necessario specificare che tutti i sensori devono essere installati rispettando le indicazioni del fornitore al fine di ottenere dati considerati validi (qualora un sensore non venga installato nella posizione di default oppure non rilevi una variabile direttamente devono essere effettuate delle correlazioni al fine di ottenere un livello sufficiente di accuratezza dei risultati ottenuti), inoltre è necessario registrare la storia temporale di ogni sensore attraverso un sistema di registrazione multi-channel. All'interno del documento di proprietà di Danisi Engineering sono riportati anche i valori entro i quali operano i sensori impiegati, oltre alle tolleranze che possono essere accettate per considerare valide le prove effettuate.

6.2.1 Sensore di accelerazione tri-assiale cuscino/schienale sedile

Le accelerazioni triassiali vengono misurate grazie al sensore riportato nell'immagine sottostante. Questo dispositivo è un accelerometro, posto all'interno di un disco semi rigido in gomma nitrilica, posizionato tra il driver ed il sedile. Solitamente questi dispositivi includono un data-sheet, contenente le informazioni relative al sensore ad alla sua applicazione, tra cui l'analisi della risposta in frequenza.

Per raccogliere i dati sufficienti nell'ambito delle prove di Ride Comfort sono necessari due accelerometri:

- Un accelerometro per le accelerazioni del cuscino del sedile;
- Un accelerometro per le accelerazioni dello schienale del sedile.



Figure 85 - Accelerometro tri-assiale Bruel & Kjaer

Il sensore appena descritto possiede le seguenti caratteristiche:

Variable	Unit	Value
Measuring range	m/s ²	±500
Amplitude response	Hz	0.1/900
Supply voltage	V (DC)	24/30
Warm-up time	s	10
Temperature range	°C	-10/+70 (-60/+100 for short periods)
Maximum operational shock	m/s ²	50000
Weight	g	345
Voltage sensitivity	mV/g	100

Table 1 - Caratteristiche accelerometro tri-assiale Bruel & Kjaer

Il sensore sul cuscino del sedile del guidatore deve essere posizionato con il piattello rivolto verso il basso ed il cavo uscente verso il lato destro del sedile.

Il sensore sullo schienale del sedile del guidatore deve essere posizionato con il piattello rivolto verso lo schienale ed il cavo uscente verso il basso, in modo da ottenere i seguenti riferimenti:

- Asse X del sensore = Asse Y del veicolo;
- Asse Y del sensore = Asse Z del veicolo;
- Asse Z del sensore = Asse X del veicolo.

È importante eseguire un check sul segno delle accelerazioni prima di eseguire il test.

6.2.2 Sensore di accelerazioni volante/telaio/guide sedile

Per quanti riguarda il volante vengono rilevate le accelerazioni radiali e quelle tangenziali, per quanto riguarda il telaio vengono rilevate quelle verticali, infine riguardo alle guide di scorrimento del sedile vengono rilevate le accelerazioni tri-assiali.

Per poter raccogliere questi dati è necessario utilizzare una serie di sensori come quello riportato nell'immagine sottostante; questo accelerometro misura accelerazioni anche in caso di input vibrazionali importanti. I micro-sensori in silicio all'interno del dispositivo sono in grado di sostenere elevati shock ed accelerazioni.

Per raccogliere i dati sufficienti nell'ambito delle prove di Ride Comfort sono necessari sei accelerometri:

- Due accelerometri per le accelerazioni del volante;
- Un accelerometro per le accelerazioni del telaio (posto in corrispondenza della pedana);
- Tre accelerometri per le accelerazioni delle guide del sedile del driver.



Figure 86 - Accelerometro Endevco

Questo sensore possiede le seguenti caratteristiche:

Variable	Unit	Value
Measuring range	m/s^2	± 90
Amplitude response	Hz	0/500
Supply voltage	V (DC)	8/40
Warm-up time	ms	15
Temperature range	$^{\circ}C$	-55/+121
Maximum operational shock	m/s^2	50000
Weight	g	10 (without cable)
Voltage sensitivity	mV/g	200
Maximum dimensions	mm	25x25x10

Table 2 – Caratteristiche accelerometro Endevco

I sensori da installare sul volante devono essere posizionati sulla sezione superiore della corona, come riportato nell'immagine sottostante.

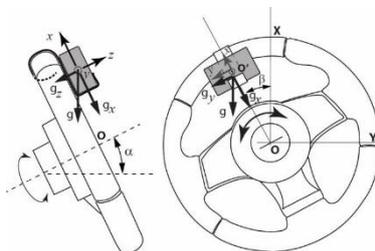


Figure 87 - Posizionamento accelerometro volante

Il sensore da installare sulla pedana (riquadrate in rosso nella figura sottostante) deve essere posizionato in modo che il cavo vada verso il basso, evitando che subisca vibrazioni.

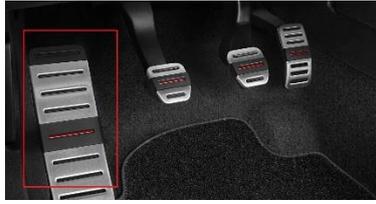


Figure 88 - Poggia-piede e pedaliera veicolo

6.2.3 Sensore di accelerazioni porta-mozzi e duomi

Questo tipo di accelerazioni viene rilevato tramite accelerometri piezo-elettrici, come quello riportato nell'immagine sottostante, montati in corrispondenza dei quattro mozzi delle ruote ed in corrispondenza dei duomi delle sospensioni. Questi sensori si interfacciano agli strumenti di acquisizione e registrazione dati.



Figure 89 - Accelerometro mozzo/duomo PCB

Questo sensore possiede le seguenti caratteristiche:

Variable	Unit	Value
Measuring range	m/s ²	±4905
Amplitude response	Hz	0/13000
Supply voltage	V (DC)	18/30
Settling time	s	<5
Temperature range	°C	-54/+121
Maximum operational shock	m/s ²	98100
Weight	g	4 (without cable)
Voltage sensitivity	mV/g	10
Maximum dimensions	mm	10.2x10.2x10.2

Table 3 – Caratteristiche accelerometro porta mozzo/duomo PCB

Questi sensori vanno fissati nella corretta posizione tramite delle speciali colle epossidiche, in modo da garantire un livello di solidità sufficiente, secondo i riferimenti riportati sulla superficie degli accelerometri.



Figure 90 - Accelerometri mozzo (sinistra) e duomo (destra)

6.2.4 Sensore di velocità del veicolo (rilevata da giri ruota)

Questo parametro viene rilevato utilizzando un encoder rotativo di tipo incrementale molto compatto e leggero, con un diametro del corpo esterno di circa 30 mm, utilizzato per le applicazioni light-duty.

Per svolgere i test di Ride Comfort è sufficiente un solo encoder.



Figure 91 - Encoder rotativo incrementale Hengstler

Questo sensore possiede le seguenti caratteristiche:

Variable	Unit	Value
Pulses per revolution	-	360
Maximum operating speed	rpm	6000
Maximum load axial & radial	N	5 & 10
Supply voltage	V (DC)	12
Temperature range	°C	-10/+60
Maximum operational shock	m/s ²	1000
Weight	g	50
Shaft & housing protection class	IP	40 & 50
External diameter	mm	30
Shaft diameter	mm	5/6

Table 4 – Caratteristiche encoder rotativo incrementale Hengstler

Per consentire al driver di valutare la velocità di avanzamento del veicolo in tempo reale è necessario installare all'interno dell'abitacolo un dispositivo come quello riportato sotto.



Figure 92 - Speed-display Hengstler

Questo dispositivo presenta le seguenti caratteristiche:

Variable	Unit	Value
Maximum dimension	mm	50x50 (depth 100)
Measure range	Hz	0.01/10000
Multiplier/divider	Programmable	

Table 5 – Caratteristiche speed display Hengstler

Il display deve essere posizionato in modo tale da consentire al driver di vedere la velocità di avanzamento del veicolo muovendo solamente i propri occhi.

6.2.5 Amplificatori di segnale

Gli amplificatori di segnale devono essere alimentati con il proprio power-supply oppure con l'alimentazione a 12V del veicolo.

Le loro impostazioni sono le seguenti:

- Sensitivity: per ogni canale accelerometrico del sensore, la sensitivity deve essere fornita dal produttore;
- Unit: rappresenta l'unità di misura del segnale in uscita e va impostata prima di eseguire le prove;
- Filtro passa-basso: rappresenta la massima frequenza di output ed il proprio valore viene settato in base alla tipologia della prova;
- Filtro passa-alto: rappresenta la minima frequenza di output ed il proprio valore viene settato in base alla tipologia della prova;

6.2.6 Acquisition board

Un processore che acquisisce i dati dotato di un filtro anti aliasing e che opera in tempo reale, garantisce la memorizzazione dei dati ottenuti.

6.3 Canali raccolti

Dopo aver elencato e descritto i sensori utilizzati per raccogliere i dati relativi alle performance di Ride Comfort, in questo paragrafo vengono riportati i canali che vengono raccolti.

Id	Measure point	Direction	Unit
1	Floor driver's X acceleration	+X	[g]
2	Floor driver's Y acceleration	+Y	[g]
3	Floor driver's Z acceleration	+Z	[g]
4	Seat rail acceleration (driver's side)	+X	[g]
5	Seat rail acceleration (driver's side)	+Y	[g]
6	Seat rail acceleration (driver's side)	+Z	[g]
7	Steering wheel angle - radial		[g]
8	Steering wheel angle - tangential		[g]
9	Vehicle speed		[km/h]
10	Engine rpm		[rpm]
11	FL hub	+X	[g]
12	FL hub	+Y	[g]
13	FL hub	+Z	[g]
14	FR hub	+X	[g]
15	FR hub	+Y	[g]
16	FR hub	+Z	[g]
17	RL hub	+X	[g]
18	RL hub	+Y	[g]
19	RL hub	+Z	[g]
20	RR hub	+X	[g]
21	RR hub	+Y	[g]
22	RR hub	+Z	[g]
23	FL dome	+X	[g]
24	FL dome	+Y	[g]
25	FL dome	+Z	[g]
26	FR dome	+X	[g]
27	FR dome	+Y	[g]
28	FR dome	+Z	[g]
29	RL dome	+X	[g]
30	RL dome	+Y	[g]
31	RL dome	+Z	[g]
32	RR dome	+X	[g]
33	RR dome	+Y	[g]
34	RR dome	+Z	[g]

Table 6 - Variabili raccolte nei test di Ride Comfort

In seguito alla raccolta dei dati, questi dovranno essere poi processati per ottenere il risultato finale, ovvero l'oggettivazione delle performance di Ride Comfort del veicolo analizzato.

6.4 Parametri del veicolo

Analogamente a quanto descritto nell'analogo paragrafo relativo al sistema di sterzo, anche nel caso di test relativi al Ride comfort vengono eseguite delle misurazioni riguardo gli aspetti più importanti del veicolo in prova, che in questo paragrafo vengono solamente elencati (si veda il paragrafo 4.4 per una descrizione più dettagliata):

- Condizioni di carico del veicolo (Standard 1-2-3);
- Centro di massa (CoG) del veicolo, a partire dal passo L e dalle masse dei quattro corner, rilevati rispettivamente con un sistema di misura laser ed un sistema di quattro bilance su cui viene posto il veicolo.

6.5 Esecuzione test

Al fine di ottenere risultati significativi è importante eseguire il programma di test di Ride comfort su una serie di superfici differenti.

Si distinguono a tal proposito due tipologie di superfici: quelle utilizzate per condurre test classificati come random e quelle utilizzate per condurre test definiti in transitorio, entrambe descritte in questo paragrafo.

6.5.1 Superfici per test random

Pavé (noto anche come pavé belga): questa tipologia di superficie viene utilizzata per replicare le sollecitazioni continue subite dai veicoli nei centri delle città.



Figure 93 - Pavé belga

Specifiche del test:

- Velocità veicolo: da definire in ragione del veicolo in prova, generalmente non superiore ai 50 km/h;
- Tolleranza velocità veicolo: $\pm 0,5$ km/h;
- Marcia inserita (solamente nel caso di cambio manuale): da definire in ragione del veicolo in prova;
- Ripetizioni test: 5.

Rough road: anche questa superficie viene usata per riprodurre sollecitazioni subite dai veicoli nelle strade cittadine.



Figure 94 - Rough road

Specifiche del test:

- Velocità veicolo: da definire in ragione del veicolo in prova, generalmente non superiore ai 50 km/h;
- Tolleranza velocità veicolo: $\pm 0,5$ km/h;
- Marcia inserita (solamente nel caso di cambio manuale): da definire in ragione del veicolo in prova;
- Ripetizioni test: 5.

Profilo autostradale: questa tipologia di asfalto viene utilizzata per riprodurre le sollecitazioni subite dai veicoli durante la guida autostradale.



Figure 95 - Profilo autostradale

Specifiche del test:

- Velocità veicolo: da definire in ragione del veicolo in prova, solitamente non superiore a 140 km/h;
- Tolleranza velocità veicolo: ± 1 km/h;
- Marcia inserita (solamente nel caso di cambio manuale): da definire in ragione del veicolo in prova;
- Ripetizioni test: 5.

6.5.2 Superfici test in transitorio

Traversina simmetrica: utilizzata per riprodurre situazioni di attraversamento di alcuni elementi presenti nelle strade cittadine, come binari del tram oppure traversine. In questa tipologia di prova tutte le ruote del veicolo devono passare sopra le traversine.



Figure 96 - Esempio di traversina

Specifiche del test:

- Velocità veicolo: da definire in ragione del veicolo in prova, generalmente non superiore ai 50 km/h;
- Tolleranza velocità veicolo: $\pm 0,5$ km/h;
- Marcia inserita (solamente nel caso di cambio manuale): da definire in ragione del veicolo in prova;
- Ripetizioni test: 5.

Traversina asimmetrica: è la stessa tipologia di ostacolo descritto in precedenza, ma in questo caso solamente una semi-carreggiata del veicolo (destra o sinistra) attraversa l'ostacolo

Specifiche del test:

- Velocità veicolo: da definire in ragione del veicolo in prova, generalmente non superiore ai 50 km/h;
- Tolleranza velocità veicolo: $\pm 0,5$ km/h;
- Marcia inserita (solamente nel caso di cambio manuale): da definire in ragione del veicolo in prova;
- Ripetizioni test: 5.

6.6 Analisi dei risultati

Dopo aver completato i test ed aver raccolto tutti i dati, è necessario elaborarli per ottenere le informazioni utili alla valutazione oggettiva del veicolo sottoposto al test, relativamente al Ride comfort.

6.6.1 Applicazione dei filtri di percezione umana

Il filtraggio dei dati assume un ruolo molto importante ai fini della valutazione oggettiva delle prestazioni di Ride comfort, in quanto il contenuto in frequenza delle vibrazioni è l'aspetto che maggiormente influisce sulla salute umana, oltre che sulle sensazioni di malessere, quali ad esempio nausea e chinetosi.

Durante l'analisi dei segnali accelerometrici rilevati nei test di Ride comfort, i valori vengono filtrati come segue:

- w_k : filtro utilizzato per analizzare i segnali di accelerazione lungo l'asse Z;
- w_d : filtro utilizzato per analizzare i segnali di accelerazione lungo gli assi X e Y;
- w_f : filtro utilizzato per l'analisi del fenomeno di chinetosi;
- w_c : filtro utilizzato per analizzare le misure relative allo schienale del sedile;
- w_e : filtro utilizzato per valutare le vibrazioni rotazionali;
- w_h : filtro utilizzato per valutare le vibrazioni trasmesse dal volante.

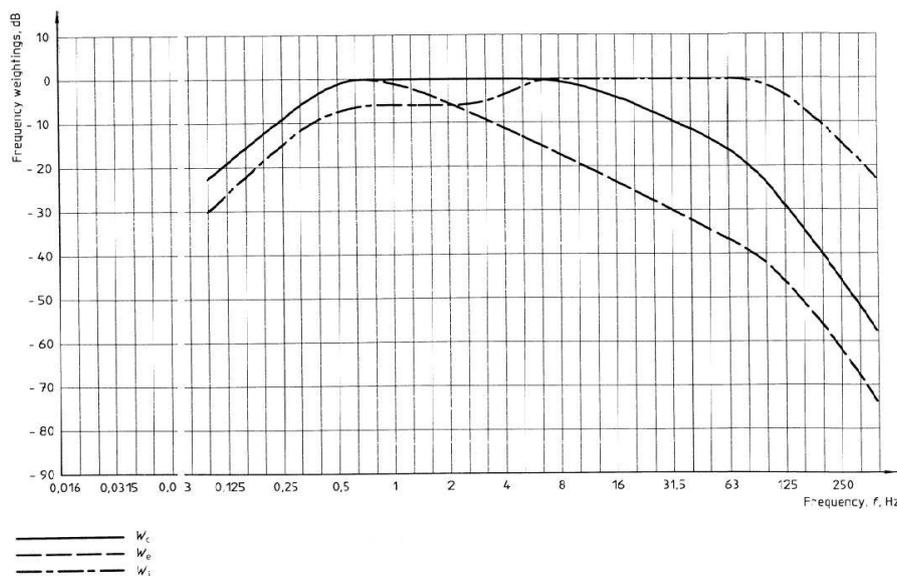


Figure 97 - Weighting filters (w_c - w_e - w_j)

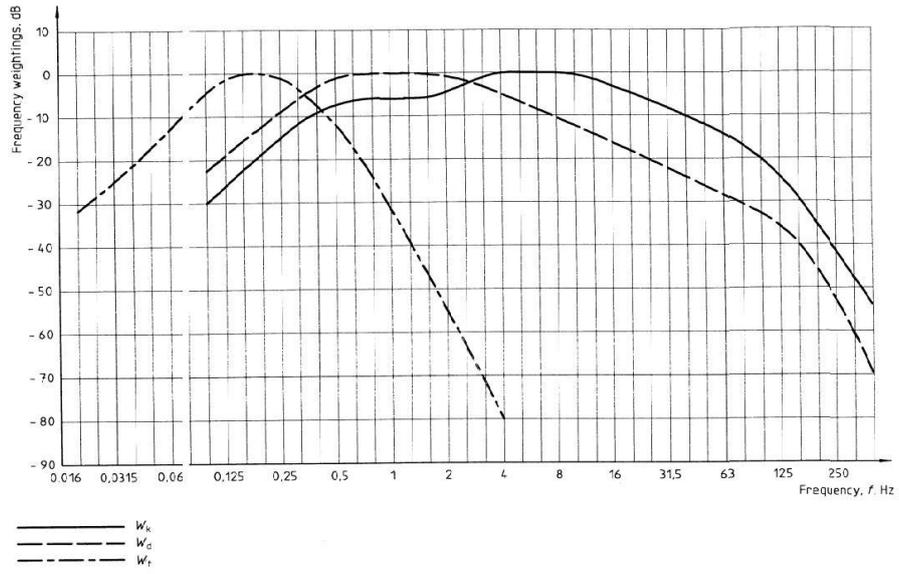


Figure 98 -- Weighting filters ($w_k - w_d - w_f$)

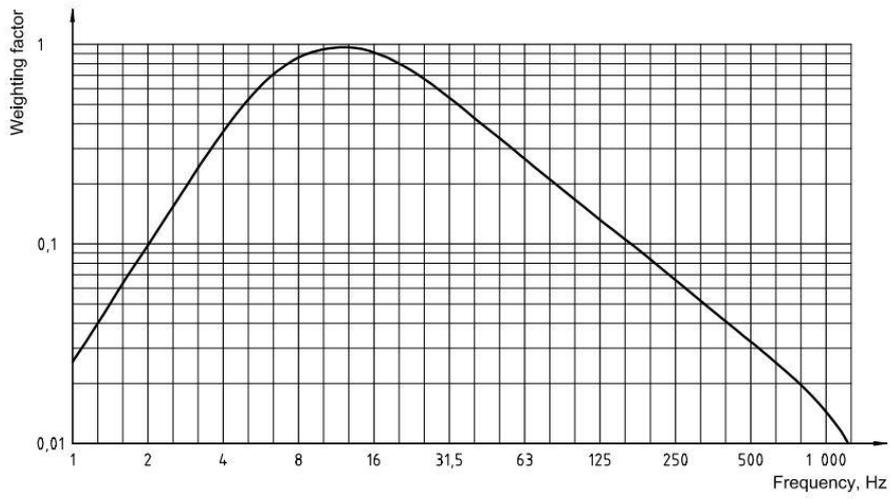


Figure 99 - Weighting filter (w_n)

6.6.2 Analisi dei test in regime transitorio

Per eventi transitori come un impatto con un ostacolo (quale una traversina) l'obiettivo è quello di calcolare il valore efficace (Root Mean Square RMS) dei valori di accelerazione ottenuti attraverso i sensori: questa analisi viene effettuata per valutare la componente energetica del segnale di accelerazione, di cui vengono utilizzati i valori nell'arco di tempo che contiene l'evento transitorio, corrispondente a circa un secondo.

Il parametro di RMS è ottenuto nel modo seguente:

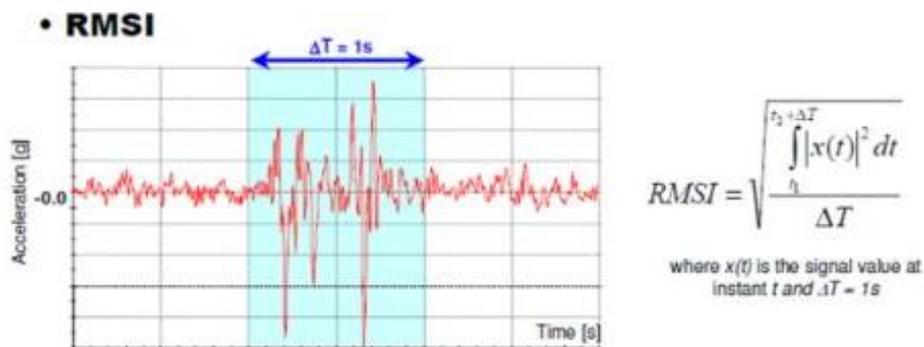


Figure 100 - RMSI di un segnale di accelerazione

- PK-PK, rappresenta la differenza tra due picchi consecutivi relativi all'impatto con l'ostacolo dell'assale anteriore e di quello posteriore

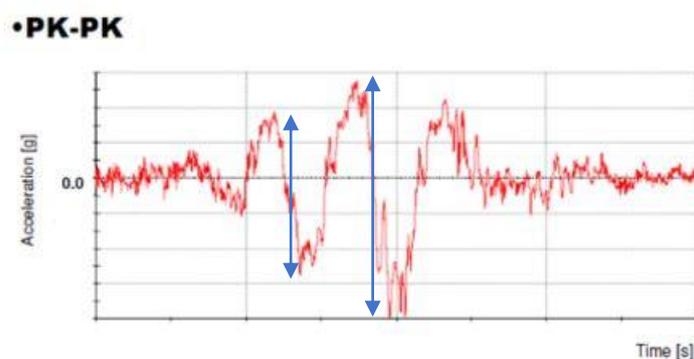


Figure 101 - Differenza picco a picco di un segnale di accelerazione

- Tempo di dissipazione: rappresenta il tempo necessario per dissipare l'energia dovuta all'impatto, in termini di smorzamento della vibrazione.

6.6.3 Analisi dei test random

La densità spettrale di potenza (Power Spectral Density PSD) di una variabile acquisita nel dominio del tempo, descrive la distribuzione di potenza nelle componenti in frequenza del segnale. La PSD di un segnale viene ottenuta attraverso la trasformata di Fourier (Fast Fourier Transform FFT), decomponendo il segnale in uno spettro di frequenze contenute in un determinato intervallo.

La PSD si calcola come segue:

$$\begin{cases} P_{x(f)} = \int_{-\infty}^{+\infty} r_x(\tau) \cdot e^{-2j\pi f\tau} d\tau \\ r_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t)x(t + \tau)dt \end{cases} \quad (22)$$

Dove T corrisponde alla durata del segnale.

Dopo aver ottenuto la FFT, viene analizzato il risultato, che generalmente si compone di quattro contributi divisi come segue:

- Frequenze inferiori ai 5 Hz: body motions, ovvero moti appartenenti al veicolo ed i propri occupanti;
- Frequenze superiori: moti propri delle sospensioni, del veicolo, sospensione motopropulsore, sospensione trasmissione.

Alcuni parametri utili per valutare le performance di Ride comfort nei test random sono i seguenti:

- RMS (Root Mean Square) definito alla pagina precedente, con riferimento alla PSD, eventualmente pesata con i filtri di percezione umana

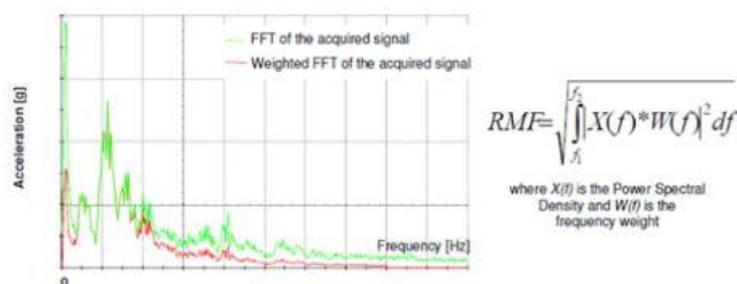


Figure 102 - RMF di un segnale di accelerazione

La SAE (Society of Automotive Engineers) definisce nel seguente modo la classificazione delle frequenze caratteristiche dei veicoli:

- Ride: basse frequenze, da 0 a 5 Hz (motion sickness 0,1/0,5 Hz);
- Shake: frequenze intermedie, da 5 a 25 Hz;
- Harshness: alte frequenze, da 25 a 100 Hz;
- Noise: fenomeni acustici, da 100 a 22000 Hz.

Capitolo 7

Conclusioni

Al termine del progetto di tesi presentato è necessario sottolineare alcuni aspetti che hanno assunto un'importanza significativa e che hanno permesso la trattazione dei vari argomenti in maniera efficace e dettagliata.

L'elemento più importante ai fini della stesura del presente documento è stato senza dubbio il processo di correlazione e di allineamento tra ambiente reale ed ambiente simulativo: come descritto in vari passaggi all'interno della tesi, è stato cruciale aver potuto eseguire comparazioni tra le attività svolte su pista da driver esperti, capaci di eseguire ripetutamente manovre caratterizzate da estrema precisione e correttezza, e le simulazioni effettuate tramite software in grado di riprodurre le manovre analizzate a partire da una serie di parametri di input opportunamente impostati. Avendo a disposizione apparecchiature in grado di riprodurre in maniera fedele i risultati che si otterrebbero in pista, necessitando inoltre di risorse temporali e soprattutto economiche inferiori, è immediato comprenderne l'efficacia, in quanto dopo aver individuato i parametri da impostare a seguito di correlazioni fisiche e numeriche legate ad una specifica manovra eseguita da un determinato veicolo, le ulteriori prove potranno essere successivamente eseguite in ambiente simulativo ed i relativi risultati saranno caratterizzati da una precisione ed una validità indiscutibili, grazie appunto alle correlazioni effettuate in precedenza.

Nel caso specifico di questo progetto, a partire dall'esecuzione in entrambi gli ambienti delle manovre di cicli di sterzo, è stato possibile verificare la correttezza dei dati ottenuti da IPG Car Maker, ricavando da quest'ultimo gli ulteriori risultati derivanti da altre manovre, fondamentali ad eseguire una caratterizzazione oggettiva del veicolo che viene sottoposto a qualunque tipologia di test. Lo stesso procedimento avrebbe potuto essere utilizzato relativamente alla caratterizzazione del veicolo nell'ambito della dinamica verticale ed è sicuramente estendibile a tutti gli aspetti che riguardano la dinamica del veicolo e che necessitano di valutazioni oggettive attendibili. Inoltre, qualora fosse possibile, sarebbe ancora più efficace l'utilizzo di un simulatore di guida, che garantirebbe anche di ricevere un feedback da parte del driver relativamente alla percezione delle variabili acquisite durante le prove: in questo modo sebbene aumentino le risorse economiche

investite è possibile ottenere risultati estremamente precisi ed affidabili, grazie anche all'esperienza dei driver, che riescono ad indirizzare la correlazione nel modo più efficace possibile.

Un ulteriore aspetto che ha assunto notevole importanza è costituito senza dubbio dalla necessità di utilizzare software di elaborazione dati, come DewesoftX e Matlab: dopo aver acquisito gli output dalle varie manovre eseguite è stato necessario effettuare un ulteriore passaggio prima di poterli presentare, in quanto relativamente sia ai test su pista sia a quelli in ambiente simulativo i risultati non sarebbero stati presentati in maniera comprensibile ed efficace.

I dati acquisiti da DewesoftX relativi ai test di dinamica laterale svolti in pista erano caratterizzati da un segnale piuttosto disturbato, aspetto dovuto alla presenza di frequenze proprie dei sistemi di misurazione installati sul veicolo, per cui i segnali ottenuti non potevano essere rappresentati senza essere stati prima filtrati per poter eliminare le fonti di disturbo: questo procedimento è stato eseguito attraverso l'esportazione su Matlab dei vettori contenenti le grandezze ottenute, applicando un primo filtro in frequenza, dopodiché utilizzando il secondo dei due software sono stati applicati ulteriori filtri in grado di pulire il segnale e di poter ottenere dei risultati molto più comprensibili ed utili al fine di eseguire le varie analisi. I vettori filtrati sono stati poi raffigurati sempre attraverso l'utilizzo di Matlab, ottenendo delle figure in grado di descrivere in maniera più chiara possibile i risultati ottenuti.

I dati ottenuti dal software IPG Car Maker sono stati anch'essi esportati in ambiente Matlab al fine di poter essere elaborati per ottenere ulteriori dati: gli output nel dominio del tempo della manovra di Sweep in frequenza (presentata all'interno del capitolo 4) sono stati utilizzati per ottenere alcuni grafici molto importanti nel dominio delle frequenze, tramite la trasformata di Fourier: senza l'utilizzo del software Matlab non sarebbe stato possibile osservare in che modo l'energia del sistema sia dipendente dalla frequenza, aspetto molto importante soprattutto per quanto riguarda l'esecuzione di una manovra in cui quest'ultima varia costantemente dall'inizio alla fine.

Concludendo, l'utilizzo delle attuali tecnologie ha sicuramente contribuito a rendere strutturato il progetto intrapreso, sebbene rimanga comunque molto importante effettuare determinate manovre di test in ambiente reale e quindi utilizzando i veicoli su pista. In questo modo si possono ottenere i parametri di input al fine di eseguire le correlazioni con i software di simulazione ed i simulatori di guida.

Capitolo 8

Bibliografia

- [1] M. Velardocchia, Appunti del corso di Meccanica del veicolo. Politecnico di Torino, 2022.
- [2] Pfeffer P. Harrer M. and Johnston D. N. (2008). "Interaction of vehicle and steering system regarding on-centre handling", *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*.
- [3] Norman K.D. (1984). Objective evaluation of on-centre handling performance. SAE paper 840069.
- [4] ISO 3888-1 (2018): Passenger cars — Test track for a severe lane-change manoeuvre.
- [5] ISO 4138 (2021): Passenger cars — Steady-state circular driving behaviour — Open-loop test methods.
- [6] ISO 7401 (2011): Road vehicles — Lateral transient response test methods — Open-loop test methods.
- [7] ISO 8855 (2011): Road vehicles — Vehicle dynamics and road-holding ability — Vocabulary.
- [8] ISO 13674-1 (2010): Road vehicles — Test method for the quantification of oncentre handling.
- [9] ISO 13674-2 (2016): Road vehicles — Test method for the quantification of oncentre handling.
- [10] ISO 15037-1 (2019): Road vehicles — Vehicle dynamics test methods.
- [11] ISO 15037-2 (2002): Road vehicles — Vehicle dynamics test methods.
- [12] Danisi Engineering — Vehicle handling characterization – draft.
- [13] Griffin M. J. - Handbook of human Vibration.
- [14] Effect Of Vehicle Vibration On Human Body – RIT Experience, Department of Mechanical Engg. Rajarambapu Institute of Technology Sakharale-415414.
- [15] Rajesh Rajamani, "Vehicle Dynamics and Controls".
- [16] ISO 15037-3 (2022): Road vehicles — Vehicle dynamics test methods.
- [17] ISO 2631-1 (2014): Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration.

Ringraziamenti

Al termine di questo progetto desidero ringraziare innanzitutto il professore Mauro Velardocchia, insieme agli assistenti Antonio Tota e Simone Venturini, per avermi aiutato durante lo svolgimento del tirocinio e della tesi.

Ringrazio il mio tutor aziendale, l'ingegnere Claudio Ricci, Head of Advanced Vehicle Dynamics presso Danisi, il quale mi ha supportato durante l'attività svolta in azienda.

Ringrazio l'azienda Danisi Engineering ed i suoi dipendenti per avermi ospitato durante il periodo di tirocinio e di tesi, aiutandomi nelle attività svolte.

Un ringraziamento va a tutti i miei amici ed alla mia famiglia: la vostra presenza ed il vostro supporto sono stati per me fondamentali in questi anni.

Infine, ci tengo a ringraziare una per una le donne della mia vita:

- Mamma, per essere sempre stata la mia sostenitrice numero uno e per aver sempre ascoltato le mie parole, supportando le mie scelte e insegnandomi a non arrendersi mai;
- Giulia, per avermi regalato momenti di divertimento e di spensieratezza durante questi anni, ma soprattutto per essere sempre stata paziente con me, dimostrandomi di essere la sorella migliore che potessi avere;
- Chicca, la mia piccola compagna di studi;
- Martina, per aver ascoltato tutte le mie preoccupazioni ed i miei sfoghi, per avermi accompagnato durante tutto il percorso e per essermi stata accanto, comprendendo qualsiasi situazione di difficoltà in questi anni. Ti avevo detto in passato che eravamo solamente all'inizio: questo è un passo in più, insieme ci prendiamo tutto.