

Collegio di Ingegneria Meccanica,  
Aerospaziale, dell'Autoveicolo e della  
Produzione



**POLITECNICO DI TORINO**

Corso di laurea Magistrale in Ingegneria

Meccanica

Elaborato di Laurea

**STIMA DELLA VELOCITÀ DI UN  
TRENO MEDIANTE ACCELEROMETRO  
TRIASSIALE CON COMPENSAZIONE  
DEGLI ERRORI DI INSTALLAZIONE**

Studente:

**Mauro Emanuel Lemma**

Matricola:

**s248385**

Relatore:

**Prof. Stefano Paolo Pastorelli**

Referente aziendale:

**Ing. Matteo Frea**

Anno Accademico 2019/2020

---



## Ringraziamenti

Questo è un traguardo importante nella mia vita, raggiunto con sacrifici difficili e ci sono molte persone che vorrei ringraziare:

Un ringraziamento speciale va ai miei genitori che mi hanno permesso di intraprendere un lungo e oneroso percorso di studi universitari che parte dal politecnico di Bari e si conclude al politecnico di Torino, che mi hanno sostenuto in ogni momento e in ogni mia scelta. Grazie Mamma e Papà vi voglio bene con tutto il cuore.

Un ringraziamento va anche alla persona che mi è stata più vicino di tutti, la mia fidanzata Daniela, la persona con cui vorrei costruirmi un futuro e di cui non riuscirei a fare a meno neanche per una settimana. Grazie amore mio, ti amo.

Un ringraziamento sentito va all'amico che non ho mai percepito lontano anche se eravamo distanti geograficamente, grazie Davide i nostri vocali sono stati un modo per rimanere in contatto e solidificare un'amicizia che ormai durerà per tutta la nostra vita, ti voglio bene Bro.

Un ringraziamento va anche a una nuova, ma speciale amicizia che si è costruita a Torino, grazie Luca per tutti quei momenti in cui mi hai sopportato e che mi hanno aiutato ad affrontare il politecnico. Alle volte "la vita non è solo sofferenza", ma ti regala inaspettatamente soddisfazioni e persone speciali con cui legarsi in modo unico. Grazie anche per le nostre numerose telefonate che ci permettono di condividere e migliorare come esseri umani. Ti voglio bene amico mio.

Un grazie va anche alla mia sorellona e al mio fratellone che mi vogliono bene e mi hanno sempre consigliato per aiutarmi a commettere meno errori possibile nella vita, vi voglio bene.

Un ringraziamento va anche al resto della mia famiglia e agli amici di famiglia oltre a tutti gli amici che sono presenti qui oggi a festeggiare il mio traguardo, vi voglio tutti bene.

Infine, vorrei ringraziare il mio relatore il Prof. Pastorelli, il mio tutor Ing. Frea, il team di R&D per avermi supportato in questo mio percorso di tesi, e la Faiveley Transport per avermi offerto questa opportunità.



# Indice

1	Introduzione .....	1
1.1	Generalità .....	1
1.2	Descrizione del dispositivo di antipattinaggio WSP (Wheel Slide Protection) .....	5
1.3	Descrizione del problema .....	13
1.4	Descrizione dell'accelerometro .....	15
2	Simulazione del problema.....	18
2.1	Modellizzazione simulink della dinamica del veicolo .....	18
2.2	Modellizzazione simulink dell'accelerometro triassiale .....	28
3	Sviluppo e risoluzione problematica dell'orientamento dell'accelerometro .....	38
3.1	Primo step per la creazione dell'algoritmo che risolva il problema dell'orientamento .....	38
3.2	Secondo step per la creazione dell'algoritmo che risolva il problema sull'orientamento .....	40
3.3	Risoluzione problema dell'orientamento .....	42
3.4	Analisi di mercato, confronto con il brevetto del competitor.....	45
4	Sviluppo risoluzione problematica delle vibrazioni e rumore di fondo dell'accelerometro.....	49
4.1	Analisi dei dati .....	49
4.2	Ricerca dei filtri passa basso digitali .....	49
4.2.1	Filtro passa basso media mobile .....	50
4.2.2	Filtro FIR simulink.....	57
4.2.3	Filtro Savitzky-Golay.....	59
4.2.4	Filtro di Kalman .....	63
4.3	Sviluppo e scelta del filtro da utilizzare .....	64

4.4 Simulazione dei dati reali sull' algoritmo orientamento e modifiche fatte all' algoritmo sulle soluzioni .....	74
5 Versione definitiva dell' algoritmo .....	81
5.1 Prove sperimentali .....	81
5.1.1 Prima prova di andata treno regionale None-Pinerolo .....	88
5.1.2 Seconda prova di andata treno regionale None-Pinerolo .....	89
5.1.3 Terza prova di andata treno regionale None-Pinerolo .....	91
5.1.4 Prima prova di ritorno treno regionale Pinerolo-None .....	93
5.1.5 Seconda prova di ritorno treno regionale None-Pinerolo .....	96
5.1.6 Terza prova di ritorno treno regionale None-Pinerolo .....	98
5.1.7 Quarta prova di ritorno treno regionale None-Pinerolo .....	100
5.2 Algoritmo.....	103
5.3 Analisi complessiva dell' utilità del argomento di tesi .....	111
5.4 Conclusioni .....	115
6 Bibliografia .....	116
7 Sitografia .....	116



# 1 Introduzione

L'intera attività di tesi è stata svolta in Faiveley Transport del gruppo Wabtec in Piossasco, un'azienda che si occupa principalmente del sistema freno per veicoli ferroviari, partendo dalla generazione di aria compressa fino all'attuazione dei sistemi frenanti e i loro relativi controlli. Infatti, il problema che si affronterà nei prossimi capitoli riguarda in particolare il controllo della frenata del treno. Questa tematica è particolarmente importante per veicoli destinati al trasporto di persone, i quali sono dotati di dispositivi antipattinaggio per la sicurezza dei passeggeri e del veicolo, come HST (Treni ad Alta Velocità), EMU (Unità automotrici Multiple Elettriche), DMU (Unità automotrici Multiple Diesel), Metropolitane e LRV (Light Rail Vehicle tram urbani).

## 1.1 Generalità

La frenata è da intendersi come un'azione il cui scopo è trasformare l'energia cinetica di un corpo in movimento in altre forme di energia al fine di dissiparla per poterlo rallentare o arrestare.

Ci sono diversi dispositivi che permettono di effettuare una frenatura, alcuni di questi sono:

- Freno elettrodinamico
- Freno a frizione
- Freno pneumatico
- Freno elettropneumatico
- Freno elettroidraulico
- Freno elettromagnetico a pattini
- Freno a pattini a magneti permanente

Per tutti questi dispositivi, il parametro di feedback che serve all'unità di controllo per regolare la frenata attraverso un'attuazione pneumatica o elettrica, è la velocità del veicolo, questa viene interrogata solo dopo esserci stata una richiesta di frenata da parte del conducente o di un sistema di sicurezza. Per questo motivo è molto

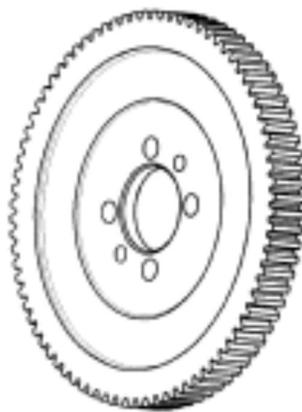
importante conoscere la velocità longitudinale del treno in modo da poterlo manovrare adeguatamente.

Esistono diversi modi per conoscere la velocità longitudinale del veicolo come la velocità ottenuta tramite GPS o tramite controlli radar oppure anche quella ottenuta dal TCMS (Train Control & Management System). Ma tutti questi metodi non sono utilizzati per il controllo della frenata per due motivi:

1. La sicurezza e l'affidabilità della velocità centralizzata non sono garantite;
2. Il dispositivo che si occupa del controllo della frenatura deve essere autonomo da dispositivi esterni che per cause particolari potrebbero non essere disponibili.

Perciò il dispositivo integrato nell'unità di controllo del freno che misura la velocità, adottato dall'azienda è una ruota fonica magnetica composta da due parti:

1. Un sensore di velocità basato sul conteggio delle rivoluzioni/min senza contatto, questo sensore è di tipo attivo (corrente o tensione) con uno o due canali indipendenti;
2. Una ruota fonica composta da una ruota dentata che con i suoi denti modifica la corrente indotta nel sensore di velocità.



**Figura 1.1– Ruota dentata utilizzata tipicamente**

Le generiche caratteristiche da rispettare per quest'ultima sono le seguenti:

- Angolo di pressione di 20°;
- Modulo 2;
- Profilo del dente DIN 867;
- Spessore del dente 3.14 mm.

La ruota fonica magnetica è montata in modo concentrico sulla parte esterna di ogni asse accanto alla ruota del treno, tale per cui la velocità angolare  $\omega$  della ruota fonica corrisponda alla velocità angolare dell'asse e quindi delle ruote del treno. Perciò conoscendo il diametro  $d$  delle suddette, è possibile risalire alla velocità longitudinale del treno attraverso la equazione (1).

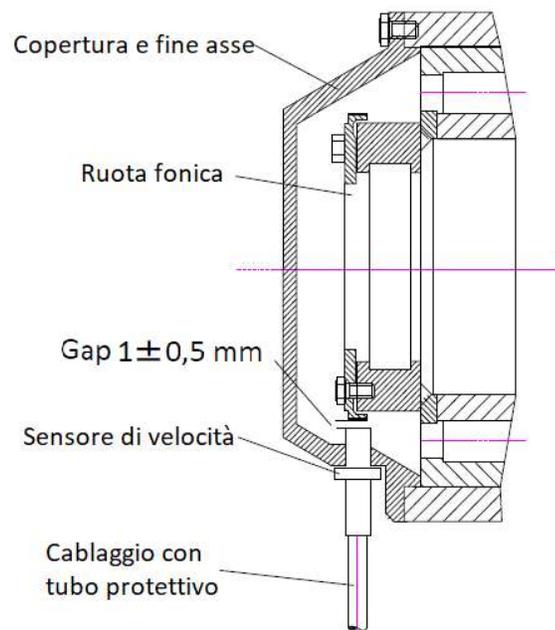
$$v = \omega * \frac{d}{2} \quad (1)$$

L'equazione (1) viene applicata per ogni asse in cui è montata la ruota fonica e la velocità del veicolo chiamata velocità di riferimento si ottiene con l'equazione 2

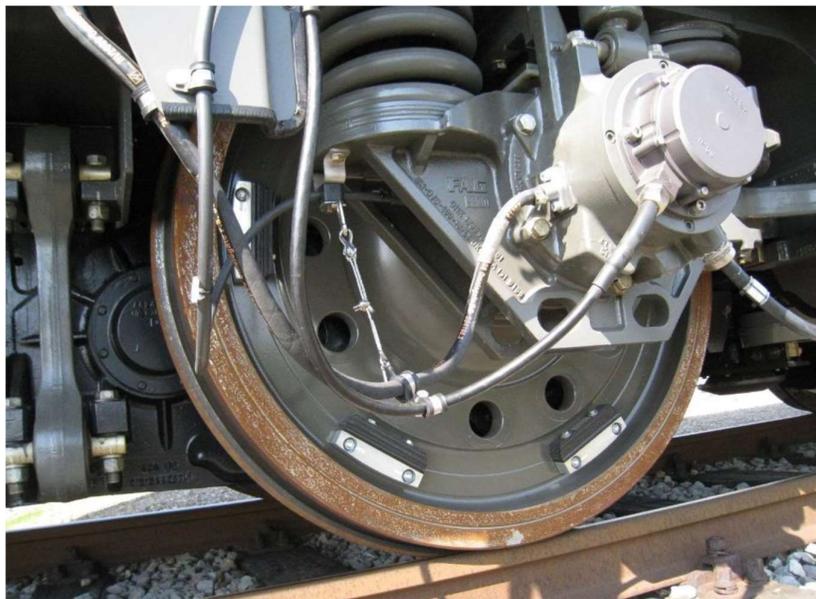
$$v_{rif} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i * \frac{d_i}{2}}{n} \quad (2)$$

Cioè eseguendo una media, inoltre i vari  $d_i$  cambiano la loro lunghezza nel tempo per via dell'usura che subiscono le ruote nella loro parte più esterna. Quindi periodicamente si utilizzano i mezzi precedentemente indicati per ricavare la velocità del veicolo come quella ottenuta dal GPS per ricavare un  $d_m$  (diametro medio) da utilizzare per tutte le velocità angolari come diametro di riferimento.

La ruota fonica magnetica è montata solitamente come in figura 1.2.



**Figura 1.2– Sezione ruota fonica montata**

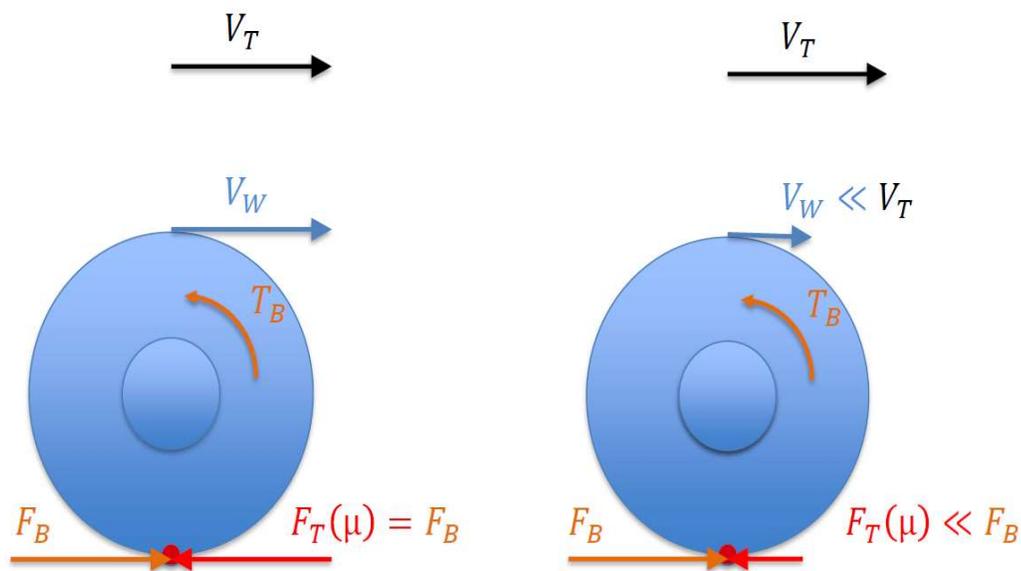


**Figura 1.3– Esempio reale di ruota fonica installata**

Nell'ambito ferroviario il controllo della frenata è associato al controllo del pattinamento fatto da un dispositivo di antipattinaggio.

## 1.2 Descrizione del dispositivo di antipattinaggio WSP (Wheel Slide Protection)

Prima di descrivere da cosa è composto e come funziona un dispositivo di antipattinaggio, è bene analizzare il fenomeno fisico del pattinamento. Quando si applica la forza frenante, la decelerazione del veicolo è funzione del coefficiente di attrito tra ruota e rotaia (detto aderenza), l'aderenza è direttamente proporzionale alla capacità di frenare in spazi minori, perché così possiamo sfruttare più forza frenante prima del blocco dell'asse.



**Figura 1.4 – Situazione alta aderenza      Figura 1.5 – Situazione bassa aderenza**

Nelle figure 1.4 e 1.5 vengono illustrate le forze e le coppie che riguardano il fenomeno del pattinamento prima nella situazione di alta aderenza, poi in quella di bassa aderenza in cui:

- $V_T$ : vera velocità del veicolo;
- $V_W$ : velocità tangenziale della ruota;

- $T_B$ : coppia di frenatura;
- $F_B$ : forza tangenziale di frenata;
- $F_T(\mu)$ : Forza d'attrito dipendente dall'aderenza.

Nella situazione di alta aderenza si sfrutta tutta la forza disponibile poiché siamo in condizione di attrito volvente, ottenendo  $F_T(\mu) = F_B$  in questo caso non si verifica il pattinamento anche detto slittamento o sliding, e si può notare come la velocità del veicolo sia uguale a quella della ruota (attrito volvente). Nella situazione di bassa aderenza invece la ruota sta strisciando sulla rotaia poiché  $V_W \ll V_T$  quindi ci troviamo in una condizione di attrito radente e la forza disponibile alla frenatura diminuisce significativamente, infatti ci troviamo nella condizione per cui  $F_T(\mu) \ll F_B$ , questo fenomeno è conosciuto come sliding.

Le principali cause che portano alla bassa aderenza sono:

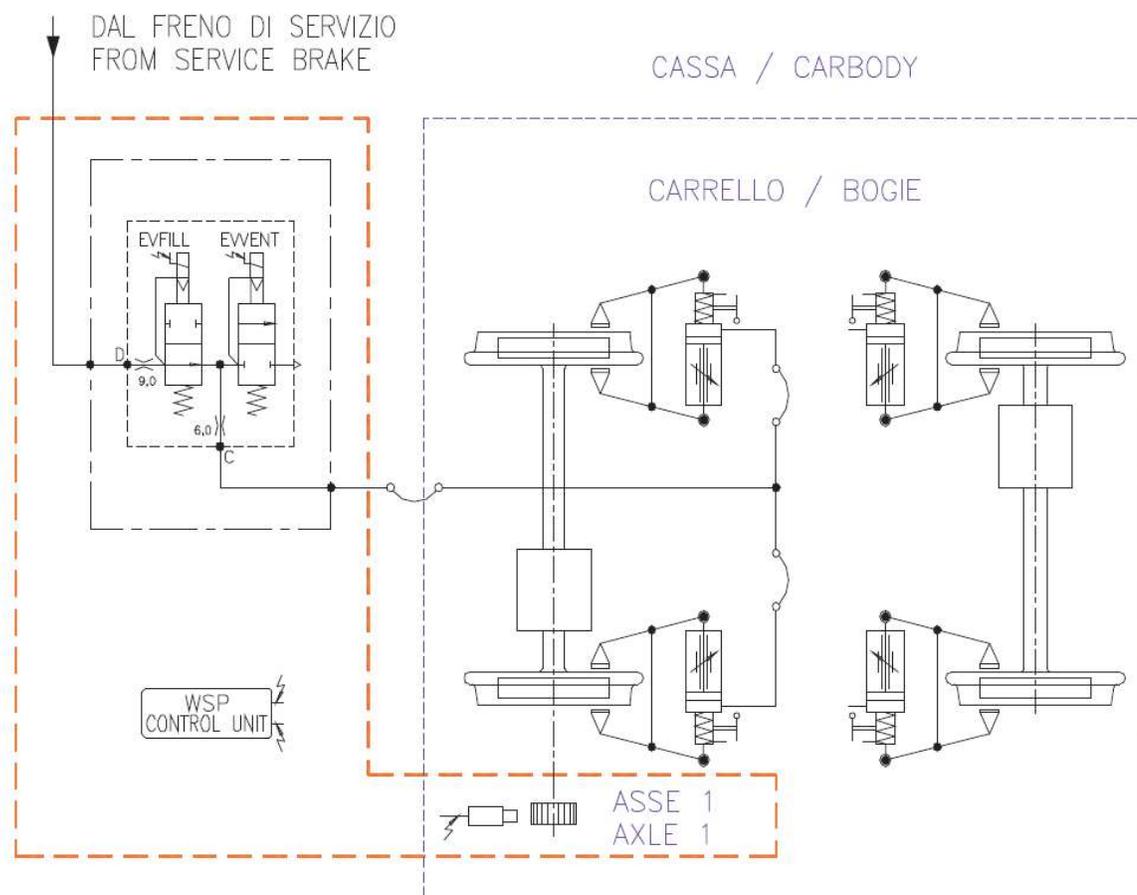
- Umidità condensa e ghiaccio sulle rotaie mescolata a contaminanti sulla rotaia;
- Usura rotaie e ruggine;
- Pioggia e neve;
- Fogliame;
- Polveri;
- Olio lubrificante e scarichi dei treni diesel;
- Perdite di fluido idraulico dalle macchine cingolate.

Lo scarso coefficiente di attrito tra ruota e rotaia pone seri problemi alla frenatura perché in determinate condizioni è facile raggiungere il bloccaggio delle ruote con pesanti conseguenze sugli spazi d'arresto e sull'integrità delle superfici di rotolamento dei cerchioni come mostrato in figura 1.6. È quindi d'obbligo prevenire il bloccaggio delle ruote in qualsiasi situazione di frenatura e per qualsiasi condizione di aderenza.



**Figura 1.6 – Ruota sottoposta a un forte pattinamento**

Questa funzione di protezione viene svolta da apposite apparecchiature dette dispositivi di antipattinaggio, che possono modulare la frenatura istantanea di un asse in funzione della sua condizione di aderenza. L'apparecchiatura in questione si compone essenzialmente di una unità elettronica di controllo che rileva e calcola la velocità dell'asse ad essa affidato tramite un sensore di velocità descritto in precedenza e modula la pressione al cilindro del freno tramite un apposito gruppo elettro-valvolare.



**Figura 1.7 – Schema tipo del gruppo elettro valvolare del WSP**

Il gruppo elettro-valvolare, mostrato in figura 1.7, di modulazione della pressione si compone di due elettrovalvole poste in serie e in prossimità del cilindro del freno. La prima di esse ha il compito di intercettare la mandata al cilindro e impedire così il suo ulteriore riempimento, mentre la seconda ha lo scopo di svuotare rapidamente il cilindro stesso. Le due valvole sono comandate opportunamente in modo da prevenire il bloccaggio dell'asse e consentire la sua rotazione sfruttando al massimo l'aderenza disponibile. Per determinare la condizione di pattinamento l'unità di controllo confronta la velocità dell'asse locale con un valore di riferimento (velocità di riferimento, appunto) calcolato utilizzando altri valori di velocità rilevati da altre unità di controllo situate sul medesimo rotabile. In questo modo la velocità di riferimento è un valore affidabile e idoneamente mediato in modo da essere altamente rappresentativo della velocità

reale del treno. Per rendere questo valore ancora più attendibile, un ultimo confronto è fatto con un valore di velocità limite, determinato istante per istante, e legato alle caratteristiche dinamiche del treno (per esempio considerando inaccettabili decelerazioni così alte da essere chiaramente errate perché inverosimili). In esercizio sono impiegati diversi tipi di algoritmi di calcolo, tutti basati sul principio sopra detto. In ogni caso, opportune misure di sicurezza impediscono la sfrenatura continuativa dell'asse e/o l'esaurimento dei serbatoi ausiliari in caso di guasto ai dispositivi di controllo.

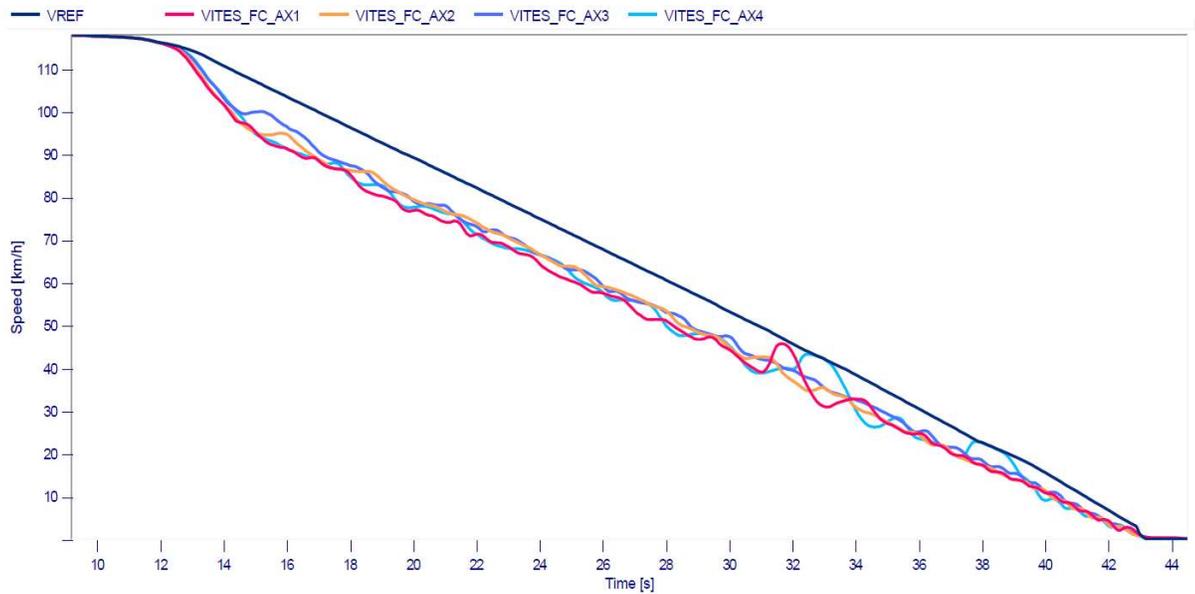
I dispositivi di antipattinaggio sono costruiti seguendo due normative:

- UIC 541 05: terza edizione del 2016, titolo: Freni – Specifiche per la costruzione di varie parti del freno – Dispositivo di antipattinaggio (WSP);
- UNI EN 15595 del 2019 titolo: Applicazioni ferroviarie - Sistemi frenanti - Sistema antipattinamento.

Queste norme impongono delle specifiche sulle minime funzionalità richieste, sulle prove da svolgere per validarli e le procedure per l'omologazione e certificazione da seguire.

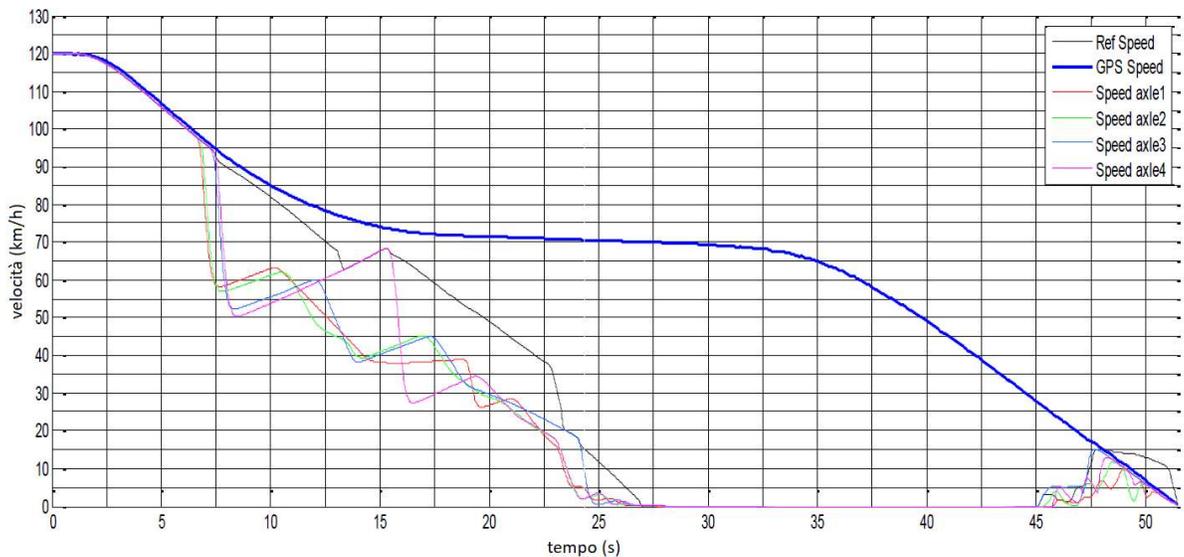
Dalle norme è anche consentito avere il 15% di slide (il 100% indica la condizione di bloccaggio dell'asse) durante un normale funzionamento per due ragioni:

- Il pattinamento si verifica molto facilmente perché l'aderenza ruota rotaia è tipicamente bassa;
- Lo sliding al 15% riesce a pulire le rotaie e migliorare le prestazioni di frenatura.



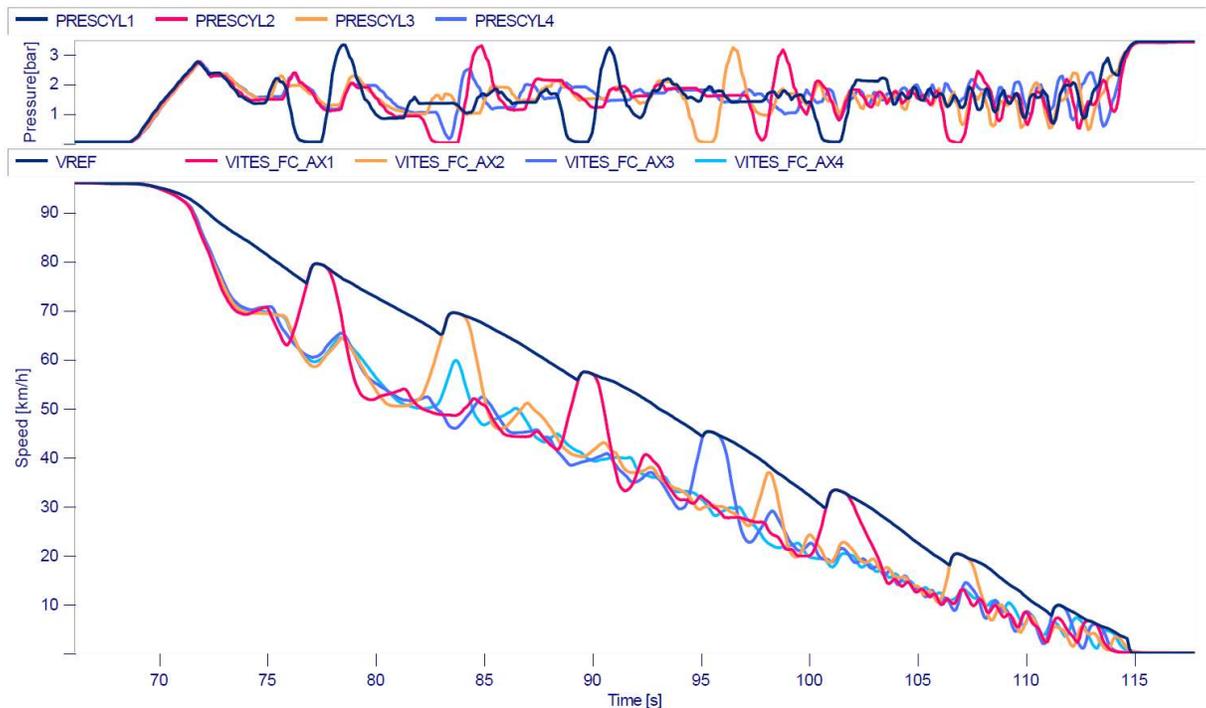
**Figura 1.8 – Confronto delle velocità degli assi con la velocità di riferimento (GPS) con aderenza tipica**

Nella figura 1.8 si può vedere l'andamento delle velocità su 4 assi in cui il dispositivo di antipattinaggio sta funzionando bene, lo sliding viene tenuto intorno al 15% infatti la velocità dei 4 assi non coincide perfettamente con la velocità di riferimento del GPS, le uniche eccezioni sono al secondo 31 con il primo asse, al secondo 33 con il quarto asse e intorno al secondo 38 con il quarto asse. In generale il dispositivo antipattinaggio svolge in modo ottimale le sue funzioni e non blocca nessun asse, altrimenti nella figura si vedrebbe qualcuna di esse avere velocità nulla mentre la velocità di riferimento sarebbe più alta.



**Figura 1.9 – Confronto delle velocità degli assi con la velocità di riferimento con un'aderenza estremamente bassa**

Nella figura 1.9 si osserva un caso di bassissima aderenza tale per cui tutti i 4 assi si stanno bloccando raggiungendo la condizione di velocità nulla intorno al secondo 25 con conseguente pattinamento davvero grave per la vita delle ruote e rotaie, questo è un caso estremo in cui il dispositivo di antipattinaggio (WSP) sta funzionando male.



**Figura 1.10 – Confronto delle velocità degli assi con la velocità di riferimento con un'aderenza estremamente bassa**

A differenza della figura 1.9 nella figura 1.10 pur avendo i 4 assi che si stanno per bloccare per le condizioni di aderenza estremamente bassa, si riesce ad ottenere una stima meno precisa della velocità di riferimento per poter controllare la frenata. Questo è possibile perché si applica un algoritmo per cui se viene rilevato lo sliding con aderenza estremamente bassa si rilascia il freno di uno dei quattro assi in modo da far recuperare alla ruota la sua vera velocità e riuscire propriamente a correggere una stima sbagliata della velocità di riferimento. Il fenomeno di rilascio del freno avviene al secondo 77 per l'asse 1, al secondo 84 per l'asse 2, al secondo 89 per l'asse 1, al secondo 95 per l'asse 3, al secondo 101 per l'asse 1, al secondo 107 per l'asse 2 e al secondo 112 per l'asse per l'asse 3, lo si potrebbe intuire dal grafico poiché ogni volta che si rilascia un asse la velocità di riferimento ha una correzione del suo andamento. Questa velocità di riferimento è solo calcolata tramite i metodi descritti precedentemente e non è ottenuta dal GPS. La parte superiore del grafico mostra l'andamento delle pressioni nei cilindri freno, infatti quando la pressione scende a 0 bar significa che un asse è stato rilasciato per

recuperare la velocità. Nelle norme questo metodo è regolamentato in modo che non si possa superare una soglia di tempo.

### 1.3 Descrizione del problema

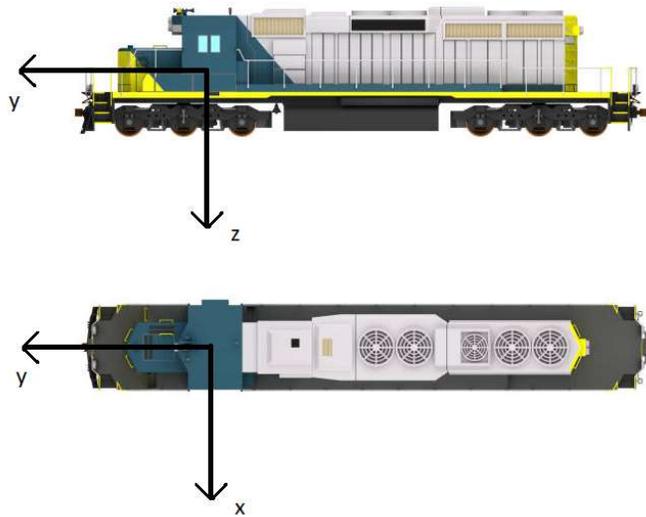
Come si è visto nelle figure 1.9 e 1.10 ci possono essere casi in cui l'aderenza è molto o estremamente bassa e il dispositivo di antipattinaggio fallisce completamente o riesce parzialmente al suo scopo. Questo è legato ovviamente alla capacità di conoscere la velocità di riferimento del veicolo, a tal proposito si è installato un accelerometro triassiale sull'unità freno per riuscire adeguatamente a stimare la velocità del veicolo.

Quindi si è scelto di installare un accelerometro triassiale, poiché questo utilizza un principio fisico la cui misura non è falsata dalle condizioni di frenata del veicolo poiché si basa sulla rilevazione dell'inerzia di una massa quando essa viene sottoposta ad un'accelerazione. Invece lo sliding per sua definizione porta ad avere una condizione in cui  $V_W < V_T$  e quindi la velocità del veicolo non è più corrispondente a quella tangenziale della ruota la quale viene misurata tramite la ruota fonica concentrica.

L'accelerometro però ha diverse problematiche da risolvere prima di poter essere utilizzato come sensore per la velocità longitudinale del treno.

Queste problematiche sono:

- L'orientamento dell'accelerometro triassiale diverso dall'orientamento del treno;
- Le vibrazioni e il rumore di fondo che affliggono il sensore.



**Figura 1.11 – Esempio di orientamento del treno**

Gli input disponibili per risolvere i problemi sono i seguenti:

- La velocità longitudinale  $v_y$  del treno in momenti di marcia regolare ottenuta da quella misurata dalle ruote foniche magnetiche, e con la sua derivata l'accelerazione longitudinale  $a_y$ ;
- Le tre componenti di accelerazione misurate dall'accelerometro triassiale;
- Un range di variazione di angoli di montaggio con cui è stato montato l'accelerometro sull'unità freno.

Per marcia regolare si intende una situazione in cui non è presente sliding delle ruote, quindi si escludono situazioni di frenata e partenza del treno.

## 1.4 Descrizione dell'accelerometro

L'accelerometro triassiale utilizzato è all'interno del sensore BMI055 costruito da Bosh Sensortech.



**Figura 1.12 – Sensore BMI055**

La figura 1.12 rappresenta un'immagine rappresentativa del sensore utilizzato, le sue tipiche applicazioni sono:

- Gaming avanzato e HMI (Human-Machine Interface);
- Riconoscimento avanzato di gesti;
- Navigazione interna;
- Stabilizzazione dell'immagine;
- Scorrimento del menu, rilevamento del tocco e del doppio tocco;
- Contapassi;
- Rilevazione caduta libera;
- Compensazione dell'inclinazione della bussola elettronica;
- Rilevamento di cadute per la validazione della garanzia.

<b>Caratteristiche principali</b>	
2 sensori inerziali in ogni dispositivo	Un accelerometro triassiale con 12 bit e un giroscopio triassiale con 16 bit
Piccolo involucro	Involucro LGA con 16 pin area di base 3.0 x 4.5 mm <sup>2</sup> e altezza 0.95 mm
Alimentazione con voltaggio comunemente usato	$V_{DD}$ range di voltaggio: 2.4 V fino a 3.6 V
Interfaccia digitale	SPI (4 connettori, 3 connettori), IIC, 4 pin di interruzione $V_{DDIO}$ range di voltaggio: 1.2 V fino a 3.6 V
Operazioni intelligenti	Giroscopio e accelerometro possono operare individualmente
Operatività dell'elettronica	MSL1, RoHS, senza alogeni e operabile tra le temperature di -40°C e +85°C

<b>Caratteristiche accelerometro</b>	
Funzionalità programmabili	Range di accelerazione $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$ ; Filtro passa basso con larghezza di banda 1kHz - <8Hz
Un chip FIFO	Un FIFO integrato a 32 frames
Un chip di controllo dell'interruzione	I segnali di interruzione sono attivati da: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Nuovi dati</li> <li>– Ogni rilevamento di pendenza</li> <li>– Rilevamento di tocco o doppio tocco</li> <li>– Riconoscimento dell'inattività e dell'orientamento</li> <li>– Rilevamento del Piano, di bassa g e di alta g</li> </ul>

Un chip di sensore di temperatura	Tagliato dall'azienda, 8 bit con tipica slope 0.5K/LSB
Bassissimo consumo elettrico	130 $\mu$ A di consumo di corrente, 1.3ms tempo di accensione, e funzioni avanzate per il controllo della potenza

Il dispositivo è un sensore di misura inerziale (IMU) per il rilevamento di movimenti e rotazioni a sei gradi di libertà. Esso è dotato di un accelerometro triassiale capace di misurare anche piccole variazioni di accelerazione, la sua risoluzione è 1/1024 di g e di un giroscopio che misura le velocità angolari, entrambe le misure sono fatte su tre assi perpendicolari x, y e z.

Per il problema che si affronta in questo lavoro di tesi il giroscopio non è stato utilizzato.

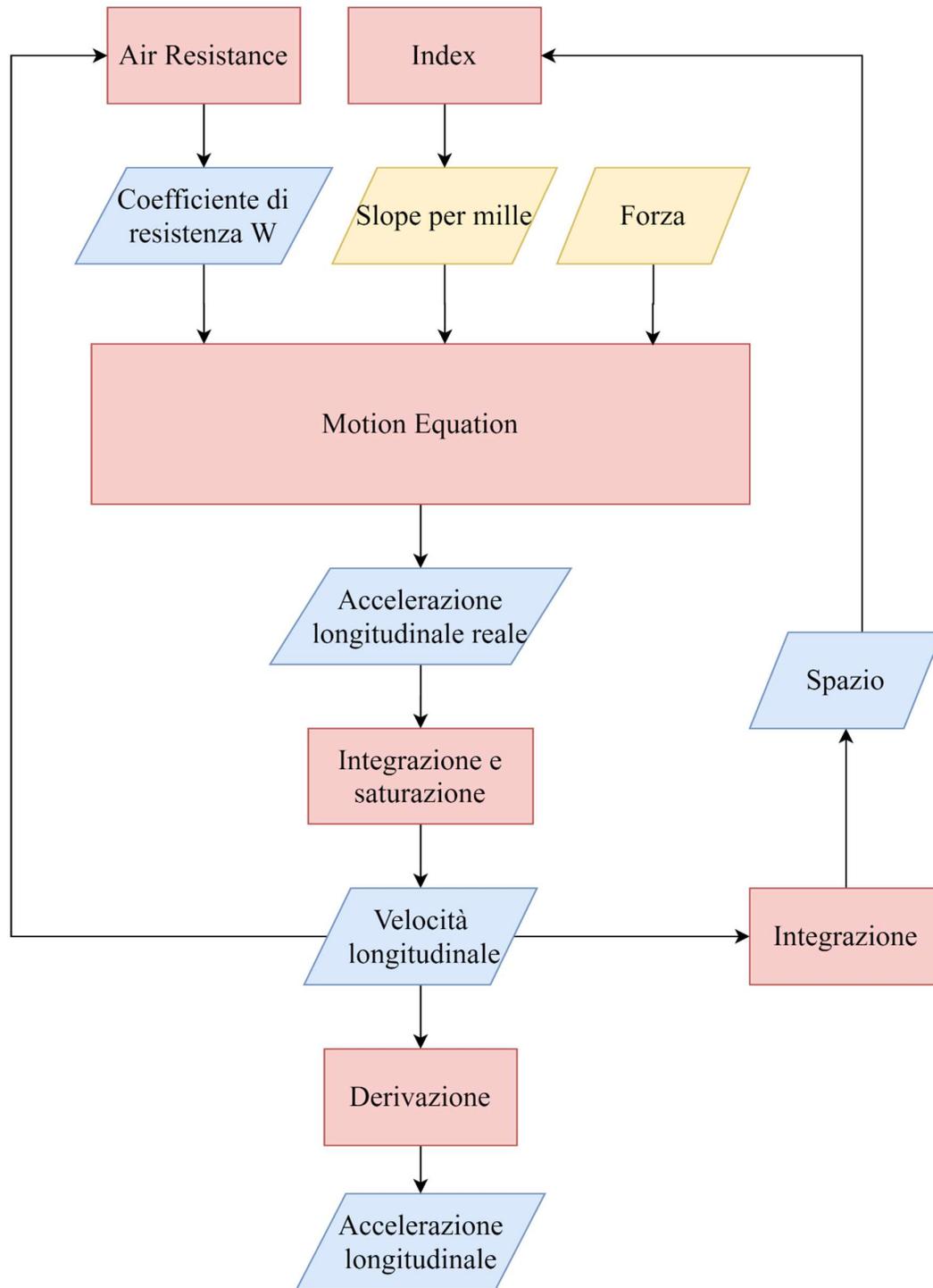
Un circuito di valutazione (ASIC) converte l'output dei MEMS (micro-electromechanical sensing structures) in multipli o sottomultipli di g, e il chip raffigurato nella figura 1.12 è impacchettato in una singola LGA di area di base 3.0 x 4.5 (mm<sup>2</sup>) e di altezza 0.95 (mm). Il dispositivo è anche dotato di interfacce digitali bidirezionali SPI e IIC. Inoltre, per garantire la massima affidabilità ed efficienza, ogni dispositivo viene testato e calibrato pronto per l'uso da Bosh

## **2 Simulazione del problema**

Il problema che si vuole simulare è relativo solo all'aspetto dell'orientamento diverso tra accelerometro e treno, poiché la problematica relativa alle vibrazioni e il rumore di fondo sarebbe inutilmente difficile da simulare partendo dai dati ideali e avendo a disposizione dei dati reali.

### **2.1 Modellizzazione simulink della dinamica del veicolo**

Si è deciso di costruire un modello simulink della dinamica del veicolo e dell'accelerometro così da poter analizzare meglio il problema successivo di creazione dell'algoritmo conoscendo in modo ideale i dati di partenza e comprendendo i fenomeni fisici che entrano in gioco.

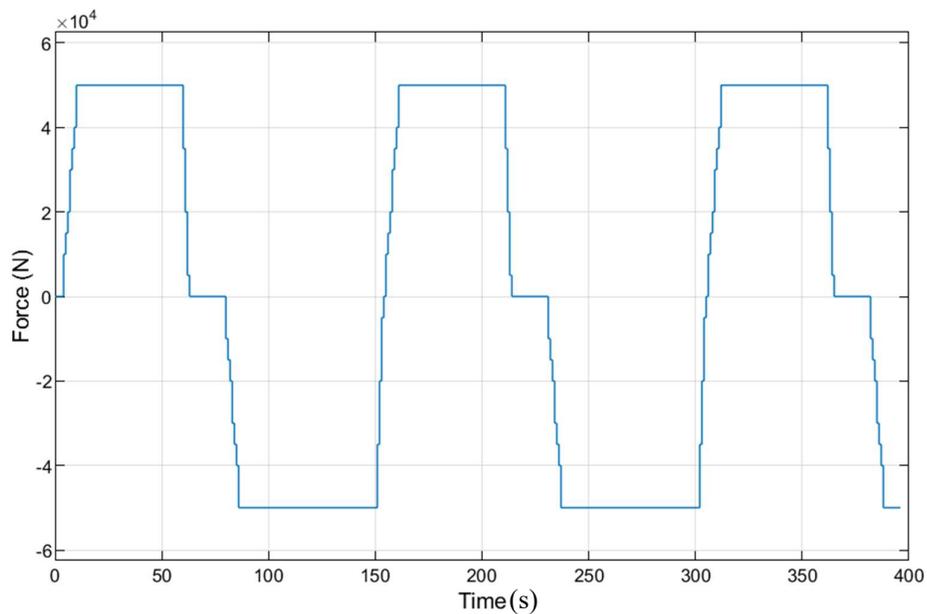


**Figura 2.1 – Diagramma a blocchi per simulare la dinamica del veicolo**

Il modello simulink così come il diagramma a blocchi in figura 2.1 è costruito come un modello ciclico a tempo discreto. Questo significa che per ogni istante di tempo si esegue tutto il ciclo mostrato in figura in modo da ottenere gli output

desiderati e che alcuni di questi vengono utilizzati come input per il successivo iter ciclico. Quando la simulazione è avviata tutti gli output ricorsivi, input per il successivo istante, sono inizializzati con valore 0. Di seguito si andrà ad analizzare ogni singolo blocco del diagramma in figura 2.1 per spiegare concretamente tutto il processo che si è seguito al fine di modellizzare la dinamica del treno.

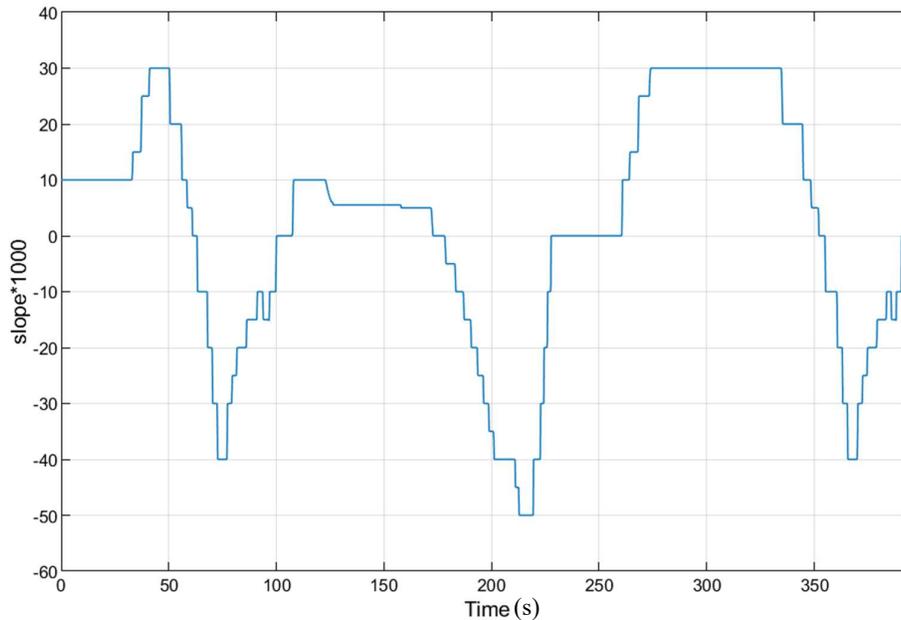
L'input Forza è costruito come un vettore composto da valori di forza in Newton variabili nel tempo, in modo da dare l'andamento mostrato nella figura 2.2 in cui si hanno fasi di trazione (valori positivi), fasi nulle e fasi di frenatura (valori negativi) tali per cui si possa simulare anche situazioni in cui il treno è fermo e frenato.



**Figura 2.2 – Andamento della forza simulata**

L'input Slope per mille invece è fatto costruendo un vettore che indica la pendenza media, moltiplicata per mille, per un tratto di 100 metri che viene interpolato linearmente nella transizione tra due segmenti di 100 metri. In questo vettore i valori negativi indicano una discesa, mentre i positivi una salita.

La pendenza media di una strada è definita dal rapporto tra il dislivello  $\Delta y$  tra il punto di partenza e quello di arrivo e la sua distanza orizzontale  $\Delta x$ . Un esempio di quelli presi in esame per lo studio ha un andamento di questo tipo.



**Figura 2.3 – Andamento della slope simulata**

Il vettore slope per mille è un vettore dipendente dallo spazio, infatti ogni elemento del vettore indica il valore di pendenza media per ogni metro di tracciato. Quindi tramite il blocco Index, dando come input lo spazio ricavato dal ciclo nell'istante precedente, viene riconosciuto il punto in cui il veicolo si trova nel momento considerato e assegnato un valore corrispondente di slope per mille per simulare il tracciato.

Il coefficiente di resistenza  $W \left( \frac{kN}{N} \right)$  è ottenuto dal blocco di processo

Air Resistance che simula le resistenze del treno al moto ed è costruito in questo modo:

Se la velocità longitudinale

$$v_y = 0 \left( \frac{km}{h} \right) \quad (2)$$

allora

$$W = 0 \quad (3)$$

Altrimenti

$$W = R_c + FFR_c * v_y + A_c * v_y^2 \quad (4)$$

Dove ci sono tre coefficienti:

- $R_c = 0.78$  per il contributo di Rolling;
- $FFR_c = 0.7$  per il contributo di Friction Flange Rail;
- $A_c = 0.001$  per il contributo dovuto all'aria;

Come si può notare dalla condizione (2) e dall'equazione (4) il coefficiente  $W$  dipende dalla velocità, la quale è presa dal valore ricavato nel ciclo all'istante precedente.

Il blocco di processo Motion Equation descrive attraverso una funzione matlab la dinamica del veicolo, ed esso prende come input:

- La forza di trazione  $F$  ( $N$ ) o di frenatura tramite un vettore.
- Slope per mille, la quale è un valore numerico che indica la pendenza del tracciato.
- $W$  ( $\frac{kN}{N}$ ) è un coefficiente che varia in funzione della velocità e indica la resistenza al moto del veicolo dovuta all'aria e agli attriti interni della macchina.

Quindi si utilizza equazione (5) per ricavarsi l'accelerazione longitudinale in ( $\frac{m}{s^2}$ ) del treno

$$a_y = \frac{F}{M} - \frac{g * M}{M} * \sin\left(\text{atan}\left(\frac{\text{slope per mille}}{1000}\right)\right) - \frac{W * g * M}{1000 * M} \quad (5)$$

Dove sono stati adoperati dei parametri precedentemente inizializzati come:

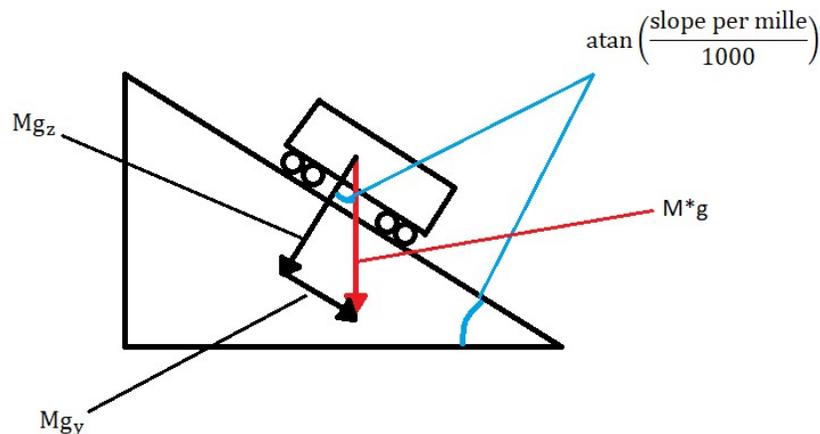
- $M$  la quale indica la massa del veicolo.
- $g$  che indica l'accelerazione di gravità.

Questa non è altro che una formulazione differente del secondo principio della dinamica.

$$\frac{F}{m} = a \quad (6)$$

Nell'equazione (5) abbiamo tre diverse forze divise per la massa del veicolo che si vanno a sommare vettorialmente tra loro:

- $F$  indica la forza applicata al treno la quale se è di trazione sarà concorde con il verso di marcia del veicolo, se è di frenata invece sarà opposta al verso di marcia.
- $-M * g * \sin\left(\text{atan}\left(\frac{\text{slope per mille}}{1000}\right)\right)$  è la componente lungo la longitudinale del veicolo  $Mg_y$ , dovuta alla forza di gravità relativa alla pendenza in quel tratto di percorso.



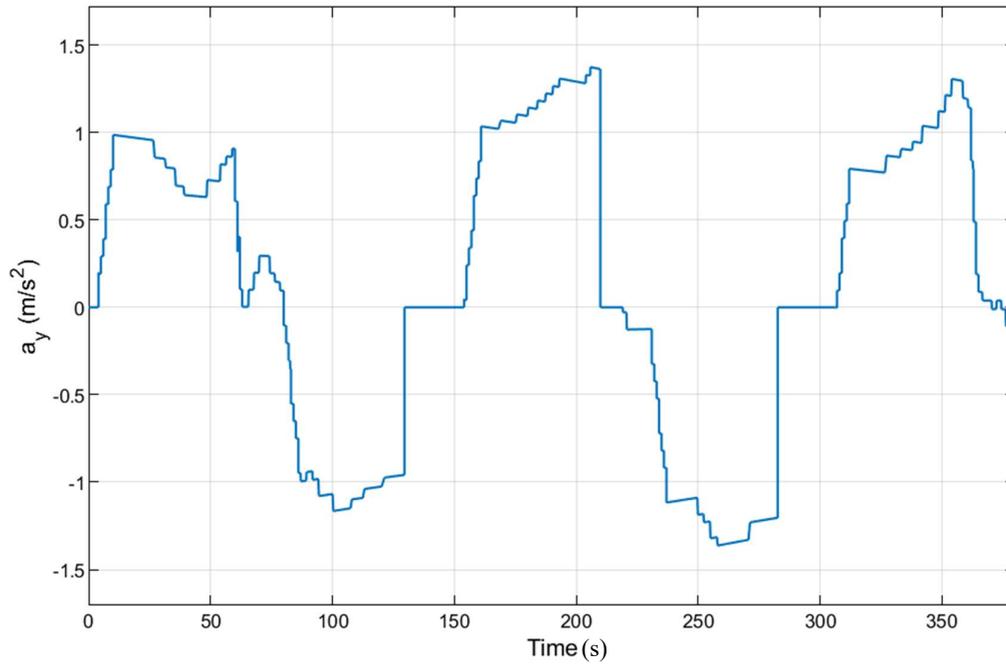
**Figura 2.4 – Diagramma esplicativo delle componenti della forza di gravità**

In cui  $atan\left(\frac{\text{slope per mille}}{1000}\right)$  è dovuto alle relazioni trigonometriche della definizione di pendenza e il seno di questo angolo per  $M * g$  rappresenta la componente longitudinale che si va a sommare alla forza di trazione nel caso di discesa e a sottrarre nel caso di salita.

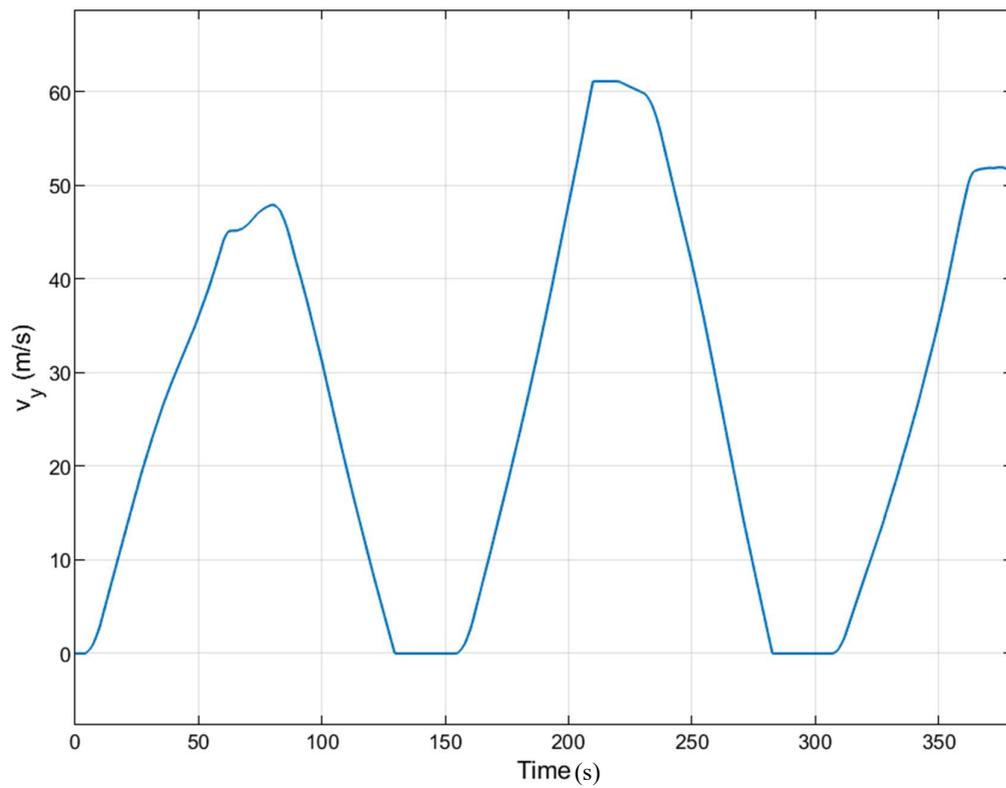
- L'ultima parte dell'equazione (5)  $\frac{W * g * M}{1000}$  è una modellizzazione fornita dall'azienda che indica la resistenza al moto del treno ed è sempre opposta al verso di marcia del veicolo.

Ottenuta l'accelerazione longitudinale  $a_y$ , la si integra per ottenere la velocità longitudinale  $v_y$ . Viene anche impostata una saturazione sulla velocità massima per simulare il valore limite raggiungibile tecnologicamente dal treno, valore oltre il quale un input di accelerazione ulteriore non produce alcun effetto sulla velocità. Inoltre, per la simulazione non si vuole considerare una retromarcia del veicolo perciò si inserisce anche una saturazione sulla velocità minima a 0, cosicché anche se il modello riceve un segnale di forza negativa (per simulare la frenata) questa non fa tornare indietro il treno ma al massimo lo fa fermare. Quindi viene eseguita un'altra derivazione da una delle tre ramificazioni della velocità longitudinale per ottenere l'accelerazione longitudinale reale la quale poi sarà quella presa in esame per i successivi utilizzi nell'accelerometro. Un'altra ramificazione porta il valore della velocità longitudinale al blocco di processo Air Resistance e l'ultima ramificazione prima integra la velocità per ottenere lo spazio percorso e poi conduce quest'ultimo al blocco di processo Index.

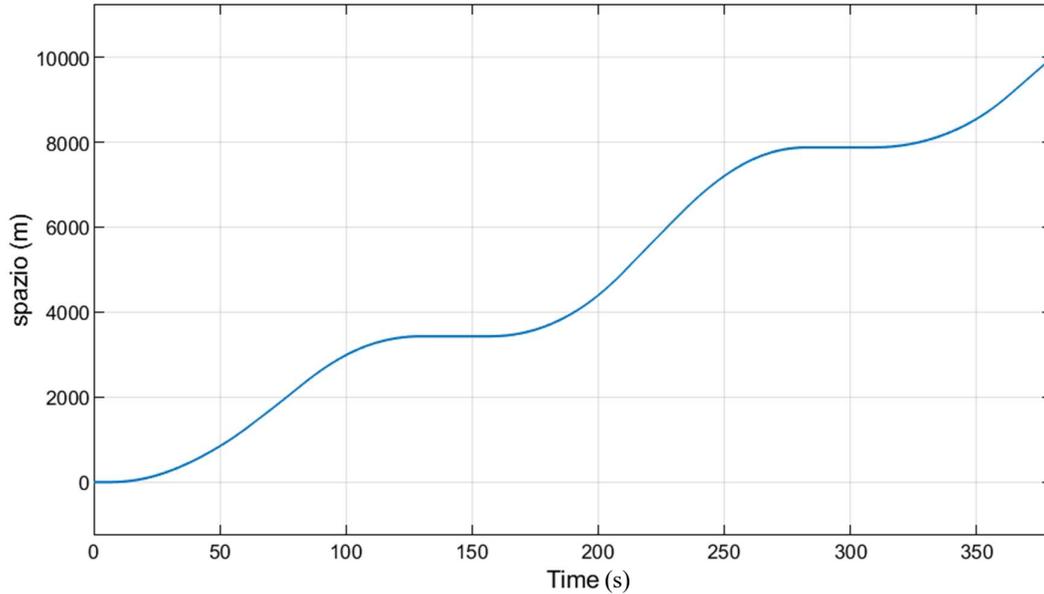
Di seguito nelle figure 2.5 2.6 e 2.7 vengono mostrati un esempio di andamenti simulati rispettivamente dell'accelerazione longitudinale del treno, della velocità longitudinale del treno e dello spazio percorso dal treno, ottenuti per la dinamica del veicolo.



**Figura 2.5 – Andamento dell'accelerazione longitudinale reale del treno**



**Figura 2.6 – Andamento della velocità longitudinale del treno**

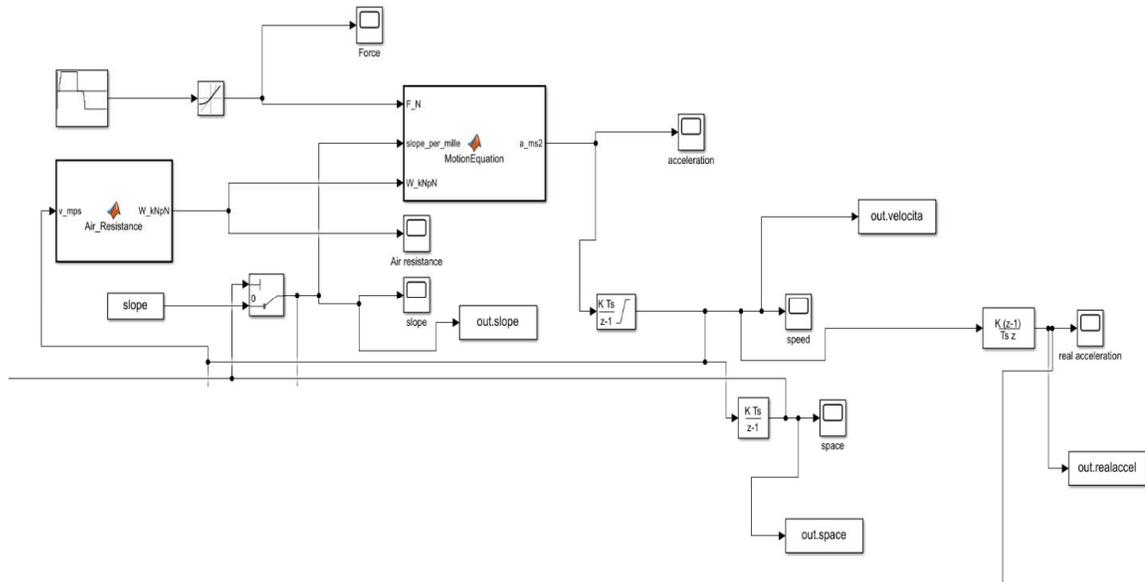


**Figura 2.7 – Andamento dello spazio percorso dal treno**

Il grafico mostrato in figura 2.5 è molto simile all'andamento della forza in figura 2.2 poiché la forza di trazione o di frenata è quella che determina principalmente l'andamento. Inoltre, si può notare che nella fase di frenatura che intercorre nel periodo di tempo tra 80 e 150 secondi, al 130° secondo il treno è stato arrestato e ne consegue una fase ad accelerazione nulla, finché non è stimolato nuovamente con una forza di trazione. Questa corrispondenza la si può vedere anche nel grafico della velocità, figura 2.6, in cui tra 130 e 150 secondi la velocità è nulla e nella figura 2.7 dello spazio in cui tra 130 e 150 secondi l'andamento è orizzontale, perciò lo spazio percorso non incrementa.

Un altro punto significativo della figura 2.6 è al 210° secondo in cui si ha la saturazione di velocità massima impostata per  $220 \left( \frac{km}{h} \right)$  che corrispondono a  $61,11 \left( \frac{m}{s} \right)$ .

Infine, si riporta la figura 2.8 una panoramica del modello simulink utilizzato per simulare e studiare la dinamica del veicolo.



**Figura 2.8 – Modello simulink della dinamica del veicolo**

## 2.2 Modellizzazione simulink dell'accelerometro triassiale

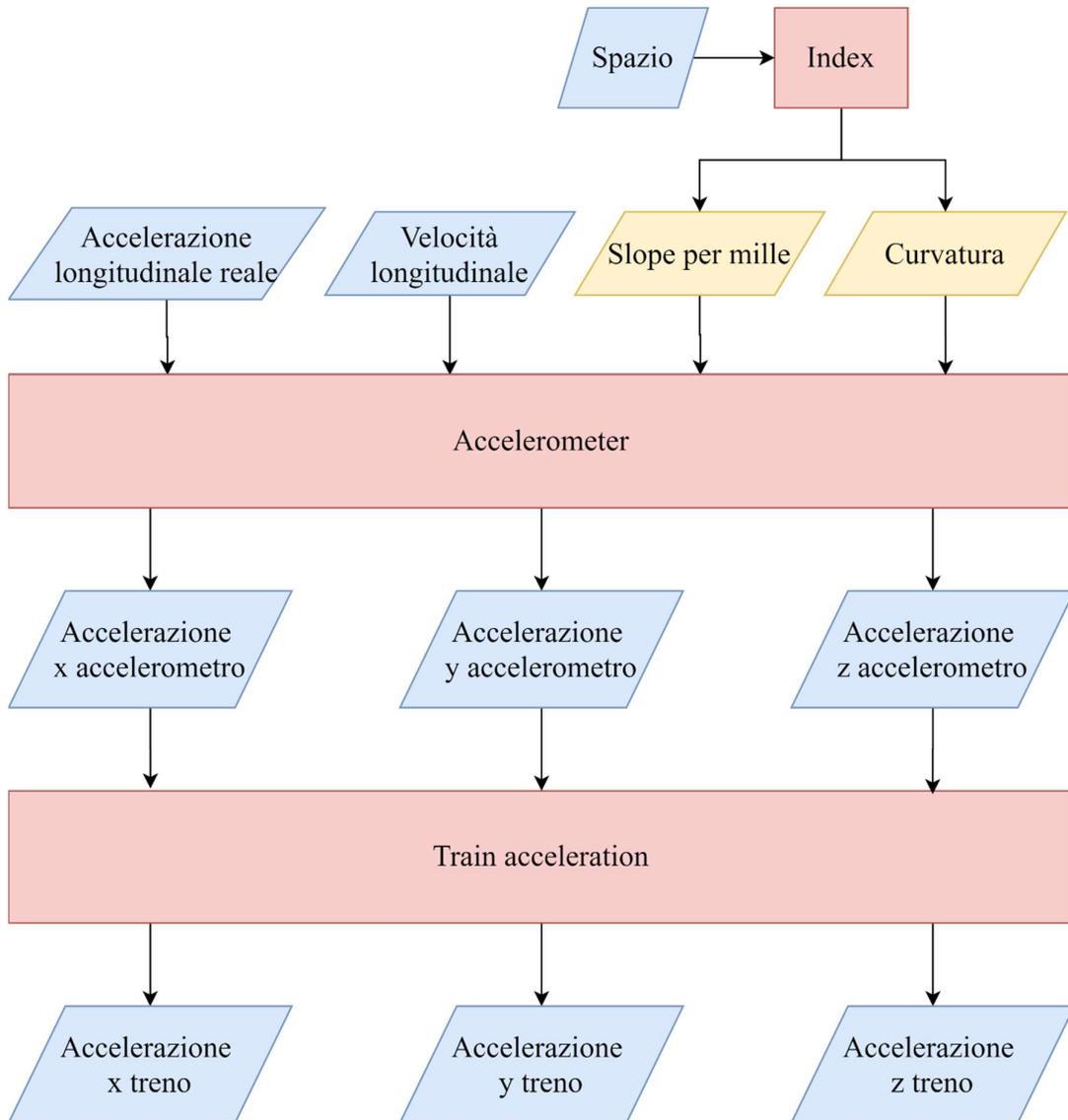
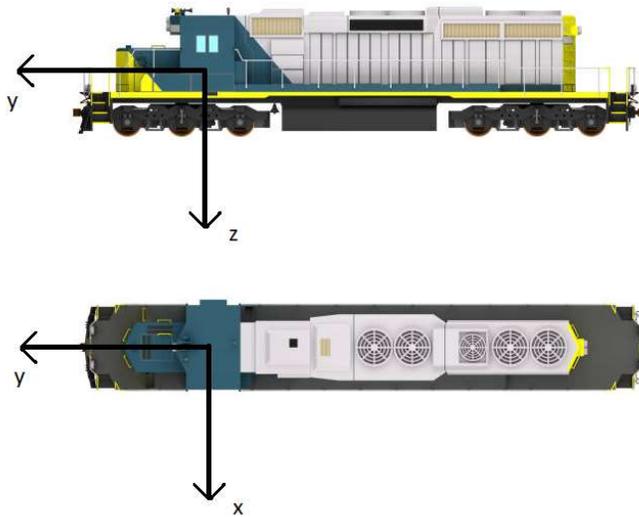


Figura 2.9 – Diagramma a blocchi per simulare l'accelerometro



**Figura 2.10 – Sistema di riferimento treno scelto**

Per modellizzare l'accelerometro propriamente si sono simulate le tre componenti di accelerazione che subisce il treno secondo i tre assi ortogonali della figura 2.10, nel blocco Accelerometer del diagramma mostrato in figura 2.9.

I blocchi spazio, velocità longitudinale e accelerazione longitudinale reale provengono dal diagramma a blocchi in figura 2.1, anche qui il blocco Index serve per indentificare il punto in cui si trova il treno in quel momento, questa volta sia per il vettore slope per mille, sia per la curvatura.

Il vettore curvatura è un vettore che contiene i raggi di curvatura della tratta simulata, questo assume i valori  $\geq 350$  (m) e  $\leq -350$  (m) considerati come raggi di curvatura accettabili poiché erano presenti nel database dell'azienda, inoltre i raggi di curvatura nulla non hanno senso e non sono stati inseriti nel vettore. Questi valori del vettore sono stati inseriti ogni 50 metri di percorso.

Quindi si è creata una funzione matlab nel blocco accelerometer che simula le tre accelerazioni del treno in questo modo:

Sulla componente x di accelerazione si è discriminato un valore di raggio di curvatura per cui si considera la tratta rettilinea con conseguente annullamento

dell'accelerazione trasversale.

Quindi se il raggio di curvatura

$$R > |R_{max}| \quad (7)$$

Allora

$$a_x = 0 \quad (8)$$

Altrimenti

$$a_x = \frac{v_y^2}{R} \quad (9)$$

cioè considerando che la componente x sia dovuta solo alla forza centripeta. Questa è un'assunzione fatta al fine di simulare la componente trasversale di accelerazione.

Invece per l'accelerazione longitudinale, se velocità è nulla o uguale alla massima velocità imposta

$$a_y = g * \sin \left( \text{atan} \left( \frac{\text{slope per mille}}{1000} \right) \right) \quad (10)$$

questo perché imponendo la saturazione sulla velocità sto simulando una condizione limite di moto uniforme in cui il treno lungo la longitudinale sarà soggetto idealmente solo alla componente di accelerazione di gravità dovuta alla pendenza, quella che deriva dalla forza  $Mg_y$  nella figura 2.4;

Altrimenti

$$a_y = \text{accelerazione longitudinale reale} \quad (11)$$

Infine, per la componente verticale

$$a_z = g * \cos \left( \text{atan} \left( \frac{\text{slope per mille}}{1000} \right) \right) \quad (12)$$

la quale è la complementare della componente di accelerazione dovuta alla pendenza su y, quella che deriva dalla forza  $Mg_z$  nella figura 2.4.

Simulate le tre componenti di accelerazione che dovrà restituire l'accelerometro triassiale si è simulato l'errore di montaggio dell'accelerometro in questo modo:

Si è creata una matrice di rotazione  $Rot$  che è composta da tre matrici di rotazioni semplici intorno ai tre assi x y z tutte fatte in premoltiplicazione (eseguite tutte nel sistema di riferimento di partenza).

Le tre matrici sono le seguenti:

$$Rot_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\vartheta) & -\sin(\vartheta) \\ 0 & \sin(\vartheta) & \cos(\vartheta) \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$Rot_y = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & 0 & \sin(\psi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\psi) & 0 & \cos(\psi) \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$Rot_z = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

E quindi la matrice  $Rot$  è ottenuta con la relazione (16)

$$Rot = Rot_x * Rot_y * Rot_z \quad (16)$$

I parametri  $\vartheta \psi \phi$  sono del tutto modificabili in modo da creare delle orientazioni arbitrarie e quindi differenti rispetto al sistema treno. Essi vengono inseriti nel file `initAccelerometer` il quale è lanciato prima della simulazione in cui ci sono altri parametri d'interesse;

Nel blocco `Accelerometer` oltre a definire le tre accelerazioni, le si inseriscono in un vettore colonna chiamato

$$a_c = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (17)$$

Per ottenere le tre componenti di accelerazione dell'accelerometro con sistema di riferimento disallineato rispetto agli assi cassa del treno si premoltiplica il vettore  $a_c$  per la matrice di rotazione  $Rot$

$$Rot * a_c = \begin{bmatrix} a_{xs} \\ a_{ys} \\ a_{zs} \end{bmatrix} \quad (18)$$

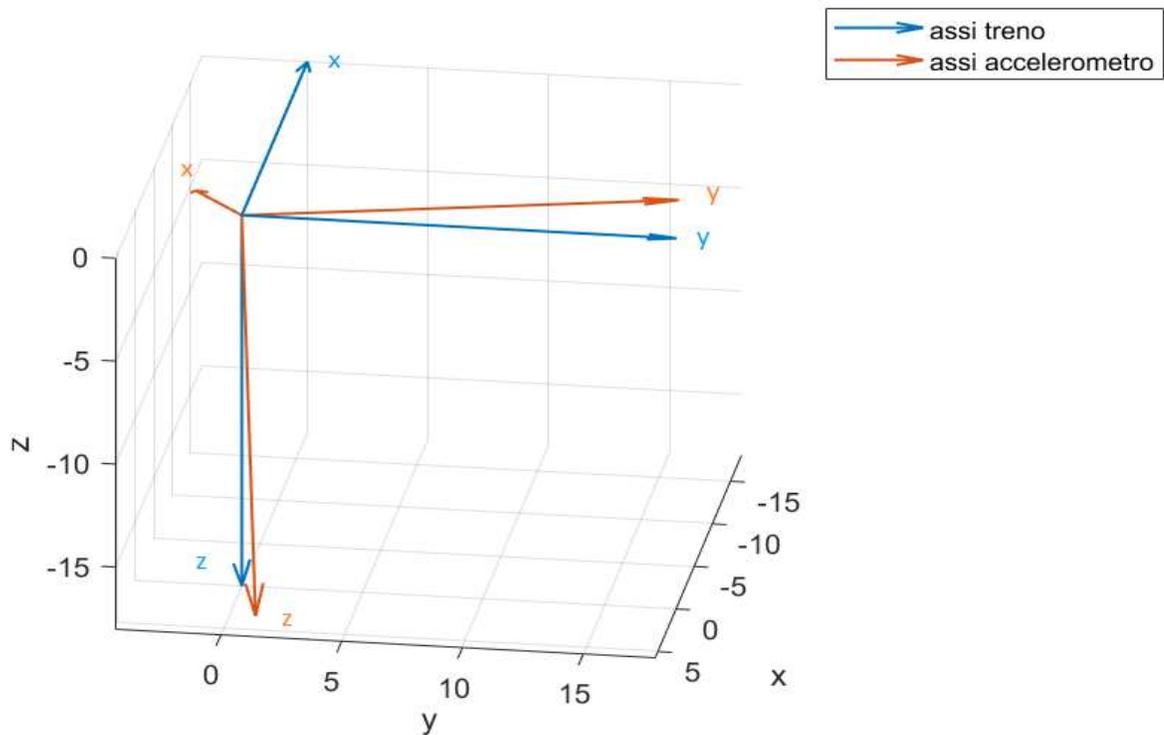
Il blocco successivo invece, chiamato `Train Acceleration` ha il compito di riottenere le componenti “reali” del treno eseguendo l'operazione algebrica (19)

$$Rot^{-1} * \begin{bmatrix} a_{xs} \\ a_{ys} \\ a_{zs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xr} \\ a_{yr} \\ a_{zr} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Per le proprietà di queste matrici in realtà  $Rot^{-1} = Rot^T$  e quindi si potrebbe anche non effettuare l'inversa.

Fatta l'ultima premoltiplicazione (19) si ottengono le accelerazioni x y e z del treno simulate in partenza.

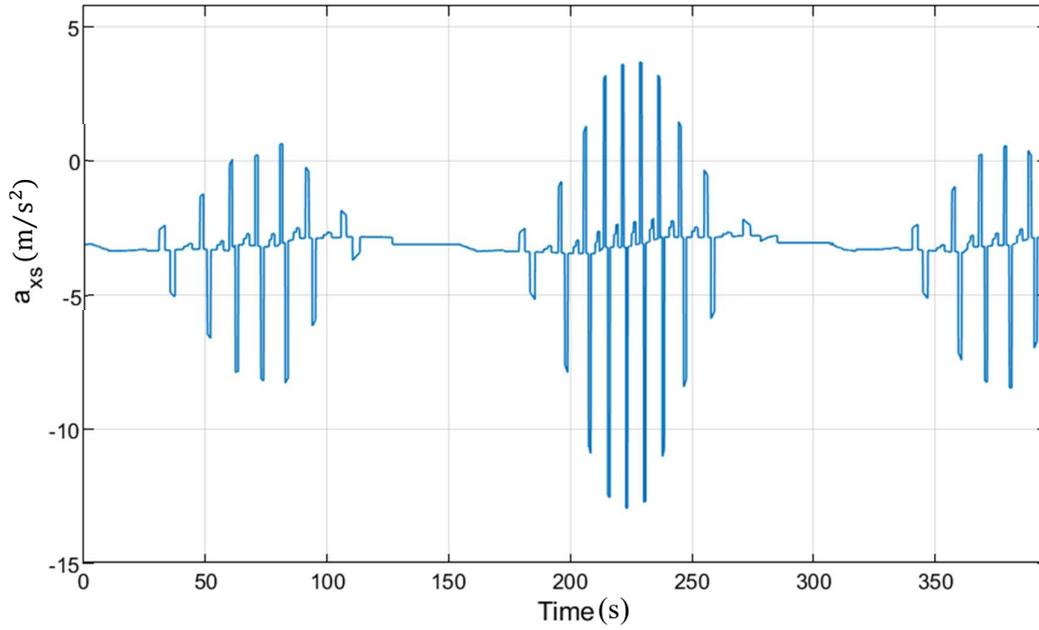
Adesso imponendo i tre parametri in questo modo  $\vartheta=4.8^\circ$ ,  $\psi=-18.45^\circ$  e  $\phi=15.687^\circ$  si può vedere come varia il sistema di riferimento dell'accelerometro da quello del treno nella figura 2.11.



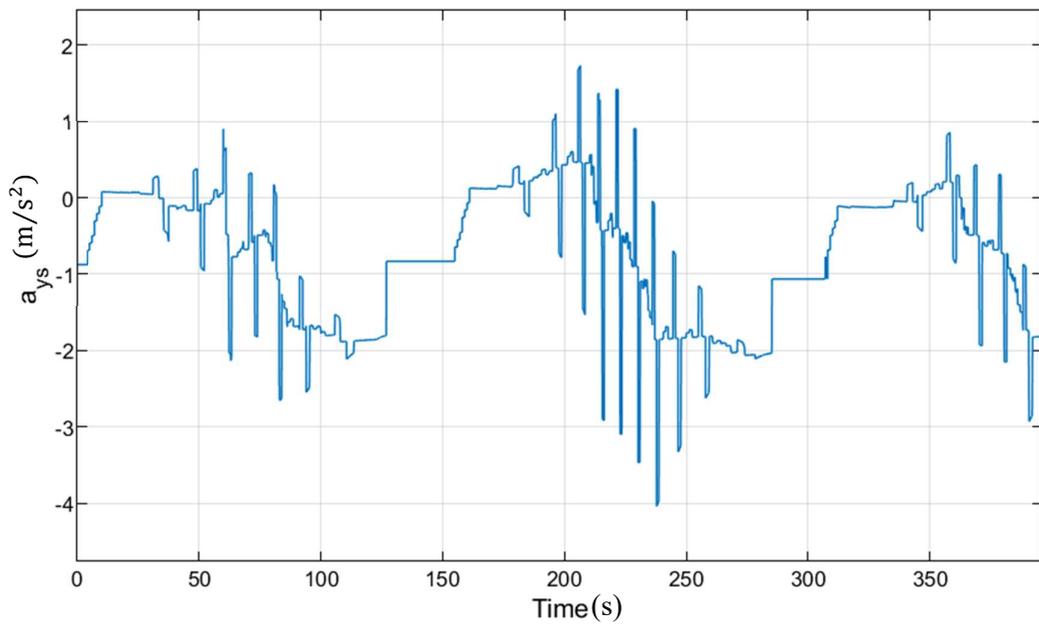
**Figura 2.11 – I 2 sistemi di riferimento comparati**

Nelle figure 2.12, 2.13 e 2.14 vengono mostrate le tre componenti ortogonali di accelerazione misurate dall'accelerometro con errori di montaggio simulati dai tre parametri imposti.

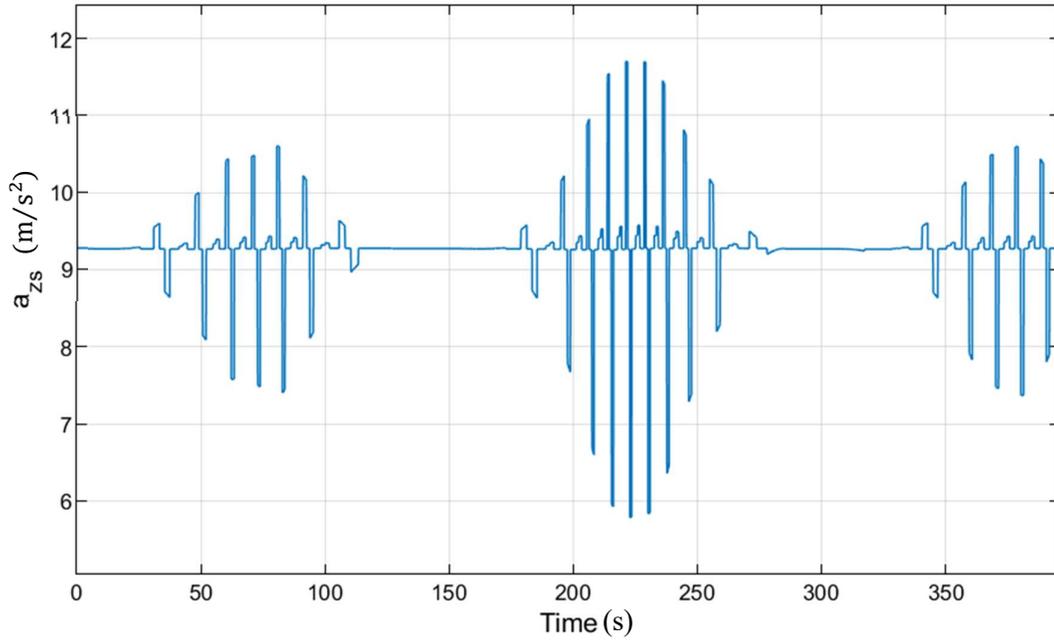
Le figure 2.15, 2.16 e 2.17 invece mostrano le componenti di accelerazione sui tre assi misurate dall'accelerometro dopo averlo allineato al sistema di riferimento treno. Le quali corrispondono perfettamente a quelle simulate del treno.



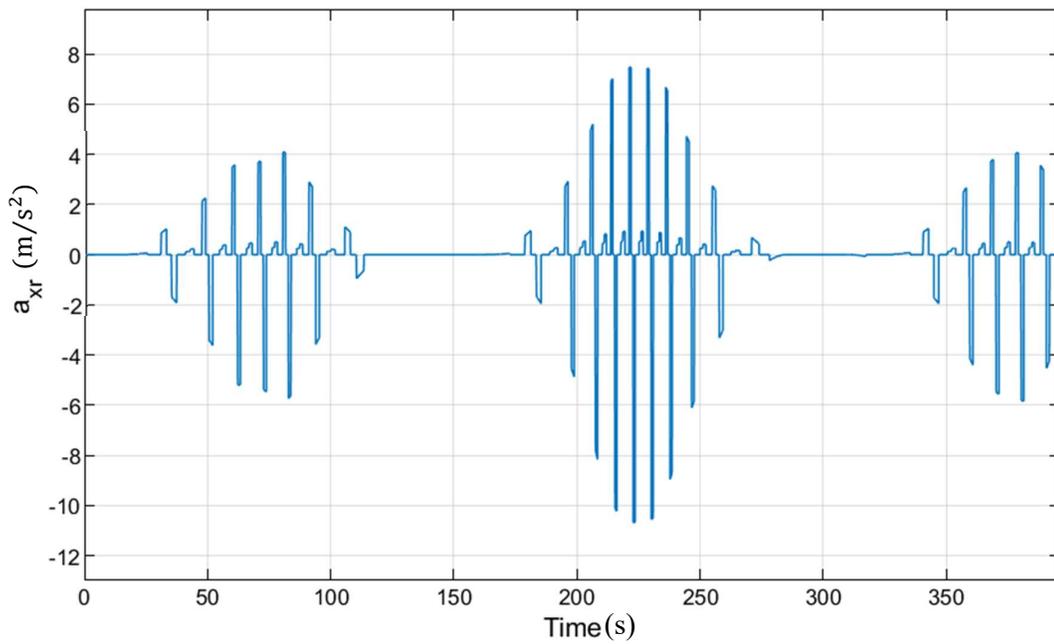
**Figura 2.12 – Componente di accelerazione x disallineata dagli assi treno**



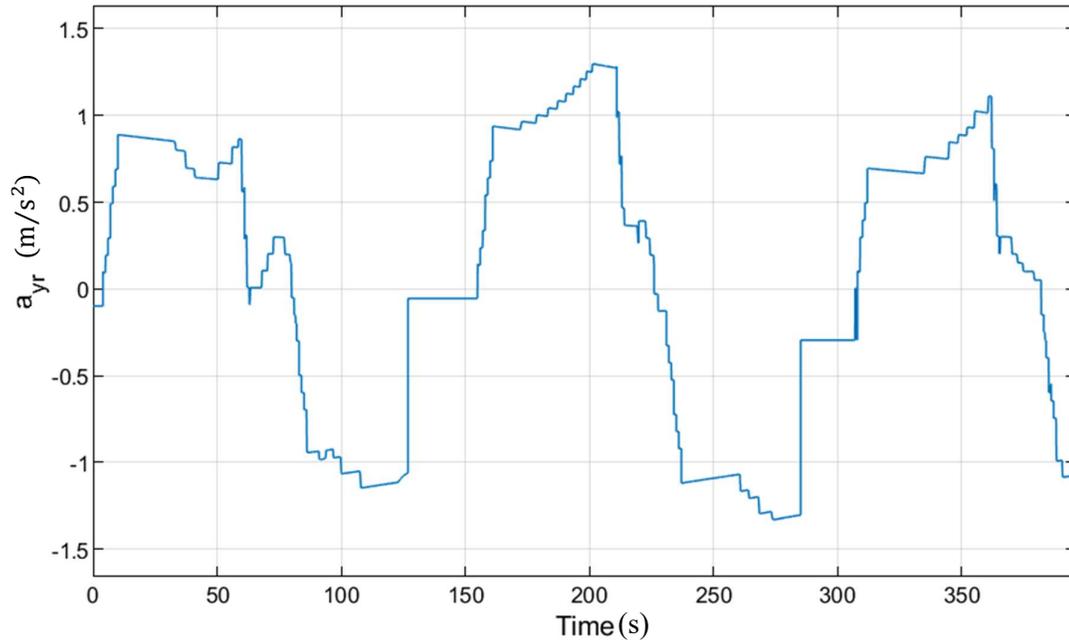
**Figura 2.13– Componente di accelerazione y disallineata dagli assi treno**



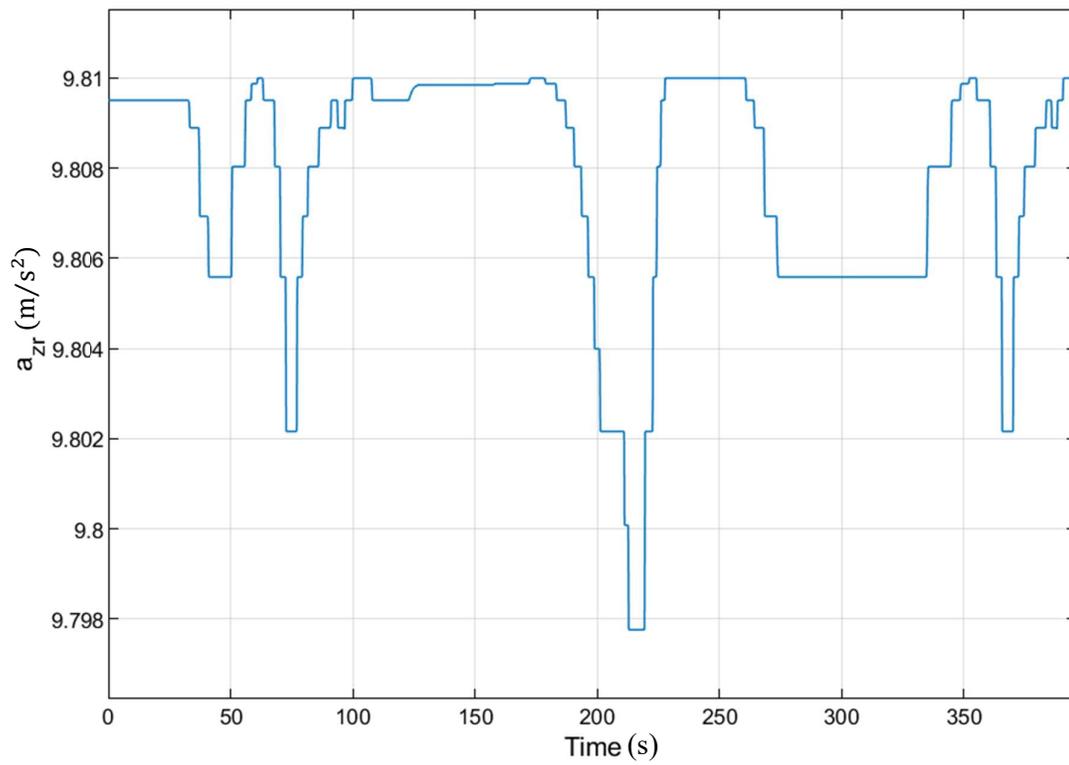
**Figura 2.14 – Componente di accelerazione z disallineata dagli assi treno**



**Figura 2.15 – Componente di accelerazione x treno rilevata dall'accelerometro**



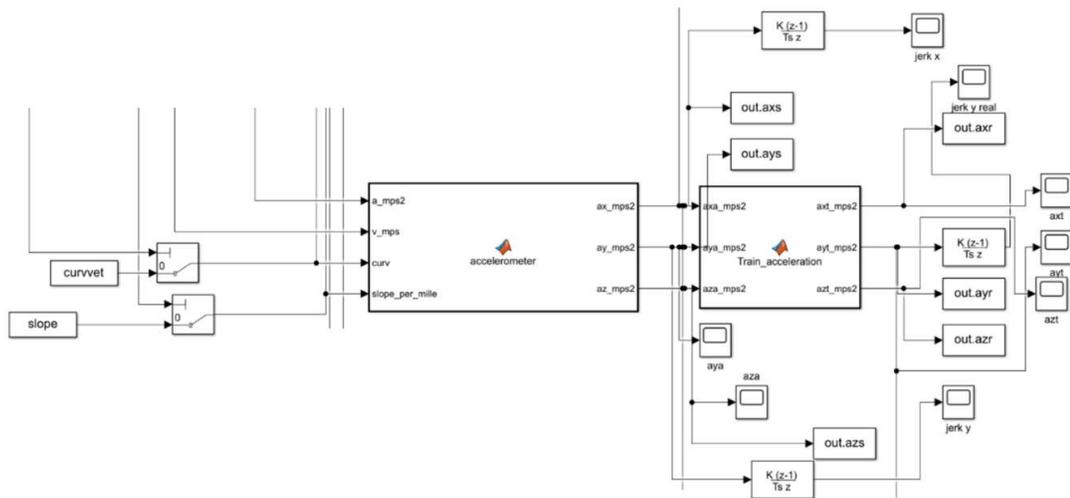
**Figura 2.16 – Componente di accelerazione y treno rilevata dall'accelerometro**



**Figura 2.17 – Componente di accelerazione z treno rilevata dall'accelerometro**

Da questa simulazione si è capito che per risolvere la problematica sull'orientamento bisogna ricavarsi la matrice  $Rot$  o  $Rot^{-1}$  o  $Rot^T$  partendo dalle tre accelerazioni misurate dall'accelerometro e dalla velocità longitudinale, così da poter correggere l'orientamento dell'accelerometro e allinearlo al sistema di riferimento del treno.

Infine, viene mostrata in figura 2.18 una panoramica dei blocchi simulink utilizzati per simulare e studiare l'accelerometro con errori di montaggio.



**Figura 2.18 – Blocco simulink accelerometro**

## 3 Sviluppo e risoluzione problematica dell'orientamento dell'accelerometro

Di seguito verrà mostrato il modo in cui ho affrontato il problema dell'orientamento in ottica aziendale. Quest'ultimo è stato risolto per step inserendo ipotesi semplificative e ogni volta che veniva trovata una soluzione, un'ipotesi semplificativa veniva eliminata.

### 3.1 Primo step per la creazione dell'algorithm che risolve il problema dell'orientamento

Dalla simulazione illustrata nel capitolo 2 ho tratto la conclusione che per risolvere il problema sull'orientamento c'è bisogno di determinare la matrice  $Rot^{-1}$  e per ricavarla sono necessari i tre angoli  $\vartheta$ ,  $\psi$  e  $\phi$ .

La prima risoluzione trovata sfruttava due ipotesi semplificative:

- Treno fermo in piano (pendenza nulla  $a_r = [0 \ 0 \ 9.81]^T$ ).
- Prima velocità misurata e quindi la sua derivata a pendenza nulla e raggio di curvatura infinito (tratta rettilinea  $a_{r1} = [0 \ 0.01 \ 9.81]^T$ ).

Sfruttando la moltiplicazione matrice per vettore della relazione (18) applicata in un caso particolare

$$Rot * a_r = \begin{bmatrix} a_{xs} \\ a_{ys} \\ a_{zs} \end{bmatrix} \quad (20)$$

e imponendo la prima ipotesi semplificativa ottengo tre elementi della matrice  $Rot$ .

Essendo

$$Rot = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \quad (21)$$

Allora i tre elementi sono:

$$R_{13} = \frac{a_{xs}}{9.81} \quad (22)$$

$$R_{23} = \frac{a_{ys}}{9.81} \quad (23)$$

$$R_{33} = \frac{a_{zs}}{9.81} \quad (24)$$

Imponendo la seconda ipotesi dove la componente y del vettore  $a_{r1}$  è un valore puramente rappresentativo della prima accelerazione, ci permette di ottenere altri tre elementi della matrice

$$R_{12} = \frac{a_{xs} - R_{13} * 9.81}{0.01} \quad (25)$$

$$R_{22} = \frac{a_{ys} - R_{23} * 9.81}{0.01} \quad (26)$$

$$R_{32} = \frac{a_{zs} - R_{33} * 9.81}{0.01} \quad (27)$$

Grazie a questi sei elementi è possibile ricavarsi gli angoli da formulazioni di angoli di Eulero, infatti:

$$\psi = \text{asin}(R_{13}) \quad (28)$$

$$\vartheta = \text{atan2}\left(-\frac{R_{23}}{\cos(\psi)}, \frac{R_{33}}{\cos(\psi)}\right) \quad (29)$$

$$\phi = \text{asin}\left(-\frac{R_{12}}{\cos(\psi)}\right) \quad (30)$$

trovati i tre angoli impongo tre rotazioni elementari precedentemente descritte ottenendo la matrice *Rot*, ne faccio l'inversa e con la relazione (31)

$$\text{Rot}^{-1} * \begin{bmatrix} a_{xs} \\ a_{ys} \\ a_{zs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xr} \\ a_{yr} \\ a_{zr} \end{bmatrix} \quad (31)$$

ottengo le tre componenti di accelerazione allineate agli assi del treno.

Le ipotesi fatte però sono molto limitanti soprattutto per quanto riguarda la tratta rettilinea, perché la misurazione più affidabile di velocità arriva quando essa è più alta e non nel primo istante. Infine, poiché non è possibile determinare con assoluta certezza se il treno è in curva o in che stato di pendenza sia, si è deciso di escludere l'ipotesi di tratta rettilinea in partenza.

## 3.2 Secondo step per la creazione dell'algoritmo che risolva il problema sull'orientamento

Quindi una volta eliminata l'ipotesi di tratta rettilinea alla partenza si è pensato di sostituirla con un'analisi sulle derivate dell'accelerazione, i jerk, per capire se il treno fosse o meno in una tratta rettilinea. Questa analisi però non è andata a buon fine e si è deciso di abbandonarla. Quindi rimane l'ipotesi di pendenza nulla all'inizio e per risolvere il problema dell'orientamento ho trovato comodo dividerlo in due parti.

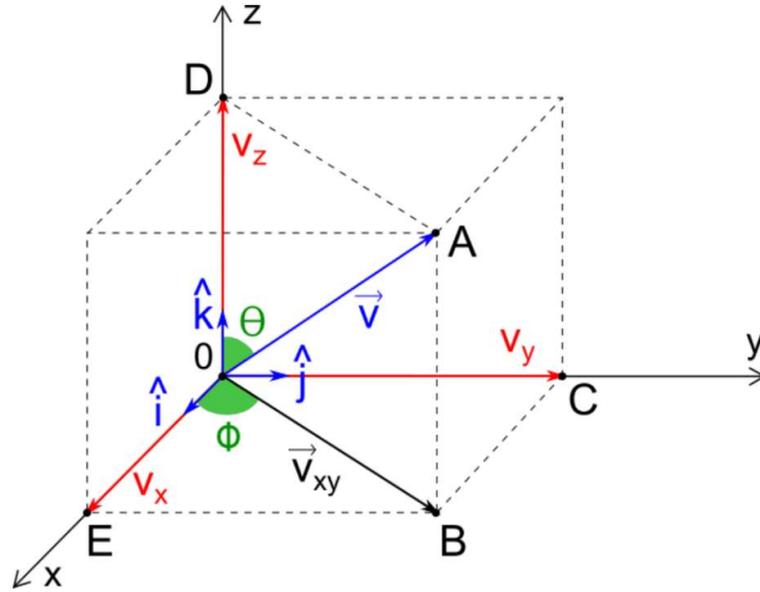
1. Allineamento dell'asse z accelerometro con l'asse z treno;
2. Allineamento dell'asse y (e x) accelerometro con l'asse y (e x) treno.

Il primo sotto problema è risolto sfruttando l'accelerazione di gravità, la quale è costante e pari a  $9.81 \left( \frac{m}{s^2} \right)$ . Quando il treno è fermo l'accelerometro misura solo quest'ultima.

Per capire come l'accelerazione di gravità è orientata rispetto all'accelerometro sfrutto le relazioni (32) e (33) facendo riferimento alla figura 3.1

$$\vartheta = \operatorname{atan2} \left( \sqrt{a_{xs}^2 + a_{ys}^2}, a_{zs} \right) \quad (32)$$

$$\phi = \operatorname{atan2}(a_{ys}, a_{zs}) \quad (33)$$



**Figura 3.1 – Vettore tridimensionale rappresentato nel piano cartesiano**

Ricavati  $\vartheta$  e  $\phi$  impongo l'allineamento dell'asse z effettuando due rotazioni elementari  $Rot_y(-\vartheta)$  e  $Rot_z(-\phi)$  con la relazione (34).

$$Rot_y(-\vartheta) * Rot_z(-\phi) * \begin{bmatrix} a_{xs} \\ a_{ys} \\ a_{zs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xs1} \\ a_{ys1} \\ a_{zs1} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Le relazioni (32) e (33) descrivono tramite due angoli come l'accelerazione di gravità è posta rispetto all'accelerometro, quindi posso usarle solo se assumo che l'accelerazione di gravità sia coincidente in direzione e verso all'asse z del treno, che corrisponde all'ipotesi semplificativa di pendenza nulla alla partenza. Allineato l'asse z il problema si riduce al solo piano x y e a una rotazione elementare da effettuare intorno all'asse z, tale per cui l'asse x e l'asse y dell'accelerometro siano allineate ai rispettivi assi x e y del treno.

Per ricavare questo angolo sfrutto l'equazione (35):

$$a_{ys1} * \cos(\alpha) - a_{xs1} * \sin(\alpha) = a_{yr} \quad (35)$$

L'angolo  $\alpha$  è ricavato utilizzando il metodo iterativo di Newton fatto per diversi momenti considerando il valore più ripetuto come quello esatto. Determinato

l'angolo  $\alpha$  si esegue una rotazione intorno all'asse z di questo angolo ottenendo l'accelerazione tangenziale del treno, la quale una volta integrata ci restituisce la velocità longitudinale del treno.

Questa soluzione è stata scartata poiché se la pendenza iniziale era diversa da 0 l'asse z dell'accelerometro non riusciva ad allinearsi all'asse z del treno e l'angolo  $\alpha$  perdeva di significato. Per provare a risolvere questa problematica ho eseguito delle analisi sui range di variabilità di  $\vartheta$  e  $\phi$  in funzione della pendenza che poi non ho più utilizzato poiché ho risolto il problema in un altro modo.

### 3.3 Risoluzione problema dell'orientamento

Per la risoluzione dell'intero orientamento dell'accelerometro volevo sfruttare l'informazione di conoscenza in modo letterale della matrice *Rot* la quale nella sua forma finale è rappresentata dalla relazione (36). Per semplicità di scrittura  $\cos =c$  e  $\sin=s$ .

$$Rot = \begin{pmatrix} c\varphi * c\psi & -c\psi * s\varphi & s\psi \\ c\vartheta * s\varphi + c\varphi * s\psi * s\vartheta & c\varphi * c\vartheta - s\varphi * s\psi * s\vartheta & -c\psi * s\vartheta \\ s\vartheta * s\varphi + c\varphi * s\psi * c\vartheta & c\varphi * s\vartheta - s\varphi * s\psi * c\vartheta & c\psi * c\vartheta \end{pmatrix} \quad (36)$$

e la sua inversa è

$$Rot^{-1} = \begin{pmatrix} c\varphi * c\psi & c\vartheta * s\varphi + c\varphi * s\psi * s\vartheta & s\vartheta * s\varphi + c\varphi * s\psi * c\vartheta \\ -c\psi * s\varphi & c\varphi * c\vartheta - s\varphi * s\psi * s\vartheta & c\varphi * s\vartheta - s\varphi * s\psi * c\vartheta \\ s\psi & -c\psi * s\vartheta & c\psi * c\vartheta \end{pmatrix} \quad (37)$$

che per le sue proprietà è anche la sua trasposta.

Conoscendo  $Rot^{-1}$  posso imporre la relazione (38)

$$(-c\psi * s\varphi) * a_{xs} + (c\varphi * c\vartheta - s\varphi * s\psi * s\vartheta) * a_{ys} + (c\varphi * s\vartheta - s\varphi * s\psi * c\vartheta) * a_{zs} = a_{yr} \quad (38)$$

che è la seconda componente della moltiplicazione tra matrice 3x3 e vettore colonna 3x1 della relazione (19).

$$Rot^{-1} * \begin{bmatrix} a_{xs} \\ a_{ys} \\ a_{zs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xr} \\ a_{yr} \\ a_{zr} \end{bmatrix} \quad (19)$$

L'idea di partenza era quella di fare delle “fotografie” del sistema a istanti diversi in cui si catturano  $a_{xs}$ ,  $a_{ys}$ ,  $a_{zs}$  e  $a_{yr}$  e che disposti secondo la relazione (38) corrispondono a un sistema di equazioni non lineare con i tre angoli come incognita.

Il sistema è risolvibile tramite dei metodi iterativi su matlab, ma per implementarlo sulla piattaforma hardware dell'azienda risulta molto oneroso sia in termini di calcolo sia in termini di programmazione.

Perciò ho deciso di semplificare ulteriormente il problema non ricavandomi più i tre angoli ma i tre elementi della matrice  $Rot^{-1}$  che si vanno a moltiplicare per le tre componenti di accelerazione ottenute dall'accelerometro tale per cui ottengo la componente longitudinale di accelerazione. In modo più preciso i tre elementi di  $Rot^{-1}$  da ricavare sono  $R_{12}$ ,  $R_{22}$  e  $R_{32}$  della matrice  $Rot$

Il principio di risoluzione è lo stesso del precedente, cioè eseguo delle “fotografie” del sistema in cui catturo i quattro elementi e imponendo l'equazione (39) che ha il vantaggio di essere più semplice da risolvere rispetto alla (38)

$$k_1 * a_{xs} + k_2 * a_{ys} + k_3 * a_{zs} = a_{yr} \quad (39)$$

Catturando tre istanti diversi si può costruire un sistema di tre equazioni lineari in tre incognite di questo tipo

$$\begin{cases} k_1 * a_{xs1} + k_2 * a_{ys1} + k_3 * a_{zs1} = a_{yr} \\ k_1 * a_{xs2} + k_2 * a_{ys} + k_3 * a_{zs2} = a_{yr2} \\ k_1 * a_{xs3} + k_2 * a_{ys} + k_3 * a_{zs} = a_{yr3} \end{cases} \quad (40)$$

Risolve il sistema utilizzando il metodo di Cramer e ottengo i tre coefficienti  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ .

$$k_1 =$$

$$\frac{a_{ys1} * a_{zs2} * a_{yr3} - a_{zs1} * a_{ys2} * a_{yr3} - a_{ys1} * a_{zs3} * a_{yr2} + a_{zs1} * a_{ys3} * a_{yr2} + a_{ys2} * a_{zs3} * a_{yr1} - a_{zs2} * a_{ys3} * a_{yr1}}{a_{xs1} * a_{ys2} * a_{zs3} - a_{xs1} * a_{zs2} * a_{ys3} - a_{ys1} * a_{xs2} * a_{zs3} + a_{ys1} * a_{zs2} * a_{xs3} + a_{zs1} * a_{xs2} * a_{ys3} - a_{zs1} * a_{ys2} * a_{xs3}} \quad (41)$$

$$k_2 =$$

$$\frac{a_{xs1} * a_{zs2} * a_{yr3} - a_{zs1} * a_{xs2} * a_{yr3} - a_{xs1} * a_{zs3} * a_{yr2} + a_{zs1} * a_{xs3} * a_{yr2} + a_{xs2} * a_{zs3} * a_{yr1} - a_{zs2} * a_{xs3} * a_{yr1}}{a_{xs1} * a_{ys2} * a_{zs3} - a_{xs1} * a_{zs2} * a_{ys3} - a_{ys1} * a_{xs2} * a_{zs3} + a_{ys1} * a_{zs2} * a_{xs3} + a_{zs1} * a_{xs2} * a_{ys3} - a_{zs1} * a_{ys2} * a_{xs3}} \quad (42)$$

$$k_3 =$$

$$\frac{a_{xs1} * a_{ys2} * a_{yr3} - a_{ys1} * a_{xs2} * a_{yr3} - a_{xs1} * a_{ys3} * a_{yr2} + a_{ys1} * a_{xs3} * a_{yr2} + a_{xs2} * a_{ys3} * a_{yr1} - a_{ys2} * a_{xs3} * a_{yr1}}{a_{xs1} * a_{ys2} * a_{zs3} - a_{xs1} * a_{zs2} * a_{ys3} - a_{ys1} * a_{xs2} * a_{zs3} + a_{ys1} * a_{zs2} * a_{xs3} + a_{zs1} * a_{xs2} * a_{ys3} - a_{zs1} * a_{ys2} * a_{xs3}} \quad (43)$$

Questo processo di cattura di tre istanti che chiameremo registrazione, viene eseguito più volte. Tramite dei parametri su simulink si è impostata un'esecuzione ricorsiva della registrazione per 10 volte, dove ogni fotografia viene catturata con un passo arbitrario, che è stato settato a 2 secondi. Infine, la struttura della matrice *Rot* impone che la norma quadra di  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  sia 1, poiché questi tre elementi hanno il significato fisico di un versore ottenendo così un criterio di scelta di soluzioni.

Quindi l'algoritmo è impostato per escludere i terzetti di  $k$  per cui la norma non sia 1. Ma questo deve essere costruito pensando di utilizzare misure realistiche e non ideali come il modello simulink creato, quindi si è deciso di unire le soluzioni di 10 o più registrazioni eseguendo una media, e in più si è estesa la condizione della norma=1 a norma circa 1.

Determinate le medie di  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ , questi coefficienti possono essere utilizzati nell'equazione (39)

$$k_1 * a_{xs} + k_2 * a_{ys} + k_3 * a_{zs} = a_{yr} \quad (39)$$

per ricavarsi l'accelerazione longitudinale partendo dalle tre componenti dell'accelerometro triassiale. Infine, ottenuta l'accelerazione longitudinale  $a_{yr}$  possiamo integrarla per ricavare la velocità longitudinale del treno.

Questa soluzione non ottiene l'intera matrice di orientazione *Rot* ma solo la parte utile per ottenere la velocità longitudinale del treno. Comunque si potrebbero ricavare i tre angoli andando a sviluppare i tre  $k$  trovati con le relazioni (41), (42) e (43), tramite i rispettivi elementi letterali della matrice di orientazione con il sistema (44)

$$\begin{cases} k_1 = -c\psi * s\varphi \\ k_2 = c\varphi * c\vartheta - s\varphi * s\psi * s\vartheta \\ k_3 = c\varphi * s\vartheta - s\varphi * s\psi * c\vartheta \end{cases} \quad (44)$$

Ma non è lo scopo di questo lavoro di tesi perciò la soluzione si ferma al determinare  $k_1, k_2$  e  $k_3$ .

### 3.4 Analisi di mercato, confronto con il brevetto del competitor

Ricavata una possibile soluzione si è deciso di analizzare il brevetto del principale competitor della Faiveley che ha lo stesso scopo dell'argomento di tesi trattato. Questa è una pratica comune nell'ambito dello sviluppo poiché prima di dedicare ulteriori risorse in termini di tempo e soldi è bene capire se la soluzione trovata è già stata brevettata da qualcun altro e quindi in caso di esito positivo cambiare adeguatamente la strada da percorrere. L'analisi di mercato sui brevetti è anche utilizzata come primo approccio per affrontare un problema di cui non si riesce a trovare una soluzione, utilizzando i ragionamenti effettuati nel brevetto come ispirazione per ricavarsi una soluzione propria, ovviamente senza rubare nessuna proprietà intellettuale.

Il brevetto analizzato è il Patent Application Publication No: US 2019/0043277 A1 (7 Feb 2019)

Il metodo ha lo scopo di determinare la decelerazione longitudinale del veicolo, ricavandosi prima l'orientazione di un sensore di accelerazione rispetto al veicolo in cui è installato, avendo a disposizione l'accelerazione del sensore in un free state (treno a velocità costante o fermo) e catturando un altro segnale di accelerazione del sensore correlata alla misura di accelerazione lineare del veicolo. Per free state si intende uno stato in cui agisce solo l'accelerazione di gravità sul veicolo, tra questi si può intendere anche un veicolo in movimento in cui la velocità è costante. Il brevetto consiste in due differenti metodi.

Il primo metodo è composto da tre step:

1. Cattura di un primo segnale di accelerazione del veicolo dal sensore in free state, per allineare l'asse verticale del sensore con la direzione dell'accelerazione di gravità.
2. Cattura di un secondo segnale di accelerazione del veicolo dal sensore ma in risposta a un'accelerazione lineare del veicolo, per allineare l'asse longitudinale del sensore con l'accelerazione longitudinale del veicolo.
3. Accertamento dell'orientazione del sensore rispetto al veicolo sulla base del primo e del secondo segnale, che serve per ricavarsi l'orientazione del dispositivo.

Il secondo metodo ha la necessità che l'asse verticale del sensore sia allineato prima dell'installazione con l'accelerazione di gravità, una volta effettuato questo pre-allineamento è pronto per misurare il segnale degli altri due assi. Il metodo è composto da due step:

1. Cattura di un segnale di accelerazione del veicolo dal sensore ma in risposta a un'accelerazione lineare del veicolo, per allineare l'asse longitudinale del sensore con l'accelerazione longitudinale del veicolo.
2. Accertamento dell'orientazione del sensore in un piano fatto da un asse longitudinale e un asse trasversale, in funzione del segnale precedentemente ottenuto.

Questo metodo inoltre comprende un avviso di non corretta installazione in cui l'asse verticale non è allineato.

Entrambi i metodi hanno due difetti principali:

1. Per il primo metodo la cattura del primo segnale in free state trascura la possibilità che il veicolo abbia una propria pendenza e che quindi l'allineamento con l'accelerazione di gravità dell'asse verticale non sia proprio ortogonale all'asse longitudinale del veicolo. Il brevetto cerca di autocorreggersi inserendo un offset, ma non è detto che riesca ad individuare il giusto allineamento. Per il secondo metodo anche il pre-allineamento può trascurare la pendenza del veicolo.
2. Entrambi effettuano la cattura del segnale di accelerazione del veicolo, in risposta ad un'accelerazione lineare dello stesso, trascurando l'effetto di accelerazione trasversale che subisce quest'ultimo, poiché assumono che il veicolo sia in tratta perfettamente lineare e questo non è vero.

Le differenze principali tra il brevetto del competitor e l'algoritmo sviluppato per questo lavoro di tesi sono che:

- L'algoritmo per funzionare ha bisogno di un accelerometro triassiale e di una misura di velocità di riferimento correlata con cui confrontarsi per allineare i tre segnali ottenuti dal sensore con la direzione della velocità di marcia del veicolo.
- L'algoritmo viene eseguito ogni volta che è possibile in modo ricorsivo finché non si arriva alla saturazione della soluzione, la quale viene propriamente mediata in modo da allineare i tre segnali di accelerazione con l'accelerazione longitudinale del veicolo. In particolare, ha la necessità di catturare almeno tre momenti differenti in cui il treno è in moto con l'accelerazione di riferimento corrispondente.
- L'algoritmo non determina l'intero orientamento del sensore ma determina solo dei coefficienti  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  che trasformano le tre misurazioni di

accelerazione sui tre assi nel valore utile per noi, cioè l'accelerazione longitudinale e di conseguenza la velocità longitudinale del veicolo.

- L'algoritmo non sfrutta l'accelerazione di gravità per allinearsi, perciò non subisce il primo difetto descritto precedentemente. Inoltre, non viene trascurato l'effetto dell'accelerazione trasversale subita dal veicolo (secondo difetto), ma viene considerata per migliorare la determinazione dei tre coefficienti  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ .

Come il brevetto del competitor, ma in modo diverso l'algoritmo è in grado di ottenere una stima della velocità longitudinale del treno nelle fasi di frenatura quando si verifica lo sliding delle ruote.

## 4 Sviluppo risoluzione problematica delle vibrazioni e rumore di fondo dell'accelerometro

Per affrontare l'argomento delle vibrazioni e rumore di fondo sotto indicazione del tutor aziendale si è deciso di utilizzare lo strumento di filtro passa basso digitale. Per studiare la tipologia di filtro più adatta a questo scopo sono state prese in esame misure dell'accelerometro nel sensore BMI055 installato senza errori di montaggio su un treno ETR500 operativo. Questo sensore è stato installato in precedenza per svolgere altre funzioni, infatti queste misure sono utili solo per risolvere la problematica del filtro poiché non si ha a disposizione la velocità di riferimento, grandezza necessaria per il corretto utilizzo dell'algoritmo.

### 4.1 Analisi dei dati

I dati ottenuti dall'accelerometro triassiale montato nel BMI055 sono dati ottenuti ogni 0.5 (ms), per un tempo complessivo di 60 secondi, la risoluzione è di 1/1024 di g. Per ogni asse viene assegnato un numero intero, con un totale di 360 mila valori.

Questi valori sono disposti su tre colonne diverse, uno per ogni asse e una riga ogni 0.5 (ms) in un formato excel, in modo che siano facilmente reperibili da matlab attraverso la funzione xlsread.

### 4.2 Ricerca dei filtri passa basso digitali

Poiché in ambito universitario non ho mai affrontato l'argomento filtri passa basso digitali, ho effettuato quello che in ambito lavorativo potrebbe essere richiesto, cioè ho cercato di documentarmi il più possibile, e dopo essermi fatto una visione generale dell'argomento ho iniziato a valutare diverse soluzioni plausibili, cercando quella che mi garantiva una pulizia del segnale con meno onerosità di calcolo sempre in ottica di installare questo tipo di filtro nel hardware aziendale montato sui treni, che non ha la potenza di calcolo di un computer di ultima

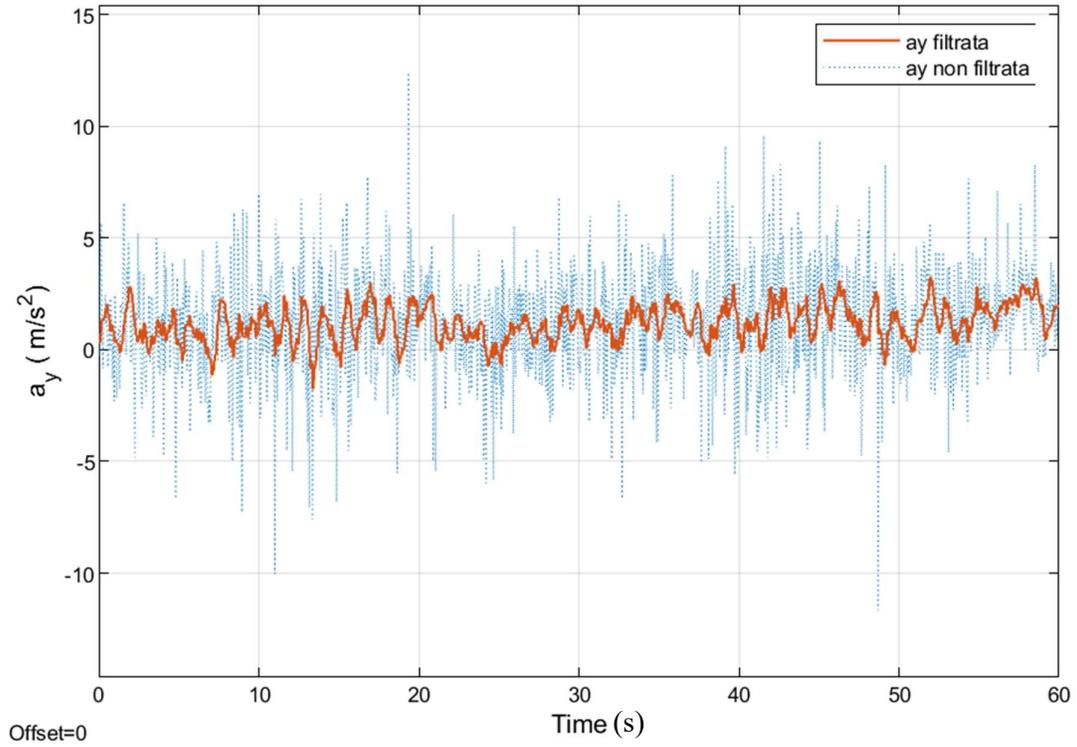
generazione. Inoltre, la tipologia di filtro così come l'algoritmo ha la necessità di essere eseguito in tempo reale.

### 4.2.1 Filtro passa basso media mobile

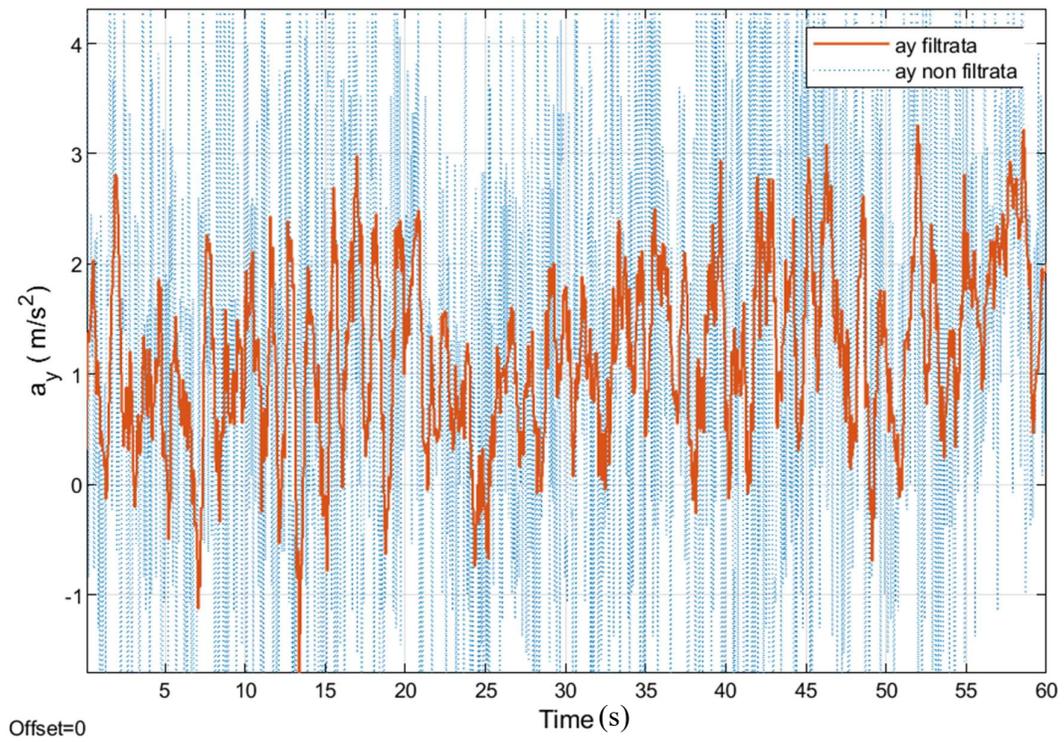
Il primo tipo di filtro passa basso digitale utilizzato per effettuare qualche prova è stato quello a media mobile scelto per la sua semplicità nel calcolo poiché esso esegue una media aritmetica degli ultimi  $n$  valori precedenti a quell'istante. Quindi il valore corrente segue la formulazione (45)

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad (45)$$

In cui gli  $i$ -esimi valori sono i valori precedenti alla misura. Infatti,  $n$  è stato costruito come un parametro modificabile e se per esempio  $n=10$  significa che il primo valore preso in considerazione per la media sarà quello di 10 periodi di campionamento fa, che nel nostro caso corrisponde a 5 (ms) prima della misura corrente, avendo un periodo di campionamento di 0.5 (ms). In figura 4.1 e 4.2 si mostrano i grafici in cui è applicato il filtro con  $n=10$  sull'asse  $y$  dove il sistema di riferimento considerato è sempre quello di figura 2.10.

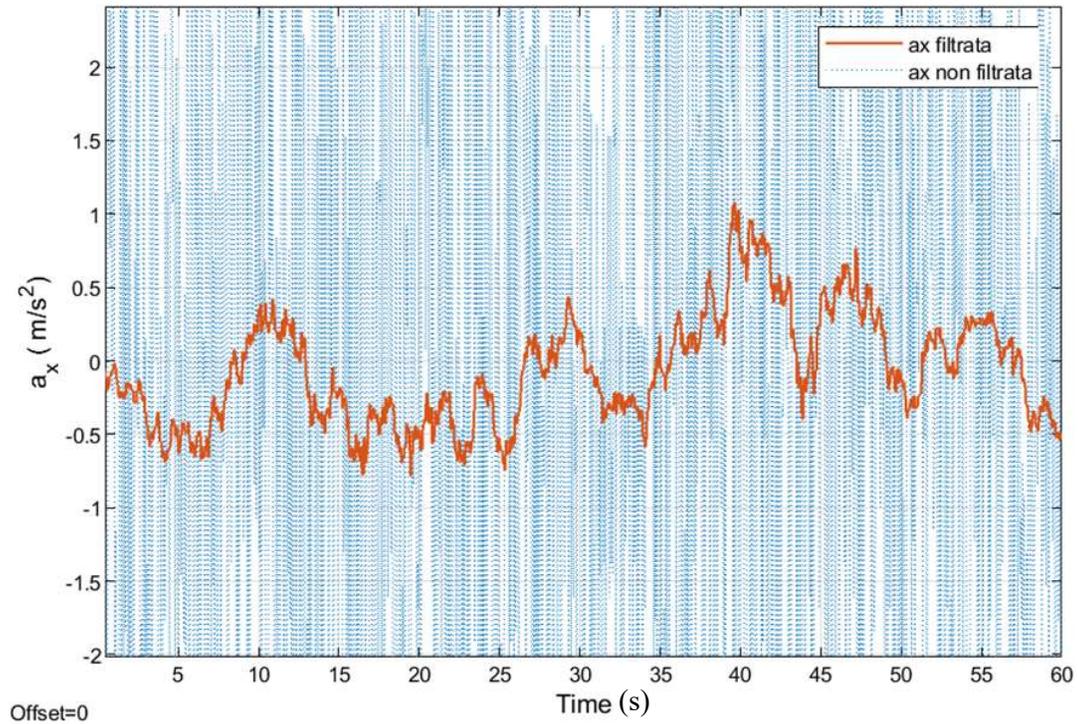


**Figura4.1– Confronto segnale filtrato e non filtrato**

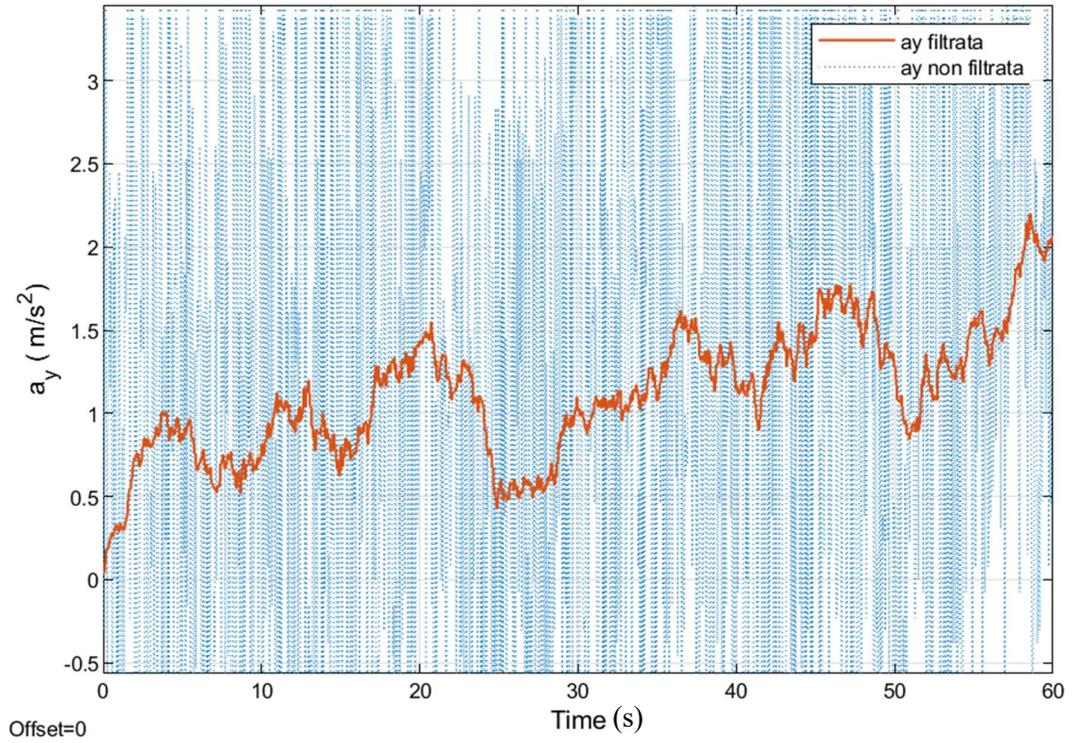


**Figura 4.2 – Ingrandimento sull'asse verticale**

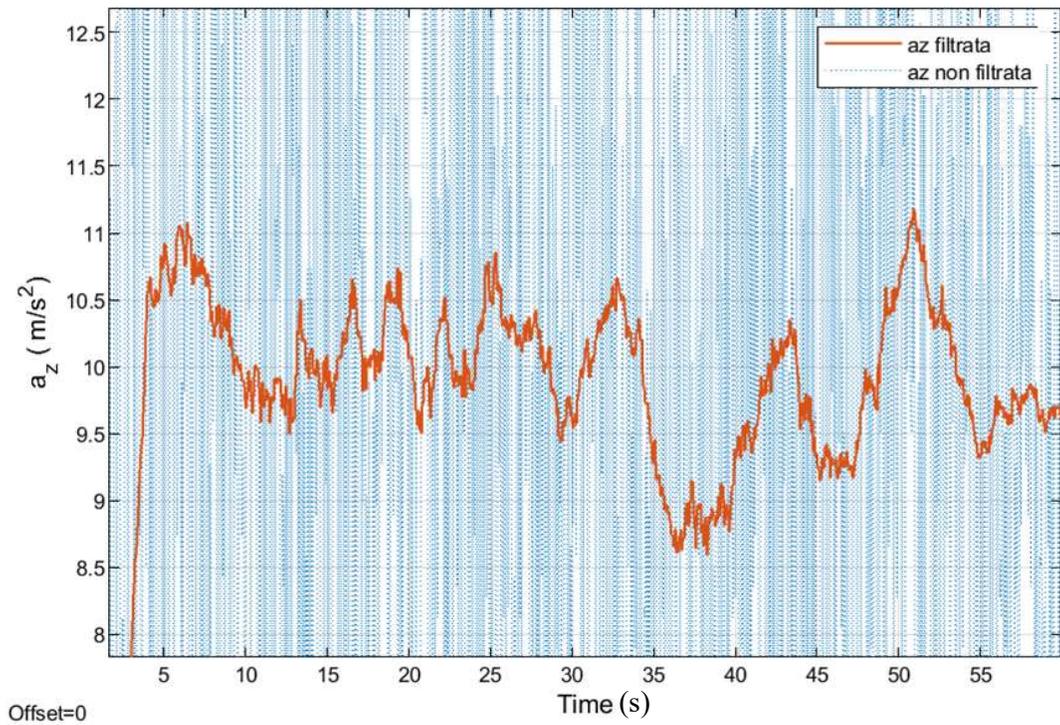
Non sono rappresentati anche gli altri due assi dell'accelerometro perché questo tipo di segnale è ancora troppo rumoroso e non rappresentativo della dinamica del veicolo. Effettuando un filtro a media mobile con  $n=80$  abbiamo gli andamenti mostrati nelle figure 4.3 4.4 e 4.5 tutti con ingrandimenti sull'asse verticale.



**Figura 4.3 – Accelerazione sull'asse x filtrata  $n=80$**

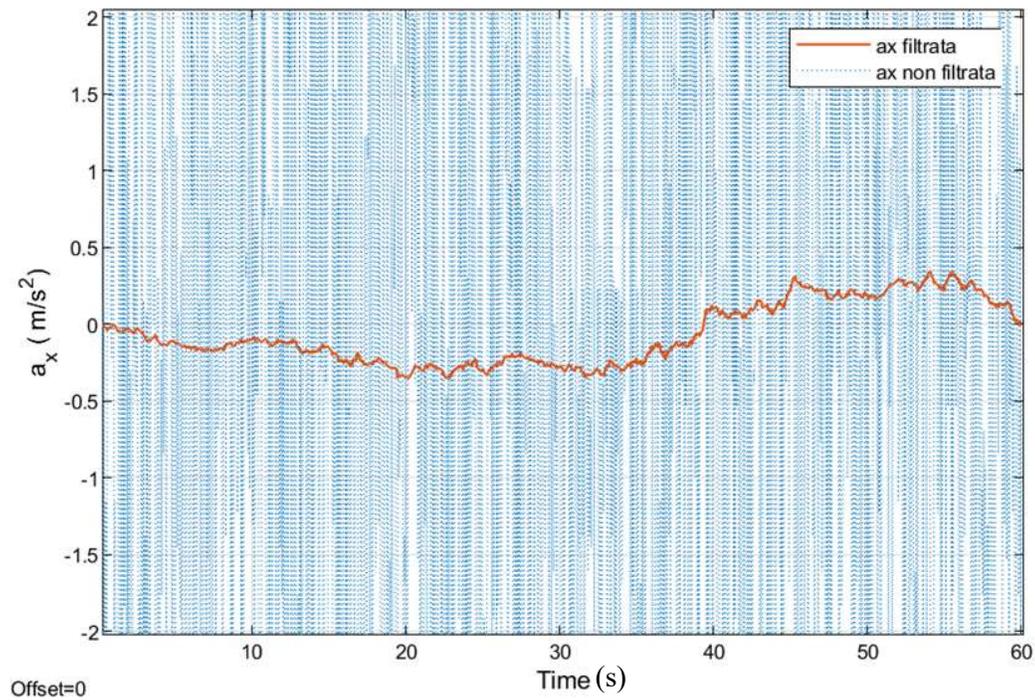


**Figura 4.4 – Accelerazione sull'asse y filtrata n=80**

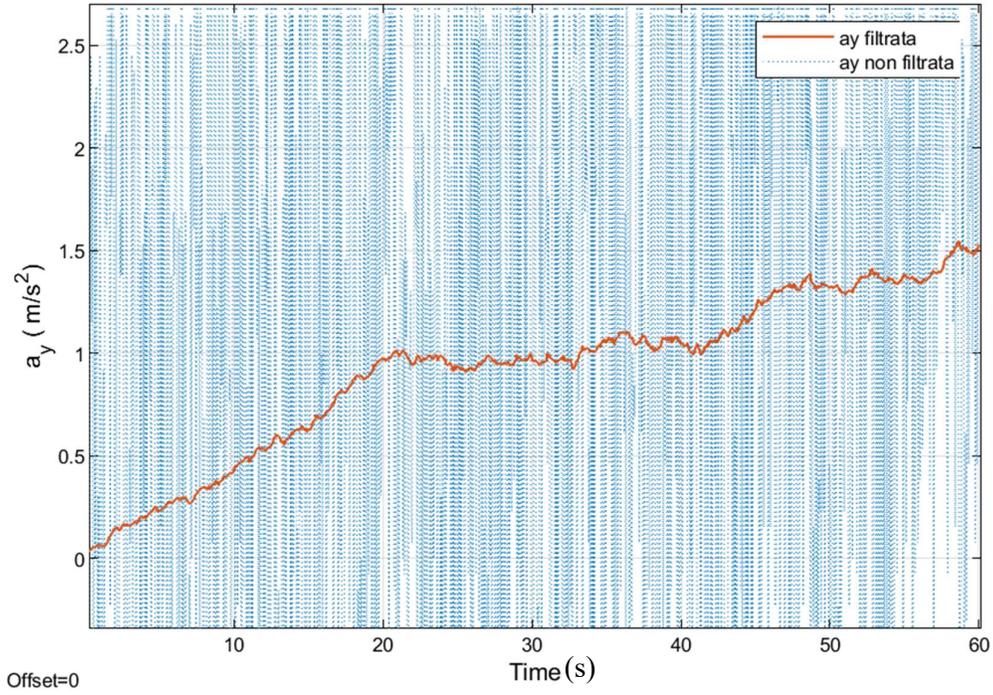


**Figura 4.5 – Accelerazione sull'asse z filtrata n=80**

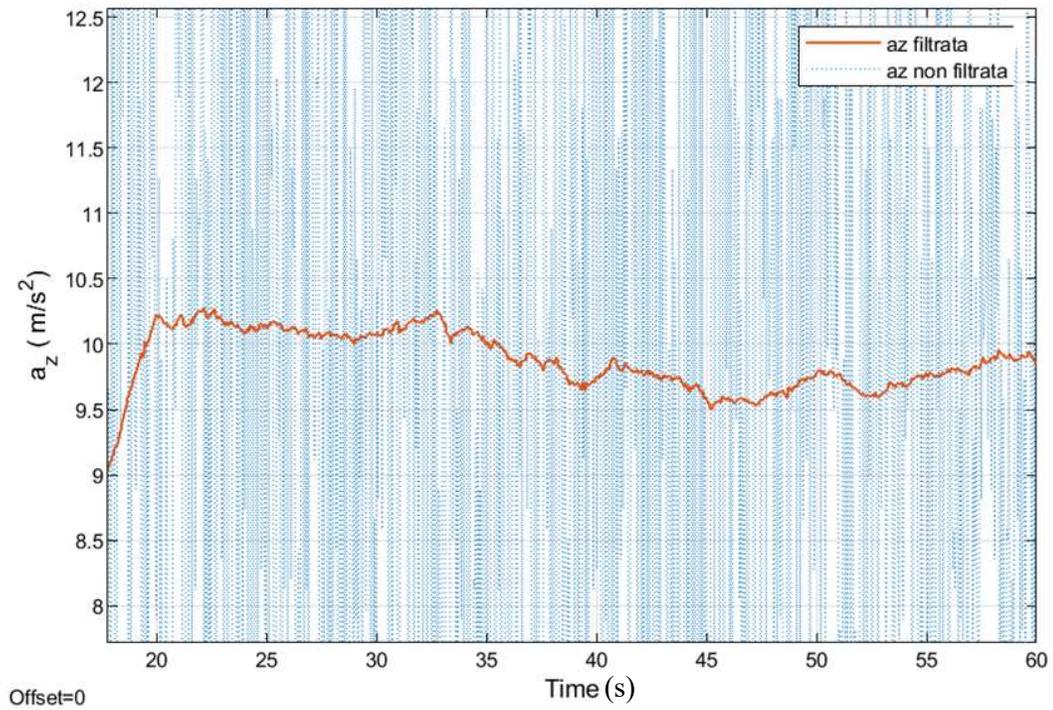
Il rumore del segnale è sicuramente diminuito ma non è ancora abbastanza per essere considerato un segnale pulito per i nostri scopi, inoltre da un punto di vista tecnico inizia a essere troppo oneroso in termini di calcolo poiché per effettuarla in tempo reale dobbiamo conservare in memoria 80 valori per ogni asse e quindi solo per questa operazione, sono 240 i valori da tenere in memoria. Per puro scopo rappresentativo vengono mostrati nelle figure 4.6 4.7 e 4.8 gli andamenti sui tre assi prendendo  $n=400$ .



**Figura 4.6 – Accelerazione sull'asse x filtrata n=400**

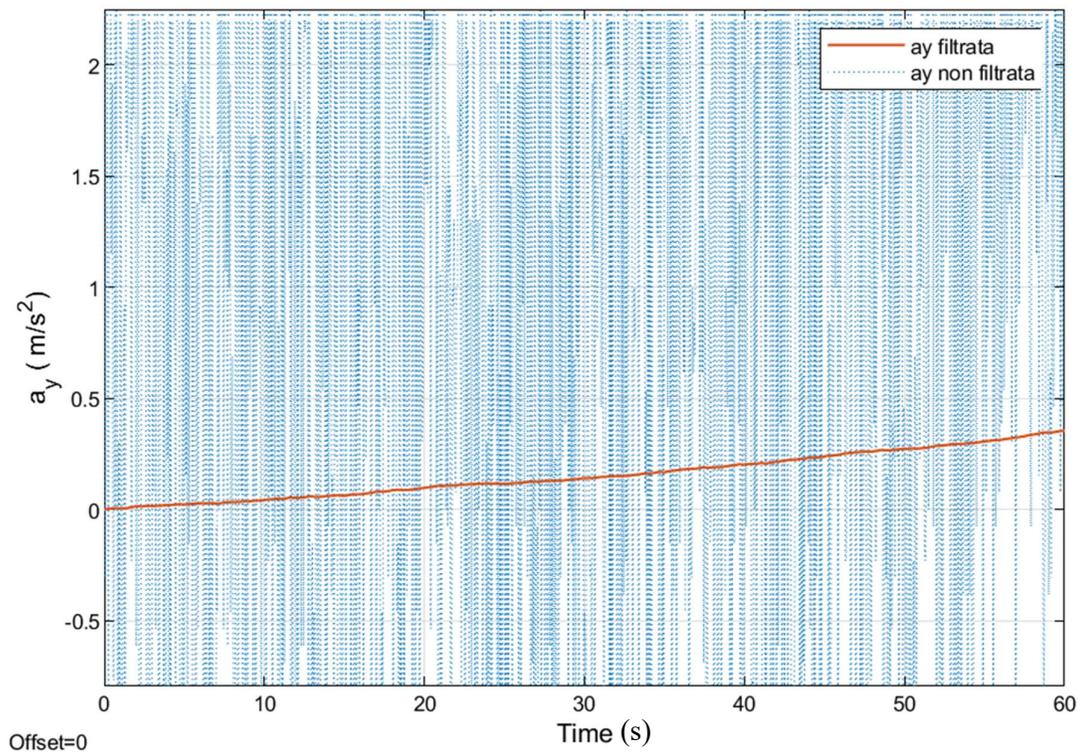


**Figura 4.7 – Accelerazione sull’asse y filtrata n=400**



**Figura 4.8 – accelerazione sull’asse z filtrata n=400**

In questo caso il segnale è abbastanza pulito ma troppo oneroso in termini di memoria. Inoltre, per la misura corrente stiamo considerando valori di 400 periodi di campionamento precedenti, che in tempo corrispondono a 0.2 secondi, quindi si riesce a rappresentare adeguatamente la dinamica del veicolo che ha una variazione significativa della sua accelerazione circa ogni secondo. Infatti, aumentando a dismisura fino a  $n=4000$ , il valore calcolato sarebbe influenzato da quello che sta succedendo 2 secondi fa e avremmo un andamento mostrato in figura 4.9 con un inevitabile perdita di informazioni utili al fine di ricavare la dinamica del veicolo. Infatti come si può vedere dalla figura 4.9 la massima accelerazione su y che si raggiunge è minore di  $0.5 \left( \frac{m}{s^2} \right)$  invece dal grafico mostrato in figura 4.7 la massima accelerazione su y era superiore a  $1.5 \left( \frac{m}{s^2} \right)$ , questo evidenzia quanto sia importante tenere in mente la dinamica di cosa si vuole filtrare al fine di non perdere informazioni utili alla misura.

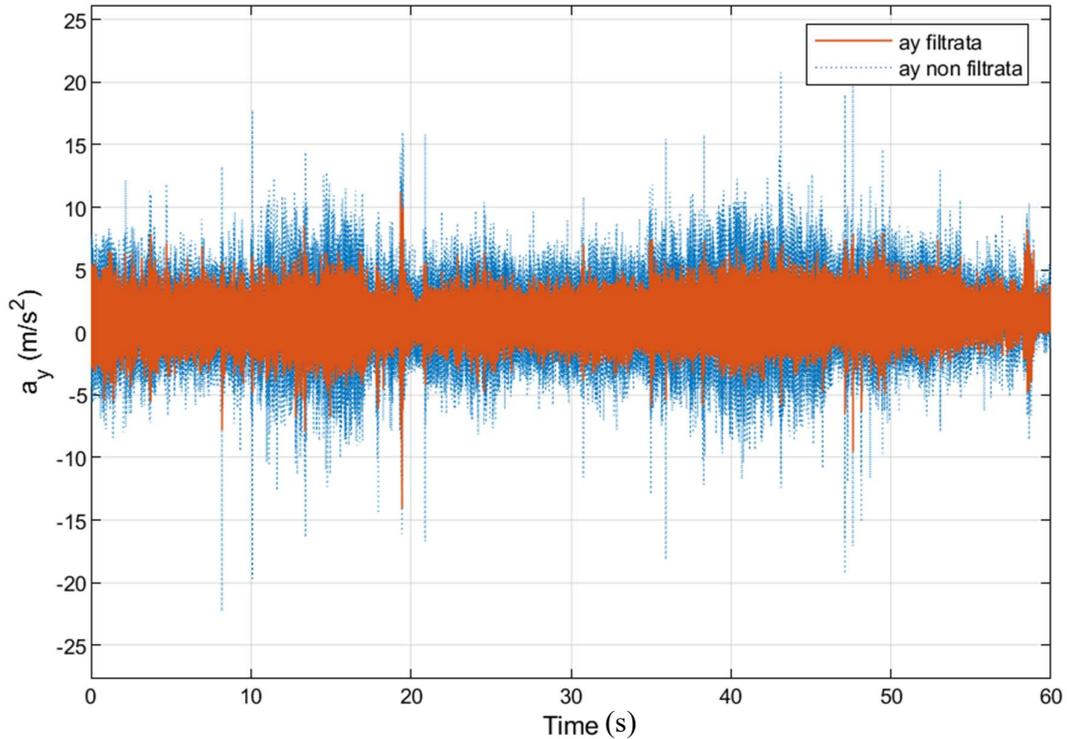


**Figura 4.9 – Accelerazione sull’asse y filtrata  $n=4000$**

Il difetto più importante della media mobile semplice è che tutti gli  $n$  valori hanno lo stesso peso nella media e quindi la influenzano tutti allo stesso modo. Quindi si sono iniziate ad analizzare tipologie di filtri in cui i coefficienti per gli  $n$  valori cambiassero in modo da favorire i segnali più recenti a scapito dei più vecchi. Perciò si è deciso di analizzare gli andamenti dei filtri più comuni già forniti da Matlab/Simulink e in caso di una buona pulizia del segnale, la loro successiva implementazione.

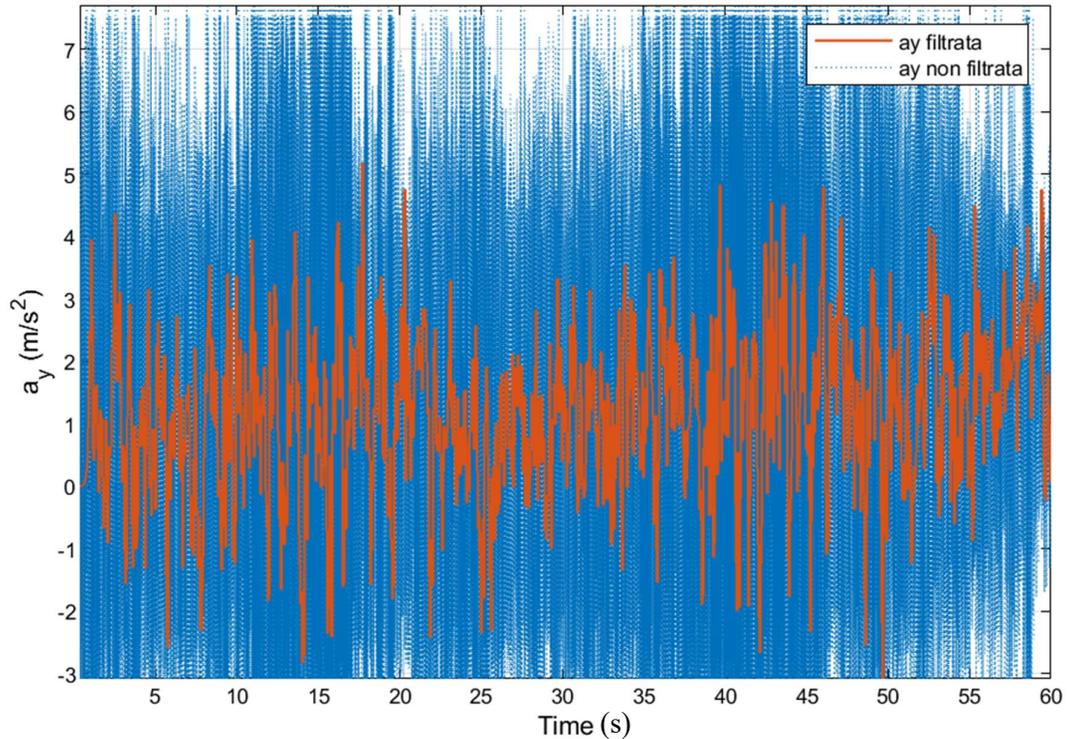
#### 4.2.2 Filtro FIR simulink

Per esempio si è creata una serie di 20 coefficienti con un vettore di questo tipo [0.0000015 0.0000015 0.000003 0.000004 0.00005 0.00015 0.0003 0.0004 0.0005 0.0015 0.0030 0.0040 0.0050 0.0150 0.0300 0.0400 0.0500 0.1500 0.3000 0.4000] in cui alla misura più recente viene assegnato un peso di 0.4 su 1 invece alla misura più vecchia è assegnato un peso di 0.0000015 su 1. Questo vettore è stato inserito nel blocco simulink discrete FIR filter permettendo di ottenere un andamento mostrato in figura 4.10 dell'accelerazione longitudinale.



**Figura 4.10 – Confronto accelerazione filtrata e non filtrata con coefficienti crescenti**

Da questa analisi si comprende che dare maggiore importanza alle ultime misure rende il segnale sicuramente più pronto ma più instabile, e poiché si è deciso di fissare il numero massimo di misure da tenere in memoria su ogni asse a 20, questo modo di filtrare non è adatto. Per cui si giunge a un compromesso per rendere il segnale più stabile, questo consiste nel saltare deliberatamente dei punti e considerare solo 20 punti presi a distanza di 0,05 secondi l'uno dall'altro che hanno l'andamento mostrato in figura 4.11.



**Figura 4.11 – Segnale con misure considerate ogni 0.05 secondi**

Il segnale è ancora troppo instabile e con questo tipo di campionamento si sta considerando per la misura recente filtrata quello che succede fino a un secondo prima, perciò siamo al limite della dinamica del veicolo.

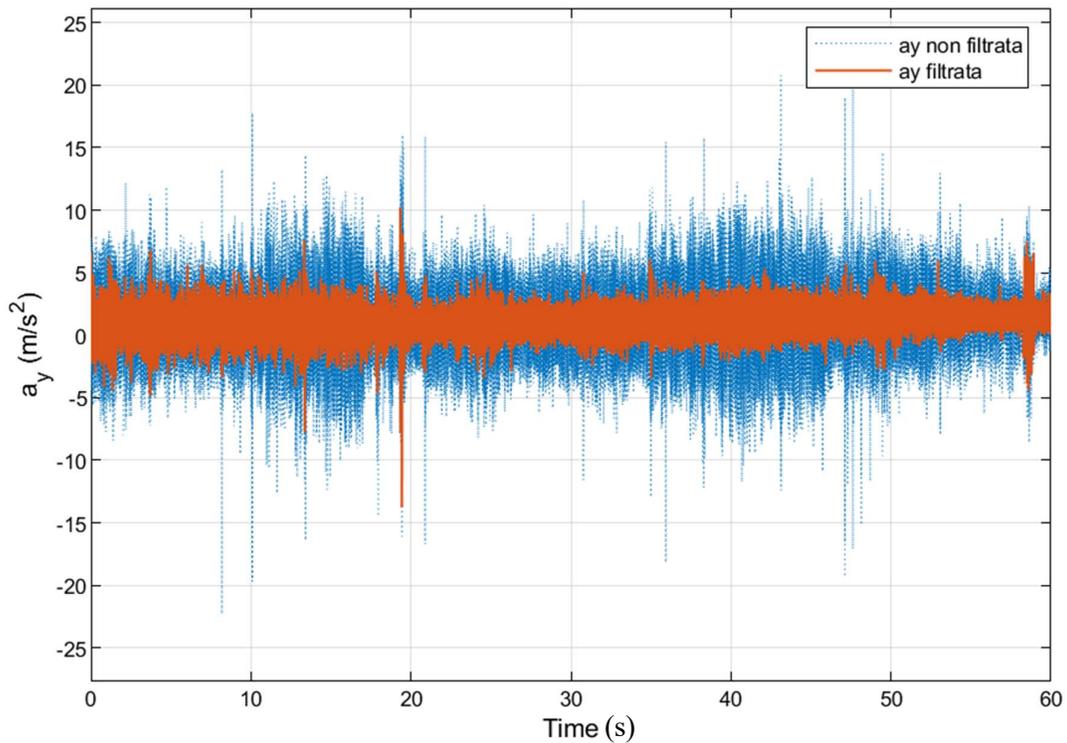
### 4.2.3 Filtro Savitzky-Golay

È una tipologia di filtro che serve per smussare il segnale approssimando il segnale a un polinomio di un ordine prescelto, inserendo anche il numero di elementi da considerare per restituire il valore dell'ultima misura. La funzione matlab utilizzata è  $y=sgolayfilt(x,order,framelen)$  in cui:

- $x$  è il vettore degli elementi da inserire, che nel nostro caso è quello dell'accelerazione longitudinale grezza  $a_y$ ;
- $order$  indica l'ordine del polinomio con cui si vuole approssimare la funzione smussata;

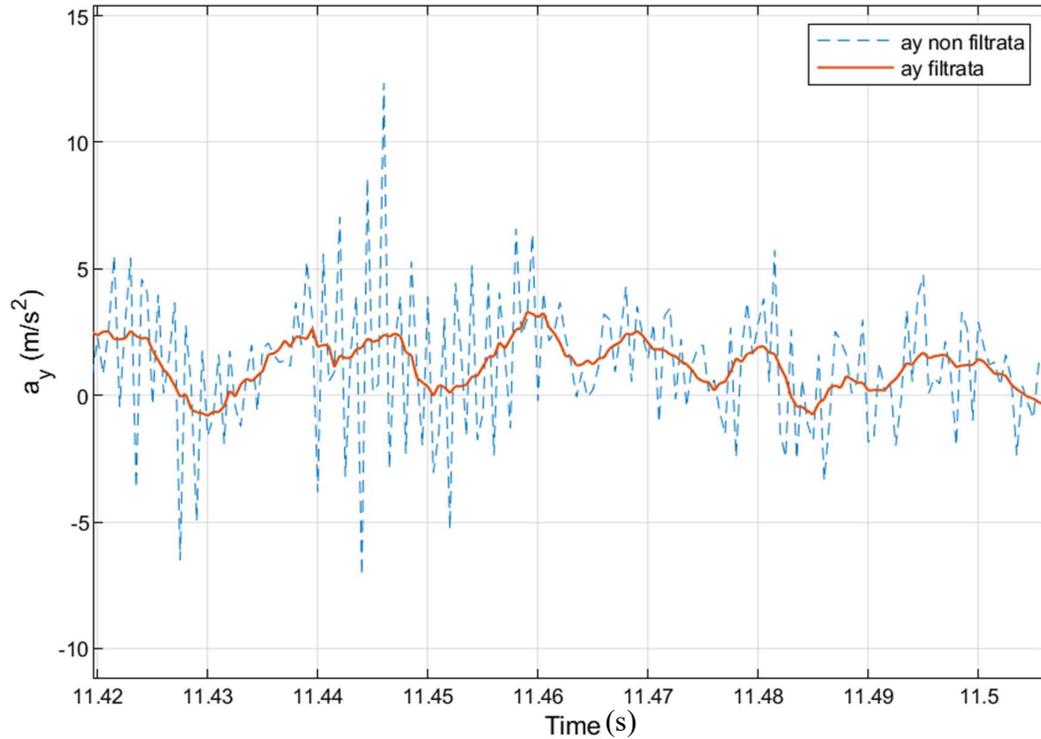
- framelen invece indica il numero di periodi di campionamento precedenti da considerare per effettuare il filtraggio della misura corrente.

Come possiamo notare dai valori dell'accelerazione longitudinale  $a_y$  filtrata con media mobile a  $n=400$  l'andamento della figura 4.7 può essere rappresentato da un polinomio di ordine 1 o ordine 2 perciò il primo tentativo che si effettua con questo filtro ha lunghezza frame di 19 e ordine 2 e presenta andamento mostrato in figura 4.12.



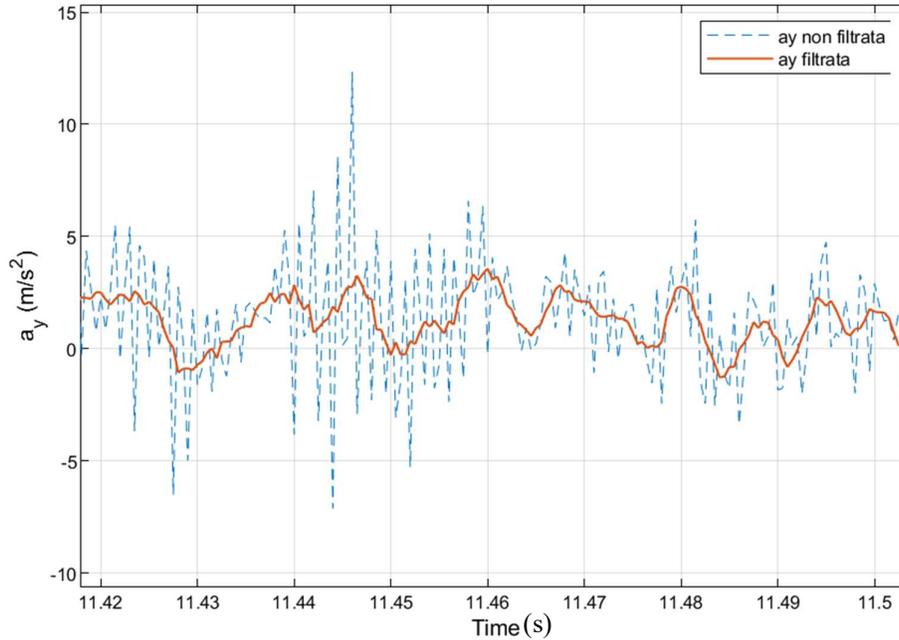
**Figura 4.12 – Confronto tra accelerazione longitudinale non filtrata e filtrata con Savitzky-Golay**

In figura 4.13 invece viene mostrato un ingrandimento per osservare cosa sta facendo questo tipo di filtro.



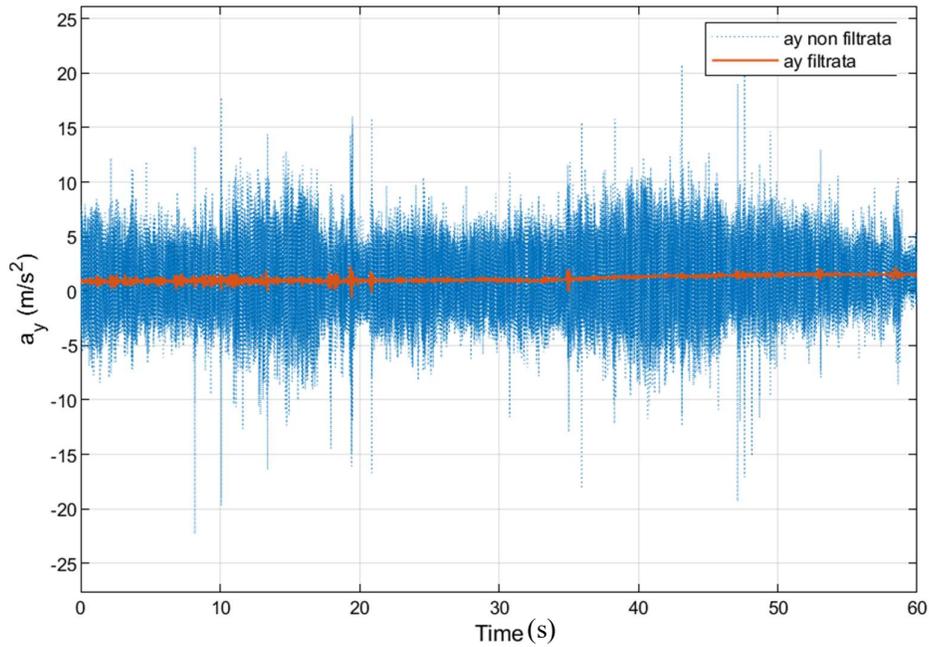
**Figura 4.13 – Ingrandimento di 0.1 secondi del segnale filtrato**

Un ordine maggiore del polinomio renderebbe il segnale filtrato ancora più instabile e lo si può notare dalla figura 4.14 che rappresenta il segnale filtrato con ordine 5 nella stessa finestra temporale

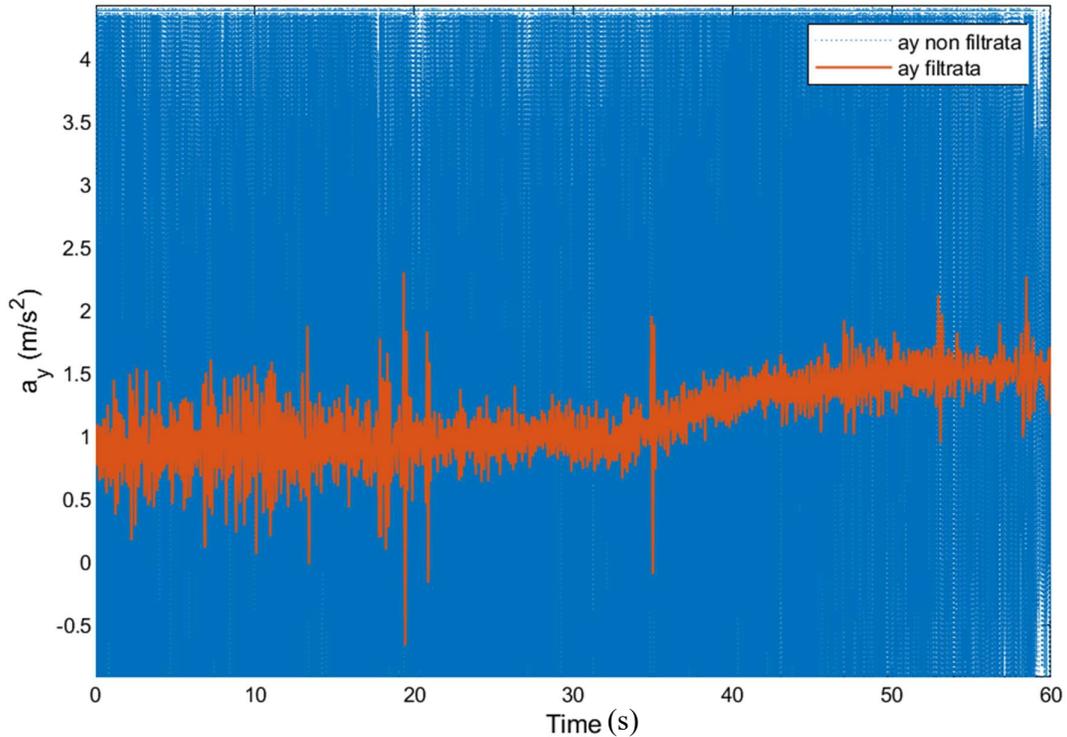


**Figura 4.14 – Ingrandimento di 0.1 secondi del segnale filtrato con ordine 5**

Con solo 19 elementi da considerare il filtro non è sufficiente per avere un segnale pulito. Infatti, si esegue un test con 199 elementi e con ordine 1 mostrato in figura 4.15 e il rispettivo ingrandimento in figura 4.16.



**Figura 4.15 – Segnale filtrato con 199 elementi e di ordine 1**



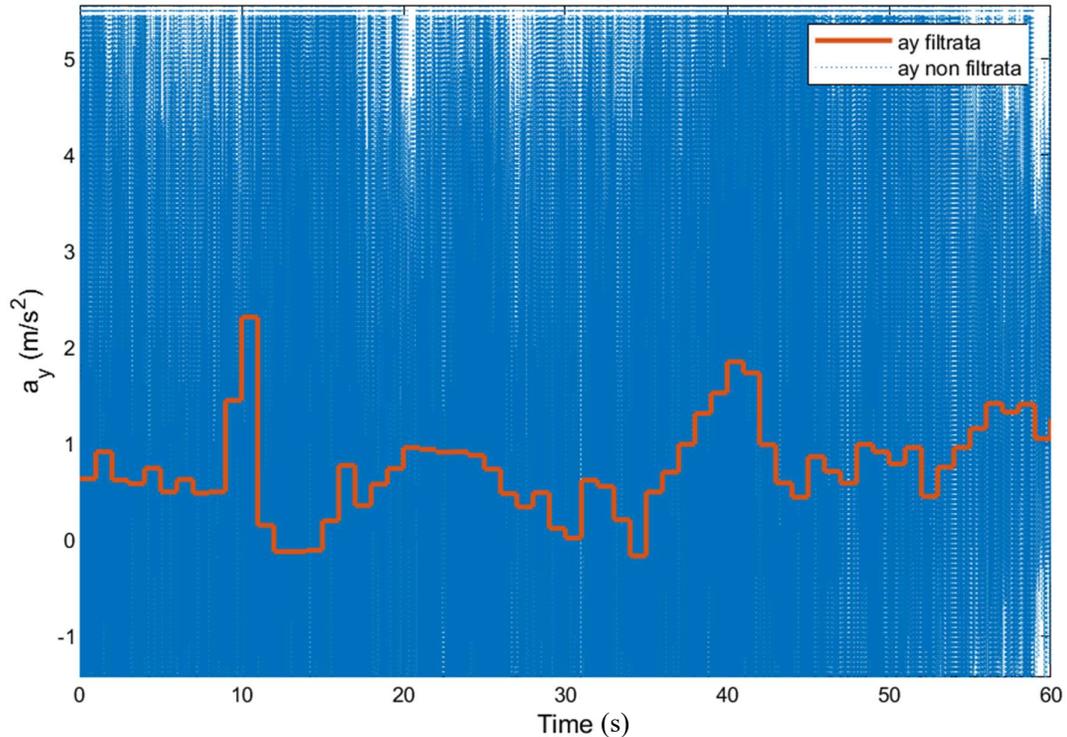
**Figura 4.16 –Ingrandimento verticale del segnale filtrato con 199 elementi e di ordine 1**

Anche considerando tutti quei punti il segnale filtrato non è accettabile perciò si è deciso di non approfondire oltre questa tipologia di filtro.

#### 4.2.4 Filtro di Kalman

Il filtro di Kalman è un efficiente filtro ricorsivo che valuta lo stato di un sistema dinamico a partire da una serie di misure soggette a rumore. Per le sue caratteristiche intrinseche è un filtro ottimo per rumori e disturbi agenti su sistemi gaussiani a media nulla. Trova utilizzo come osservatore dello stato, come loop transfer recovery (LTR) e come sistema di identificazione parametrica. È spesso utilizzato per filtrare i segnali di accelerometri, ma è particolarmente complicato utilizzarlo adeguatamente.

Per il test è stata adoperata la versione standard del filtro in Matlab/Simulink e l'andamento ottenuto è mostrato in figura 4.17



**Figura 4.17 –Ingrandimento verticale del segnale filtrato con il filtro di Kalman**

Il segnale ottenuto è sicuramente pulito ma l'andamento mostrato è strano, sicuramente migliorabile approfondendo ulteriormente le sue caratteristiche e configurandolo bene.

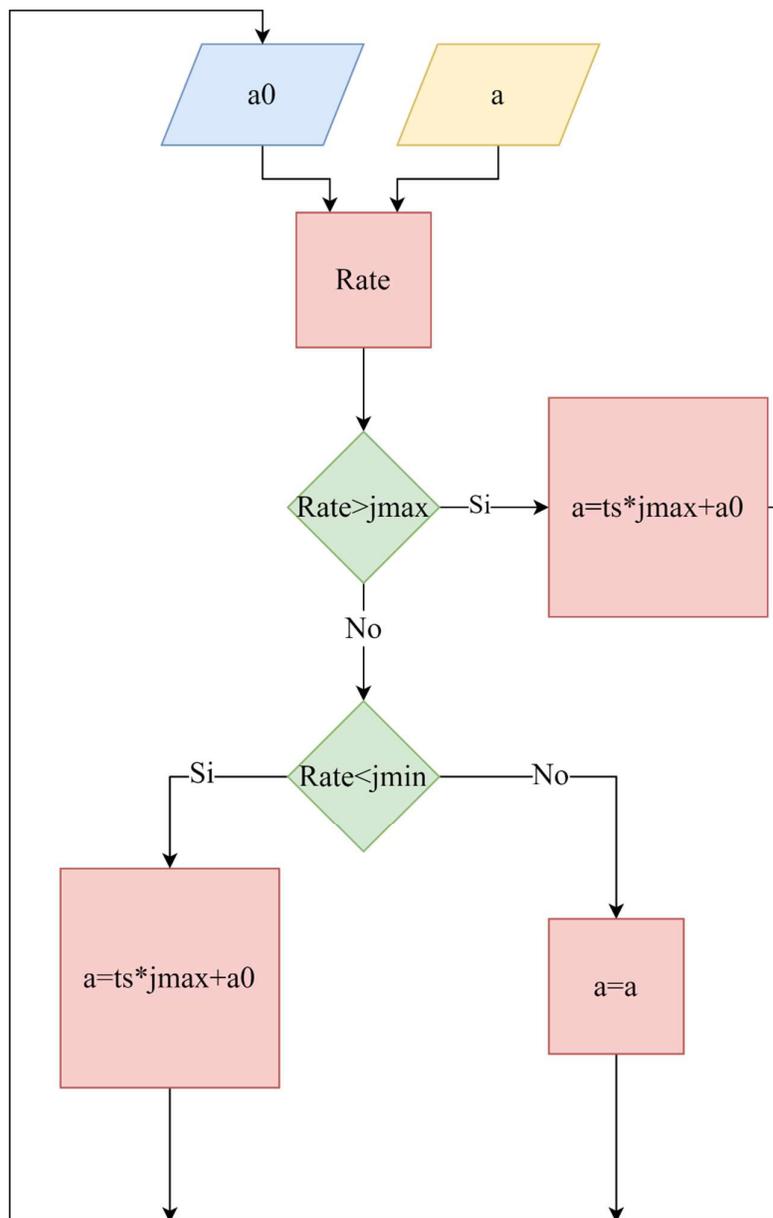
### 4.3 Sviluppo e scelta del filtro da utilizzare

Per ottenere un segnale più pulito sotto suggerimento del tutor si è intrapresa la strada di migliorare il segnale prima di filtrarlo sfruttando la dinamica conosciuta del veicolo. Per le varie tipologie di treno in cui si installano le unità freno infatti si conoscono i jerk massimi e minimi da rispettare per la sicurezza dei passeggeri. Questo discorso è stato fatto tutto in forma parametrica in modo da essere facilmente modificabile, quindi prima di eseguire questa operazione si deve inserire la massima accelerazione longitudinale permessa  $a_{max}$  e la massima

decelerazione longitudinale permessa  $d_{max}$  per un certo intervallo di tempo di riferimento  $t_v$ , in modo tale che con le formulazioni (46) e (47)

$$j_{max} = \frac{a_{max}}{t_v} \quad (46) \quad j_{min} = \frac{d_{max}}{t_v} \quad (47)$$

si ottengano il jerk istantaneo massimo e minimo e si possa costruire il Rate limiter.



**Figura 4.18 –Diagramma a blocchi del Rate limiter**

La figura 4.18 rappresenta il diagramma a blocchi del Rate limiter uno strumento ricorsivo creato per migliorare il segnale utilizzando la dinamica del veicolo conosciuta. Questo ha come input:

- $a_0$  l'accelerazione di un asse dell'istante precedente;
- $a$  l'accelerazione misurata da un asse dell'istante corrente.

queste due accelerazioni vengono processate nel blocco Rate con l'equazione (48)

$$Rate = \frac{a - a_0}{ts} \quad (48)$$

In cui  $ts$  è il tempo di campionamento del segnale e quindi è anche l'intervallo di tempo che intercorre tra il valore corrente e il precedente.

Calcolato il Rate per l'istante corrente si possono verificare tre situazioni:

1.  $Rate > j_{max}$  perciò si limita il valore da considerare come accelerazione corrente ad

$$a = ts * j_{max} + a_0 \quad (49)$$

2.  $Rate < j_{min}$  quindi si limita il valore da considerare come accelerazione corrente ad

$$a = ts * j_{min} + a_0 \quad (50)$$

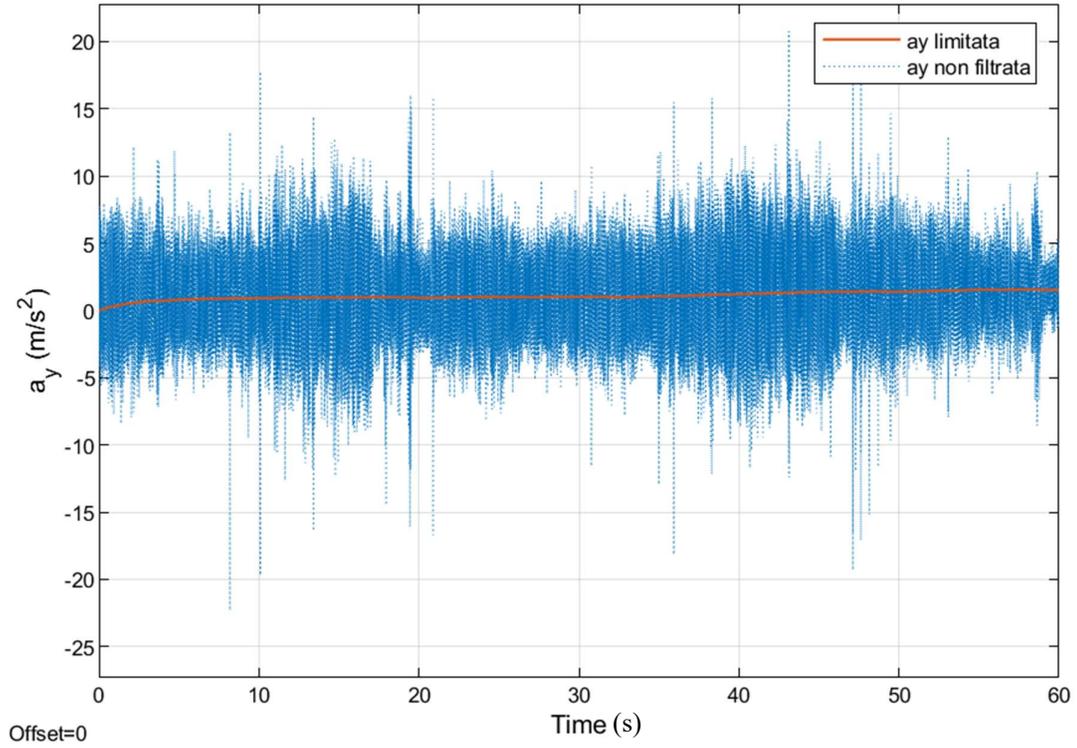
3.  $j_{min} \leq Rate \leq j_{max}$  allora il valore corrente della misura risulta accettabile per la dinamica del veicolo e

$$a = a \quad (51)$$

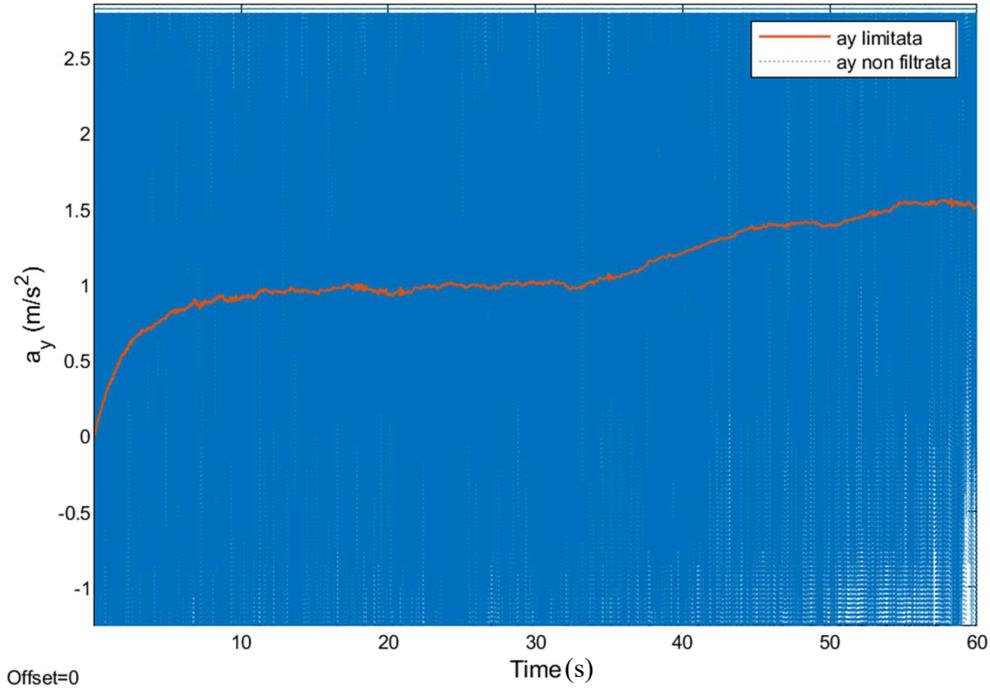
Il valore uscente di  $a$  ottenuto dalle formulazioni (49), (50) o (51) viene utilizzato come valore  $a_0$  per il ciclo successivo.

Poiché le variazioni di accelerazione massima e minima longitudinali sono le più imponenti lungo i tre assi ortogonali il rate limiter viene applicato a tutti e tre gli assi nello stesso modo. Inoltre, se si considera un accelerometro montato con errori di installazione, si avrebbe una diluizione della componente longitudinale di accelerazione sull'asse trasversale e verticale, ma limitandoli tutti con lo stesso

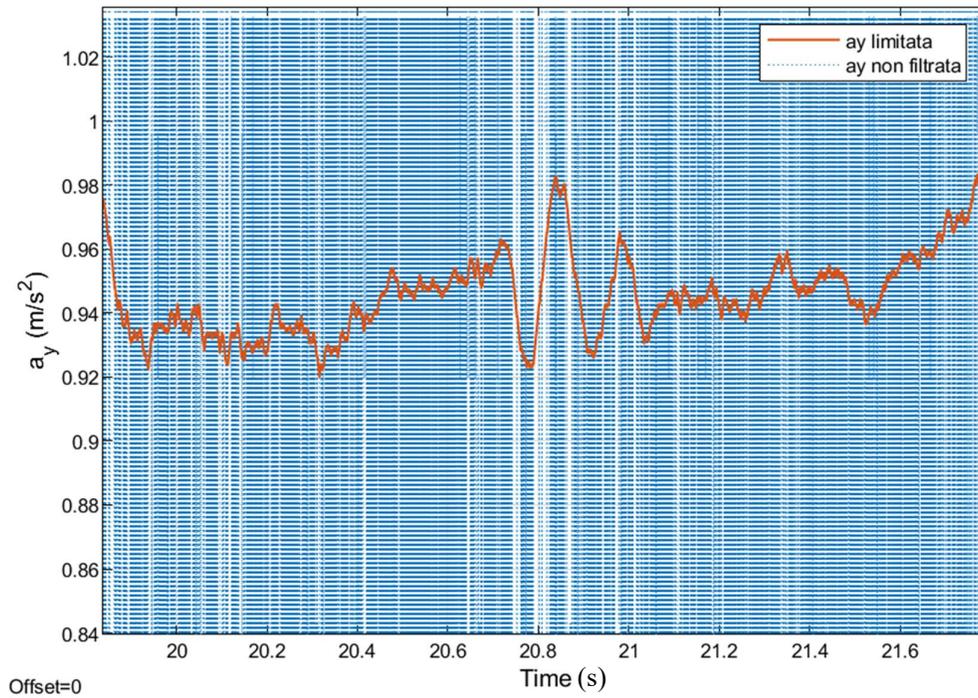
criterio non si rischia di tagliare delle informazioni utili all'algoritmo dell'orientamento. Le figure 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25 mostrano gli andamenti dei tre assi dell'accelerometro in cui stiamo applicando il rate limiter.



**Figura 4.19 – Confronto accelerazione longitudinale limitata e grezza**

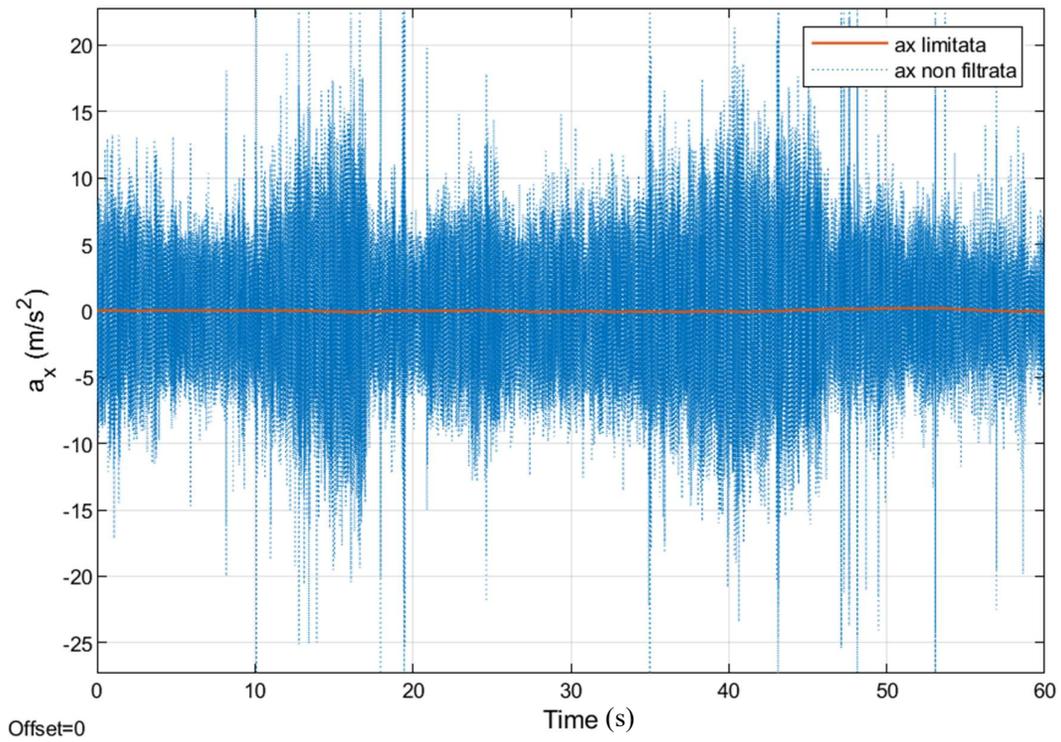


**Figura 4.20 –Ingrandimento sull’asse verticale del confronto dell’accelerazione longitudinale**

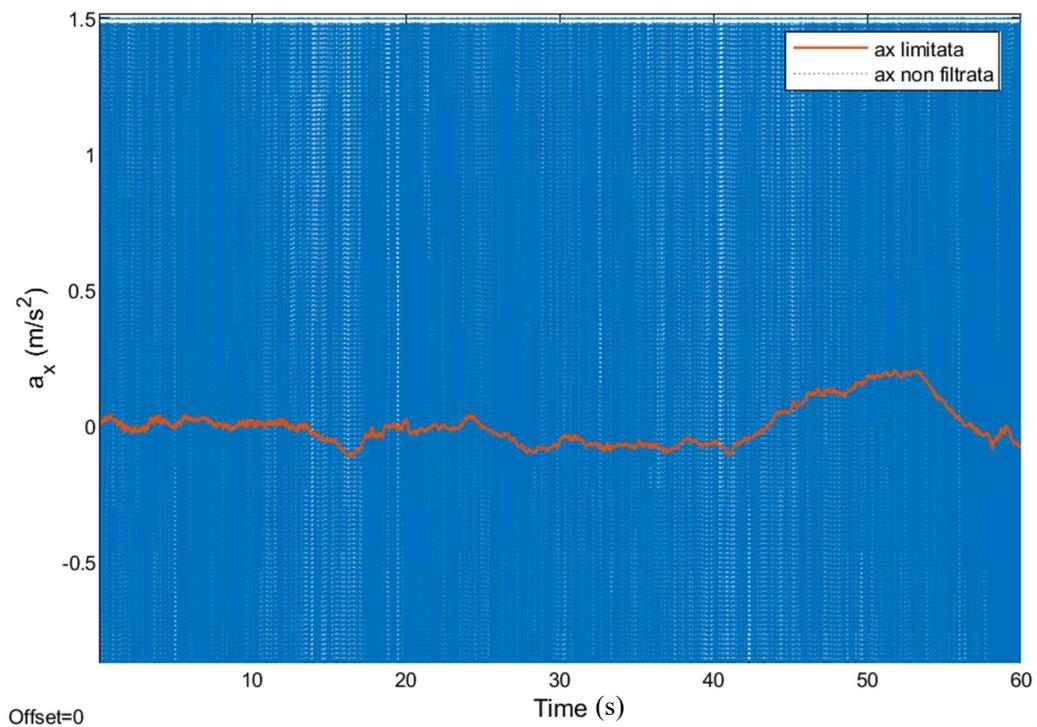


**Figura 4.21 – Ulteriore ingrandimento sull’asse verticale del confronto dell’accelerazione longitudinale**

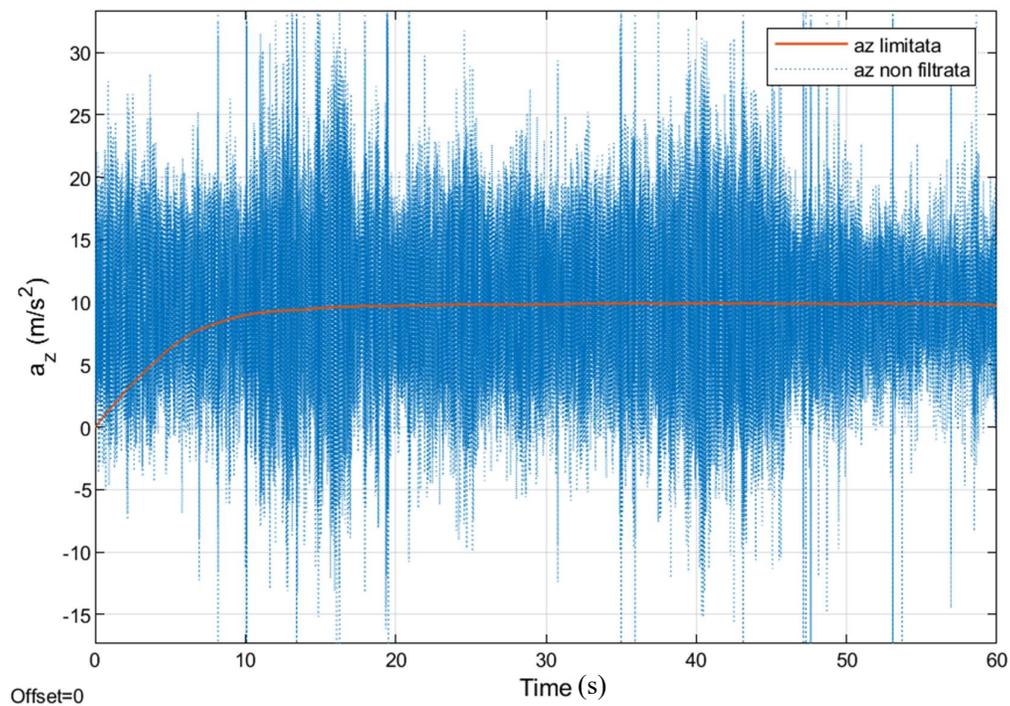
Nella figura 4.21 si nota come il segnale sia ancora un po' instabile ma quasi del tutto accettabile. In generale questo limitatore di rate è molto funzionale allo scopo di filtrare adeguatamente il segnale con poche risorse computazionali.



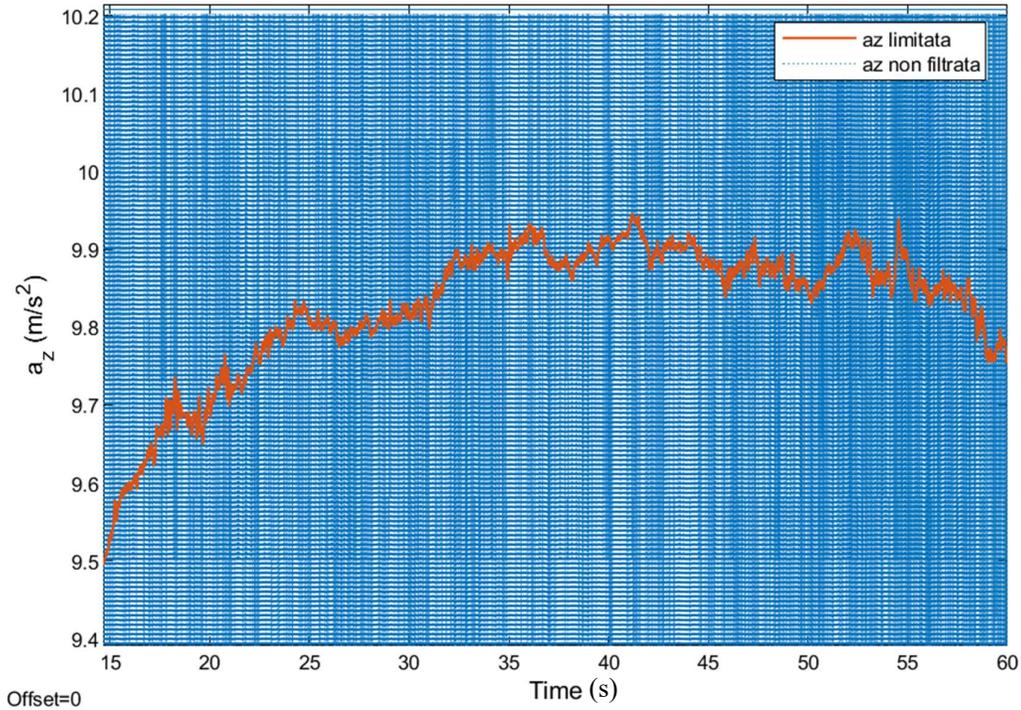
**Figura 4.22 –Confronto accelerazione trasversale limitata e grezza**



**Figura 4.23 –Ingrandimento sull’asse verticale del confronto dell’accelerazione trasversale**



**Figura 4.24 –Confronto accelerazione verticale limitata e grezza**

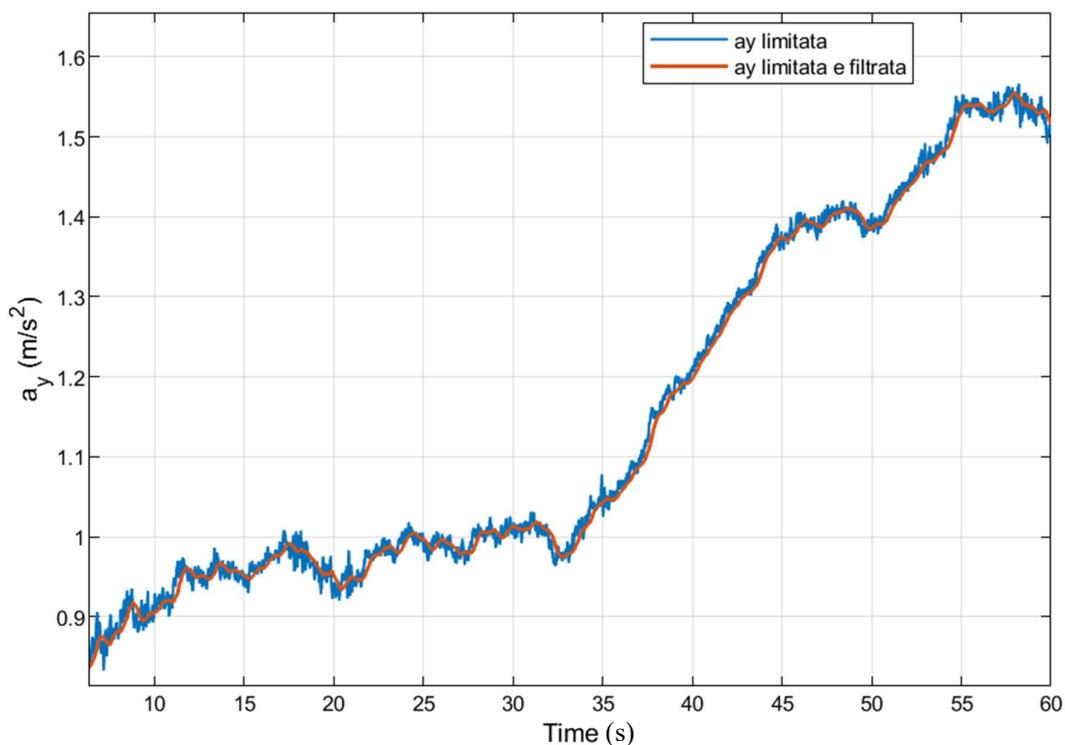


**Figura 4.25 –Ingrandimento sull’asse verticale del confronto dell’accelerazione verticale**

Dalla figura 4.19 alla figura 4.25 si può osservare che il primo valore del segnale arancione è sempre zero, anche se queste misure sono state effettuate in un periodo in cui il treno è già in moto avviato. Soprattutto nella figura 4.24 si nota come il valore dell’accelerazione verticale passi da 0 a circa 9.81 (valore dell’accelerazione di gravità) e che si stabilizzi intorno a quest’ultimo. Avendo imposto come valore iniziale nella simulazione 0 e applicando il rate limiter, occorre un periodo di buffering prima che si raggiunga la reale accelerazione di regime.

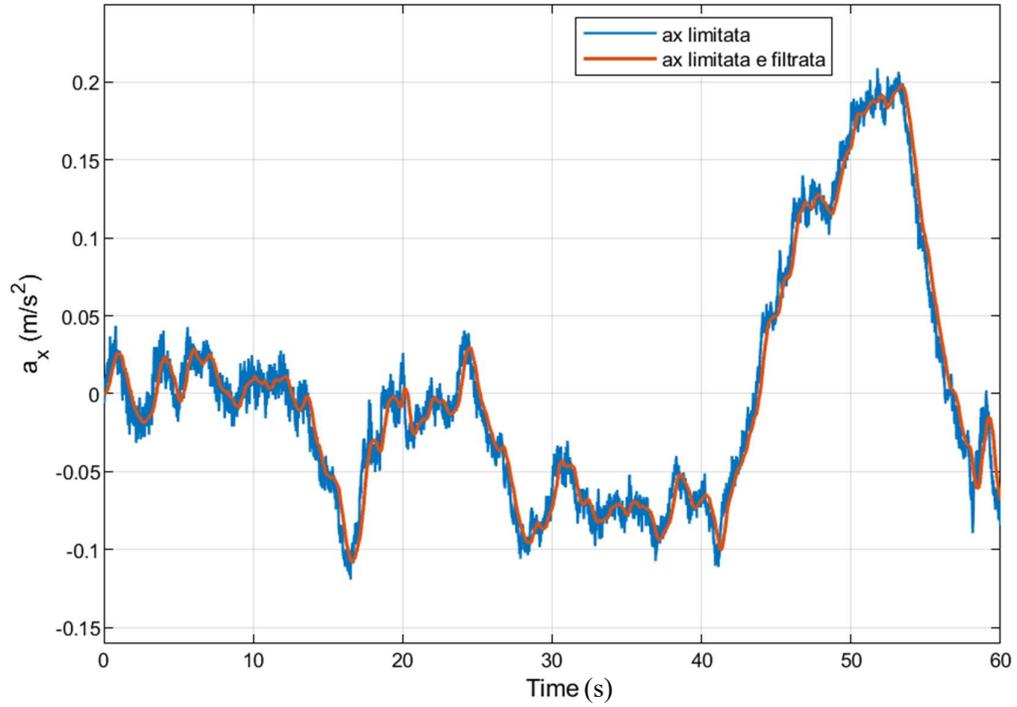
Poiché il segnale ottenuto è già abbastanza pulito, si inserisce una media mobile semplice che lo va a smussare ulteriormente. Viene scelta la media mobile a 20 punti (descritta nel capitolo 4.2.1) per la semplicità di calcolo computazionale e facilità di implementazione, considerando quello che sta succedendo fino a 0.5 secondi prima.

Anche il filtro a media mobile viene reso parametrico infatti si devono inserire il numero dei punti da considerare e il tempo del fenomeno in cui distribuirli uniformemente. Per esempio, nel caso preso in esame si considerano 20 punti distanziati l'uno dall'altro di 25 (ms) ottenuti dalla divisione tra il tempo del fenomeno, 0.5 secondi, e il numero dei punti. Il filtro è stato creato in modo tale che cambiando il tempo di campionamento sia facilmente configurabile tramite parametri. Nella figure 4.26, 4.27 e 4.28 viene mostrato l'andamento dei segnali limitati e filtrati dei tre assi pronti per essere utilizzati.

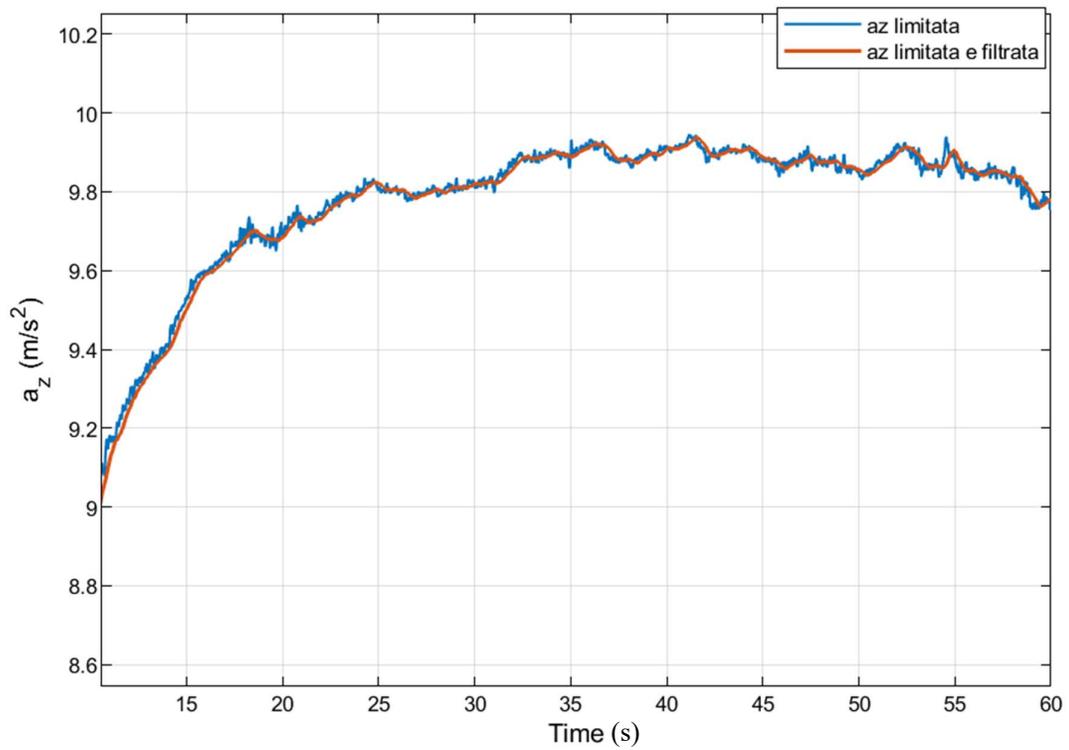


**Figura 4.26 –Confronto accelerazione longitudinale limitata con limitata e filtrata**

Dalla figura 4.26 si può constatare che l'andamento è molto simile all'andamento ottenuto nella figura 4.7 cioè quello a  $n=400$ , ma in questo modo si tengono in memoria solo 21 punti per ogni asse, ottenendo una pulizia superiore del segnale con un risparmio di risorse computazionali significative.



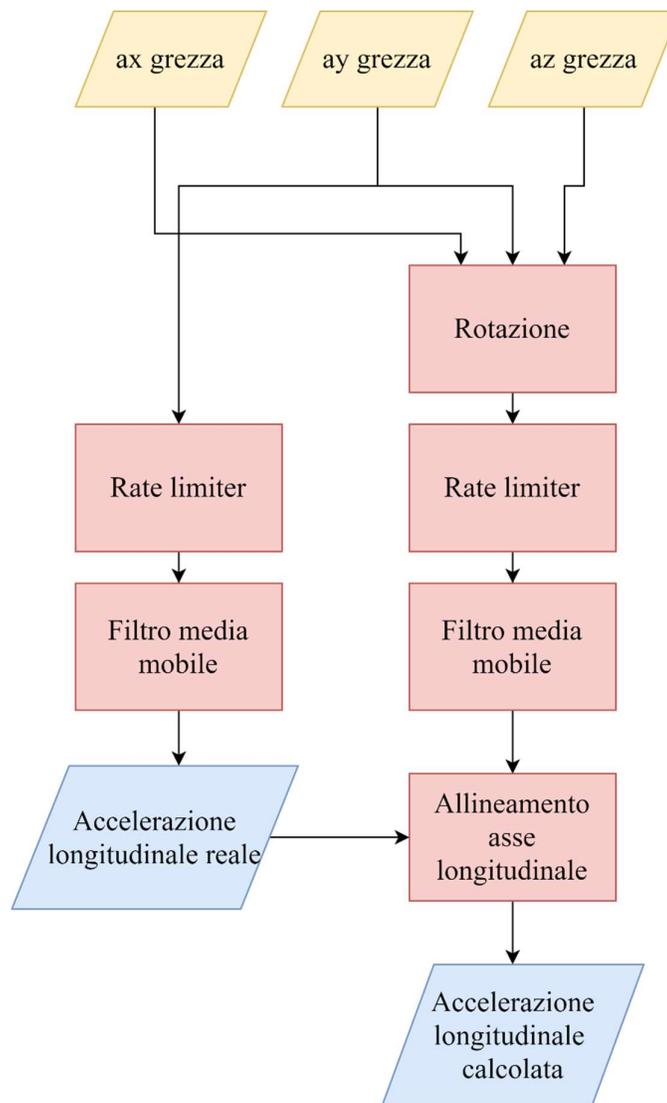
**Figura 4.27 –Confronto accelerazione trasversale limitata con limitata e filtrata**



**Figura 4.28 –Confronto accelerazione verticale limitata con limitata e filtrata**

## 4.4 Simulazione dei dati reali sull' algoritmo orientamento e modifiche fatte all' algoritmo sulle soluzioni

Concluso il discorso filtri ho voluto testare l' algoritmo sull' orientamento con dei dati reali, ma non avendo ancora misurazioni che contenessero anche la velocità di riferimento ho simulato un orientamento diverso applicando la matrice di rotazione ai dati grezzi ottenuti dall' accelerometro, seguendo il diagramma a blocchi mostrato in figura 4.29.



**Figura 4.29 –Diagramma a blocchi del test dati reali su algoritmo orientamento**

Quindi prendendo come input i segnali grezzi restituiti dall'accelerometro montato correttamente sul ETR500 utilizzati per sviluppare un filtro digitale ho seguito lo stesso iter per simulare l'accelerometro montato disallineato affrontato nel paragrafo 2.2, in particolare questa operazione è eseguita con l'equazione (18) in cui i tre parametri scelti per disallineare virtualmente l'accelerometro sono  $\theta = 2.5^\circ$ ,  $\psi = -5^\circ$  e  $\phi = -7.6^\circ$ .

Ruotato virtualmente l'accelerometro con il blocco Rotazione i segnali di accelerazione dei tre assi vengono limitate e filtrate come visto nel paragrafo 4.3 con gli stessi parametri, rispettivamente nei blocchi Rate limiter e Filtro media mobile.

Avendo i segnali pronti e ruotati vengono elaborati nel blocco Allineamento asse longitudinale. Questo per funzionare adeguatamente ha bisogno della velocità di riferimento poiché attraverso la sua derivata è possibile ricavarsi l'accelerazione di riferimento. Quest'ultima è necessaria per ricavarsi i tre coefficienti  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  tale per cui si abbia una corrispondenza con la combinazione delle misure lette dall'accelerometro attraverso la relazione (39). Quindi si utilizza l'accelerazione longitudinale  $y$  solo limitata e filtrata, non ruotata, come accelerazione di riferimento. Questo processo è stato eseguito dalla colonna sinistra del diagramma a blocchi in figura 4.29.

Ovviamente dovendo elaborare segnali reali le soluzioni ideali perdono di significato, perciò si sono apportate le seguenti modifiche all'algoritmo per ottimizzarlo:

- La registrazione descritta nel paragrafo 3.3 non viene più eseguita solo 10 volte ma viene fatta ogni periodo di campionamento disponibile alla registrazione, fino a saturazione del numero di iterazioni prelezionato tramite un parametro. Questo parametro è un contatore che si aggiorna ogni volta che un terzetto di  $k$  risulta accettabile. Oppure la registrazione viene effettuata fino alla completa analisi dell'intervallo in cui è possibile

registrare (momenti in cui l'accelerazione longitudinale del veicolo è disponibile).

- I tre istanti in cui vengono “scattate le fotografie” adesso non sono più distanziati di due secondi ma sono valori di istanti precedenti in funzione del tempo di campionamento del segnale e di parametri scelti. Nello specifico sono stati fotografati  $x_n$ ,  $x_{n-10}$  e  $x_{n-20}$  cioè il valore all'istante corrente, quello di 10 e 20 momenti precedenti, per i parametri scelti cioè i 20 istanti tenuti in memoria che sono distanziati tra loro di 0.5 secondi, il valore  $x_n$  è quello dell'istante corrente, il valore  $x_{n-10}$  equivale all'istante di 5 secondi fa e  $x_{n-20}$  equivale all'istante di 10 secondi fa;
- Invece di avere la condizione di norma circa 1 per validare le soluzioni, si è cambiata la logica di scelta, inserendo una media pesata in cui abbiamo i pesi di ciascun terzetto definiti dalla relazione (52)

$$peso_i = \frac{1}{|1 - norma_i|^{esp}} \quad (52)$$

in cui  $esp$  è l'esponente da attribuire ai pesi e la loro norma è descritta dalla relazione (53)

$$norma_i = \sqrt{k_{1i}^2 + k_{2i}^2 + k_{3i}^2} \quad (53)$$

Inoltre, il  $peso_i$  viene calcolato solo per le soluzioni accettabili.

Questi terzetti di  $k$  si ritengono accettabili se:

1. La norma del terzetto nell'istante preso in considerazione non è nulla o NaN;
2.  $k_{1_{min}} \leq k_{1_i} \leq k_{1_{max}}$ ;
3.  $k_{2_{min}} \leq k_{2_i} \leq k_{2_{max}}$ ;
4.  $k_{3_{min}} \leq k_{3_i} \leq k_{3_{max}}$ .

$k_{1_{min}}$ ,  $k_{1_{max}}$ ,  $k_{2_{min}}$ ,  $k_{2_{max}}$ ,  $k_{3_{min}}$ ,  $k_{3_{max}}$ , sono ottenuti da una funzione eseguita prima di avviare la simulazione in cui inserendo i possibili range di montaggio dell'accelerometro vengono testate le possibili soluzioni, costruendo la matrice *Rot* per ogni combinazione dei

tre angoli  $\vartheta$ ,  $\psi$  e  $\phi$  ma variabili di 10 in 10 e dopo aver trovato il minimo e il massimo per ogni  $k$  queste vengono maggiorate o minorate di 0.2 per essere sicuri di non escludere delle soluzioni accettabili. Inoltre, se nel range inserito c'è un numero non multiplo di 10, questo verrà approssimato al primo multiplo di 10 successivo che non escluda il valore in considerazione, per esempio se viene inserito  $31^\circ$  il range che verrà considerato sarà  $40^\circ$ . Inserendo per esempio i possibili range di montaggio sui tre assi rispettivamente  $x = [30^\circ]$ ,  $y = [40^\circ]$  e  $z = [30^\circ]$  si ottengono:

$$k1_{min} = -0.7, k1_{max} = 0.7, k2_{min} = 0.3893, k2_{max} = 1.20,$$

$k3_{min} = -0.9113$  e  $k3_{max} = 0.7982$ . Questi range sono opzionali e ovviamente aiutano nella ricerca delle migliori soluzioni.

Quindi quando si verificano le condizioni di accettabilità si ottengono i tre coefficienti con le relazioni (54), (55) e (56)

$$k_1 = \frac{\sum_{i=1}^m (k_{1i} * peso_i)}{\sum_{i=1}^m peso_i} \quad (54)$$

$$k_2 = \frac{\sum_{i=1}^m (k_{2i} * peso_i)}{\sum_{i=1}^m peso_i} \quad (55)$$

$$k_3 = \frac{\sum_{i=1}^m (k_{3i} * peso_i)}{\sum_{i=1}^m peso_i} \quad (56)$$

In cui  $m$  è il numero totale di soluzioni accettabili trovate. Questo in caso avessimo salvato tutti i terzetti di  $k$  e i loro pesi, ma poiché il processo utilizzato è ricorsivo e vogliamo snellire le risorse da tenere in memoria per ogni iterazione si seguono i seguenti passaggi:

1. Trovato il terzetto accettabile di  $k$  viene calcolato il  $peso_i$ ;
2. Si moltiplicano rispettivamente

$$k_{1i} * peso_i \quad (57) \quad k_{2i} * peso_i \quad (58) \quad e \quad k_{3i} * peso_i \quad (59);$$

3. I valori calcolati nelle relazioni (57), (58) e (59) vanno aggiunti a quelli del precedente ciclo con le formulazioni (60), (61) e (62)

$$sumk1 = sumk1 + k_{1i} * peso_i \quad (60)$$

in cui  $sumk1$  per l'istante preso in considerazione corrisponde a  $k_{1i-1} * peso_{i-1}$  più tutti quelli dei precedenti cicli già eseguiti e analogamente per le relazioni (61) e (62)

$$sumk2 = sumk2 + k_{2i} * peso_i \quad (61)$$

$$sumk3 = sumk3 + k_{3i} * peso_i \quad (62)$$

4. Poi attraverso la relazione (63) il peso viene sommato in modo ricorsivo

$$peso = peso + peso_i \quad (63)a$$

in cui  $peso$  per l'istante preso in considerazione corrisponde alla somma di tutti i  $peso_i$  dei cicli precedenti;

5. Infine, si ottiene il terzetto mediato dei  $k$  con le relazioni (64) (65) e (66)

$$k_1 = \frac{sumk1}{peso} \quad (64)$$

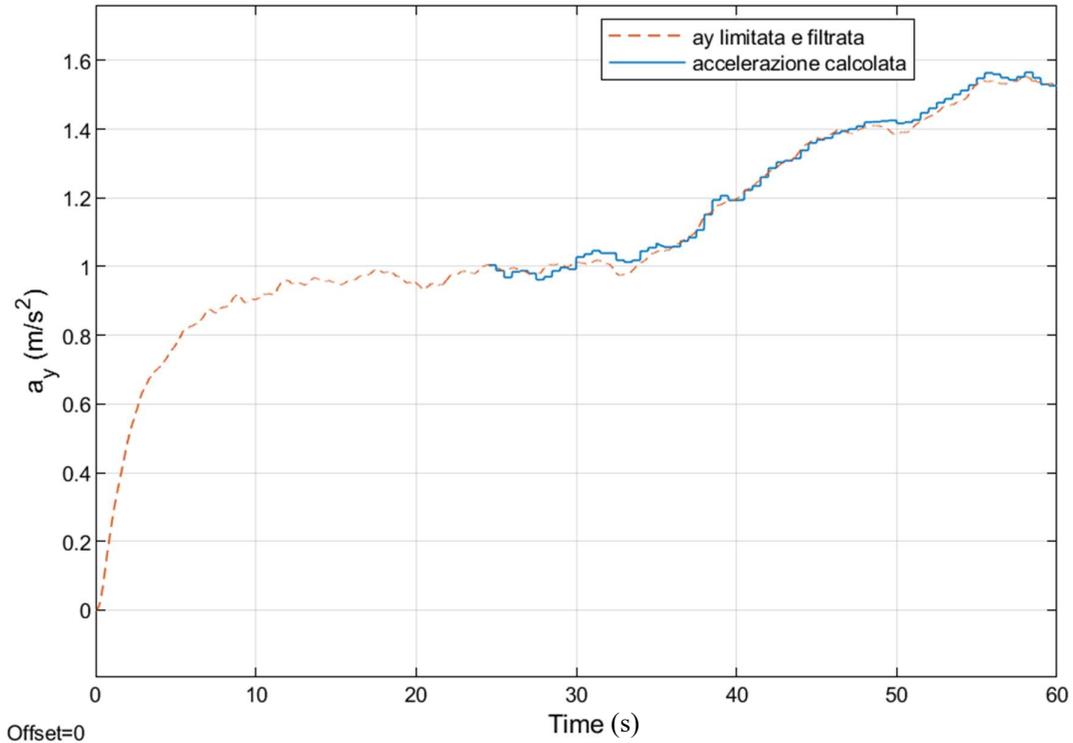
$$k_2 = \frac{sumk2}{peso} \quad (65)$$

$$k_3 = \frac{sumk3}{peso} \quad (66)$$

In questo modo si possono fare 50000 iterazioni dovendo salvare solo 4 valori e non 200000 valori per effettuare la media pesata.

Effettuati questi miglioramenti ho testato l'algoritmo con numero massimo impostato di soluzioni accettabili da mediare di 500, e per la simulazione presa in esame l'algoritmo ha ricavato 33 soluzioni ottenendo questi valori di  $k$  mediati:

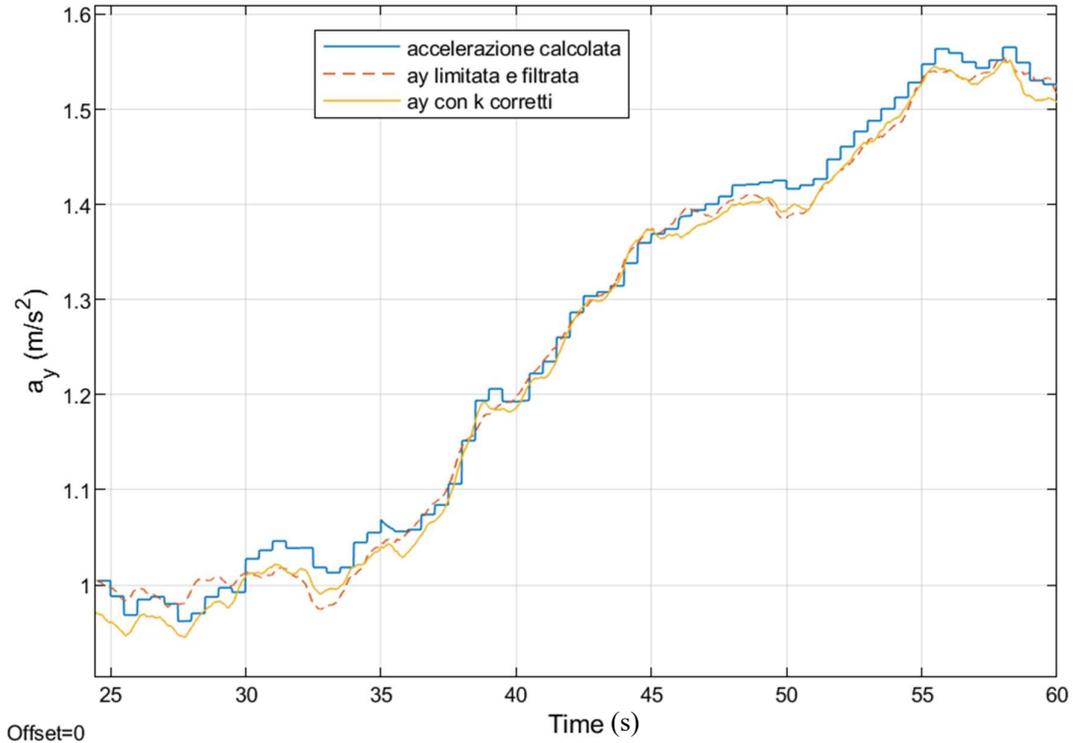
$k_1 = 0.1636$ ,  $k_2 = 0.9837$  e  $k_3 = 0.0592$  che presentano andamento mostrato in figura 4.30.



**Figura 4.30 – Confronto accelerazione longitudinale calcolata con accelerazione longitudinale di riferimento simulata**

I valori di  $k$  con cui è stato ruotato l'accelerometro corrispondenti ai tre parametri  $\vartheta = 2.5^\circ$ ,  $\psi = -5^\circ$  e  $\phi = -7.6^\circ$ , sono  $k_1 = 0.1318$ ,  $k_2 = 0.9898$  e  $k_3 = 0.0542$  molto simili alle soluzioni ricavate dall'algoritmo.

Come si può osservare dalla figura 4.30 la prima accelerazione calcolata viene ricavata intorno ai 25 secondi cioè quando trova il primo terzetto di  $k$  accettabile, che è composto da  $k_1 = 0.3435$ ,  $k_2 = 1.1682$  e  $k_3 = 0.0631$ . Essendo un metodo ricorsivo i  $k$  mediati cambiano e si avvicinano sempre di più ai valori con norma più vicina a 1.



**Figura 4.31 – Confronto accelerazioni longitudinali rispettivamente calcolata, limitata e filtrata e quella ottenuta con i k corretti**

Nella figura 4.31 si vogliono confrontare tre tipi di accelerazione. Quella calcolata dall’algoritmo, quella di riferimento e quella ottenuta allineando l’accelerometro matematicamente con il terzetto dei coefficienti  $k$  precedentemente imposti per ruotarlo. Si può osservare che l’accelerazione di riferimento non è perfettamente sovrapponibile all’accelerazione calcolata con il terzetto matematicamente corretto. Infatti, questo comportamento è dovuto al filtro, che va per sua natura a escludere delle informazioni meno utili al fine di ottenere un andamento ottimale, ma che non fanno verificare la perfetta corrispondenza dei due segnali. In ogni caso si può notare come queste variazioni siano davvero minime e che anche il segnale ottenuto dall’accelerazione calcolata dall’algoritmo sia un’ottima approssimazione dell’accelerazione di riferimento.

## 5 Versione definitiva dell'algoritmo

Per definire la versione finale dell'algoritmo lo si è dovuto testare con delle prove sperimentali andando ad analizzare il comportamento dell'algoritmo e modificarne le parti più critiche.

### 5.1 Prove sperimentali

Il dispositivo utilizzato per le prove sperimentali è una versione prototipo di quello utilizzato sui treni come ETR500 ed è costituito da due parti principali:

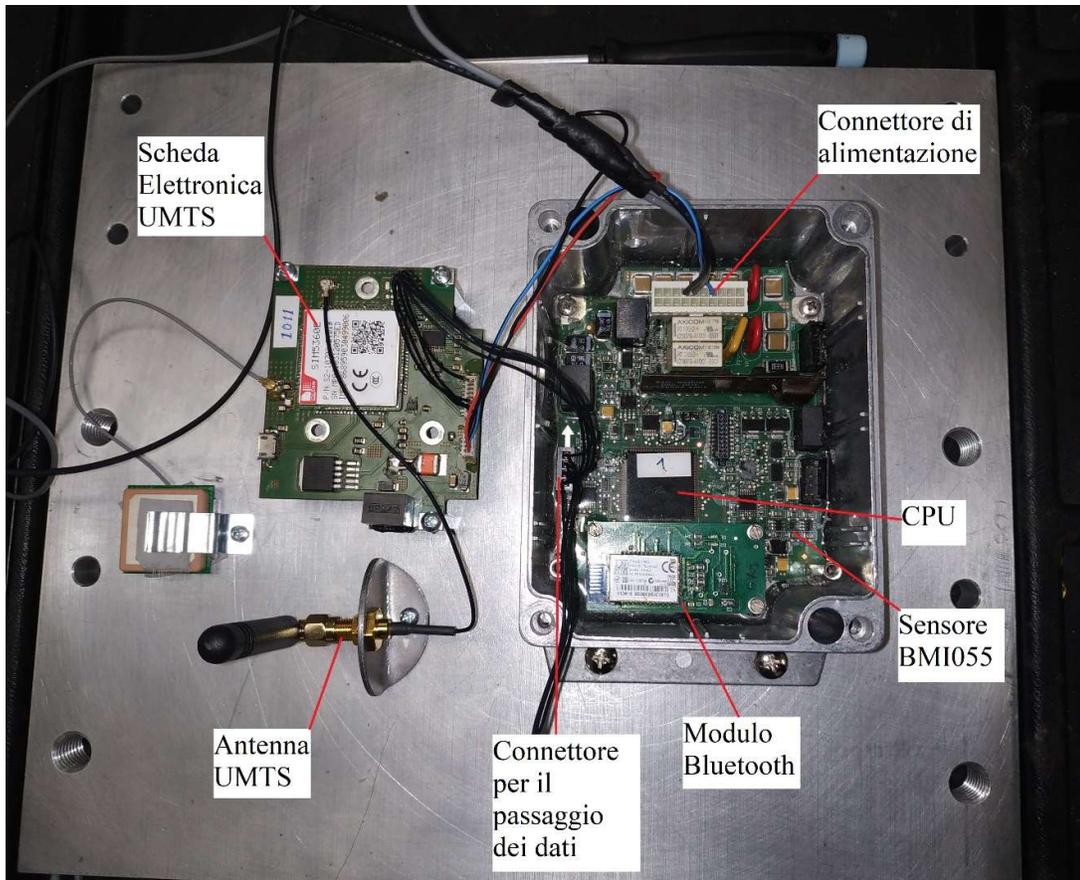
- Una scheda elettronica per l'acquisizione ed elaborazione dei dati ricevuti dal sensore BMI055 (accelerometro e giroscopio), posizionata sulla destra nella figura 5.1;
- Una scheda elettronica in grado di trasmettere i dati via UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) che permette di comandare in remoto l'intero dispositivo e caricare i dati su un server dedicato, posizionata sulla sinistra nella figura 5.1.

A differenza dei dispositivi già installati per altri scopi, questo è dotato anche di una connessione Bluetooth seriale con cui è possibile collegarsi al pc per acquisire i dati. Infatti, per le prove sperimentali effettuate la scheda elettronica UMTS non viene utilizzata, avendo a disposizione un metodo di collegamento più comodo.

Il dispositivo è stato montato meccanicamente su una lastra di alluminio per permettere un fissaggio più rapido nelle prove in campo e renderlo più stabile.

Il trasferimento dei dati tra le due schede elettroniche avviene tramite il connettore per il passaggio dei dati il quale è un collegamento seriale.

Sul Pc il software per l'acquisizione e il monitoraggio dei dati è un software aziendale chiamato Monitoring.



**Figura 5.1– Panoramica del dispositivo**

Il tempo di acquisizione del sensore è di 0.5 (ms) e con il software aziendale si può scegliere quando e per quanto tempo si vogliono registrare i dati ottenuti dal sensore.

Lo scopo di queste prove sperimentali è testare il corretto funzionamento dell’algoritmo prima di implementarlo su un treno, perciò per le suddette non sono state previste delle installazioni del dispositivo come elettronica interna al treno, ma solo come un dispositivo esterno.

Il dispositivo viene alimentato a 24 (V) e non avendo disponibile l’alimentazione del treno è stato collegato a due batterie da 12 (V) in serie per alimentarlo in modo portatile, mostrate in figura 5.2.



**Figura 5.2– Batterie collegate in serie**

Inoltre, non avendo collegamento diretto del dispositivo con il treno, non abbiamo modo di registrare la velocità di riferimento di quest'ultimo. Quindi si è utilizzata un'applicazione per smartphone (GPS Speed) in grado di registrare la velocità ottenuta tramite GPS ogni secondo che si è assunta valida per eseguire questi test.

Prima di eseguire le prove su un treno si sono eseguiti dei test in auto per verificare le attrezzature e il corretto funzionamento delle registrazioni dei dati.

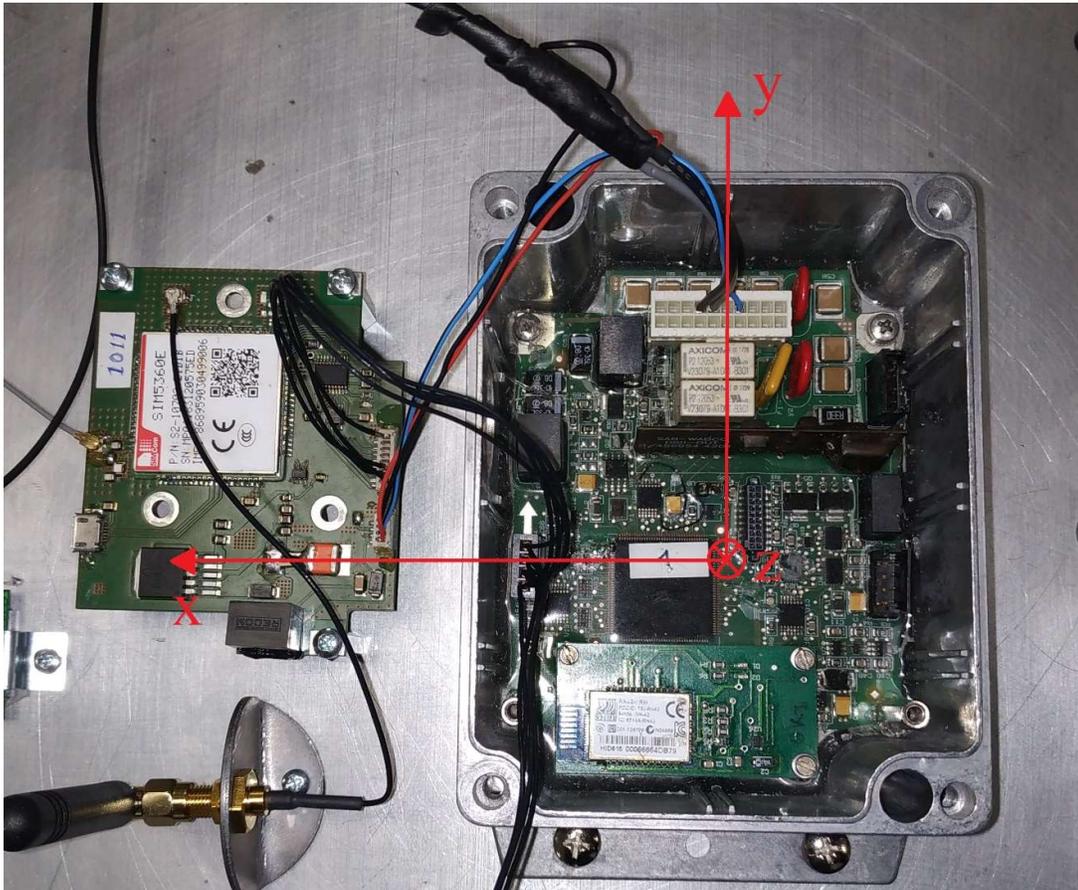


**Figura 5.3– Installazione in auto del dispositivo**

In figura 5.3 viene mostrata l'installazione del dispositivo in auto in cui sono state fatte delle registrazioni per piccoli tratti nei dintorni dell'azienda.

Sia il dispositivo che l'applicazione hanno registrato correttamente le misurazioni, ma si sono presentate delle problematiche da risolvere prima delle prove in treno.

La prima problematica riguarda l'ambito software dell'algoritmo relativo alle misurazioni ottenute dall'accelerometro. Prima delle prove in auto si era considerata un'accelerazione con il segno positivo e una decelerazione con il segno negativo. In realtà l'accelerometro rileva un'accelerazione con segno in base al verso in cui sta avvenendo il fenomeno. Infatti, nelle prove in auto l'accelerometro rilevava delle accelerazioni con segno negativo quando la macchina aumentava la velocità e viceversa. Avendo delle accelerazioni più alte e più prolungate in auto si è potuto definire il verso degli assi riportato in figura 5.4.



**Figura 5.4– Sistema di riferimento dell'accelerometro**

Considerando che il dispositivo una volta installato sul treno rimarrà bloccato alla cassa per tutto il suo ciclo vitale e che i treni percorrono la stessa tratta prima in un

verso e poi nell'altro si è dovuta eseguire una modifica alla funzione dei range di variazione dell'installazione. Questa modifica riguarda solo  $k_2$  che sarà comunque quello disposto principalmente lungo la direzione del senso di marcia a cui si è dovuto aggiungere anche il segno negativo tra le possibili soluzioni. Infatti, prima valeva  $k_{2_{min}} \leq k_{2_i} \leq k_{2_{max}}$  nella scelta dei  $k$  accettabili ora questa condizione si è evoluta con la formulazione (67):

$$k_{2_{min}} \leq k_{2_i} \leq k_{2_{max}} \vee -k_{2_{max}} \leq k_{2_i} \leq -k_{2_{min}} \quad (67)$$

In questo modo vengono considerati entrambi i sensi di marcia del treno.

La seconda problematica che è anche la più importante riguarda il principio di funzionamento del sensore il quale ha bisogno di essere solidale al corpo di cui si vuole misurare l'accelerazione per avere delle misure attendibili. Anche se il dispositivo era incastrato, non era fissato all'automobile perciò le sue misurazioni sono state leggermente falsate perché in realtà non era solidale. Ma per la natura delle prove da effettuare sul treno non ci era permesso montare il dispositivo e quindi si è cercato di appesantirlo molto in modo da bloccarlo con la forza di gravità dello stesso. La soluzione adottata per trasportarlo sul treno è utilizzare una valigetta da trasferta dell'azienda in cui ci sarebbero stati tutti i componenti necessari per il funzionamento e per il bloccaggio all'interno della stessa. Questa valigetta è mostrata in figura 5.5, in essa si può vedere la lastra in cui è montato il dispositivo che oltre a essere incastrata fisicamente è bloccata ai 4 angoli con del mastice. Inoltre, si è cercato di montare la lastra del dispositivo in modo corretto per quanto possibile con una livella, per simulare un montaggio che potrebbe avere errori di installazione, ma di cui si conosce il sistema di riferimento.



**Figura 5.5 – Interno della valigetta**

Le prove sperimentali sono state fatte su un treno regionale che percorreva la tratta None-Pinerolo e Pinerolo-None, di cui tre prove per l'andata e quattro per il ritorno. Purtroppo, la velocità GPS ottenuta dall'applicazione non si è comportata sempre bene e questi dati sono stati manipolati per renderli più accettabili al fine di verificare il corretto funzionamento dell'algoritmo.

Il segnale di velocità GPS di partenza ha un periodo di campionamento di 1 secondo e le modifiche eseguite sono le seguenti:

1. Sincronizzazione con i segnali di accelerazione;
2. Limitatore di rate di crescita e decrescita di velocità fissato a 0.8 (m/s) per ogni secondo;
3. Media mobile centrata a 3 secondi descritta dalla relazione (68)

$$\frac{v_{GPS} + v_{GPS} + v_{GPS+1}}{3} \quad (68)$$

4. Interpolazione lineare del segnale per renderlo campionato come quello delle accelerazioni, quindi  $T=0.5$  (ms);
5. Derivata per ricavarsi l'accelerazione di riferimento ottenuta considerando una finestra temporale centrata di punti, che segue la relazione (69)

$$a_{gps} = \frac{v_{gps+750ms} - v_{gps-750ms}}{1.5} \quad (69)$$

A seguire saranno riportati i risultati delle sette prove sperimentali.

### 5.1.1 Prima prova di andata treno regionale None-Pinerolo

Per tutte le prove di andata None-Pinerolo si è assunta la stessa disposizione del dispositivo, mostrata in figura 5.6 con l'asse y concorde con il senso di marcia e l'asse z concorde con l'accelerazione di gravità. In questa disposizione si è cercato di avere gli assi dell'accelerometro allineati con gli assi della cassa del treno, la registrazione è durata 240 secondi, ma l'applicazione non ha funzionato poiché lo smartphone non è riuscito a collegarsi ai satelliti per ottenere le informazioni GPS, quindi non si è potuto applicare l'algoritmo.

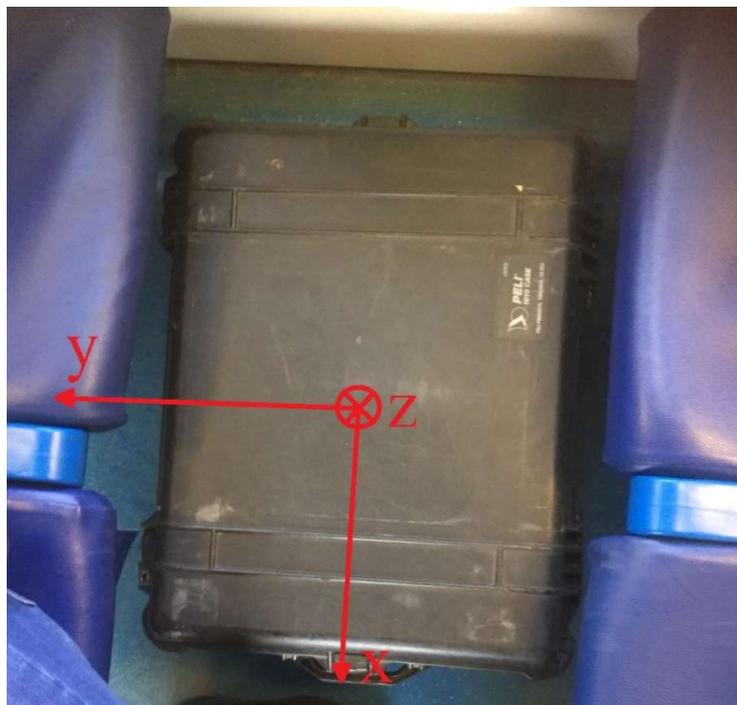
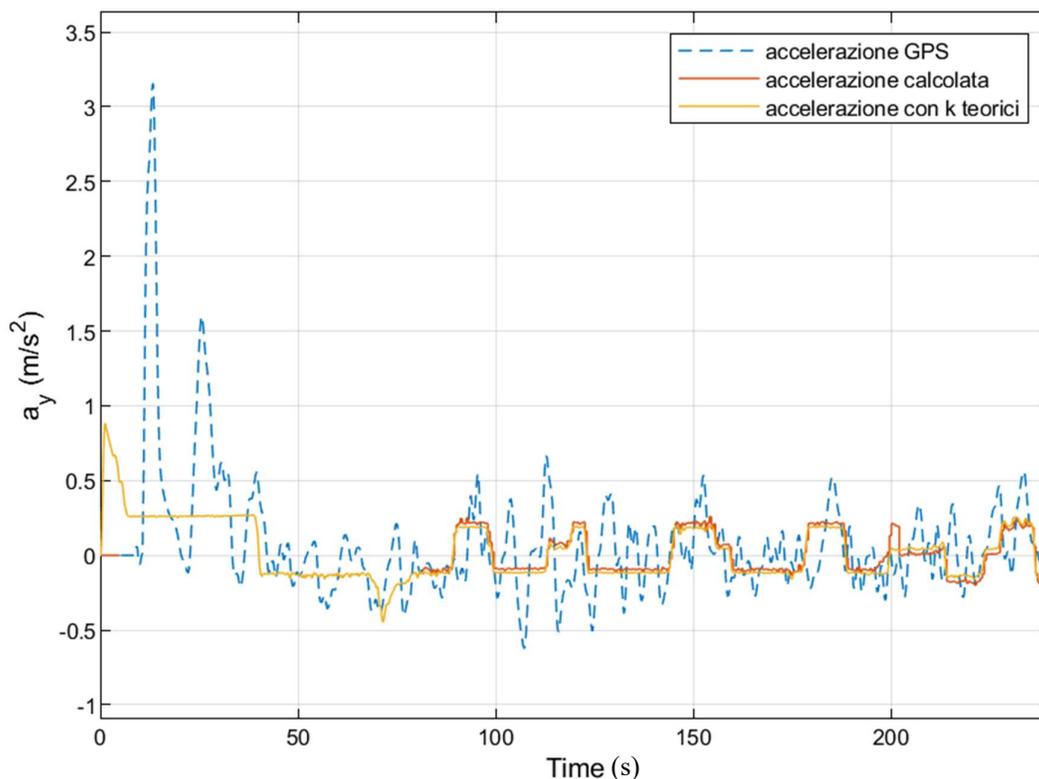


Figura 5.6 – Installazione valigetta su treno regionale

### 5.1.2 Seconda prova di andata treno regionale None-Pinerolo

La seconda prova è durata 240 secondi e mantiene sempre la disposizione della valigetta mostrata in figura 5.6. La figura 5.7 mostra il grafico in cui vengono messe a confronto tre accelerazioni:

- Accelerazione GPS, ottenuta dalla velocità GPS descritta nel paragrafo 5.1;
- Accelerazione calcolata, questa è quella ottenuta dal funzionamento dell'algoritmo in modo ricorsivo.
- Accelerazione con k teorici, è quella che si ottiene dall'allineamento matematico del dispositivo con gli assi cassa del treno. Il terzetto dei k teorici si può conoscere perché si è scelto di montare il dispositivo in un modo predeterminato. Questi coefficienti sono  $k_1 = -0.0174$ ,  $k_2 = 0.9971$  e  $k_3 = -0.0738$ .



**Figura 5.7 – Confronto accelerazione GPS, calcolata e teoricamente corretta**

L'algoritmo è riuscito a ricavare 4 terzetti di  $k$  accettabili che dopo essere opportunamente mediati sono risultati essere  $k_1 = -0.1111$ ,  $k_2 = 1.0314$  e  $k_3 = -0.0765$  con norma = 1.0402. Si può facilmente notare che il terzetto finale pur essendo costruito da una media di poche soluzioni è molto simile a quello teoricamente corretto perciò si può affermare che l'algoritmo abbia funzionato piuttosto bene.

Dalla figura 5.7 si può vedere che intorno all'ottantesimo secondo sia stato ricavato il primo terzetto di  $k$  accettabili e l'andamento dell'accelerazione calcolata parta da quel momento.

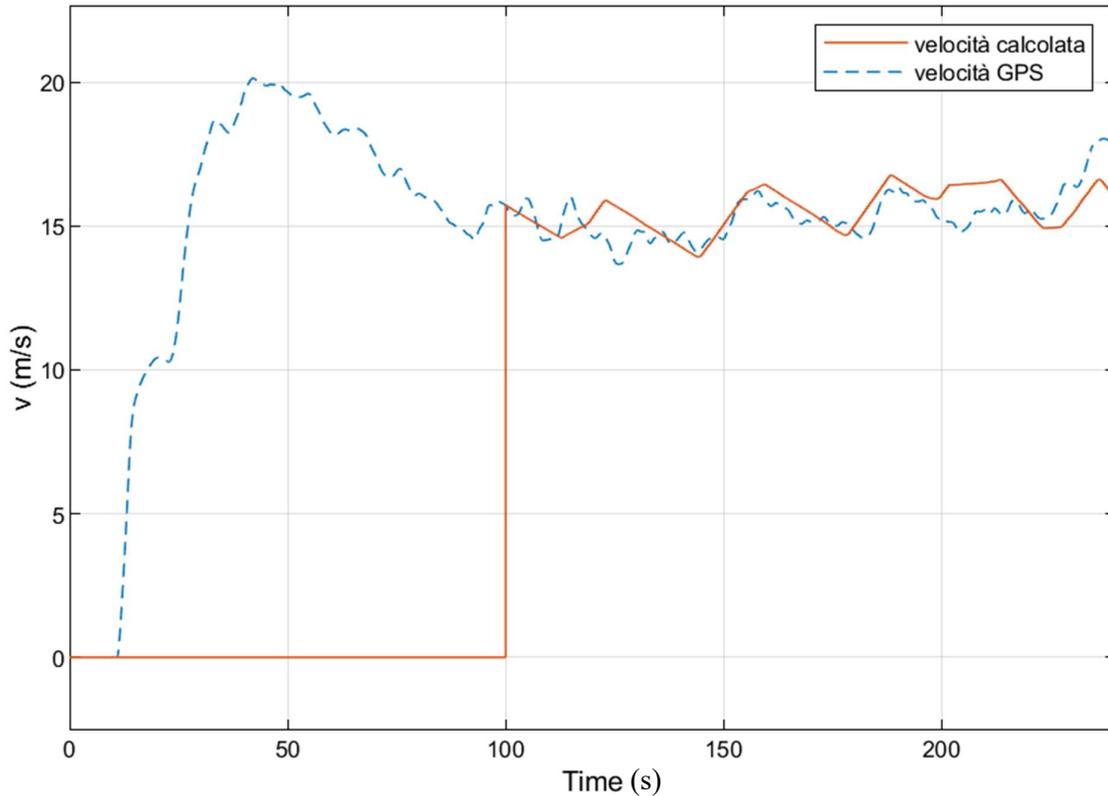
Poiché lo scopo di questo algoritmo è ricavare una stima della velocità longitudinale del veicolo ho inserito una parte per ottenerla partendo dall'accelerazione calcolata. Infatti, scegliendo il momento in cui si deve iniziare a calcolare la velocità, si è stimata la velocità longitudinale seguendo la formulazione (70)

$$v = v_0 + a_{calc} * t_f \quad (70)$$

In cui:

- $v$  è la velocità stimata del treno;
- $v_0$  è la velocità GPS o di riferimento del treno all'istante iniziale, che per noi corrisponde al frame precedente a quello scelto per calcolare la velocità;
- $a_{calc}$  è l'accelerazione calcolata dall'algoritmo ottenuta dalla formula (39) del paragrafo 3.3;
- $t_f$  è la periodicità di esecuzione dell'algoritmo che per i casi esaminati corrisponde a 0.5 (s).

Nella figura 5.8 viene mostrato l'andamento della velocità stimata confrontata con quella GPS partendo dal centesimo secondo.

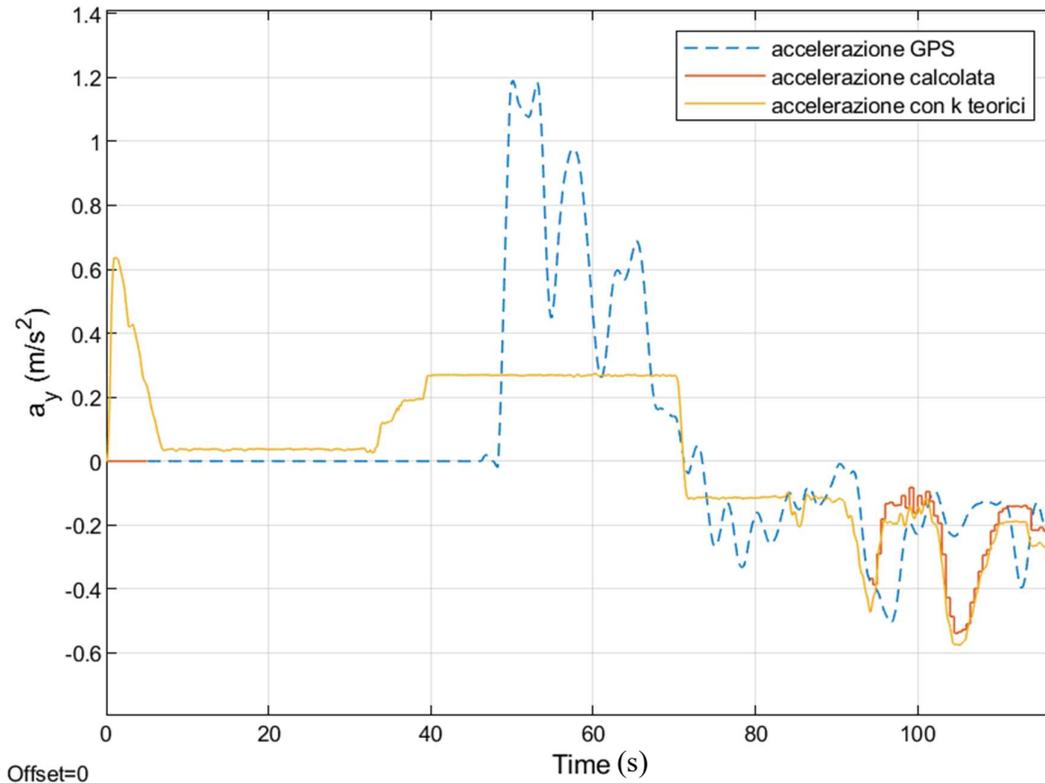


**Figura 5.8 – Confronto velocità calcolata con velocità GPS**

I due andamenti sono molto simili perciò si può ritenere che l’algoritmo abbia funzionato piuttosto bene.

### 5.1.3 Terza prova di andata treno regionale None-Pinerolo

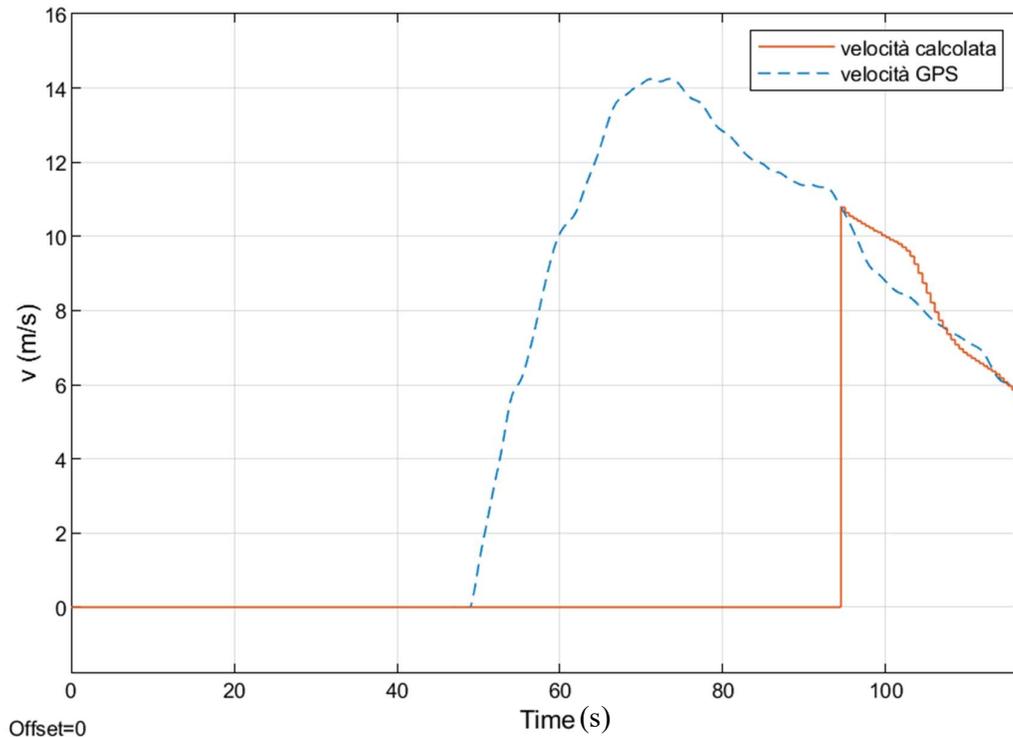
La terza prova di andata dura 117 secondi e mantiene la disposizione della valigetta mostrata in figura 5.6. La figura 5.9 mostra a confronto le tre accelerazioni descritte nel paragrafo 5.1.2. L’algoritmo ha ricavato 6 terzetti accettabili che dopo essere opportunamente mediati sono risultati essere  $k_1 = -0.1370$ ,  $k_2 = 0.9985$  e  $k_3 = -0.0690$  con norma = 1.0102, le soluzioni ricavate anche in questo caso sono molto simili al terzetto teorico di  $k$  ( $k_1 = -0.0174$ ,  $k_2 = 0.9971$  e  $k_3 = -0.0738$ ) anche se  $k_1$  è quello che differisce di più. Questo comportamento è dovuto al fatto che il tratto di moto registrato è relativamente corto e la velocità GPS ha avuto qualche problema di rilevazione.



**Figura 5.9 – Confronto accelerazione GPS, calcolata e teoricamente corretta**

Dalla figura 5.9 risulta più evidente un tratto iniziale giallo che indica un'accelerazione del veicolo, ma è un falso positivo poiché in realtà prima dei 30 secondi l'accelerazione è nulla. Il falso positivo è dovuto al tempo che ci mette il filtro sui dati dell'accelerometro per andare a regime, il quale in quei secondi deve passare da 0 a  $9.81 \left(\frac{m}{s^2}\right)$  e poiché l'accelerometro è leggermente in pendenza di circa 4.33 gradi questo deve compensare quello che sta misurando l'asse y che in realtà è solo accelerazione di gravità.

Applicando la formulazione (70) al secondo 98 si ottiene l'andamento della velocità mostrato in figura 5.10 che è piuttosto simile per quello che si può osservare.

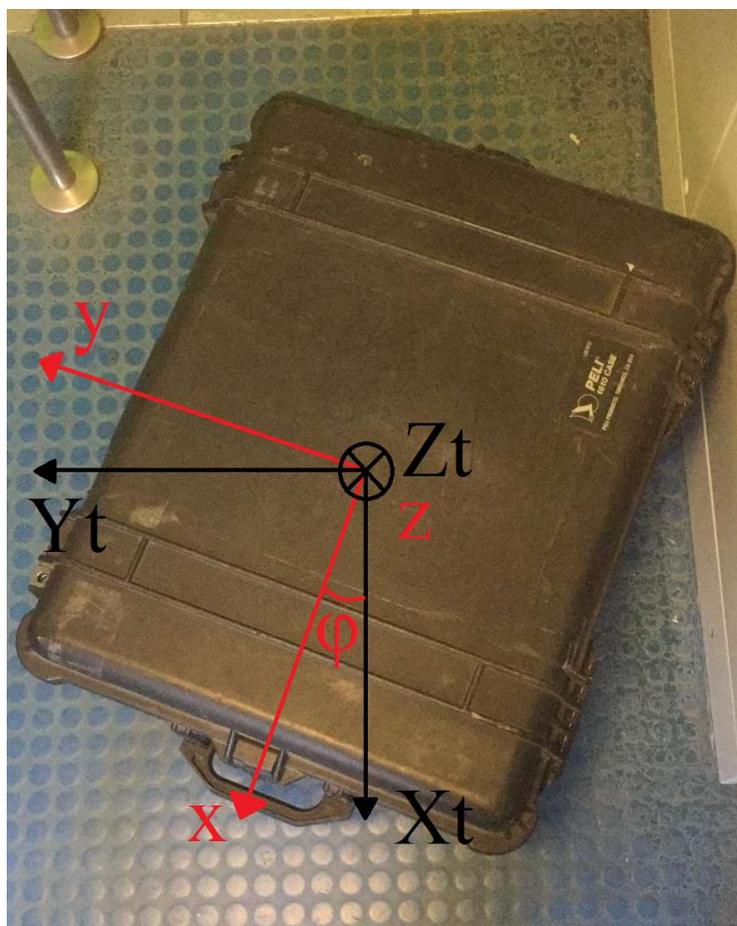


**Figura 5.10 – Confronto velocità calcolata con velocità GPS**

### 5.1.4 Prima prova di ritorno treno regionale Pinerolo-None

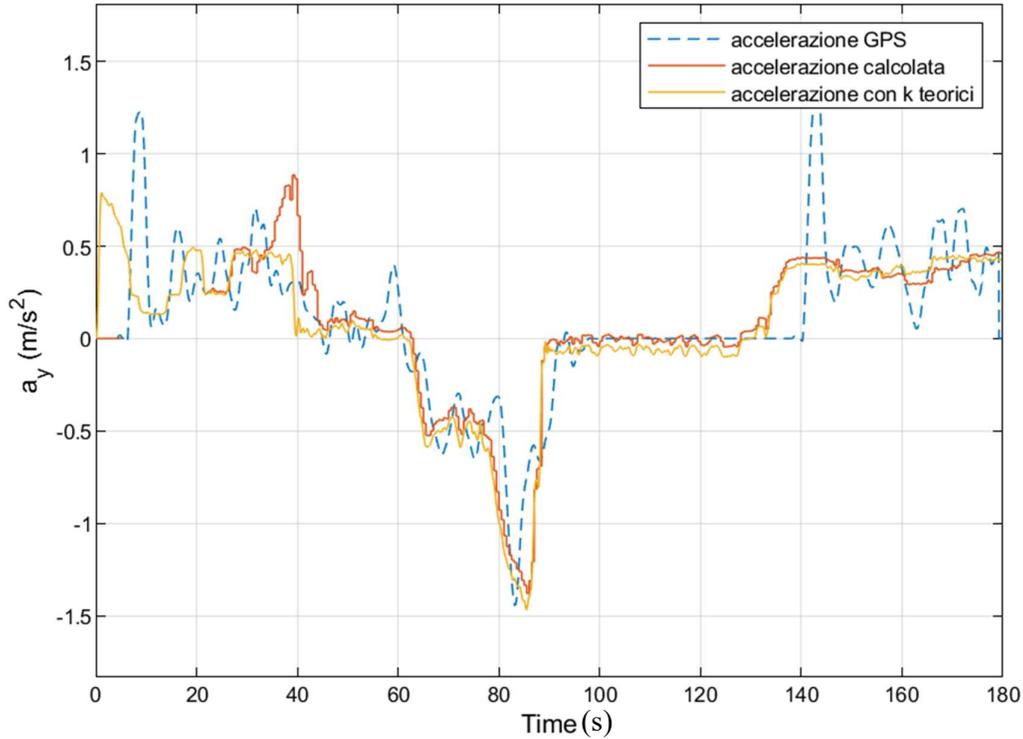
La prima prova di ritorno è durata 180 secondi ed è stata eseguita con una disposizione della valigetta installata volutamente disallineata agli assi cassa mostrata in figura 5.11. Nella figura 5.11 il sistema di riferimento dell'accelerometro ha gli assi di colore rosso, invece quelli della cassa del treno sono di colore nero. In questa disposizione si è cercato di mantenere l'asse z della valigetta coincidente con l'asse z della cassa, invece gli assi x e y sono sfasati di un angolo  $\phi$  che avendo fatto opportune misurazioni corrisponde a 22 gradi.

In questo modo è stato possibile ricavarsi il terzetto dei k teorici che corrisponde a  $k_1 = -0.3745$ ,  $k_2 = 0.9260$  e  $k_3 = -0.0481$ .



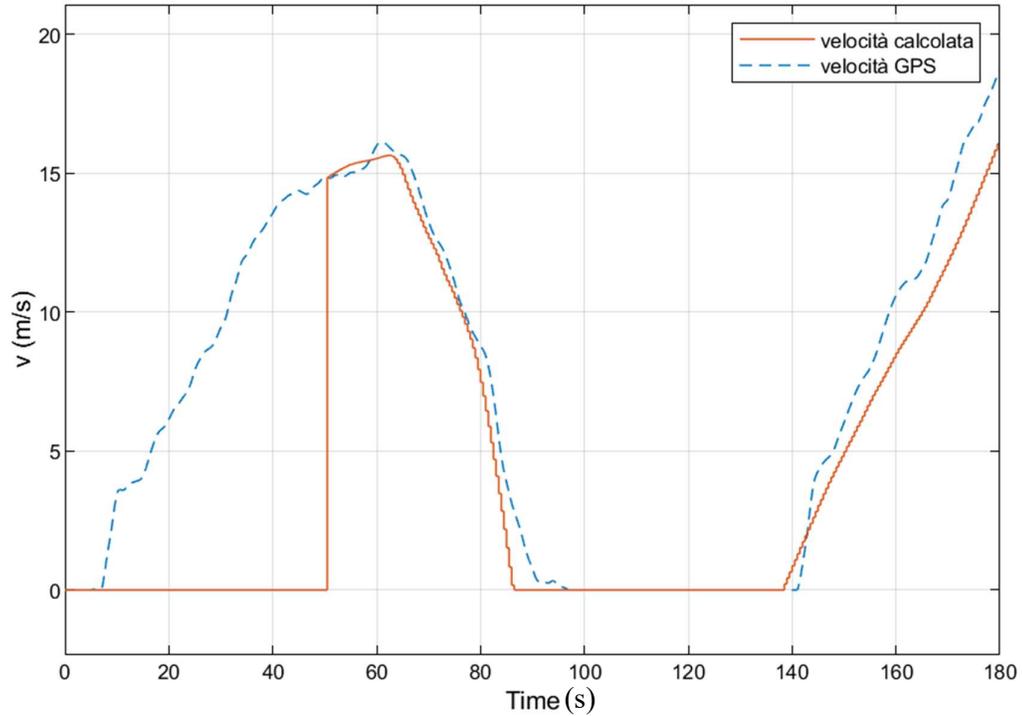
**Figura 5.11 – Valigetta con disposizione disallineata**

Applicando l'algoritmo i terzetti accettabili trovati sono 13 e dopo aver opportunamente mediato le soluzioni il terzetto risultante ha  $k_1 = -0.1846$ ,  $k_2 = 0.9752$  e  $k_3 = -0.0479$  con norma = 0.9937. La figura 5.12 mostra l'andamento delle tre accelerazioni descritte nel paragrafo 5.1.2, da questo grafico si può osservare meglio la ricorsività dell'algoritmo infatti tra il secondo 20 e 45 si nota una discrepanza netta tra l'accelerazione calcolata e l'accelerazione teoricamente corretta dovuta a un terzetto di  $k$  ritenuto accettabile con norma vicino a 1, ma meno delle successive soluzioni ottenute, che hanno grazie la media pesata, sostituito questa discrepanza avvicinando la soluzione il più possibile alla norma 1.



**Figura 5.12 – Confronto accelerazione GPS, calcolata e teoricamente corretta**

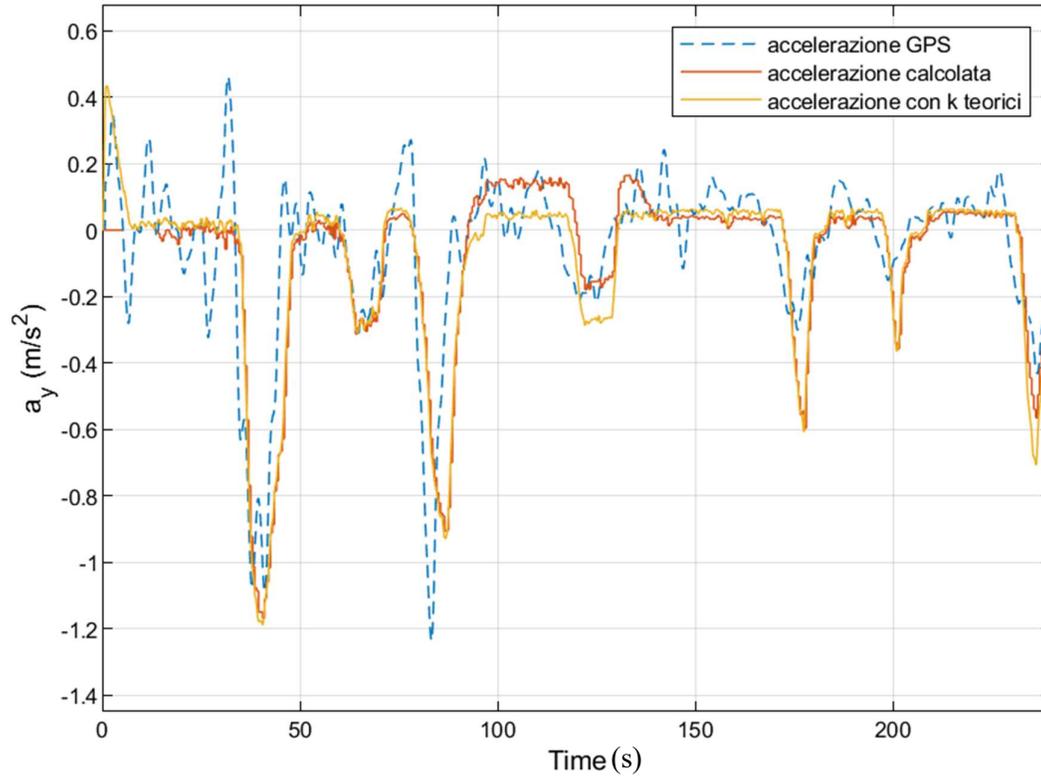
Applicando la formulazione (70) al secondo 50 si ottiene l'andamento della velocità del treno mostrato in figura 5.13 che è molto simile a quello realmente misurato dall'applicazione GPS. Ovviamente per dare maggiore validità alla velocità calcolata si imposta la saturazione  $v \geq 0$ . In questa prova l'algoritmo ha funzionato molto bene poiché la velocità di riferimento ottenuta dall'applicazione è risultata essere più coerente con la realtà dei fatti e quindi meno affetta da errori dovuti alla rilevazione del GPS.



**Figura 5.13 – Confronto velocità calcolata con velocità GPS**

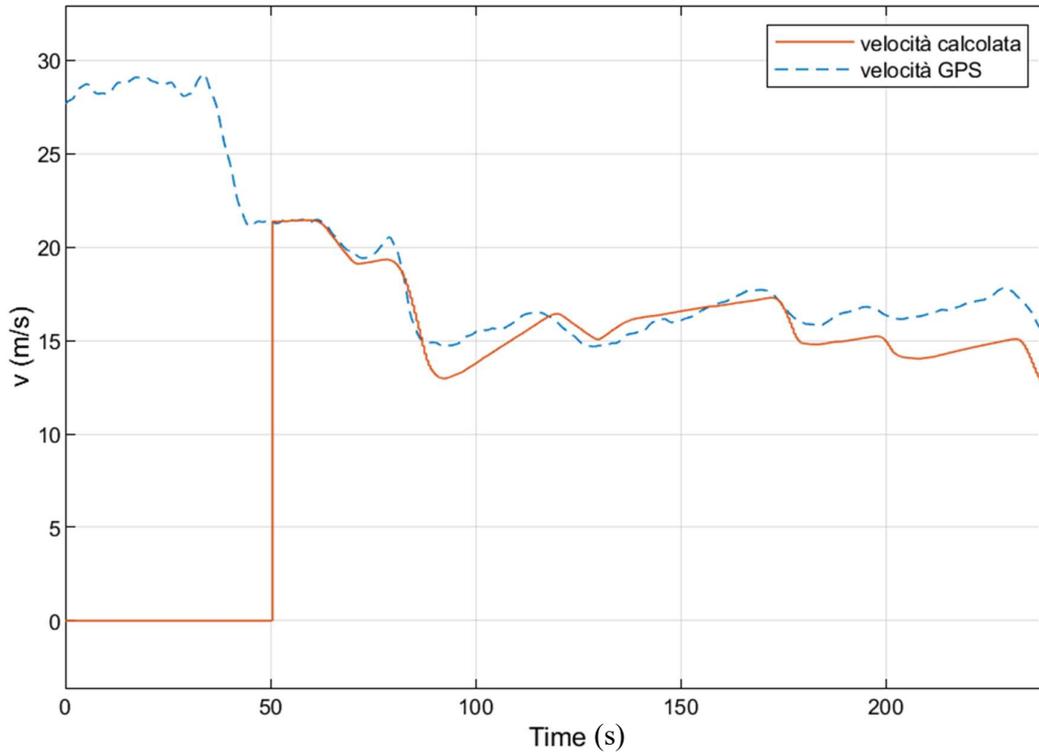
### 5.1.5 Seconda prova di ritorno treno regionale None-Pinerolo

La seconda prova di ritorno dura 240 secondi e mantiene la disposizione della valigetta mostrata in figura 5.11. La figura 5.14 mostra a confronto le tre accelerazioni descritte nel paragrafo 5.1.2. L’algoritmo ha ricavato 25 terzetti accettabili che dopo essere opportunamente mediati sono risultati essere  $k_1 = -0.2254$ ,  $k_2 = 0.7717$  e  $k_3 = -0.0405$  con norma  $=0.8050$ , le soluzioni ricavate anche in questo caso sono molto simili al terzetto teorico di  $k$  ( $k_1 = -0.3745$ ,  $k_2 = 0.9260$  e  $k_3 = -0.0481$ ) tranne per  $k_2$ .



**Figura 5.14 – Confronto accelerazione GPS, calcolata e teoricamente corretta**

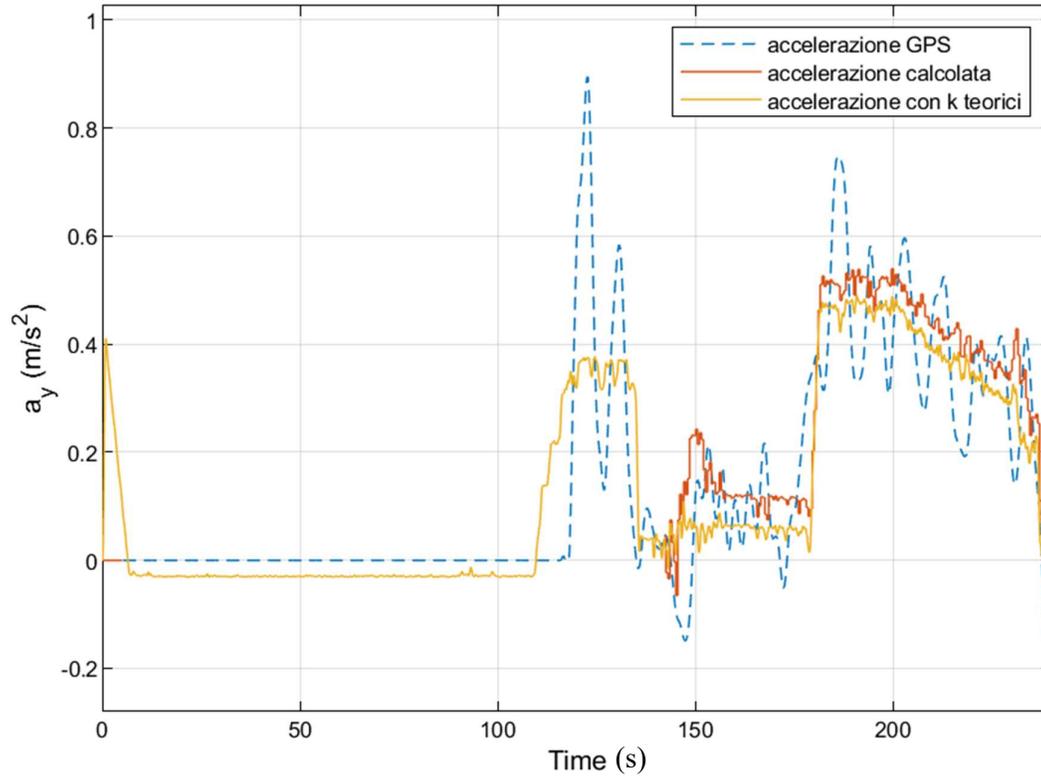
Applicando la formulazione (70) al secondo 50 si ottiene l'andamento della velocità mostrato in figura 5.15 confrontato con quella ottenuta dal GPS, i due andamenti sono simili però più passa il tempo più l'errore tra le due curve si accumula dovuto a delle discrepanze tra accelerazione calcolata e accelerazione GPS.



**Figura 5.15 – Confronto velocità calcolata con velocità GPS**

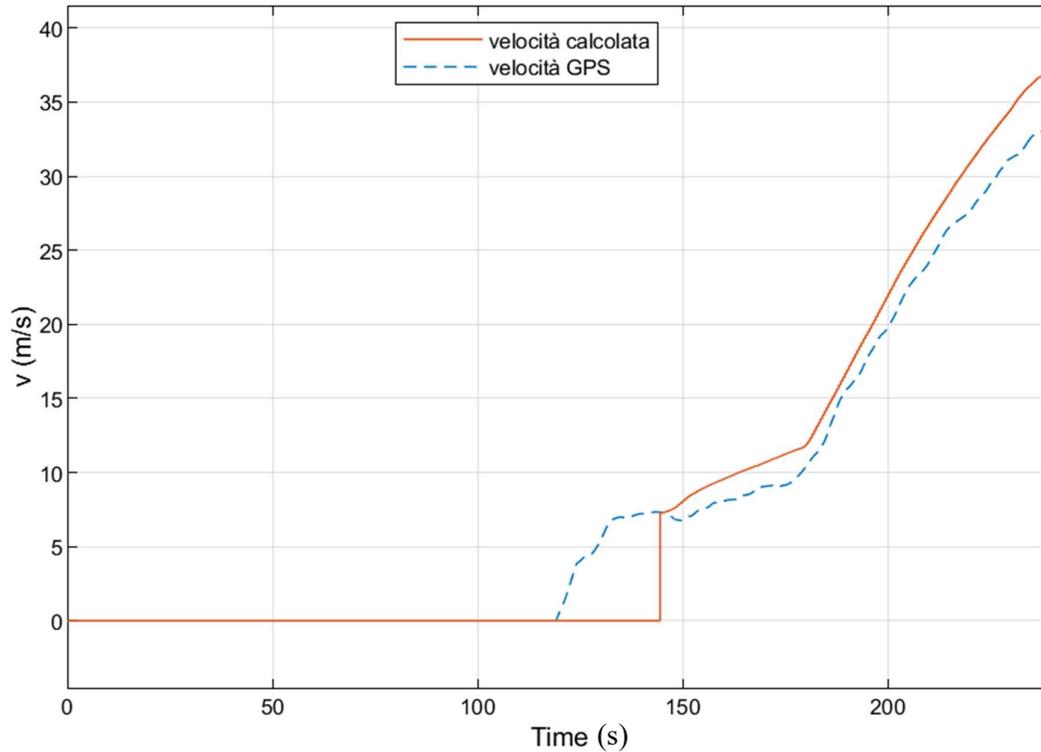
### 5.1.6 Terza prova di ritorno treno regionale None-Pinerolo

La terza prova di ritorno dura 240 secondi e mantiene la disposizione della valigetta mostrata in figura 5.11. La figura 5.16 mostra a confronto le tre accelerazioni descritte nel paragrafo 5.1.2. L'algoritmo ha ricavato 3 terzetti accettabili che dopo essere opportunamente mediati sono risultati essere  $k_1 = -0.7103$ ,  $k_2 = 0.7578$  e  $k_3 = -0.0293$  con norma = 1.0391, le soluzioni ricavate non sono simili al terzetto teorico di  $k$  ( $k_1 = -0.3745$ ,  $k_2 = 0.9260$  e  $k_3 = -0.0481$ ) questo perché l'accelerazione GPS è troppo instabile per essere considerata come riferimento e il tratto di moto del treno è troppo corto.



**Figura 5.16 – Confronto accelerazione GPS, calcolata e teoricamente corretta**

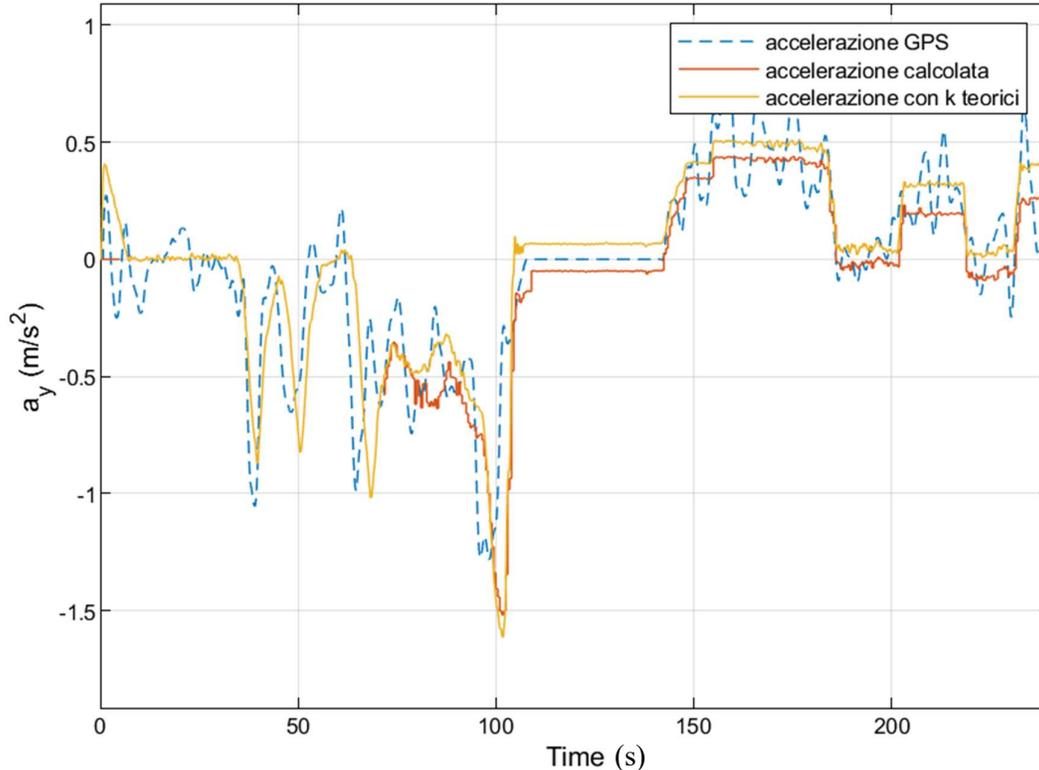
Applicando la formulazione (70) al secondo 144 si ottiene l'andamento della velocità mostrato in figura 5.17 confrontato con quella ottenuta dal GPS, i due andamenti sono simili però il terzetto dei  $k$  ricavato non può essere considerato statisticamente accettabile dovuto alle condizioni della prova.



**Figura 5.17 – Confronto velocità calcolata con velocità GPS**

### 5.1.7 Quarta prova di ritorno treno regionale None-Pinerolo

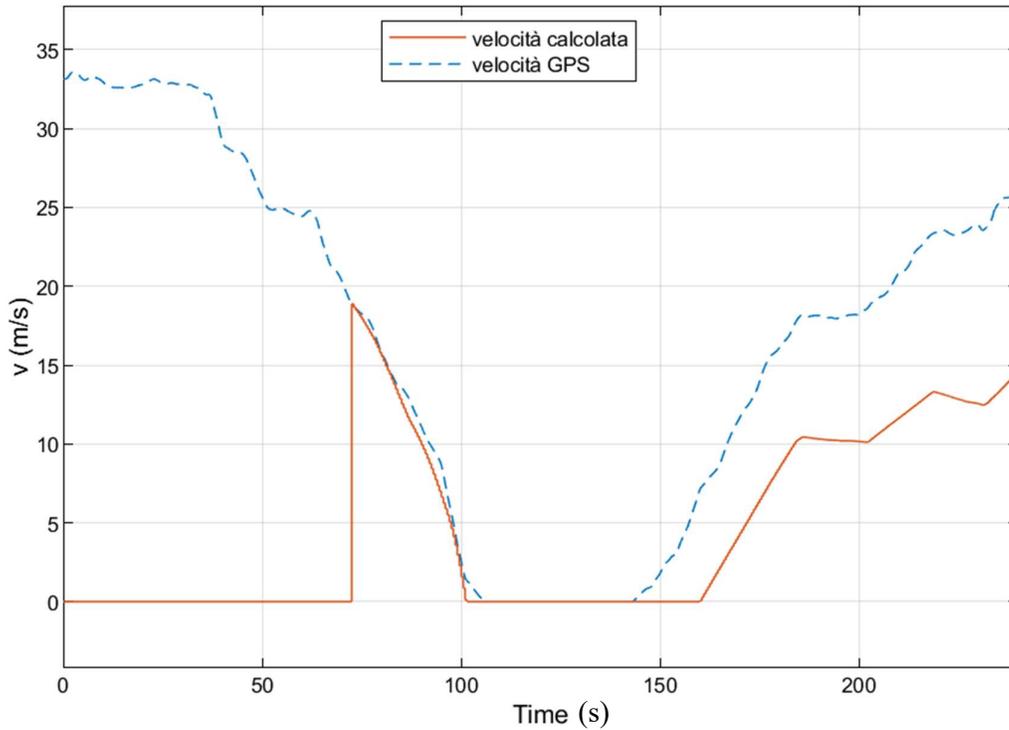
La seconda prova di ritorno dura 240 secondi e mantiene la disposizione della valigetta mostrata in figura 5.11. La figura 5.18 mostra a confronto le tre accelerazioni descritte nel paragrafo 5.1.2. L'algoritmo ha ricavato 24 terzetti accettabili che dopo essere opportunamente mediati sono risultati essere  $k_1 = 0.0585$ ,  $k_2 = 0.9870$  e  $k_3 = -0.0648$  con norma = 0.9909, le soluzioni ricavate sono simili al terzetto teorico di  $k$  ( $k_1 = -0.3745$ ,  $k_2 = 0.9260$  e  $k_3 = -0.0481$ ) tranne per  $k_1$  che è quello più diverso, questo perché non è stato individuato correttamente dall'algoritmo e quindi la velocità calcolata risentirà di un errore maggiore se viene utilizzata come velocità di riferimento per più tempo. L'algoritmo però segue comunque l'andamento dell'accelerazione di riferimento.



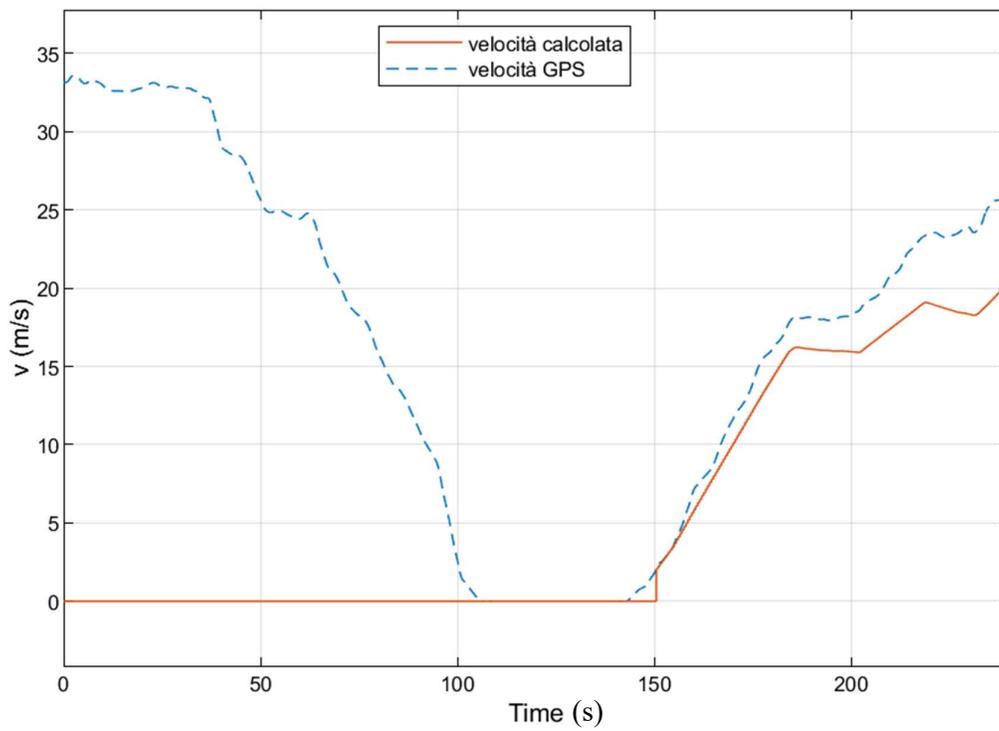
**Figura 5.18 – Confronto accelerazione GPS, calcolata e teoricamente corretta**

Infatti, per dimostrarlo si applica la formula (70) al secondo 72 in figura 5.19 e poi al secondo 150 in figura 5.20 e si può notare come nella figura 5.19 dopo i 150 secondi l'andamento della velocità pur essendo simile, è sbagliato.

Invece se si osserva la figura 5.20 in cui la velocità calcolata dal secondo 150 l'andamento seguito è molto più verosimile. Inoltre, fino alla diciottesima soluzione i  $k$  mediati erano questi  $k_1 = -0.2927$ ,  $k_2 = 0.9649$  e  $k_3 = -0.0579$ , che sarebbero stati più corretti rispetto a quelli finali, ma tutto dipende dalla precisione della velocità di riferimento che in quei punti successivi ha fatto rilevare delle soluzioni con norma molto vicina a 1 e che hanno influenzato con più peso la media. Probabilmente con un tratto più lungo o con una velocità più precisa sicuramente l'algoritmo risponderebbe meglio.



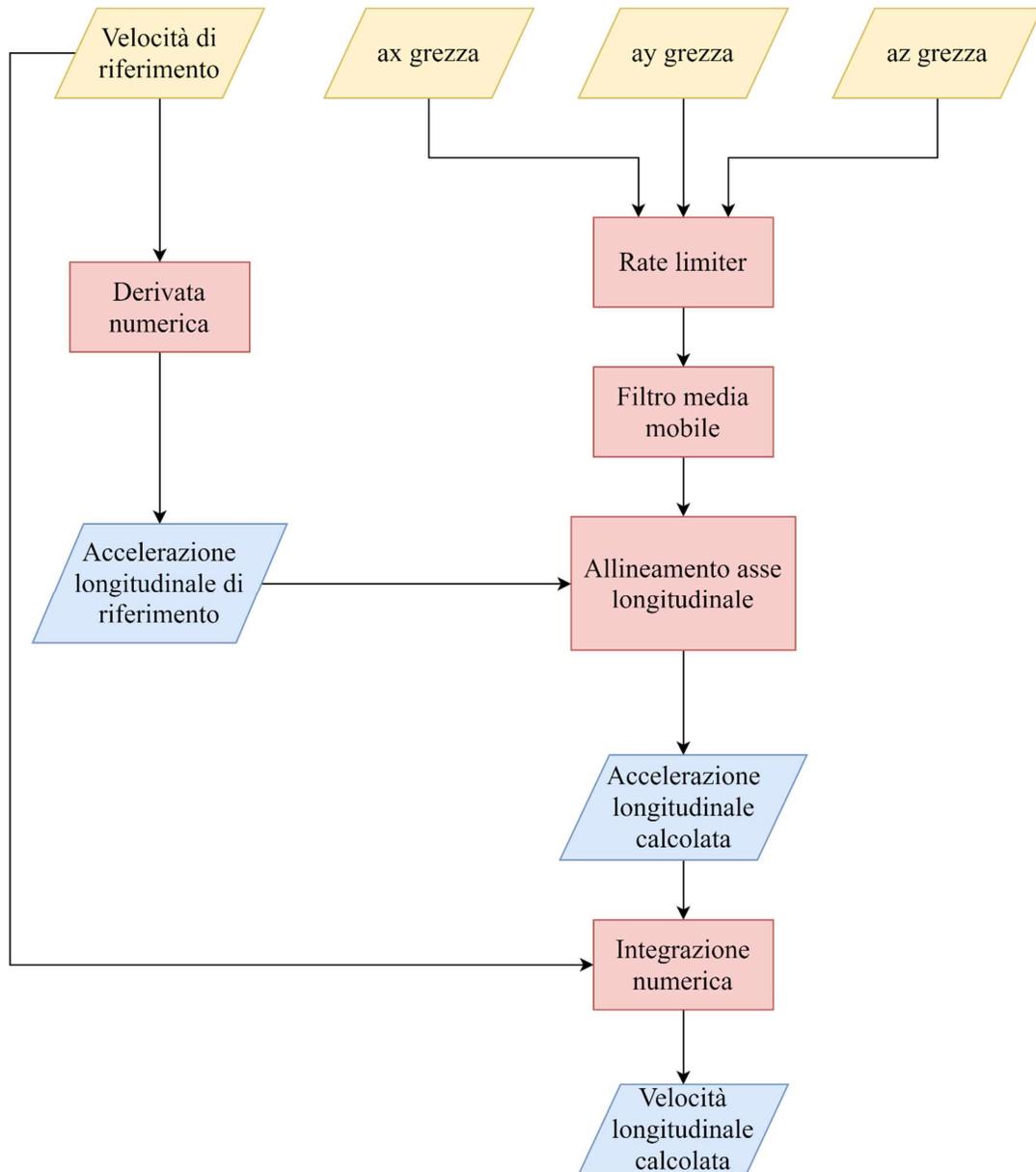
**Figura 5.19 – Confronto velocità calcolata con velocità GPS**



**Figura 5.20 – Confronto velocità calcolata con velocità GPS**

## 5.2 Algoritmo

Effettuati i test operativi dell'algoritmo con le prove descritte nel paragrafo 5.1, questo paragrafo sintetizza tutti i passaggi che esegue la versione finale dell'algoritmo con il diagramma a blocchi mostrato in figura 5.21.

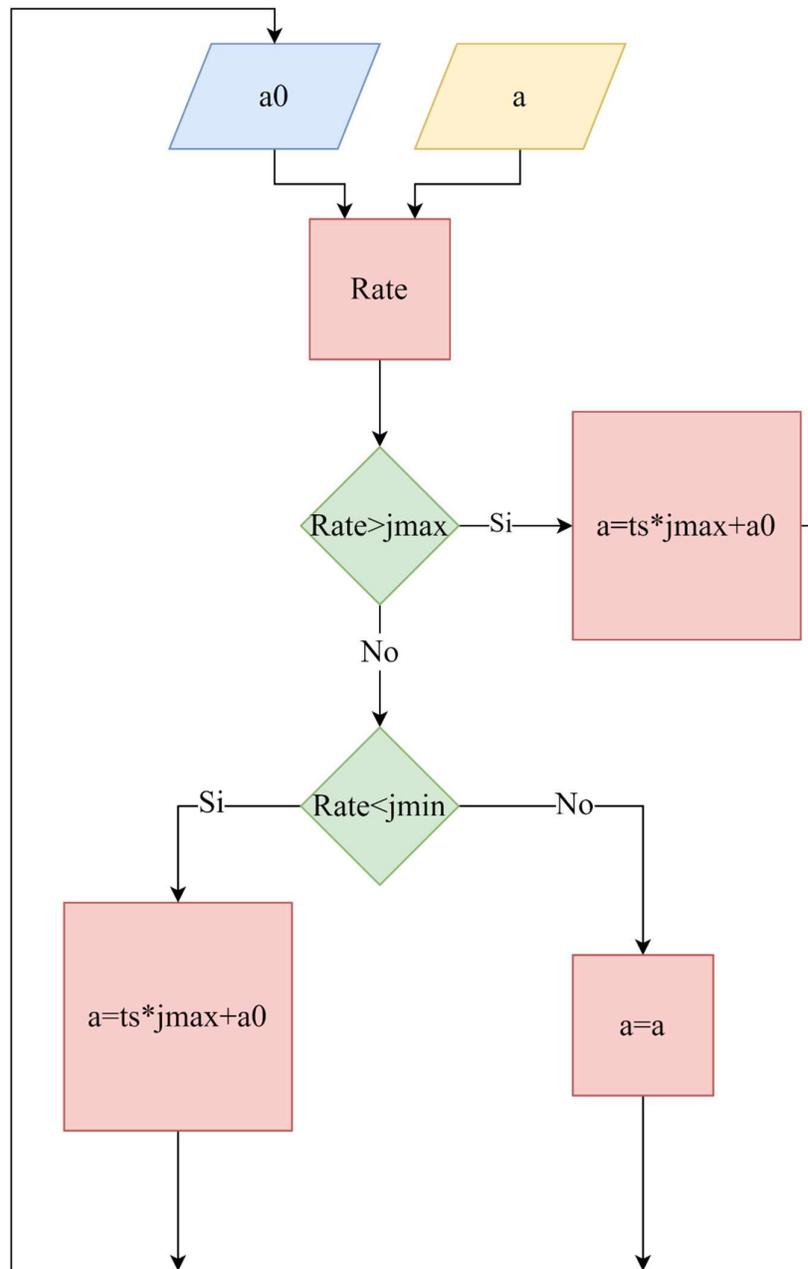


**Figura 5.21 – Diagramma a blocchi dell'algoritmo**

Gli input dell'algoritmo sono:

- Le misure di accelerazione di un accelerometro triassiale;
- Velocità di riferimento;
- Range di parametri per gli errori di montaggio dell'accelerometro.

I blocchi Rate limiter e Filtro media mobile sono i blocchi che si occupano di filtrare i segnali da vibrazioni e rumore di fondo.



**Figura 4.18 – Diagramma a blocchi del Rate limiter**

Il blocco Rate limiter è rappresentabile dal diagramma a blocchi mostrato in figura 4.18. Questo viene applicato a ogni asse dell'accelerometro nello stesso modo quindi inserendo la massima accelerazione longitudinale permessa  $a_{max}$  e la massima decelerazione longitudinale permessa  $d_{max}$  dal treno per un certo intervallo di tempo di riferimento  $t_v$ , è possibile ricavare il jerk massimo e minimo con le formulazioni (46) e (47).

$$j_{max} = \frac{a_{max}}{t_v} \quad (46) \quad j_{min} = \frac{d_{max}}{t_v} \quad (47)$$

Il Rate limiter è uno strumento ricorsivo creato per migliorare il segnale utilizzando la dinamica del veicolo conosciuta. Questo ha come input:

- $a_0$  l'accelerazione di un asse dell'istante precedente;
- $a$  l'accelerazione misurata da un asse dell'istante corrente.

queste due accelerazioni vengono processate nel blocco Rate con l'equazione (48)

$$Rate = \frac{a - a_0}{ts} \quad (48)$$

In cui  $ts$  è il tempo di campionamento del segnale e quindi è anche l'intervallo di tempo che intercorre tra il valore corrente e il precedente.

Calcolato il Rate per l'istante corrente si possono verificare tre situazioni:

4.  $Rate > j_{max}$  perciò si limita il valore da considerare come accelerazione corrente ad

$$a = ts * j_{max} + a_0 \quad (49)$$

5.  $Rate < j_{min}$  quindi si limita il valore da considerare come accelerazione corrente ad

$$a = ts * j_{min} + a_0 \quad (50)$$

6.  $j_{min} \leq Rate \leq j_{max}$  allora il valore corrente della misura risulta accettabile per la dinamica del veicolo e

$$a = a \quad (51)$$

Il valore uscente di  $a$  ottenuto dalle formulazioni (49), (50) o (51) viene utilizzato come valore  $a_0$  per il ciclo successivo.

Ottenuti i valori di accelerazione limitati per ogni asse questi vengono processati nel blocco Filtro media mobile. Si è scelta la media mobile come tipologia di filtro per la sua semplicità nel calcolo e poiché il segnale limitato risultava già abbastanza buono per essere processato. Il filtro è completamente parametrico e impostabile secondo le esigenze, esso esegue una media aritmetica mobile degli ultimi  $n$  valori precedenti a quell'istante, in cui il valore corrente segue la formulazione (45)

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad (45)$$

Per i casi presi in esame gli  $n$  valori sono 20 e questi sono suddivisi per un periodo di tempo di 0.5 secondi in modo da non creare un eccessivo ritardo del segnale rispetto alla dinamica del veicolo, con questi parametri si ha un valore di accelerazione filtrata ogni 25 (ms).

Il blocco Allineamento asse longitudinale è quello che compensa errori dovuti all'installazione dell'accelerometro, esso ha come input:

- I tre segnali di accelerazione limitati e filtrati ottenuti dall'accelerometro
- L'accelerazione longitudinale di riferimento, ottenuta da una derivazione numerica del segnale di velocità di riferimento.

La derivazione numerica della velocità di riferimento viene fatta con la relazione (71)

$$a_{ri} = \frac{v_{ri} - v_{ri-1}}{\Delta t} \quad (71)$$

In cui:

- $a_{ri}$  è l'accelerazione longitudinale di riferimento dell'istante corrente;

- $v_{ri}$  è la velocità di riferimento dell'istante corrente;
- $v_{ri-1}$  è la velocità di riferimento dell'istante precedente;
- $\Delta t$  è il tempo che intercorre tra  $v_{ri}$  e  $v_{ri-1}$ .

Questo blocco sfrutta la relazione (19) descritta nel paragrafo 3.3

$$Rot^{-1} * \begin{bmatrix} a_{xs} \\ a_{ys} \\ a_{zs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xr} \\ a_{yr} \\ a_{zr} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Dove:

- $Rot^{-1}$  è l'inversa della matrice di rotazione che serve per descrivere l'orientamento diverso dell'accelerometro rispetto alla cassa del treno;
- $a_{xs}$ ,  $a_{ys}$  e  $a_{zs}$  sono i segnali delle tre accelerazioni misurate dall'accelerometro triassiale disallineate dagli assi cassa;
- $a_{xr}$ ,  $a_{yr}$  e  $a_{zr}$  sono i segnali delle tre accelerazioni misurate dall'accelerometro triassiale allineate agli assi cassa.

In cui con la seconda componente della moltiplicazione tra matrice 3x3 e vettore colonna 3x1 si ottiene l'equazione (39)

$$k_1 * a_{xs} + k_2 * a_{ys} + k_3 * a_{zs} = a_{yr} \quad (39)$$

$k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  sono gli elementi  $R_{12}$ ,  $R_{22}$  e  $R_{32}$  della matrice  $Rot^{-1}$ . Applicando l'equazione (39) per diversi momenti si può costruire un sistema di tre equazioni in tre incognite (40). Questo sistema è risolvibile applicando Cramer, ottenendo i tre coefficienti  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  in modo da potersi ricavare l'accelerazione longitudinale del treno  $a_{yr}$ , quando sono disponibili solo le misure dell'accelerometro triassiale.

$$\begin{cases} k_1 * a_{xs1} + k_2 * a_{ys1} + k_3 * a_{zs1} = a_{yr1} \\ k_1 * a_{xs2} + k_2 * a_{ys2} + k_3 * a_{zs2} = a_{yr2} \\ k_1 * a_{xs3} + k_2 * a_{ys3} + k_3 * a_{zs} = a_{yr3} \end{cases} \quad (40)$$

Per costruire il sistema (40) l'algoritmo ha bisogno di registrare  $a_{xs}$ ,  $a_{ys}$ ,  $a_{zs}$  e  $a_{yr}$  con una dovuta distanza in modo da ottenere dei coefficienti che considerino delle

finestre temporali più lunghe. Si è deciso di registrare in modo ricorsivo gli ultimi 20 punti di ogni elemento, distanziati tra loro di 0.5 secondi, in modo da poter costruire il sistema (40) considerando il frame corrente per la terza equazione, quello di 5 secondi prima per la seconda equazione e quello di 10 secondi precedenti per la prima equazione. Questi tempi di registrazione sono ovviamente modificabili, e determinano anche il periodo di funzionamento dell'algoritmo. Infatti, avendo a disposizione dei nuovi dati ogni 0.5 secondi conviene utilizzare l'algoritmo con un periodo  $\geq 0.5$  (s) poiché se avesse un periodo minore, l'algoritmo ripeterebbe la stessa operazione ed otterrebbe lo stesso risultato.

$Rot$  e  $Rot^{-1}$  sono matrici di orientazione descritte da tre rotazioni elementari con la relazione (16) nel paragrafo 2.2, il significato fisico dei tre coefficienti  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  è quello di un versore, perciò la loro norma quadra deve essere uguale a 1. Ovviamente adoperando dati reali la norma non potrà mai essere esattamente 1, ma bisogna imporre un criterio di scelta di soluzioni che abbia la norma più vicina possibile a 1. Questo criterio è costruito con una media pesata dei terzetti di soluzioni dei coefficienti  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  in cui ogni peso è definito dalla relazione (52)

$$peso_i = \frac{1}{|1 - norma_i|^{esp}} \quad (52)$$

dove  $esp$  è l'esponente da attribuire ai pesi e la loro norma  $i$ -esima è descritta dalla relazione (53)

$$norma_i = \sqrt{k_{1i}^2 + k_{2i}^2 + k_{3i}^2} \quad (53)$$

Inoltre, il  $peso_i$  viene calcolato solo per le soluzioni accettabili.

I terzetti di  $k$  si ritengono accettabili solo se:

1. La norma del terzetto nell'istante non è nulla o NaN;
2.  $k_{1_{min}} \leq k_{1_i} \leq k_{1_{max}}$ ;
3.  $k_{2_{min}} \leq k_{2_i} \leq k_{2_{max}} \vee -k_{2_{max}} \leq k_{2_i} \leq -k_{2_{min}}$ ;
4.  $k_{3_{min}} \leq k_{3_i} \leq k_{3_{max}}$ .

$k_{1_{min}}, k_{1_{max}}, k_{2_{min}}, k_{2_{max}}, k_{3_{min}}, k_{3_{max}}$ , sono ottenuti da una funzione eseguita prima di avviare l'algoritmo in cui inserendo i possibili range di montaggio come rotazioni intorno a ogni asse dell'accelerometro, vengono testate le possibili soluzioni, costruendo la matrice *Rot* per ogni combinazione dei tre angoli  $\vartheta$ ,  $\psi$  e  $\phi$  ma variabili di 10 in 10 per non appesantire la capacità di calcolo e dopo aver trovato il minimo e il massimo di ogni  $k$  queste vengono maggiorate o minorate di 0.2 per essere sicuri di non escludere delle soluzioni accettabili. Inoltre, se nel range inserito c'è un numero non multiplo di 10, questo verrà approssimato al primo multiplo di 10 successivo che non escluda il valore in considerazione, per esempio se viene inserito 31° sull'asse x, il range che verrà considerato sarà 40°. Questa funzione sui range può essere utilizzata solo se si è sicuri che l'asse y dell'accelerometro sia la predominante nelle misurazioni di accelerazione lungo la direzione del verso di marcia, cosa che è facilmente verificata poiché si cerca di montare l'accelerometro correttamente se pur con qualche variazione di pochi gradi rispetto agli assi cassa. Questa condizione di utilizzo è dovuta alla terza condizione di accettabilità di soluzioni che considera l'adoperabilità del treno di viaggiare sia in un verso di marcia principalmente concorde all'asse y positivo del sensore sia in un verso di marcia opposto, ma comunque predominante sull'asse y negativo dell'accelerometro.

Quindi quando si verificano le condizioni di accettabilità i tre coefficienti  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  vengono elaborati in modo ricorsivo adoperando i seguenti sei passaggi:

1. Trovato il terzetto accettabile di  $k$  viene calcolato il  $peso_i$  con la relazione (52);
2. Si moltiplicano rispettivamente  $k_{1i} * peso_i$  (57)  $k_{2i} * peso_i$  (58) e  $k_{3i} * peso_i$  (59);
3. I valori calcolati nelle relazioni (57), (58) e (59) vanno aggiunti a quelli del precedente ciclo con le formulazioni (60), (61) e (62)

$$sumk1 = sumk1 + k_{1i} * peso_i \quad (60)$$

in cui  $sumk1$  per l'istante preso in considerazione corrisponde a  $k_{1i-1} * peso_{i-1}$  più quelli dei precedenti cicli e analogamente per le relazioni (61) e (62)

$$sumk2 = sumk2 + k_{2i} * peso_i \quad (61)$$

$$sumk3 = sumk3 + k_{3i} * peso_i \quad (62)$$

4. Poi attraverso la relazione (63) il peso viene sommato in modo ricorsivo

$$peso = peso + peso_i \quad (63)$$

in cui  $peso$  per l'istante preso in considerazione corrisponde alla somma di tutti i  $peso_i$  dei cicli precedenti;

5. Infine, si ottiene il terzetto mediato dei  $k$  con le relazioni (64) (65) e (66)

$$k_1 = \frac{sumk1}{peso} \quad (64)$$

$$k_2 = \frac{sumk2}{peso} \quad (65)$$

$$k_3 = \frac{sumk3}{peso} \quad (66)$$

In questo modo si può eseguire questo tipo di algoritmo tantissime volte dovendo conservare in memoria solo quattro valori in più per effettuare la media pesata. Inoltre, è previsto anche un criterio di stop di ricerca dei terzetti che corrisponde a un contatore di soluzioni accettabili ricavate, impostabile facilmente tramite un parametro. Questo contatore indica il numero di soluzioni necessarie per ritenere il terzetto mediato finale statisticamente valido.

Ottenuta l'accelerazione longitudinale calcolata del diagramma a blocchi in figura 5.21 viene fatta un'integrazione numerica con la relazione (70) per ottenere la velocità longitudinale calcolata

$$v = v_0 + a_{calc} * t_f \quad (70)$$

In cui:

- $v$  è la velocità longitudinale calcolata del treno;
- $v_0$  è la velocità di riferimento del treno dell'istante iniziale, che corrisponde al frame precedente rispetto a quello in cui viene rilevato lo slinding delle ruote;
- $a_{calc}$  è l'accelerazione calcolata dall'algorithm ottenuta dalla formula (39) con i coefficienti  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  mediati fino a quell'istante;
- $t_f$  è la periodicità di esecuzione dell'algorithm che per i casi esaminati corrisponde a 0.5 (s).

Infine, in figura 5.22 viene mostrata una panoramica dei blocchi simulink dell'algorithm descritto.

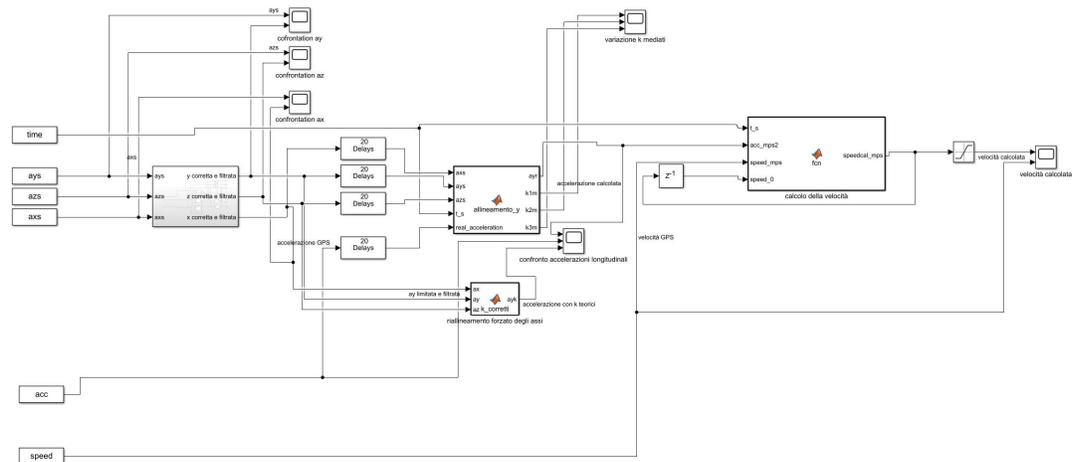
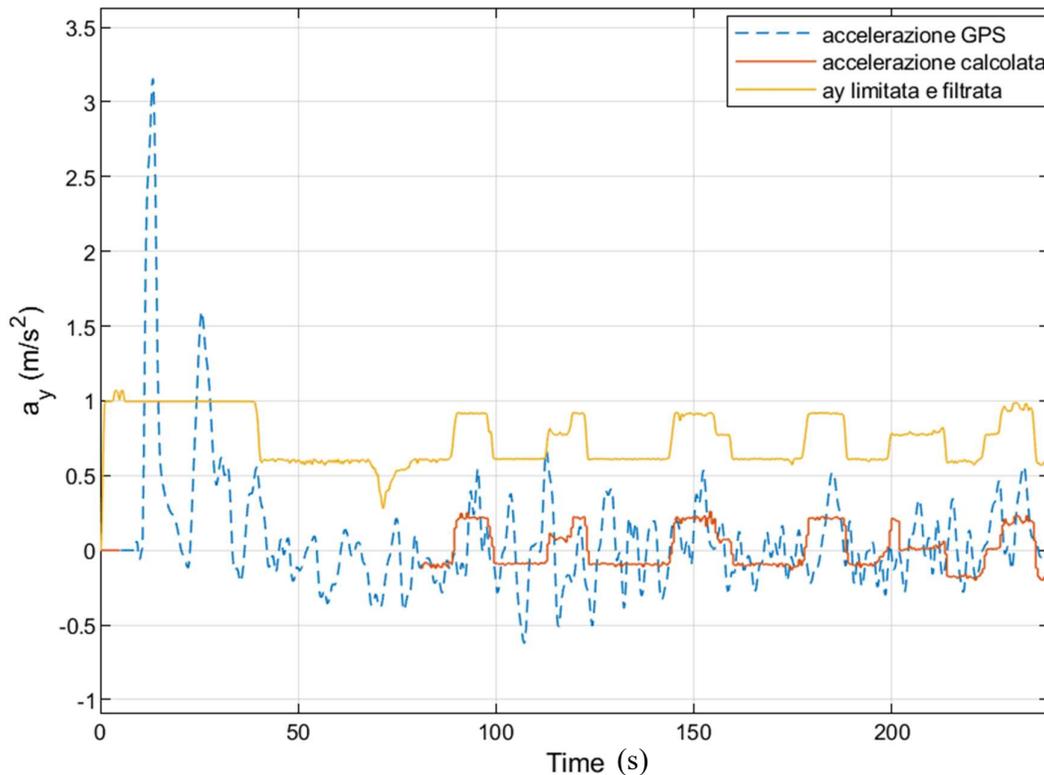


Figura 5.22 – Panoramica dei blocchi simulink dell'algorithm

## 5.3 Analisi complessiva dell'utilità dell'argomento di tesi

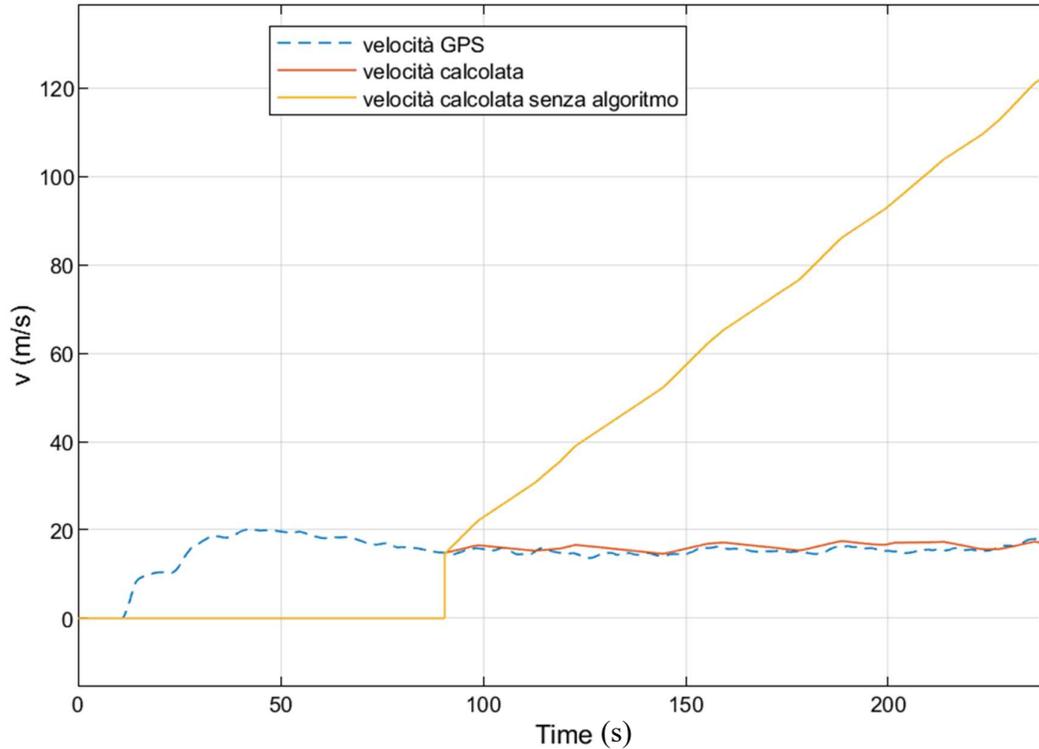
Per evidenziare l'utilità dell'algorithm si sono confrontati i dati di alcune prove descritte nel paragrafo 5.1 con e senza l'uso dell'algorithm. Per la figura 5.23 si utilizzano i dati provenienti dalla seconda prova di andata del paragrafo 5.1.2 che ha una disposizione del dispositivo mostrata in figura 5.6. In cui le tre accelerazioni confrontate sono:

- L'accelerazione del treno ottenuta dal GPS, tratteggiata in blu;
- L'accelerazione del treno calcolata adoperando l'intero algoritmo, in rosso;
- Il segnale di accelerazione appartenente all'asse y dell'accelerometro dopo averlo limitato con il rate limiter e filtrato con media mobile, che si è cercato di posizionare allineato all'asse longitudinale del treno, rappresentato dalla linea gialla continua.



**Figura 5.23 – Confronto accelerazione GPS, calcolata e solo limitata e filtrata**

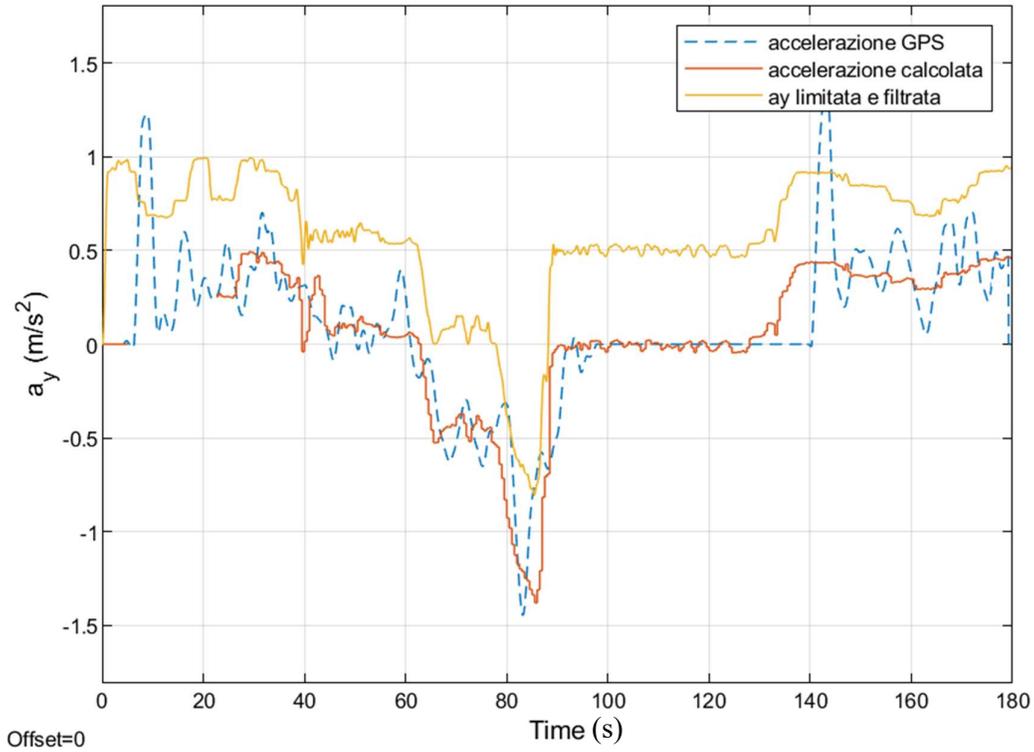
Come si può osservare dalla figura 5.23 il segnale giallo in cui non viene applicato l'algoritmo presenta un andamento simile rispetto all'accelerazione calcolata con l'algoritmo, ma spostato di un offset, dovuto a una piccola pendenza del dispositivo rispetto alla cassa del treno. Questo errore che può sembrare minimo riportato sulla velocità di riferimento diventa enorme, infatti nella figura 5.24 si può notare che applicando la relazione (70) per ricavare la velocità ma utilizzando l'accelerazione lungo l'asse longitudinale non elaborata dall'algoritmo, l'andamento è completamente sbagliato.



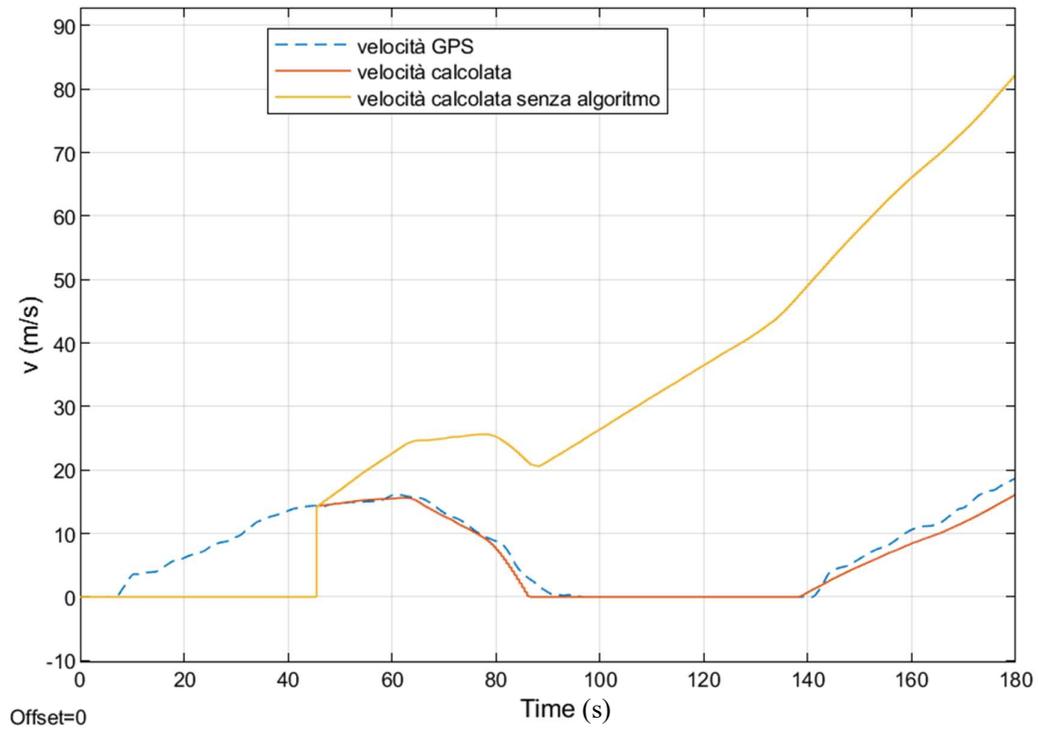
**Figura 5.24 – Confronto velocità GPS, calcolata e senza algoritmo**

Nella figura 5.25 invece si prendono i dati della prima prova di ritorno descritta nel paragrafo 5.1.4 che ha la disposizione del dispositivo mostrata in figura 5.11.

Anche in questa figura come nella 5.23 l'andamento tra l'accelerazione calcolata dall'algoritmo e quella solo limitata e filtrata sono molto simili, ma presentano un offset. Anche in questo caso andando a calcolare la velocità con la relazione (70) nella figura 5.26, il piccolo offset tra le due accelerazioni si trasforma in un grosso errore che fa sbagliare completamente l'andamento della velocità longitudinale del treno.



**Figura 5.25 – Confronto accelerazione GPS, calcolata e solo limitata e filtrata**



**Figura 5.26 – Confronto velocità GPS, calcolata e senza algoritmo**

## 5.4 Conclusioni

Si può affermare che dopo i test sul campo effettuati l'algoritmo abbia risposto piuttosto bene e che probabilmente si potrebbero eseguire dei miglioramenti sui criteri di scelta e di trattamento delle soluzioni dei terzetti dei coefficienti  $k$ .

Inoltre, si è potuto constatare che la validità dell'algoritmo sia fortemente correlata al segnale di velocità di riferimento da utilizzare. In aggiunta per ottenere delle soluzioni statisticamente accettabili c'è bisogno di adoperare l'algoritmo per tempi più lunghi cosicché si possa saturare il numero di soluzioni.

Infine, vorrei aggiungere che l'intero problema dell'allineamento non esatto tra accelerometro e assi cassa del treno potrebbe essere evitato, eseguendo un installazione del dispositivo calibrata, ma probabilmente oltre a essere più costosa potrebbe risentire di altri tipi di problemi. Quindi questo lavoro di tesi può essere utile all'azienda per implementare un dispositivo che riesca adeguatamente a stimare la velocità longitudinale del treno, e che non risenta dello sliding in modo da controllare meglio i dispositivi frenanti.

## 6 Bibliografia

Faiveley Transport Italia 2006. Sistemi di Controllo del Freno Ferroviario.  
Railway Brake Control Systems.

Bosch Sensortec GmbH. Data Sheet BST-BMI055-DS000-08 Revision 1.2 July  
2014.

Brevetto competitor: Patent Application Publication No: US 2019/0043277 A1 (7  
Feb 2019)

## 7 Sitografia

Kalman Filter: [https://it.wikipedia.org/wiki/Filtro\\_di\\_Kalman](https://it.wikipedia.org/wiki/Filtro_di_Kalman)

Signal smoothing: <https://it.mathworks.com/help/signal/examples/signal-smoothing.html#SignalSmoothingExample-6>

Applicazione GPS Speed:

<https://play.google.com/store/apps/details?id=luo.gpsspeed&hl=it>

Angoli di orientazione di un vettore in tre dimensioni

<https://www.youmath.it/lezioni/algebra-lineare/matrici-e-vettori/691-vettori-e-versori.html>