

# POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di laurea magistrale

## **Studio di algoritmi per la diagnostica di difetti di ruote per veicoli ferroviari merci**

**Docente:**

Prof. Aurelio Somà

**Candidato:**

Federico Sartori

Matricola 262814

Anno Accademico 2020/2021

## Sommario

1	Introduzione .....	7
2	Il sistema di monitoraggio.....	9
3	Wheel flat.....	13
3.1	Modello teorico adottato .....	17
3.2	Valore efficace .....	23
3.3	Approccio di rilevamento guasto.....	23
3.4	Analisi segnali di accelerazione.....	24
3.5	Tasso di rilevamento.....	29
3.6	Analisi del valore efficace di accelerazione stima del difetto.....	31
3.7	Modello Simulink .....	36
4	Analisi contenuto in frequenza dei segnali di accelerazione teorici.....	44
4.1	Onda quadra .....	48
4.2	Effetto scalatura onda quadra .....	49
4.3	Scalatura onda triangolare .....	52
4.4	Analisi segnale complesso al variare del difetto.....	55
4.5	Analisi del segnale a una nuova velocità di riferimento al variare del difetto .....	59
4.6	Confronto con dati sperimentali.....	63
5	Algoritmo di rilevamento sviluppato .....	65
5.1	Trigger di Schmitt.....	65
5.2	Descrizione dell'algoritmo .....	66
6	Simulazione variazione di velocità.....	73
6.1	Rilevamento entità difetto tramite algoritmo.....	80
7	Possibili miglioramenti del modello .....	87
8	Conclusioni.....	96
	Bibliografia.....	98

## Indice delle figure

Figura 1 Sistema di monitoraggio installato su carro merci intermodale Sggmrs 90.....	9
Figura 2 approccio sistematico.....	9
Figura 3 central station.....	10
Figura 4 axel box diagram.....	11
Figura 5 caratteristiche sistema di acquisizione.....	11
Figura 6 moto della ruota con wheel flat .....	13
Figura 7 schema della ruota .....	14
Figura 8 traiettoria del centro ruota.....	15
Figura 9 forme del moto.....	16
Figura 10 $l = 60 \text{ mm}$ $v = 40 \text{ km/h}$ .....	17
Figura 11 $l = 60 \text{ mm}$ $v = 40 \text{ km/h}$ .....	17
Figura 12 andamento del fattore di scala temporale $\tau$ .....	18
Figura 13 forme del moto con introduzione del fattore di scala temporale $\tau$ .....	19
Figura 14 $V = 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40 \text{ km/h}$ $l = 60 \text{ mm}$ .....	19
Figura 15 $V = 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40 \text{ km/h}$ $l = 60 \text{ mm}$ .....	20
Figura 16 $v=100 \text{ km/h}$ $l=50 \text{ mm}$ .....	20
Figura 17 $V = 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40 \text{ km/h}$ $l = 60 \text{ mm}$ .....	21
Figura 18 confronto picco massimo di accelerazione tra modelli differenti per varie condizioni .....	22
Figura 19 schema logico sistema monitoraggio .....	23
Figura 20 $l=10 \text{ mm}$ $V=40 \text{ km/h}$ .....	24
Figura 21 $l=10 \text{ mm}$ $v= 50 \text{ km/h}$ .....	24
Figura 22 $l=10 \text{ mm}$ $v=60 \text{ km/h}$ .....	25
Figura 23 valore efficace $l=10 \text{ mm}$ $v=60 \text{ km/h}$ .....	25
Figura 24 $l=10 \text{ mm}$ $v=100 \text{ km/h}$ .....	26
Figura 25 $l= 10 \text{ mm}$ $v=100 \text{ km/h}$ $F_s=8000 \text{ Hz}$ .....	26
Figura 26 $l= 15 \text{ mm}$ $v=40 \text{ km/h}$ .....	27
Figura 27 $l= 15 \text{ mm}$ $v=100 \text{ km/h}$ .....	27
Figura 28 segnale campionato $v=40 \text{ km/h}$ $l= 60 \text{ mm}$ .....	28
Figura 29 $a_{\text{rms}}$ $v=40 \text{ km/h}$ $l= 60 \text{ mm}$ .....	28
Figura 30 percentuale di punti di valore efficace sopra la soglia del rumore .....	29
Figura 31 tasso di campionamento al variare della velocità per diversi difetti .....	29
Figura 32 $V = 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 \text{ km/h}$ $l = 60 \text{ mm}$ .....	30
Figura 33 valore efficace segnale teorico per diversi difetti e diverse velocità .....	31
Figura 34 $l=10 \text{ mm}$ $v= 50 \text{ km/h}$ .....	31
Figura 35 valore efficace ottenuto da campionamento di segnali teorici per diversi difetti e velocità.....	32
Figura 36 rapporto valori efficaci per diversi difetti e velocità .....	33
Figura 37 rapporto valori efficaci per diversi difetti e velocità .....	33
Figura 38 confronto rapporto beta per diversi difetti e diverse velocità.....	34
Figura 39 valore efficace segnale teorico per diversi difetti e diverse velocità .....	35
Figura 40 modello analitico semplificato .....	36
Figura 41 modello a blocchi simulink .....	37
Figura 42 $l=60 \text{ mm}$ $v=50 \text{ km/h}$ .....	38
Figura 43 $l=60 \text{ mm}$ $v=100 \text{ km/h}$ .....	38
Figura 44 $l = 20 \text{ mm}$ $v = 100 \text{ km/h}$ .....	39
Figura 45 $l = 20 \text{ mm}$ $v = 50 \text{ km/h}$ .....	39

Figura 46 $l=20\text{ mm}$ $v=100\text{ km/h}$ .....	40
Figura 47 $l=60\text{ mm}$ $v=50\text{ km/h}$ .....	40
Figura 48 $l=60\text{ mm}$ $v=100\text{ km/h}$ .....	40
Figura 49 $l=10\text{ mm}$ $v=50\text{ km/h}$ .....	41
Figura 50 $l=10\text{ mm}$ $v=50\text{ km/h}$ .....	42
Figura 51 $l=10\text{ mm}$ $v=50\text{ km/h}$ .....	42
Figura 52 valore efficace da campionamento segnale modello simulink per diversi difetti e velocità .....	43
Figura 53 $l=10\text{ mm}$ $V=100\text{ km/h}$ .....	45
Figura 54 $l=10\text{ mm}$ $V=100\text{ km/h}$ .....	45
Figura 55 $l=10\text{ mm}$ $V=100\text{ km/h}$ .....	46
Figura 56 $l=10\text{ mm}$ $V=100\text{ km/h}$ .....	46
Figura 57 $l=10\text{ mm}$ $v=100\text{ km/h}$ .....	47
Figura 58 $T0/\tau = 2$ .....	48
Figura 59 onda quadra scomposizione con trasformata di Fourier .....	48
Figura 60 analisi spettrale ottenuta per onda quadra con $T0/\tau0 = 2$ .....	49
Figura 61 effetto scalatura treno impulsi rettangolari .....	49
Figura 62 componente rettangolare del segnale accelerazione .....	50
Figura 63 confronto spettri scalatura onda quadra tramite fft matlab .....	50
Figura 64 analisi spettrale treno di impulsi rettangolare .....	51
Figura 65 analisi spettrale componente rettangolare del segnale di accelerazione .....	51
Figura 66 scalatura onda triangolare .....	52
Figura 67 confronto analisi spettrale scalatura onda triangolare tramite fft matlab .....	52
Figura 68 spettro teorico scalatura onda triangolare .....	53
Figura 69 confronto forme .....	53
Figura 70 segnale triangolare riscalo con stesso $\tau0$ .....	54
Figura 71 analisi spettrale parte cuspidale del segnale di accelerazione .....	54
Figura 72 analisi spettrale treno impulsi rettangolari $l=10\text{ mm}$ $V=100\text{ km/h}$ .....	55
Figura 73 $l=10\text{ mm}$ $V=100\text{ km/h}$ .....	55
Figura 74 $l=10\text{ mm}$ $V=100\text{ km/h}$ .....	56
Figura 75 $l=10\text{ mm}$ $V=100\text{ km/h}$ .....	56
Figura 76 $l=20\text{ mm}$ $v=100\text{ km/h}$ .....	57
Figura 77 $l=20\text{ mm}$ $v=100\text{ km/h}$ .....	57
Figura 78 dettaglio $l=40\text{ mm}$ $v=100\text{ km/h}$ .....	58
Figura 79 $l=40\text{ mm}$ $v=70\text{ km/h}$ .....	59
Figura 80 $l=40\text{ mm}$ $v=70\text{ km/h}$ .....	59
Figura 81 $l=40\text{ mm}$ $v=70\text{ km/h}$ .....	60
Figura 82 $l=10\text{ mm}$ $v=70\text{ km/h}$ .....	60
Figura 83 $l=10\text{ mm}$ $v=70\text{ km/h}$ .....	61
Figura 84 Time-velocity/time-vertical acceleration axle box diagram .....	63
Figura 85 confronto analisi spettrale di diversi segnali di accelerazione .....	64
Figura 86 $l=60\text{ mm}$ $v=50\text{ km/h}$ .....	65
Figura 87 valori efficaci di riferimento per identificazione entità danno wheel-flat .....	67
Figura 88 valore efficace da campionamento segnale modello simulink per diversi difetti e velocità .....	68
Figura 89 $l=10\text{ mm}$ $v=80\text{ km/h}$ .....	68
Figura 90 $l=10\text{ mm}$ $v=80\text{ km/h}$ .....	69
Figura 91 valori efficaci di riferimento per la definizione del danno .....	69
Figura 92 schema logico algoritmo di rilevamento proposto .....	72
Figura 93 Trend velocità durante la frenata .....	73

Figura 94 andamento $a_{RMS}$ campionato .....	74
Figura 95 $a_{RMS}$ medio ottenuto sul periodo $DT=10$ s.....	75
Figura 96 confronto intervallo rilevato tra urti successivi.....	75
Figura 97 confronto velocità medie rilevate .....	76
Figura 98 Trend velocità decelerazione durante la frenata .....	77
Figura 99 confronto RMS accelerazione.....	78
Figura 100 confronto RMS accelerazione su periodi $T=10$ s .....	78
Figura 101 confronto intervallo medio tra due urti su un periodo $T=10$ s.....	79
Figura 102 confronto velocità media con velocità media ricavata da intervallo medio tra due urti.....	79
Figura 103 Trend velocità durante frenata.....	80
Figura 104 confronto intervallo medio tra urti successivi.....	81
Figura 105 confronto RMS accelerazione rilevata dalla simulazione di difetti diversi per stessa frenata.....	82
Figura 106 $a_{RMS}$ medio ottenuto sul periodo $DT=10$ s.....	82
Figura 107 confronto intervallo medio tra urti successivi.....	84
Figura 108 confronto velocità medie .....	84
Figura 109 Trend RMS accelerazione per $l=10$ mm.....	85
Figura 110 confronto RMS accelerazione medio su intervalli $T=10$ s .....	85
Figura 111 nuovo modello simulink .....	88
Figura 112 $l=10$ mm $V=50$ km/h .....	89
Figura 113 confronto valori efficaci di accelerazione ottenuti dal campionamento, $l=10$ mm $V=50$ km/h .....	89
Figura 114 dettaglio variazione picchi $a_{RMS}$ , $l=10$ mm $V=50$ km/h.....	90
Figura 115 $l=10$ mm $V=80$ km/h.....	92
Figura 116 $l=10$ mm $V=80$ km/h .....	92
Figura 117 confronto variazione RMS accelerazione al variare della velocità .....	93
Figura 118 incremento medio di RMS al variare della velocità $\lambda = 400$ mm .....	93
Figura 119 $l=10$ mm $v=50$ km/h .....	94
Figura 120 incremento medio di RMS al variare della velocità, $\lambda = 200$ mm .....	94
Figura 121 diagramma di bode del modello.....	95

## Indice delle tabelle

Tabella 2 .....	34
Tabella 3 .....	37
Tabella 4 .....	61
Tabella 5 .....	62
Tabella 6 .....	62
Tabella 7 .....	65
Tabella 8 .....	70
Tabella 9 .....	70
Tabella 10 .....	70
Tabella 11 .....	81
Tabella 12 .....	83
Tabella 13 .....	83
Tabella 14 .....	84
Tabella 15 .....	86
Tabella 16 .....	86
Tabella 17 .....	90
Tabella 18 .....	91
Tabella 19 .....	91
Tabella 20 .....	91
Tabella 21 .....	95

# 1 Introduzione

Nell'area europea la crescita predominante del traffico stradale carica pesantemente la rete stradale e porta a significative emissioni aggiuntive di gas serra.

Per uno sviluppo più sostenibile è necessario arrestare questa tendenza e rafforzare la competitività del trasporto merci su rotaia.

Nonostante il fatto che il trasporto merci su rotaia sia una delle soluzioni di trasporto più rispettose dell'ambiente, la sua crescita è rimasta indietro rispetto alla crescita del trasporto merci in generale.

Gli studi hanno dimostrato che uno svantaggio competitivo è causato da una scarsa disponibilità di materiale rotabile, in particolare i carri merci.

Si ritiene che il passaggio da una strategia di manutenzione basata sul tempo a una basata sulle condizioni, monitorando in maniera continua i componenti critici, riduca i tempi di fermo di almeno un terzo [9] rendendo il trasporto merci ferroviario più competitivo.

Un buon sistema di monitoraggio dovrebbe fornire informazioni su quando e dove si verifica un problema. Per raggiungere i seguenti obiettivi per la creazione del sistema di monitoraggio non vi è necessariamente un aumento dei costi [5]:

- Installare sensori a basso costo;
- Sviluppare un sistema per la raccolta e l'elaborazione dei dati continui in loco;
- Stabilire un metodo di trasmissione delle informazioni in tempo reale.

Il gruppo di ricerca di Ingegneria Ferroviaria del Politecnico di Torino ha sviluppato un sistema di monitoraggio (On Board Unit) per carri ferroviari merci per il trasporto intermodale [5,6,7,8,9].

Lo scopo di questo sistema è il monitoraggio in linea di carrelli ferroviari merci e di avere un controllo puntuale e costante del carrello al fine di individuare tempestivamente la manifestazione di guasti.

L'individuazione tempestiva del guasto permette una migliore organizzazione delle operazioni di manutenzione che sono più efficienti grazie a un monitoraggio continuo e automatico che velocizza il processo di diagnosi, integrando le periodiche ispezioni da parte degli operatori manutentivi.

Il monitoraggio online permette di individuare per tempo mal funzionamenti riducendo la possibilità di rotture catastrofiche lungo la linea che potrebbero causare danni alle persone, al sistema ferroviario o nel migliore dei casi intasare il traffico ferroviario.

Per questi motivi i sistemi di monitoraggio online sono di interesse per un rinnovamento del sistema ferroviario al fine di aumentare la sicurezza e l'efficienza di tutto l'impianto.

Il lavoro di tesi si concentra nell'analisi del difetto ruota del wheel-flat o di spiattellamento ruota, un difetto molto grave che può portare anche al deragliamento del convoglio.

Il difetto nasce a causa del bloccaggio della ruota che perde aderenza, strisciando per inerzia del convoglio sul tracciato si consuma spiattellandosi, questa forma alterata introduce un martellamento continuo e forti sollecitazioni al sistema meccanico.

Partendo dalla geometria di una ruota con determinato difetto di wheel-flat, come svolto da Steenbergen [1] e Esteban [3], e dall'ipotesi di un tracciato infinitamente rigido è stato sviluppato un modello teorico analitico per modellizzare l'accelerazione verticale della ruota difettosa in funzione della velocità orizzontale  $V$  imposta costante, del diametro ruota  $D$  e dell'entità del difetto  $l$  ipotizzato.

Il modello i risultati del modello semplificato sono stati confrontati con quello multibody di Bosso [2].

Fissata la frequenza di campionamento è stata analizzata l'influenza della velocità sulla rilevazione del segnale di accelerazione.

Si è individuata una relazione in funzione della velocità tra valore efficace del segnale simulato e del valore efficace ottenuto dal segnale di accelerazione campionato alla frequenza prefissata.

Nella parte successiva viene sviluppato un modello simulink per tener conto della dinamica del carrello e del contatto ruota rotaia utilizzando parametri simili a quelli adottati da Esteban [3].

Viene eseguita l'analisi spettrale [11,12,13] dei segnali di accelerazione in input e output del modello.

Per eseguire una prima validazione dei segnali di accelerazione ottenuti si sono confrontati le analisi spettrali del segnale teorico di una ruota danneggiata con quello ottenuto da dati sperimentali da Gericke [4].

È stato dunque sviluppato un algoritmo per il rilevamento on-board del difetto attraverso l'analisi del segnale di accelerazione campionato.

Nel capitolo sei si prendono alcune frenate monitorate dal sistema di monitoraggio del gruppo di ricerca di Ingegneria Ferroviaria del Politecnico di Torino [8] e si simulano tramite il modello proposto i dati di accelerazione nel caso di ruota danneggiata per verificare che l'algoritmo di rilevamento del wheelflat proposto riesca a valutare correttamente il difetto.

Nel capitolo 7 si introducono alcuni possibili miglioramenti per un futuro sviluppo del modello e dell'algoritmo.

Si è introdotto un difetto di ondulazione al tracciato descritto da Wu, T.X. [14] e si sono analizzati i segnali di accelerazione ottenuti in output dal modello simulink ed è stato verificato se l'algoritmo ideato fosse ancora in grado di identificare il difetto del wheel-flat.

La maggior parte dei documenti della letteratura utilizzati si possono classificare in tre categorie:

Documenti per la definizione del modello fisico del wheel flat: [1,2,3,15]

Documenti che contengono dati sperimentali per validazione o simulazione di condizioni: [4,5,6,7,8,9]

Documenti utili come strumenti di calcolo: [11,12,13]



## 2 Il sistema di monitoraggio

Il sistema di monitoraggio è stato installato su un carro merci intermodale di proprietà dell'Ambrogio Trasporti S.p.a. nell'ambito del progetto ITS Cluster Italy 2020.

Il sistema è stato installato nel carrello centrale che è stato rilevato come il più critico.

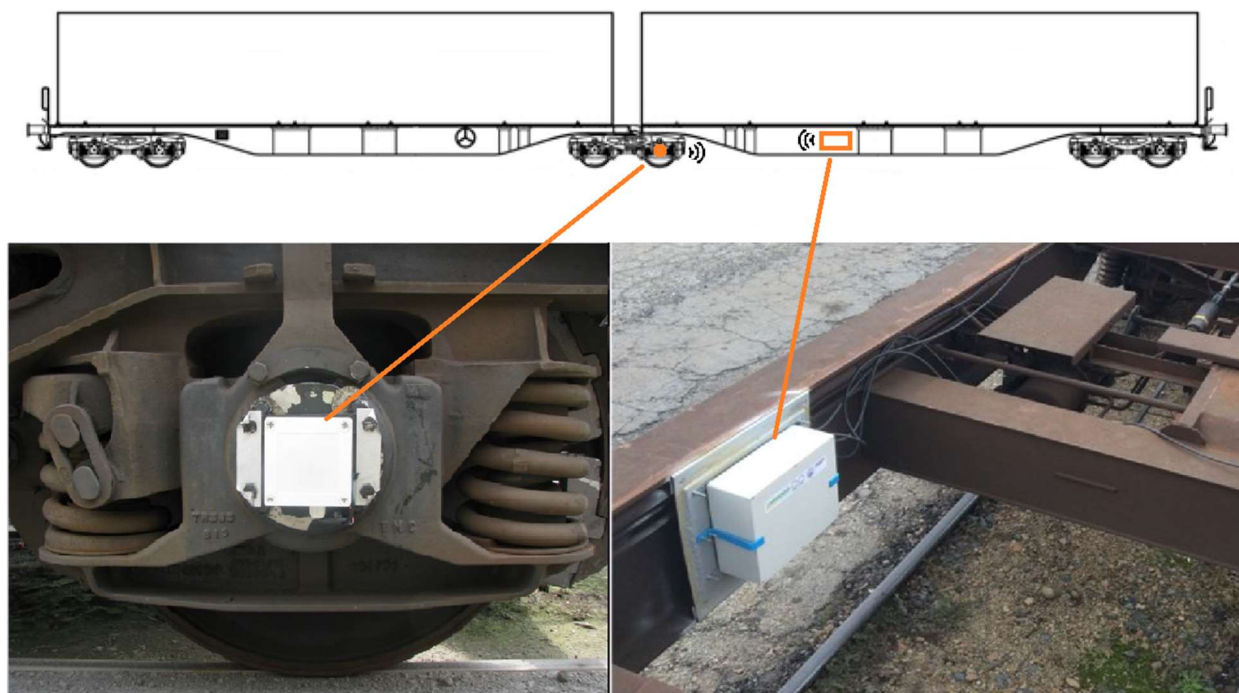


Figura 1 Sistema di monitoraggio installato su carro merci intermodale Sggmrs 90.

Per il monitoraggio del carrello è stato scelto di installare alcuni sensori per rilevare pochi parametri idonei alla prevenzione di cedimenti strutturali. Questo tipo di strategia di sensorizzazione è utile per fornire informazioni sulla vita residua dei componenti e sui tempi di manutenzione (attualmente raramente rispettati sui veicoli merci) e sulla localizzazione precisa e tempestiva del convoglio sulla rete ferroviaria continentale, ciò è un servizio apprezzato da operatori e trasportatori. L'approccio sistemico utilizzato per la progettazione del sistema di monitoraggio è riportato in figura (2).

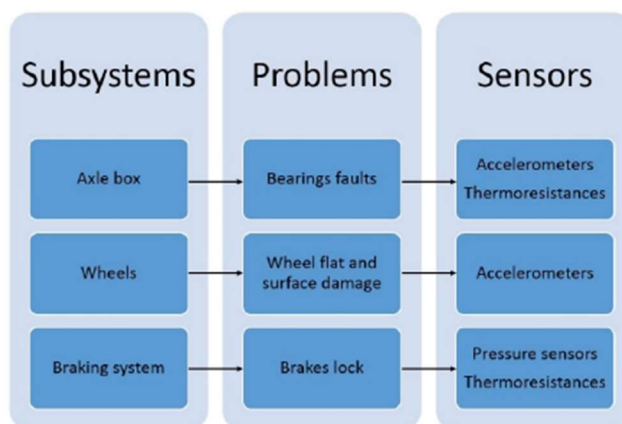


Figura 2 approccio sistematico

Il sistema sfrutta l'analisi dei segnali di temperatura delle termoresistenze opportunamente installate per il monitoraggio dei cuscinetti e dei ceppi freno, i sensori di pressione per il monitoraggio del corretto

funzionamento del sistema pneumatico frenante, gli accelerometri triassiali per il monitoraggio delle ruote, dei cuscinetti e della dinamica del carrello.

Il sistema è composto da una central unit installata sulla cassa del carro e quattro axel box node installati sulle boccole del carrello monitorato.

il sistema di monitoraggio central unit, il cui schema è riportato in figura (3), si compone delle seguenti parti:

- un sistema di acquisizione dati basato su un microcontrollore ATmega2560;
- sensori di temperatura Pt1000;
- sensori di pressione differenziali MPX5700DP;
- accelerometro triassiale ADXL345;
- modulo GPS;
- memoria SD per il salvataggio dei dati.

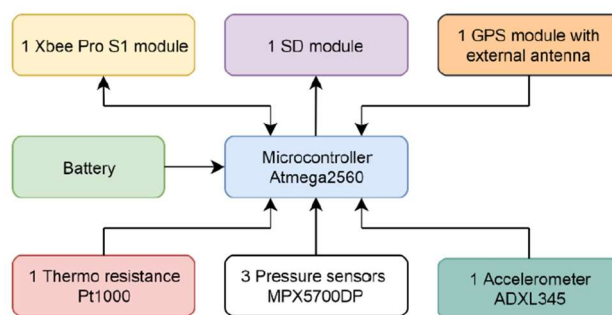


Figura 3 central station

La base station monitora:

- Temperatura di un blocco freno del carrello centrale dell'intermodale
- carro merci monitorato
- Pressione del tubo del freno
- Pressione del cilindro del freno del carrello centrale
- Pressione della valvola di pesatura del carrello centrale
- Accelerazioni sui tre assi, espresse utilizzando RMS (Root quadrato medio), il massimo e il minimo.
- Posizione GPS
- Velocità del carro
- Altitudine

Poiché il sistema di monitoraggio è alimentato solo tramite batterie che in linea possono essere ricaricate solo da un energy harvester che ottiene energia dalle vibrazioni meccaniche verticali, per ridurre il consumo il sistema è stato dotato di un algoritmo di risparmio energetico.

Tale algoritmo verifica le condizioni di movimento del convoglio ferroviario e in caso di fermo prolungato fa entrare il sistema in sleep mode disabilitando i sensori della central unit e delle axel box unit per ottimizzare il consumo energetico.

l'accelerometro ADXL345 della central unit è l'unico sensore che è sempre alimentato poiché funge da interruttore.

Quando il convoglio si ferma per un tempo prolungato l'accelerometro ADXL345 della central unit non rileva vibrazioni e quindi l'algoritmo fa entrare il sistema in sleep mode, allo stesso modo quando il convoglio riparte l'accelerazione rilevata dal sensore riattiva il sistema.

Il nodo della boccola è costituito dai seguenti componenti hardware:

- 1 microcontrollore Atmega328P,
- 1 accelerometro ADXL345
- 1 accelerometro ADXL377
- 1 termoresistenza Pt1000
- 1 modulo Xbee Pro S1
- Modulo SD

Si riporta lo schema in figura (4)

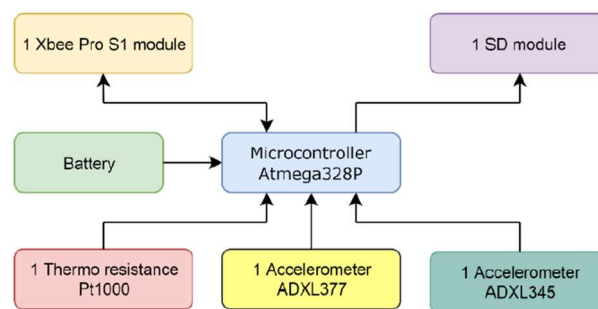


Figura 4 axel box diagram

Il nodo boccola monitora:

- Accelerazioni sui tre assi, espresse utilizzando RMS (Rootmean square), il massimo e il minimo, monitorati utilizzando i presenti due accelerometri.
- Temperatura esterna del coperchio della boccola

L'ADXL377 è un accelerometro analogico e consente di monitorare le accelerazioni nella gamma  $\pm 200g$ . La risoluzione di ADXL377 è di circa 0,5 g.

Un tale valore di risoluzione lo rende adatto per rilevare eventi di shock in i cui livelli di accelerazione superano facilmente i 10 g, ma non per il monitoraggio della boccola dinamica durante le normali condizioni operative.

Per il monitoraggio delle normali condizioni di funzionamento è stato quindi necessario utilizzare l'accelerometro ADXL345 (lo stesso utilizzato nella stazione base) che con un range di  $\pm 2g$  possiede una sensibilità più adatta di 0,39g.

Si riportano in figura (5) le frequenze di campionamento e di salvataggio delle grandezze di interesse.

Le frequenze scelte sono frutto di un compromesso tra accuratezza del monitoraggio e riduzione del consumo energetico.

Sensore	Frequenza di campionamento [Hz]	Frequenza di salvataggio [Hz]
Temperatura	1	1
Pressione	200	1
Accelerazione	200	1
GPS	1	1

Figura 5 caratteristiche sistema di acquisizione

Il lavoro di tesi svolto si concentra sull'analisi del segnale di accelerazione verticale per lo sviluppo di un algoritmo di individuazione on-board del wheelflat.

Si studia la costruzione di un modello fisico per la definizione del segnale teorico di accelerazione del difetto per lo sviluppo di un algoritmo che possa riconoscere l'entità del difetto e distinguerlo da altri disturbi.

Definito il modello fisico è stata eseguita l'analisi dei segnali campionati a  $F_s = 200 \text{ Hz}$  e la correlazione con il segnale teorico.

Viene dunque sviluppato l'algoritmo che analizza il segnale di accelerazione campionato a  $F_s = 200 \text{ Hz}$  tramite la correlazione con il modello teorico ricava l'entità del difetto.

### 3 Wheel flat

Il wheel flat è un grave difetto che può affliggere le ruote dei convogli ferroviari.

Può essere fonte di gravi danni al carro, alla linea e anche di possibili deragliamenti.

L'individuazione di tale difetto in tempi utili è importante per una tempestiva manutenzione evitando danni alla linea e al convoglio e migliorando la sicurezza del sistema.

Analizzo un modello fisico che descrive tale difetto partendo dalla geometria come fatto da Steenberg [1], le grandezze di interesse che possono descrivere il wheel flat sono lo spostamento, la velocità e l'accelerazione verticale.

Tramite gli accelerometri triassiali è possibile monitorare l'accelerazione verticale per il monitoraggio della salute delle ruote e rilevare eventuali wheel flat.

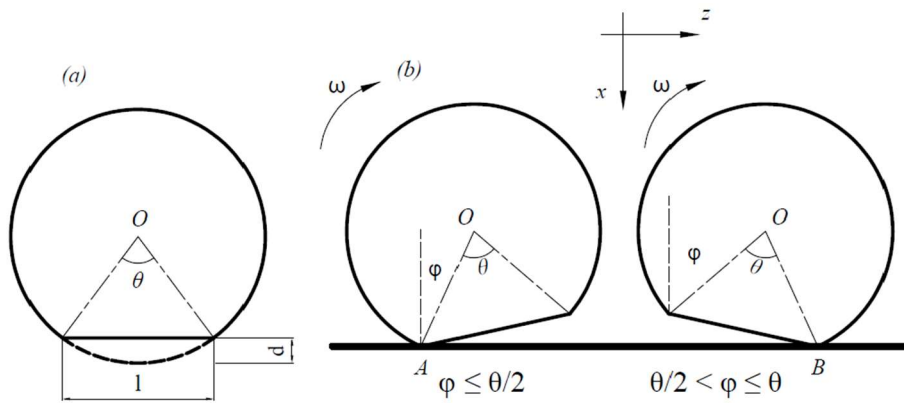


Figura 6 moto della ruota con wheel flat

Nota la soglia di rumore a normale funzionamento la lunghezza del difetto deve essere tale da produrre una accelerazione maggiore per essere individuata, deve essere anche definita una velocità di rotazione di soglia.

Ipotizzando una velocità orizzontale del centro ruota, in presenza di spiattellamento il moto continuo rotatorio verrà interrotto, la ruota riprenderà il moto continuo rotatorio una volta superato il difetto, il wheel flat introduce quindi un disturbo periodico ad ogni giro di ruota.

In particolare il centro ruota in presenza del difetto inizierà a “cadere” acquisendo una velocità verticale, al momento dell’impatto avverrà l’inversione della velocità verticale con la conseguente variazione della quantità di moto.

L’urto dovrebbe dipendere dalle masse, elasticità, e velocità del veicolo.

In prima istanza assumeremo che il tracciato sia perfettamente rigido e costruiremo il modello del wheel flat partendo dalla descrizione della geometria del difetto ipotizzando che il difetto sia perfettamente piatto.

Lo spiattellamento ruota può essere dunque rappresentato come una corda di circonferenza di lunghezza  $l$  e perdita di materiale  $d$ , si veda Fig. (7).

$$l = 2\sqrt{R^2 - (R - d)^2} = 2\sqrt{2Rd - d^2} \approx \sqrt{8Rd}$$

I punti alle estremità del difetto sono singolari, in particolare la curvatura passa istantaneamente da  $R$  a infinito.

Le zone nell'intorno dei punti singolari durante il rotolamento ruota a causa della deformazione plastica del materiale tendono ad essere progressivamente smussate fino a scomparire.

Ne consegue che la lunghezza del difetto aumenta a parità di profondità del difetto  $d$  e che la curva del profilo tornerà ad essere una curva continua.

Il difetto risultante viene chiamato "degenerated wheel flat".

Questo difetto viene considerato stabile se soddisfa le seguenti condizioni geometriche:

1. la regione chiusa delimitata da  $r(\theta)$  è convessa;
2.  $r(\theta)$  è una funzione continua senza singolarità, quindi anche  $\dot{r}(\theta)$  sarà continua.

Nella costruzione del modello teorico del wheel flat si imporrà che lo spiattellamento sia simmetrico attorno a  $\theta = 0$ , dove  $r(0) = R - d$ .

$$x_0 = \begin{cases} r(1 - \cos\varphi) & 0 \leq \varphi \leq \frac{\theta}{2} \\ r[1 - \cos(\theta - \varphi)] & \frac{\theta}{2} \leq \varphi \leq \theta \end{cases}$$

$$\theta = 2 \cos^{-1} \left( \frac{r-d}{r} \right)$$

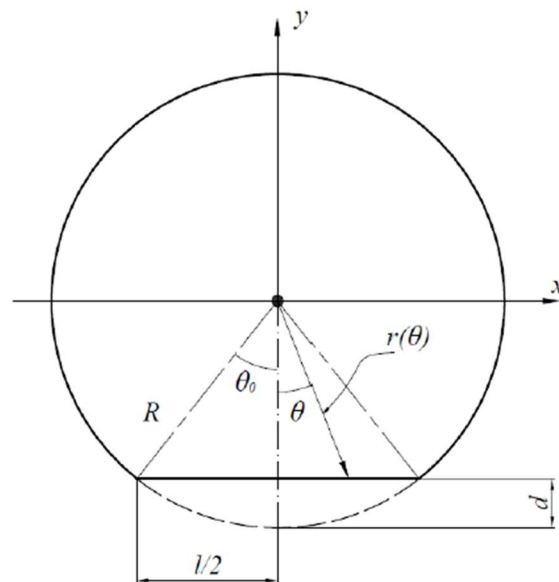


Figura 7 schema della ruota

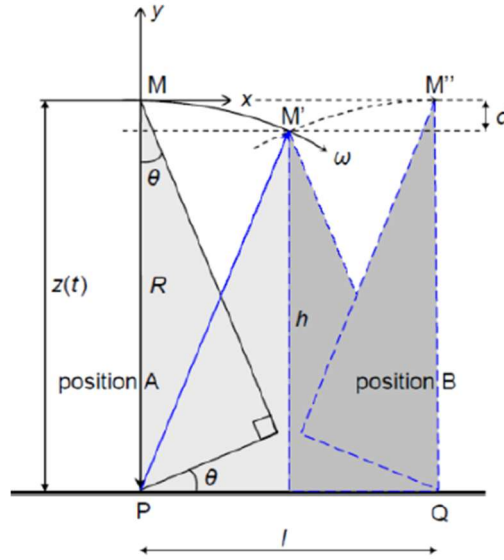


Figura 8 traiettoria del centro ruota

Ipotizzando lo spiatellamento perfettamente piatto e una velocità orizzontale  $V_x$  del centro ruota costante si descrive brevemente la traiettoria del centro ruota, figura (8).

All'ingresso della fase danneggiata del profilo ruota il centro di rotazione passa da M al punto di contatto con il tracciato P. il centro ruota "cadrà" fino a quando il wheel flat non sarà a contatto con il tracciato, in questo istante il centro ruota raggiunge la quota minima  $R - d$ , il centro di rotazione si sposta da P in Q, avviene l'inversione di velocità a causa dell'impatto e inizia la fase di risalita.

Quando il baricentro M si riallinea su Q la ruota esce dalla fase danneggiata, il centro di rotazione torna in M e la ruota riprende il moto di continuo rotolamento.

Schematizzata la geometria si può descrivere la traiettoria del centro ruota in funzione dello spostamento orizzontale x nel modo seguente:

$$y(x) = (\sqrt{R^2 - x^2} - R) H\left(-x + \frac{l}{2}\right) + (\sqrt{R^2 - (x - l)^2} - R) \left(H\left(x - \frac{l}{2}\right) - H(x - l)\right)$$

$$\frac{dy(x)}{dx} = \left(-\frac{x}{\sqrt{R^2 - x^2}}\right) H\left(-x + \frac{l}{2}\right) - \left(\frac{(x - l)}{\sqrt{R^2 - (x - l)^2}}\right) \left(H\left(x - \frac{l}{2}\right) - H(x - l)\right)$$

Ricordando che  $x = v \cdot t$  riporto l'equazione nel dominio del tempo:

$$y(t) = (\sqrt{R^2 - v^2 t^2} - R) H\left(-vt + \frac{l}{2}\right) + (\sqrt{R^2 - (vt - l)^2} - R) \left(H\left(vt - \frac{l}{2}\right) - H(vt - l)\right)$$

Derivando nel tempo ricavo:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \left( -\frac{v^2 t}{\sqrt{R^2 - v^2 t^2}} \right) H\left(-t + \frac{l}{2v}\right) - \left( \frac{v(vt - l)}{\sqrt{R^2 - (vt - l)^2}} \right) \left( H\left(t - \frac{l}{2}\right) - H\left(t - \frac{l}{v}\right) \right)$$

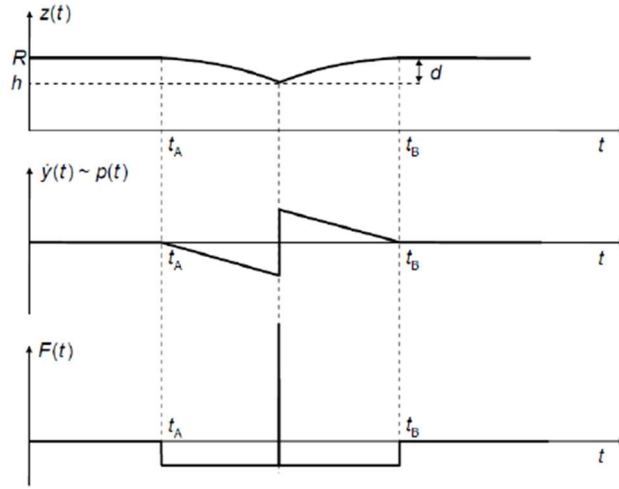


Figura 9 forme del moto

$$z(t) = y(t) + R$$

$$\text{Sarà minimo a } \frac{t_A + t_B}{2}$$

La quantità di moto della ruota è data dalla seguente relazione

$$p(t) = m\dot{y}(t) = \left( \frac{-mv^2 t}{\sqrt{R^2 - v^2 t^2}} \right) H\left(-t + \frac{l}{2v}\right) - \left( \frac{mv(vt - l)}{\sqrt{R^2 - (vt - l)^2}} \right) \left( H\left(t - \frac{l}{2v}\right) - H\left(t - \frac{l}{v}\right) \right)$$

L'esatta espressione del wheel-flat può essere espressa in termini di  $l$  e  $d$

$$R^2 = \left(\frac{l}{2}\right)^2 + (R - d)^2$$

Se  $d \ll l$ ,  $R$  questo implica che  $d^2$  è del secondo ordine e può essere trascurato ottenendo

$$R = \frac{l^2}{8d}$$

Differenziando nel tempo la quantità di moto trovo la forza e l'accelerazione

$$F(t) = \dot{p}(t) = m\ddot{y}(t)$$

Ipotizzando che la ruota sia sempre a contatto con la rotaia e cada seguendo la traiettoria sopra descritta posso valutare l'accelerazione verticale indipendentemente dalla massa.



### 3.1 Modello teorico adottato

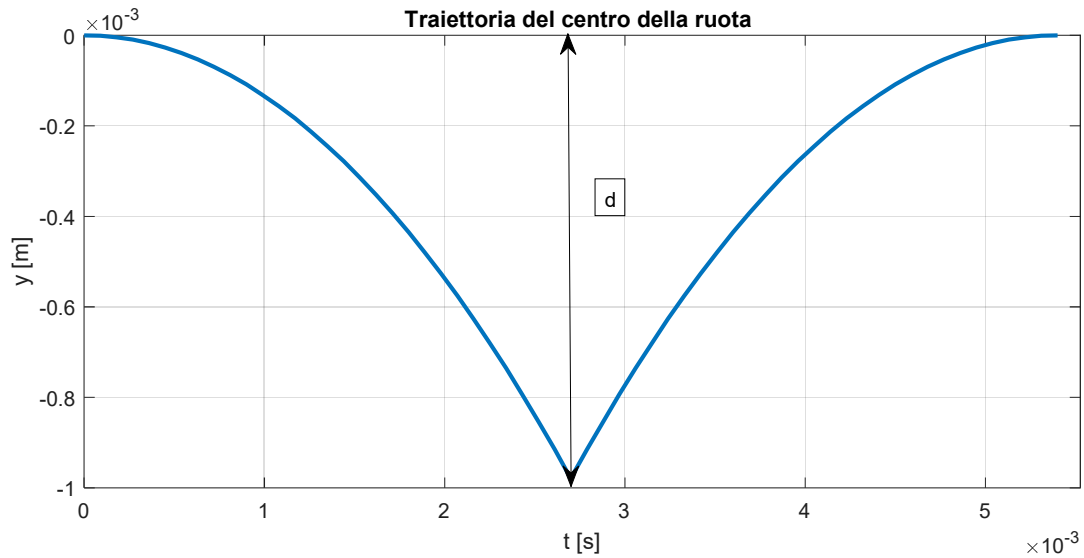


Figura 10  $l = 60 \text{ mm}$   $v = 40 \text{ km/h}$

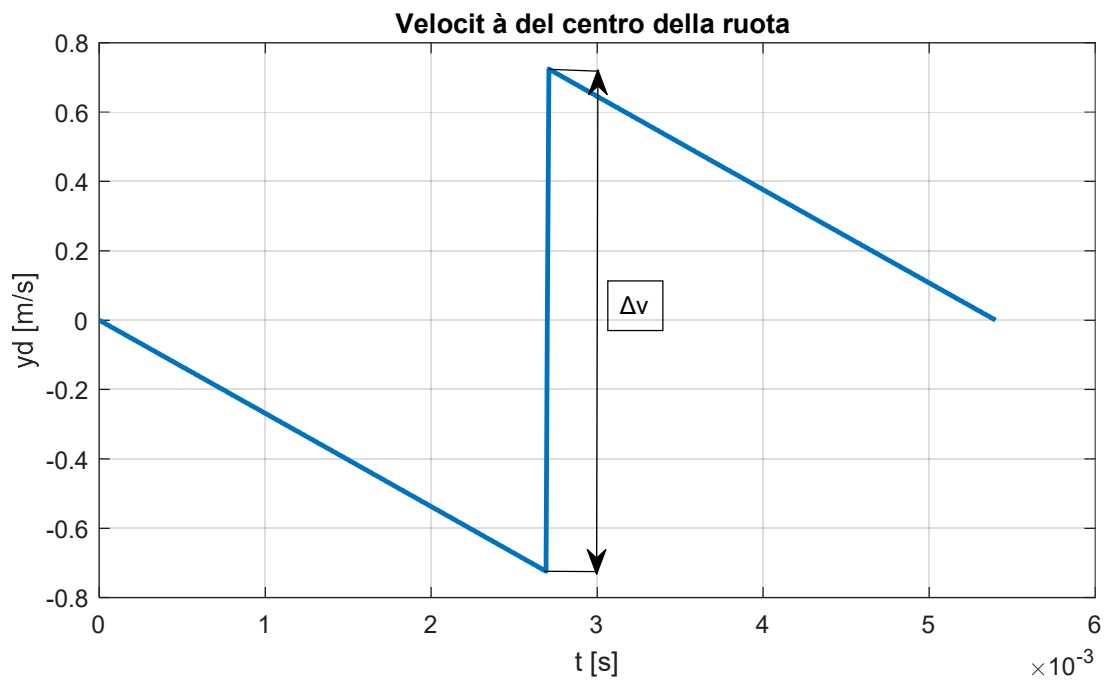


Figura 11  $l = 60 \text{ mm}$   $v = 40 \text{ km/h}$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \left( -\frac{v^2 t}{\sqrt{R^2 - v^2 t^2}} \right) H\left(-t + \frac{l}{2v}\right) - \left( \frac{v(vt - l)}{\sqrt{R^2 - (vt - l)^2}} \right) \left( H\left(t - \frac{l}{2}\right) - H\left(t - \frac{l}{v}\right) \right)$$

L'accelerazione verticale sarà data dalla derivata nel tempo della velocità verticale.

All'inversione di velocità verticale corrisponderà l'impatto che possiamo definire come variazione della quantità di moto nel modo seguente:

$$m \cdot (v_{y_{imp+}} - v_{y_{imp-}}) = \int_{t_0}^{t_1} F dt$$

$$\Delta p_{t=l/2V} = m\Delta v_{t=l/2V} = \int_{t_0}^{t_1} m\ddot{y}_{t=l/2V} dt$$

L'istante dell'impatto dove ho quota minima è:  $t = \frac{t_A + t_B}{2}$

Definendo il salto  $\Delta v = v_{y_{imp+}} - v_{y_{imp-}}$

E sostituendo  $t = \frac{t_A + t_B}{2} = \frac{l}{2V}$

$$2\Delta v_0 = \left( \frac{v^2 t}{\sqrt{R^2 - v^2 t^2}} \right) = \frac{vl/2}{\sqrt{R^2 - l^2/4}}$$

Ricordando che:  $R = \frac{l^2}{8d}$

$$2\Delta v_0 = \frac{vl/2}{\sqrt{R^2 - l^2/4}} \approx \frac{8vd}{l}$$

L'impatto per un  $dt$  infinitesimo risulterebbe impulsivo e tendente a infinito.

Assumendo una prima usura del wheel flat introduco nel periodo in cui abbiamo il difetto una scala temporale  $\tau$  inversamente proporzionale alla velocità che descrive con quale rapidità l'accelerazione raggiunge il valore massimo.

Nella costruzione del segnale teorico è stato imposto che  $\tau = 0,2 \text{ ms}$  per un urto a  $V = 100 \text{ km/h}$

La variazione del coefficiente  $\tau$  in funzione della velocità è descritto dalla figura (12):

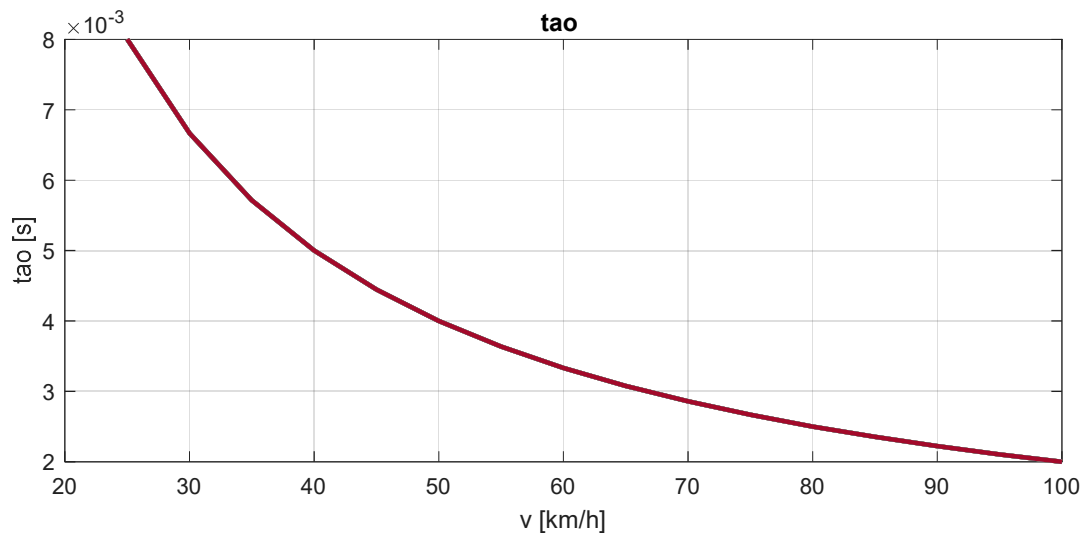


Figura 12 andamento del fattore di scala temporale  $\tau$

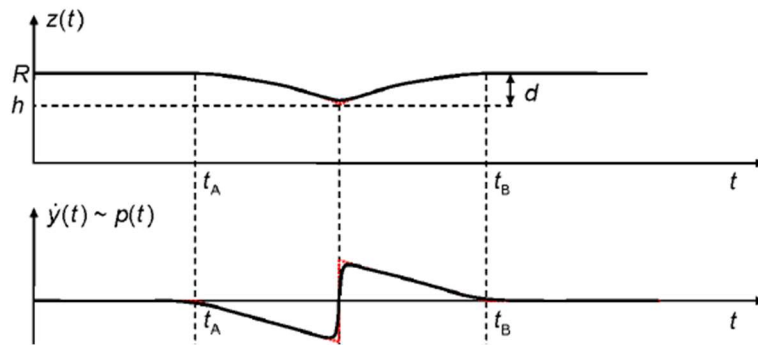


Figura 13 forme del moto con introduzione del fattore di scala temporale  $\tau$

La nuova forma analitica della velocità mettendo l'origine in  $\frac{t_A+t_B}{2}$  e considerando il ramo destro risulta essere la seguente:

$$\dot{y}(t) = \Delta v_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) (1 - \alpha t) \quad t \in \left[\frac{t_A+t_B}{2}, t_B\right]$$

Alle alte velocità  $\tau$  tende a 0 e la forma di velocità tende a quella teorica.

Il parametro  $\alpha$  definisce il punto in cui la funzione andrà a 0

$$\alpha = \left[\frac{1}{s}\right]$$

Posso quindi ricavare una forma analitica dell'accelerazione ottenuta dalla derivazione nel tempo di  $\dot{y}(t)$ :

$$\ddot{y}(t) = \frac{\Delta v_0}{\tau} \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau}}(1 - \alpha t + \alpha \tau) - \alpha \tau\right) \quad t \in \left[\frac{t_A+t_B}{2}, t_B\right]$$

Le forme risultanti del segnale teorico sono di seguito riportate.

Viene riportata nella figura (14) un dettaglio della traiettoria verticale del centro ruota confrontando lo spostamento per un giro di ruota per diverse velocità orizzontali di riferimento

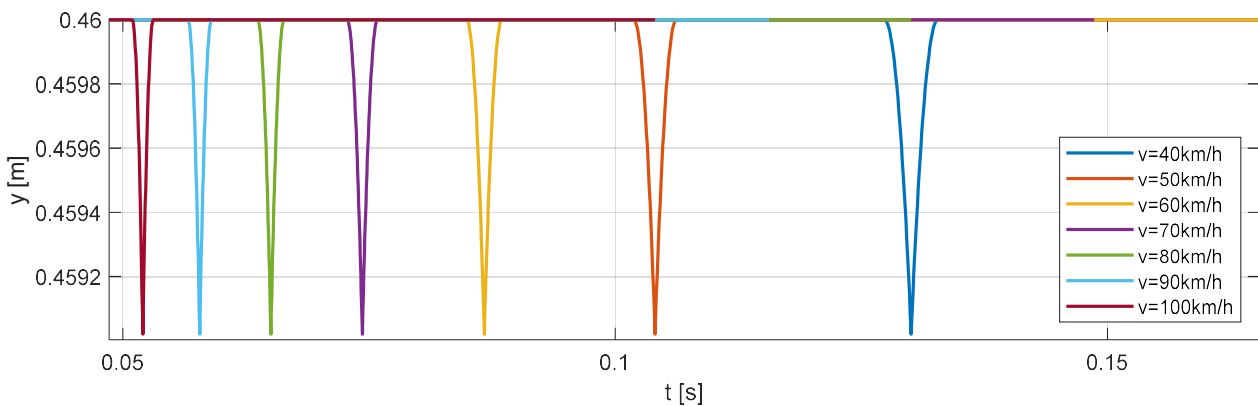


Figura 14  $V = 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40$  km/h  $l = 60$  mm

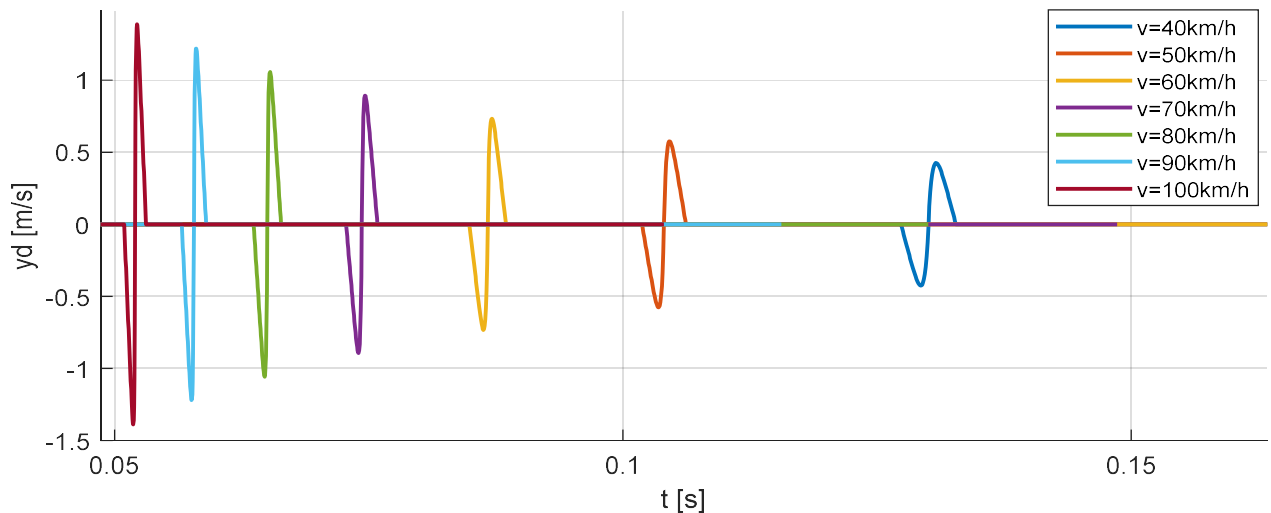


Figura 15  $V = 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40 \text{ km/h}$   $l = 60 \text{ mm}$

Nella figura (15) propone un dettaglio delle velocità verticali del centro ruota nel dominio del tempo effettuando un confronto per un giro di ruota a diverse velocità orizzontale.

Si nota che l'aumento della velocità verticale è coerentemente proporzionale all'aumento della velocità orizzontale, all'aumentare della velocità orizzontale l'attenuazione del  $\tau$  diventa sempre più debole e l'inversione di velocità tende a diventare sempre più istantanea e a coincidere con la forma senza  $\tau$ .

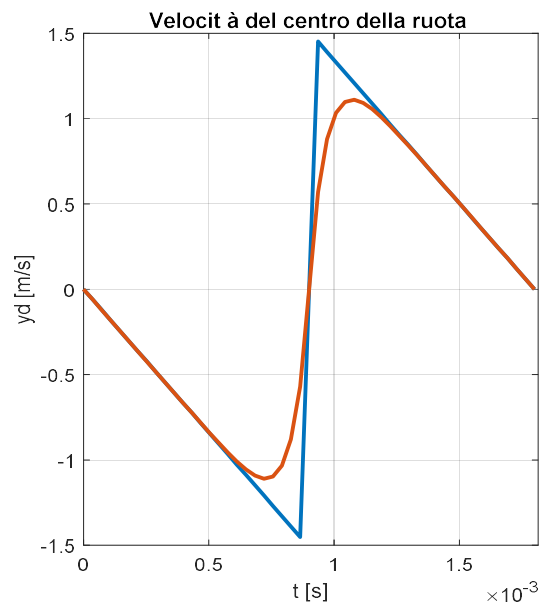


Figura 16  $v=100\text{km/h}$   $l=50\text{mm}$

Si riportata in figura (16) un confronto del diagramma della velocità verticale teorico (forma a triangolo) e sovrapposto quelle della velocità rivista in funzione del fattore di scala  $\tau$  che attenua l'inversione istantanea.

All'aumentare della velocità orizzontale il  $\tau$  tende a zero e si verifica che la forma della velocità in funzione di  $\tau$  tende a coincidere con quella teorica.

Si riporta nella figura (17) il confronto delle forme di accelerazione al variare della velocità orizzontale sempre prendendo come riferimento un singolo giro di ruota

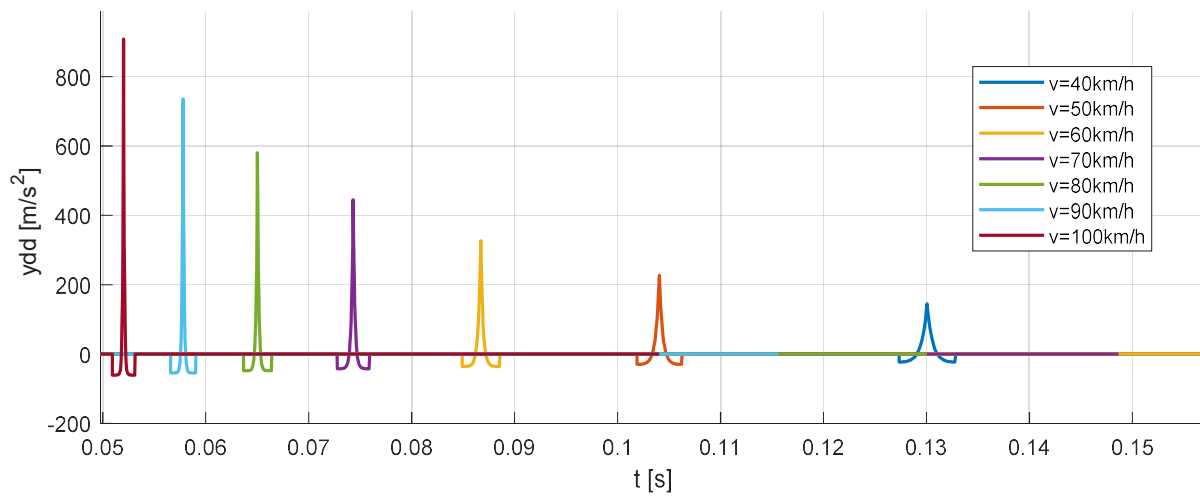


Figura 17  $V = 100,90,80,70,60,50,40$  km/h  $l = 60$  mm

Il picco massimo dipende dalla dimensione del difetto che definisce la caduta massima verticale  $d$ .

Si nota che la crescita del picco di accelerazione aumenta con la velocità con una legge quadratica.

Sul grafico sono sovrapposte le curve di accelerazione a diverse velocità orizzontali per un singolo giro di ruota.

Si riportano gli andamenti dell'accelerazione massima al variare della velocità e della dimensione del difetto

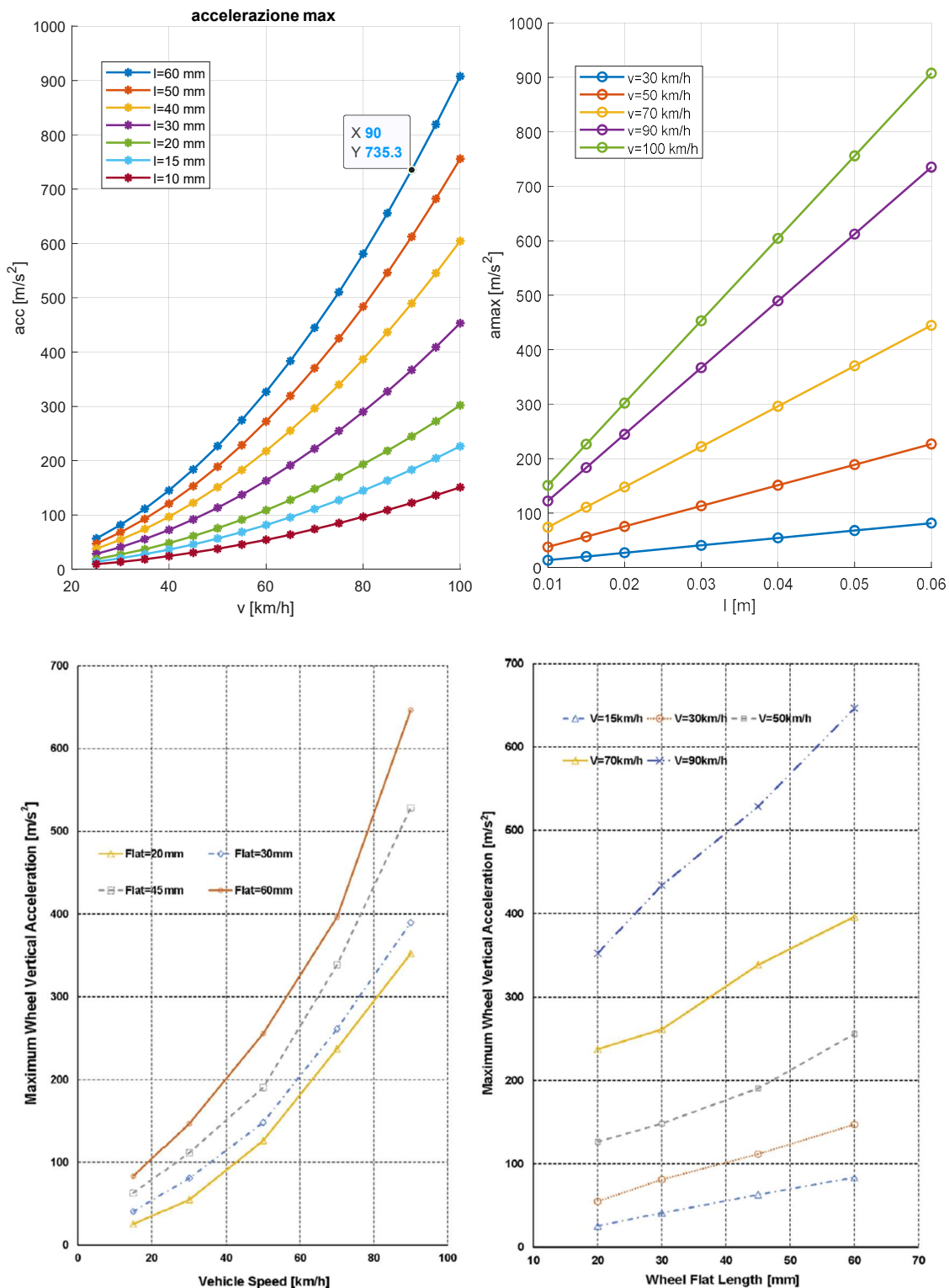


Figura 18 confronto picco massimo di accelerazione tra modelli differenti per varie condizioni

Si verifica che in entrambi i modelli il picco massimo di accelerazione dipende in modo lineare con l'aumento dell'entità del difetto e cresce con dipendenza non lineare, circa quadratica, con l'aumentare della velocità.

Si nota inoltre che il modello analitico proposto è coerente con il modello multibody di Bosso [2] anche per ordine di grandezza del picco di accelerazione a parità di difetto e velocità orizzontale di riferimento.

### 3.2 Valore efficace

Si definisce valore efficace di una funzione continua  $x(t)$ , la radice della media quadratica (ovvero la "radice della media dei quadrati" detta anche valore quadratico medio, in inglese Root Mean Square, da cui la sigla RMS), sul periodo della funzione stessa:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [x(t)]^2 dt}$$

Corrispondentemente per un segnale discreto  $x$  si ha:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

Il procedimento implementato nell'algoritmo prevede, una volta impostata la frequenza di campionamento a 200 Hz (200 punti discreti prelevati ogni secondo), di valutare il valore RMS di tali punti così da poter costruire delle curve tempo dipendenti che mostrino l'andamento dell'accelerazione RMS e la sua sensibilità rispetto alla variazione delle grandezze geometriche  $l$  e della velocità del treno  $V$ .

È dunque possibile rilevare il difetto attraverso l'acquisizione dell'accelerazione verticale.

Con un campionamento di  $F_s = 200 \text{ Hz}$  è possibile identificare il difetto tramite rms come sopra spiegato.

### 3.3 Approccio di rilevamento guasto

Il sistema di monitoraggio a bordo carro prevede le seguenti fasi principali:

- Sensore (acquisizione)
- Conversione analogica digitale
- Micro-processore (analisi dati, esecuzione calcoli)
- Stima della soglia di allarme
- Conferma della soglia
- Trasmissione

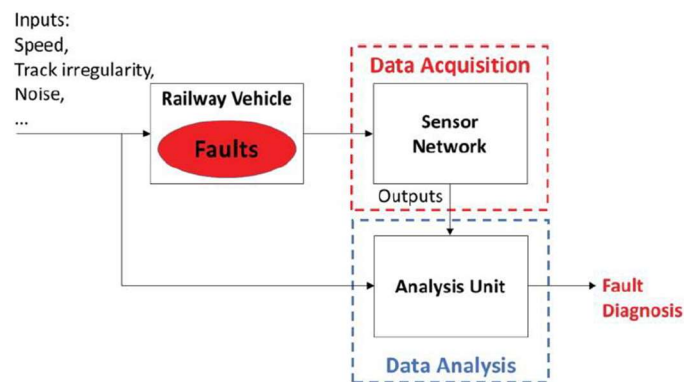


Figura 19 schema logico sistema monitoraggio

La frequenza di campionamento adottata è stata quella tipica di un comune strumento di monitoraggio,  $F_s = 200 \text{ Hz}$  dal segnale in ingresso si acquisiscono 200 valori ogni secondo.

Si calcola la RMS dell'accelerazione per ogni secondo di campionamento.

L'obiettivo è di valutare dal segnale di accelerazione campionato la presenza o meno di un wheel-flat noto l'andamento ideale dell'accelerazione.

### 3.4 Analisi segnali di accelerazione

Si riportano e si analizzano i segnali di accelerazione simulati campionati a  $F_s = 200 \text{ Hz}$  e l'andamento del valore efficace di accelerazione calcolato ogni secondo sul set di dati campionati.

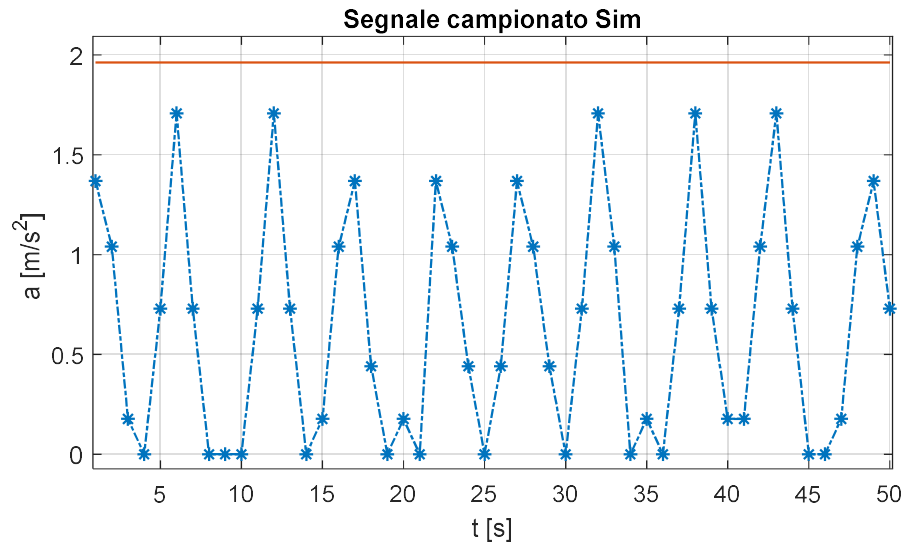


Figura 20  $l=10 \text{ mm}$   $V=40 \text{ km/hD}$

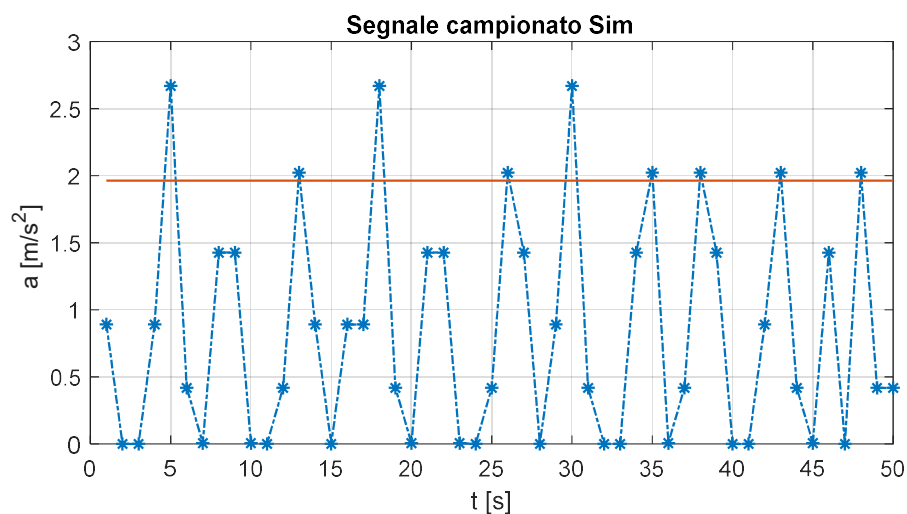


Figura 21  $l=10 \text{ mm}$   $v=50 \text{ km/h}$

Sono riportati i grafici dei valori efficaci ottenuti dal campionamento del segnale teorico di accelerazione.

Si nota che per un difetto di 10 mm se il convoglio viaggia a una velocità di 40 km/h il valore efficace di accelerazione è al di sotto della soglia del rumore.

Se il convoglio viaggia a una velocità di 50 km/h con il medesimo difetto si inizia a rilevare alcuni punti di valore efficace al di sopra della soglia del rumore.



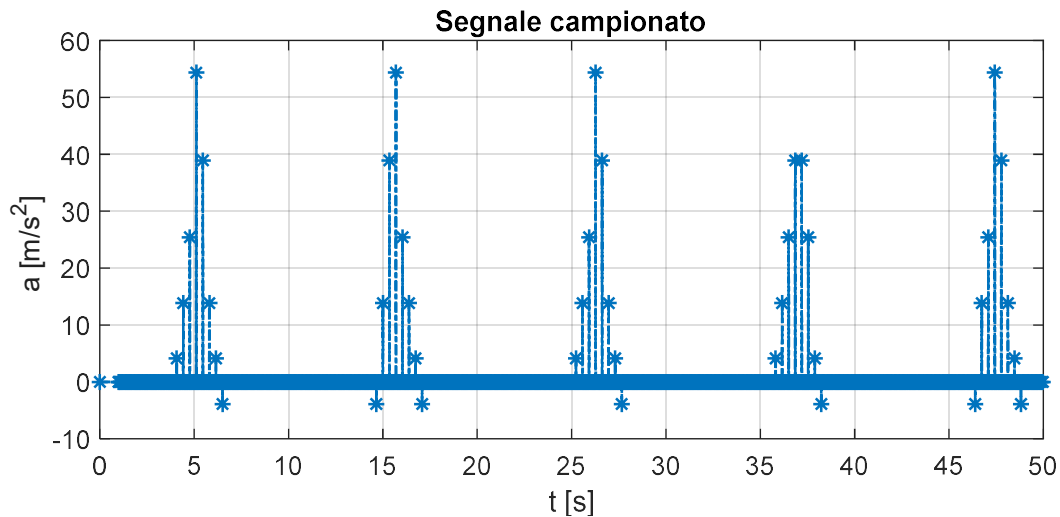


Figura 22  $l=10\text{ mm}$   $v=60\text{km/h}$

Analizzando il segnale di accelerazione campionato a una velocità del convoglio di 60 km/h si nota che si manifesta l'aliasing, questo fenomeno è dovuto a un campionamento insufficiente per ricostruire il segnale, si riottiene la forma del segnale come se fosse di una frequenza più bassa.

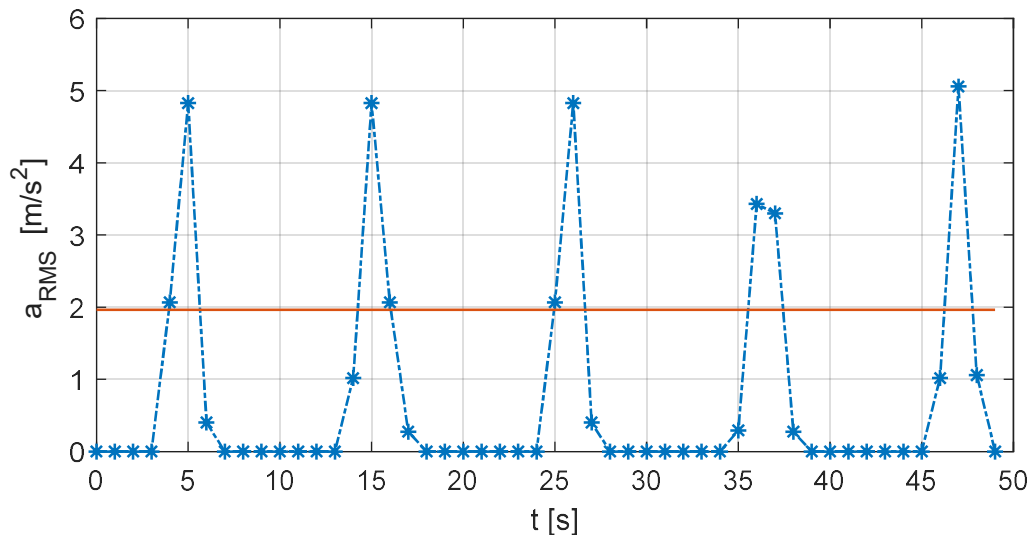


Figura 23 valore efficace  $l=10\text{ mm}$   $v=60\text{km/h}$

Il valore efficace di accelerazione corrispondente risente di questo effetto con la definizione di picchi locali.

La scelta di un periodo  $T = 10\text{ s}$  per l'analisi del valore efficace permette una corretta valutazione del valore medio nonostante le eventuali concentrazioni dei valori acquisiti a causa di fenomeni come l'aliasing.

La scelta di un periodo  $T = 10\text{ s}$  risulta opportuna anche per il fatto che è un periodo relativamente breve in cui le variazioni di velocità del convoglio sono contenute e, ammettendo un margine di errore, permette dunque una valutazione del difetto tramite valore efficace sfruttando il modello semplificato proposto che ipotizza la velocità del convoglio costante.

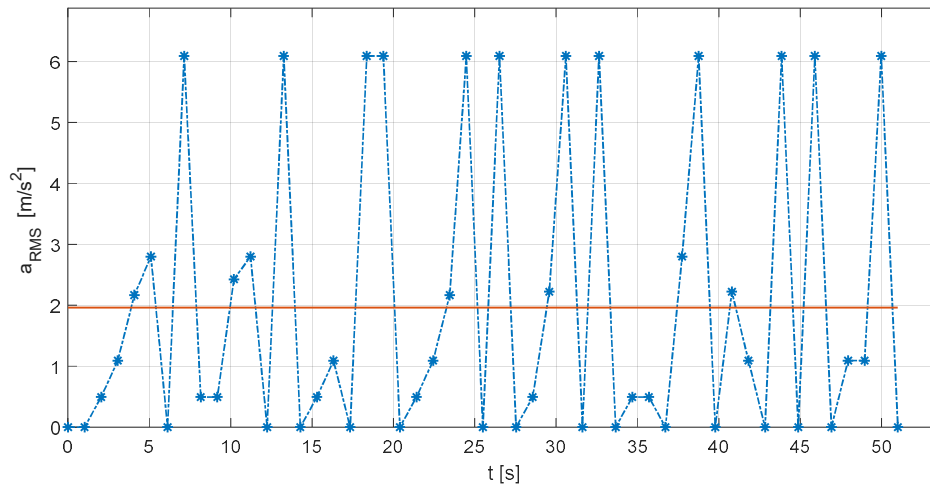


Figura 24  $l=10 \text{ mm}$   $v=100\text{km/h}$

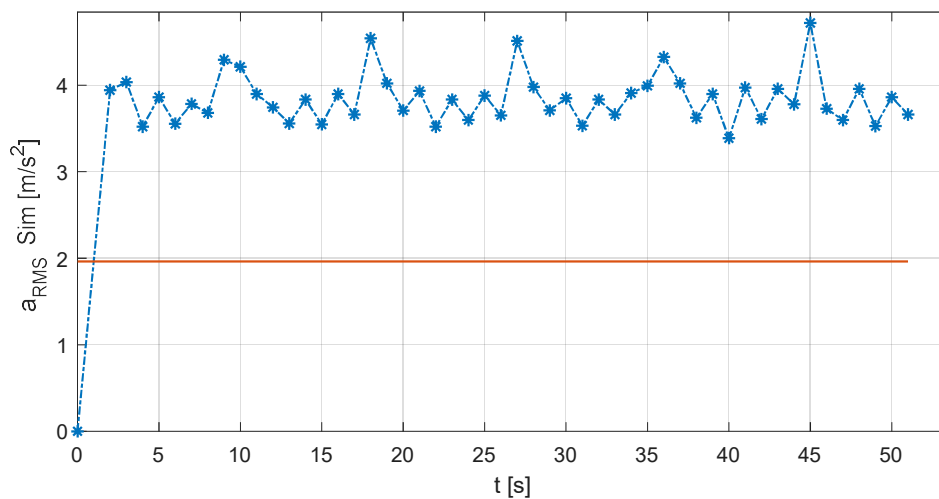


Figura 25  $l= 10 \text{ mm}$   $v=100\text{km/h}$   $F_s=8000 \text{ Hz}$

- Si nota che aumentando la frequenza di campionamento il valore efficace rilevato converge al valore efficace del segnale teorico.
- Si deduce che ha poco senso la valutazione del picco di valore efficace per la determinazione dell'entità del difetto quanto piuttosto la valutazione del valor medio che anche con una forte riduzione della frequenza di campionamento conserva maggiormente la sua proporzionalità con l'entità del difetto.
- La valutazione del picco di valore efficace viene utilizzata non per la valutazione dell'entità del difetto ma per la verifica di superamento della soglia del rumore e quindi della segnalazione di una anomalia che può essere dovuta al wheel-flat come a un danneggiamento della linea.

Per un difetto più grande come ad esempio 15mm è possibile il rilevamento tramite la soglia del rumore già a 40 km/h

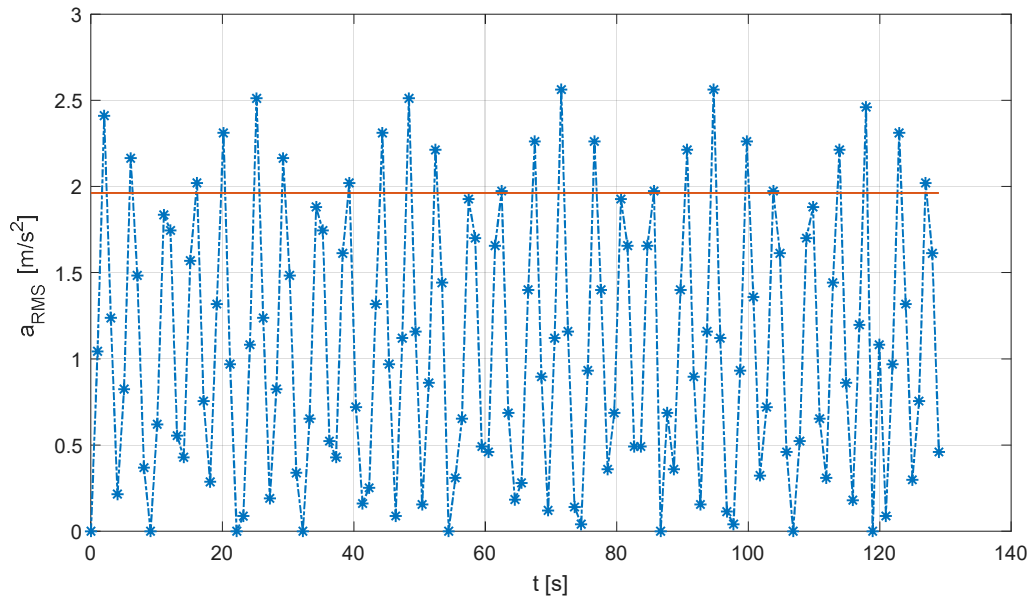


Figura 26  $l = 15 \text{ mm}$   $v = 40 \text{ km/h}$

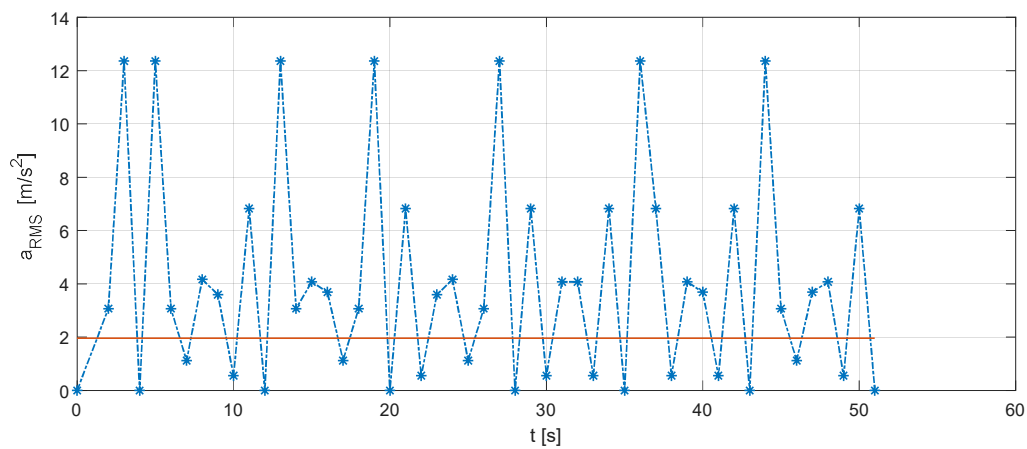


Figura 27  $l = 15 \text{ mm}$   $v = 100 \text{ km/h}$

Per un tasso di campionamento  $F_s = 200 \text{ Hz}$  per il difetto  $l = 15 \text{ mm}$  anche a  $V = 100 \text{ km/h}$  non tutti i punti del valore efficace di accelerazione si trovano sopra la soglia del rumore poiché essendo un difetto relativamente piccolo per il tasso di campionamento imposto, non riesce a rilevare almeno un picco ad ogni secondo di rilevamento su cui viene valutato il valore efficace.

Per un difetto di grandi dimensioni dal campionamento del segnale di accelerazione, ottenuto secondo il modello costruito, già a 40km/h tutti i punti di valore efficace di accelerazione si trovano al di sopra della soglia del rumore.

Secondo normativa una ruota con un difetto di 60mm non può più circolare.

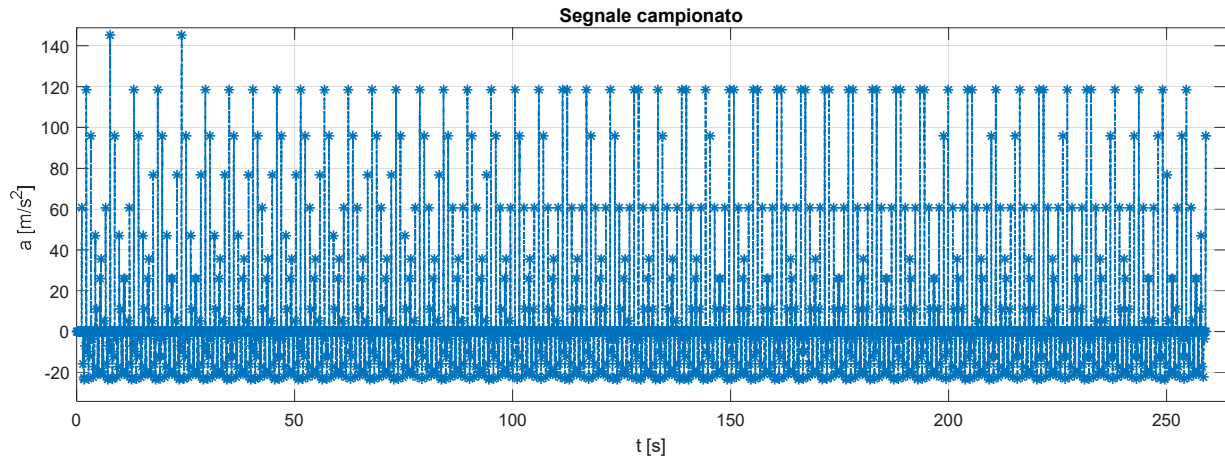


Figura 28 segnale campionato  $v=40 \text{ km/h}$   $l=60 \text{ mm}$

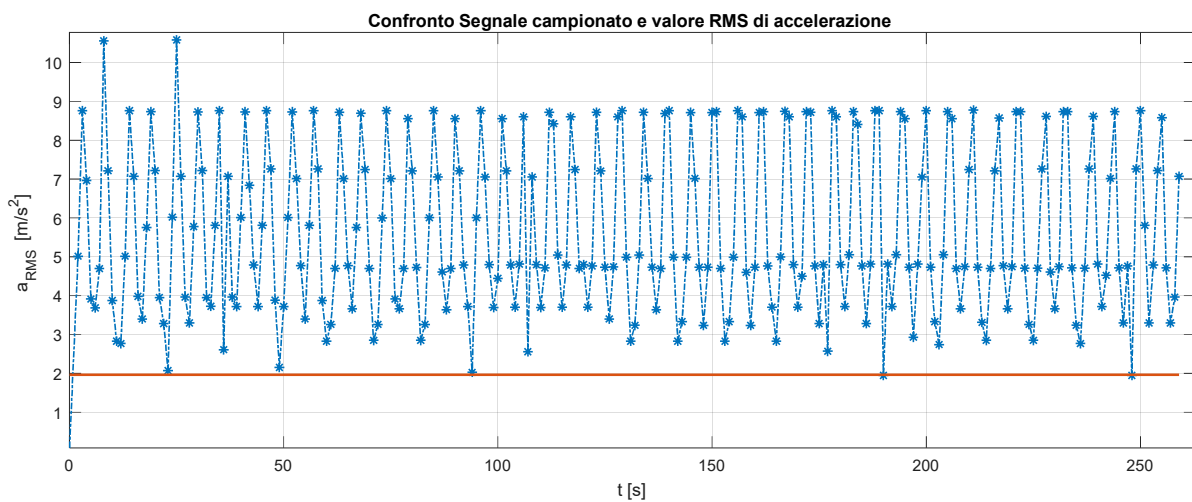


Figura 29  $a_{\text{rms}}$   $v=40 \text{ km/h}$   $l=60 \text{ mm}$

### 3.5 Tasso di rilevamento

Si riporta l'andamento delle percentuali di  $a_{rms}$  rilevate per  $N=1000$  rivoluzioni al di sopra del valore di soglia per diverse velocità e difetti

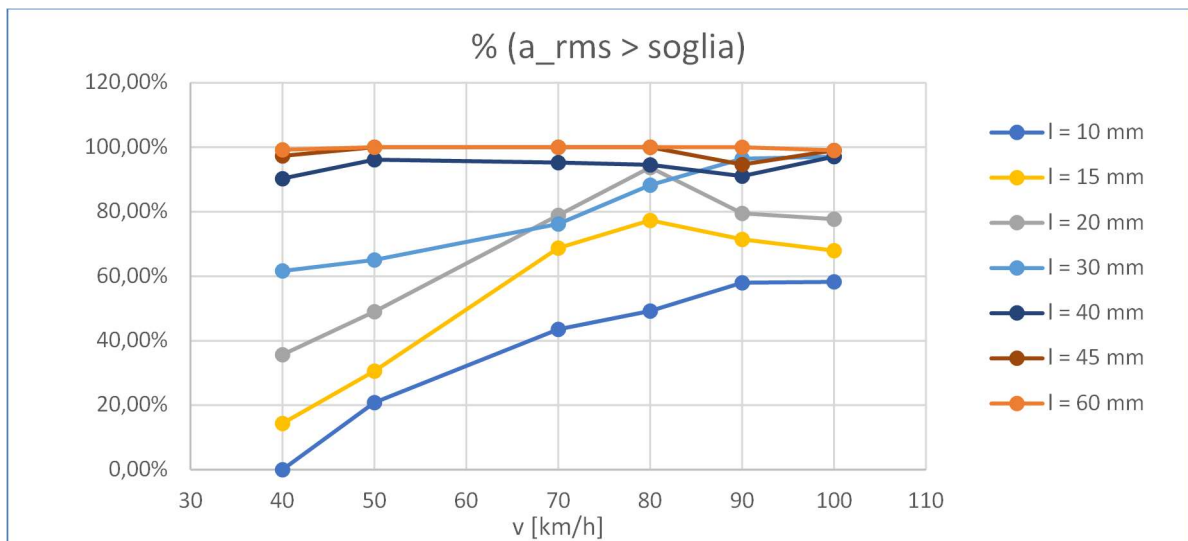


Figura 30 percentuale di punti di valore efficace sopra la soglia del rumore

si nota che a basse velocità più è piccolo è il difetto minori sono i picchi rilevati, al salire della velocità sale l'accelerazione e coerentemente aumenta la percentuale dei valori di  $a_{rms}$  rilevati superiori alla soglia. Oltre una certa velocità però il tasso di rilevamento riduce il numero di picchi rilevabili.

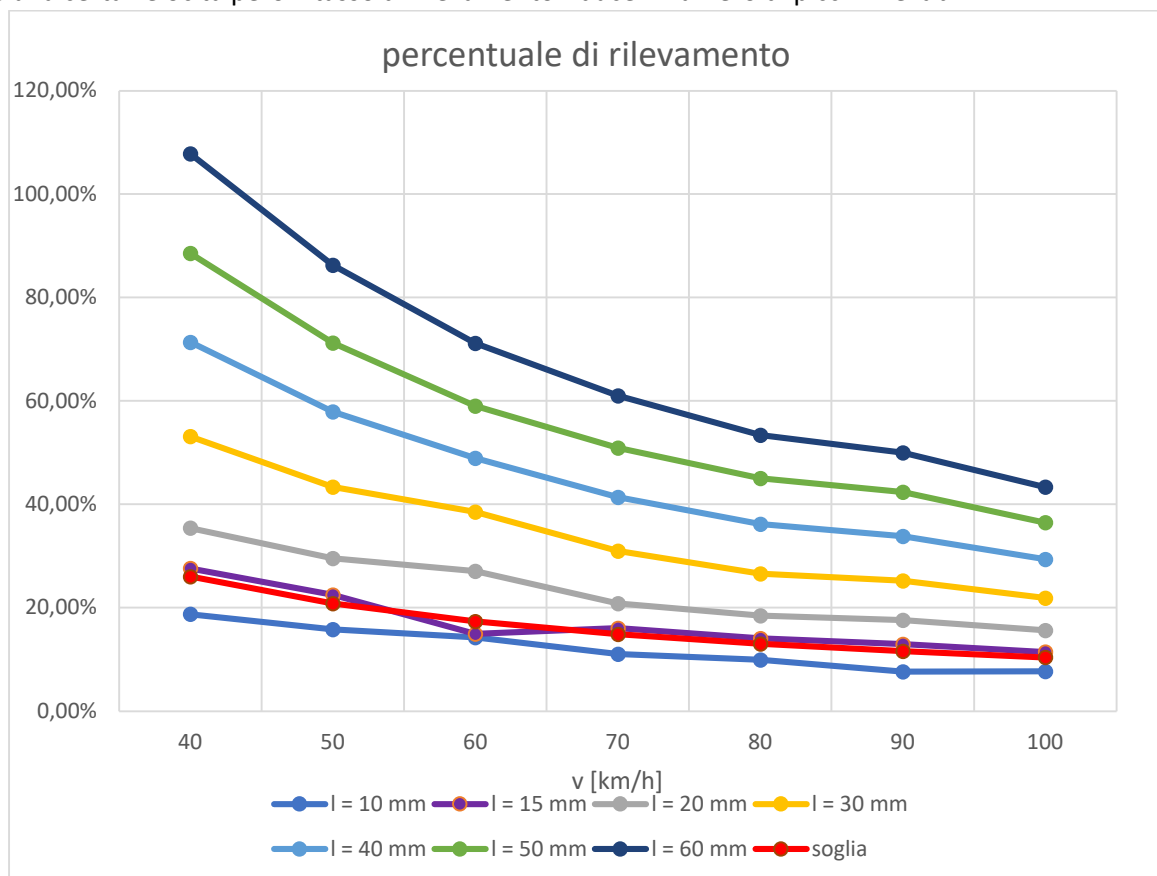


Figura 31 tasso di campionamento al variare della velocità per diversi difetti

$$\text{tasso di rilevamento} = \frac{l}{2\pi R} \cdot \frac{Fs}{n}$$

- $\frac{Fs}{n}$  = il rapporto tra frequenza di campionamento su giri al secondo definisce il numero di punti rilevati ad ogni giro di ruota
- $\frac{l}{2\pi R}$  = definisce il tratto di ruota danneggiato

Il prodotto rappresenta un indice di rilevabilità del difetto.

Bisogna inoltre considerare che i valori di picco per la conferma si trovano solo nella zona centrale corrispondente a un intervallo ridotto della zona difettosa e che tende ulteriormente a restringersi con l'aumento della velocità.

la curva chiamata soglia è la percentuale minima di tasso di rilevamento per campionare almeno un picco al secondo:

$$\text{soglia} = \frac{1}{(n)}$$

Si nota che per i difetti più piccoli (15mm e 10mm) il tasso di rilevamento è inferiore alla soglia, non è possibile in media rilevare un picco ogni secondo di campionamento.

Per avere una valutazione del segnale più affidabile e compensare in parte la perdita di informazione dovuta al sotto campionamento viene scelto un periodo di studio del segnale  $T = 10s$ .

Questa scelta permette di avere un tasso di rilevamento dei picchi sul periodo migliore con un giusto margine rispetto la soglia minima compensando in parte questo limite dovuto alla frequenza di campionamento  $F_s = 200Hz$ .

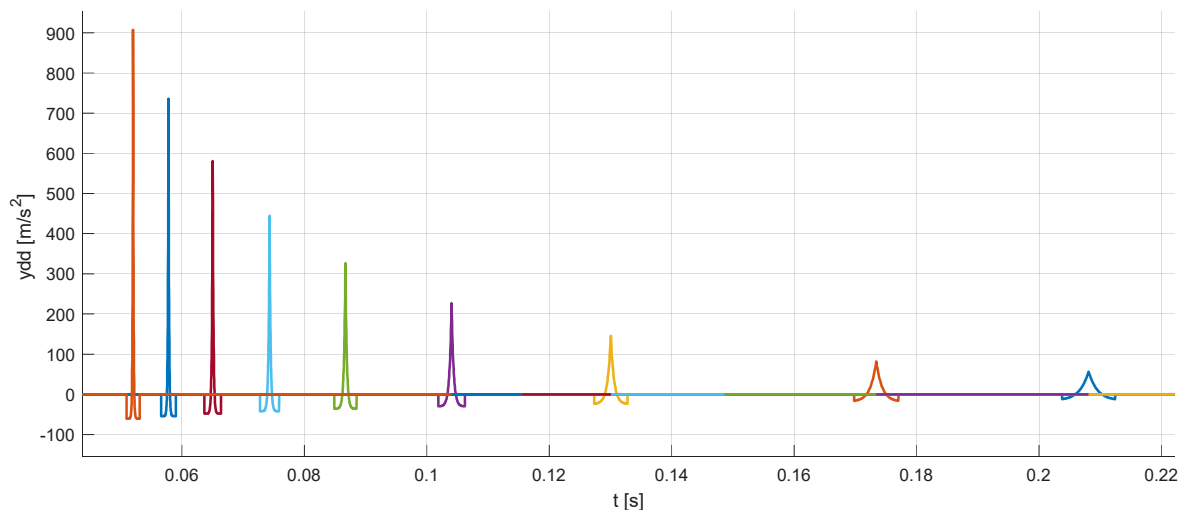


Figura 32  $V = 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 \text{ km/h}$   $l = 60 \text{ mm}$

### 3.6 Analisi del valore efficace di accelerazione stima del difetto

Si riporta il grafico delle medie del valore efficace di accelerazione valutate su un intervallo  $T = 10$  s.

Si nota che per diverse velocità al variare del difetto l'andamento dell' $a_{rms}$  media è circa lineare al variare del difetto a parità di velocità.

Si riportano i grafici degli andamenti del rapporto tra  $a_{rms}$  calcolata su 10 secondi del segnale teorico e la media di  $a_{rms}$  ottenuta dal segnale campionato su lo stesso periodo.

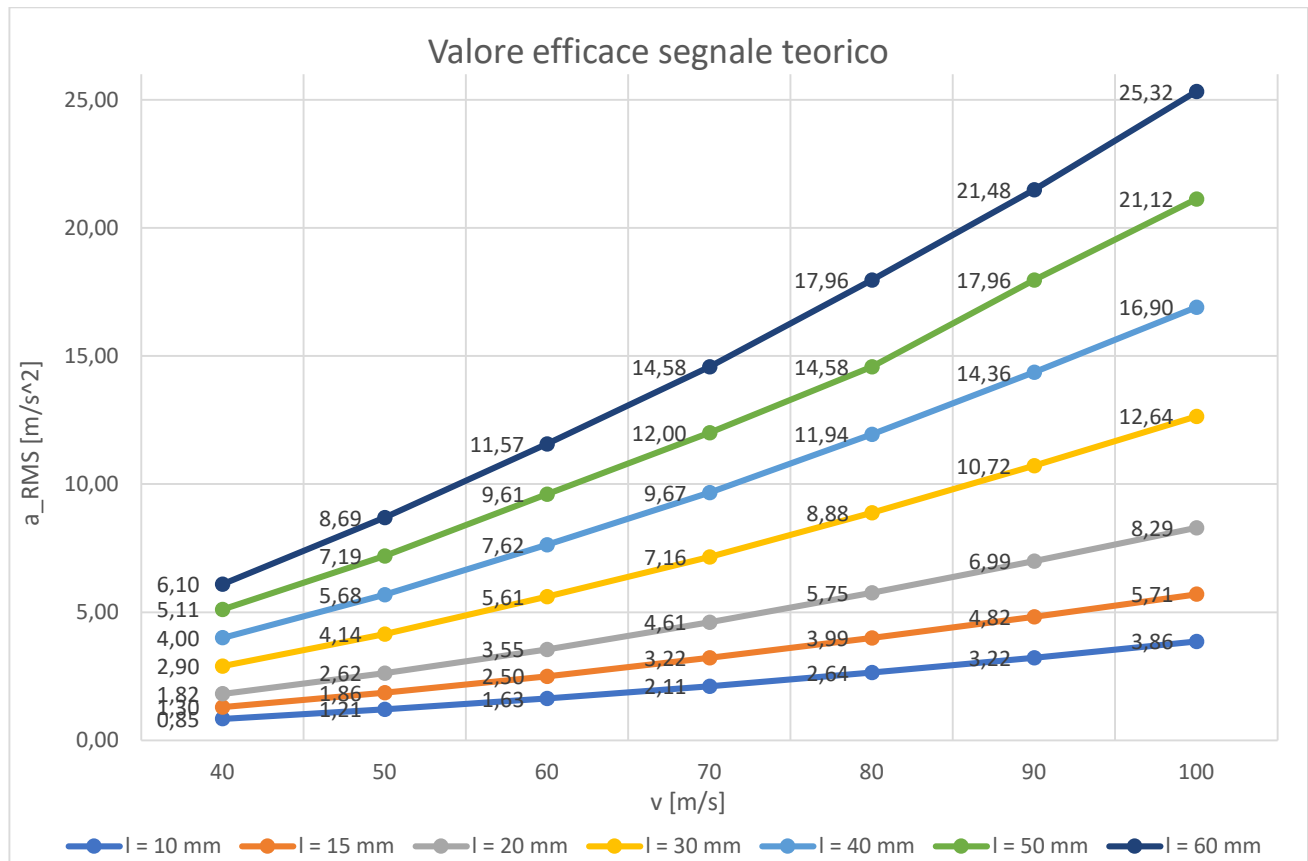


Figura 33 valore efficace segnale teorico per diversi difetti e diverse velocità

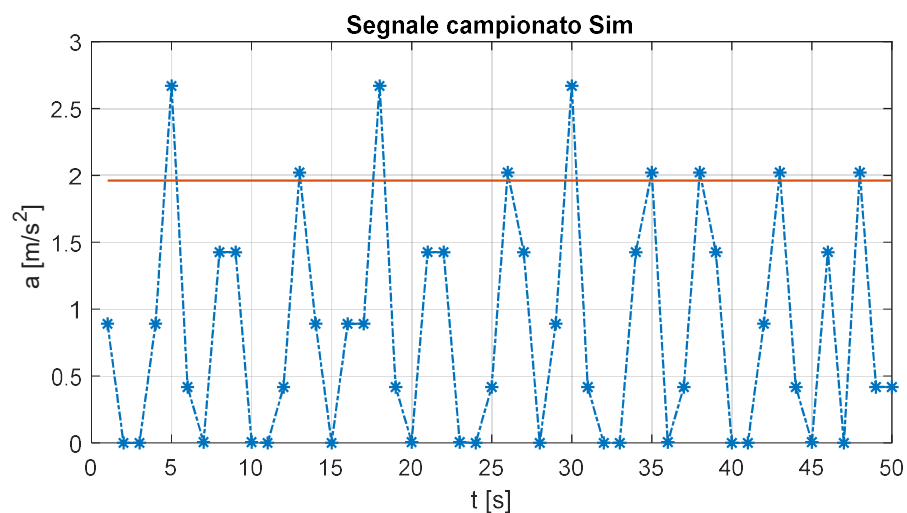


Figura 34  $l=10$  mm  $v=50$  km/h

Si nota che il valore efficace ottenuto dal segnale campionato teorico è oscillante.

Per essere rilevato i picchi di valore efficace devono superare la soglia del rumore di 0,2g.

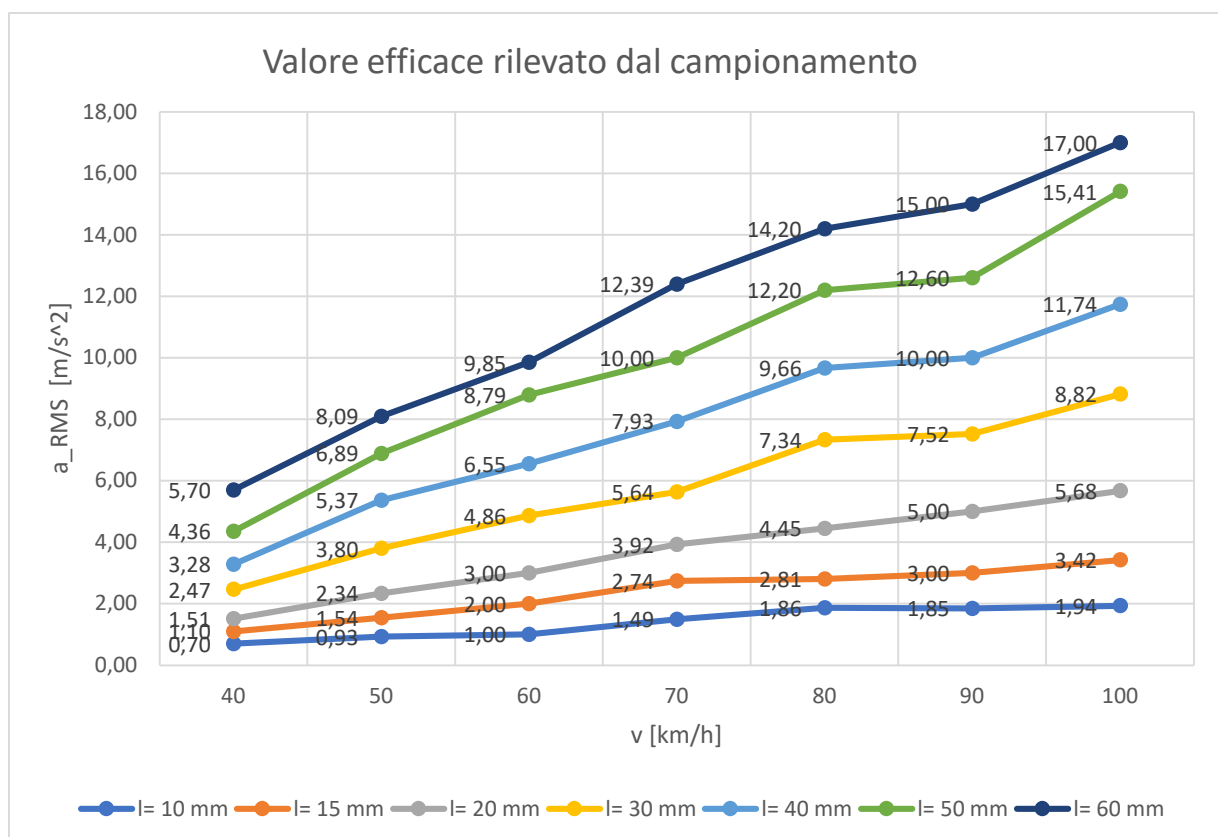
Il valore efficace medio minimo rilevabile sarà maggiore di 0,1g.

Nel caso riportato in figura (34) il valore efficace corrispondente a questo difetto è

$$a_{RMS}(0.01m, 50km/h) = 1,2m/s^2 \approx 0.12g > 0.1g$$

Da questa considerazione si conclude che difetti con valori efficaci medi di accelerazione più bassi non possono essere rilevati secondo questo modello, in particolare risulta che per un difetto  $l = 10\text{ mm}$  la velocità soglia per il suo rilevamento è  $V = 50\text{ km/h}$ .

Si riportano i valori efficaci medi calcolati su un periodo  $T = 10s$  del segnale di valore efficace medio ottenuto dal campionamento dell'accelerazione verticale.



**Figura 35** valore efficace ottenuto da campionamento di segnali teorici per diversi difetti e velocità



Si cerca di trovare una correlazione tra il valore efficace medio di accelerazione ottenuto dal campionamento con il valore efficace ottenuto dal segnale teorico facendone il rapporto.

$$\beta = \frac{a_{RMS}}{a_{RMS_{sampl}}}$$

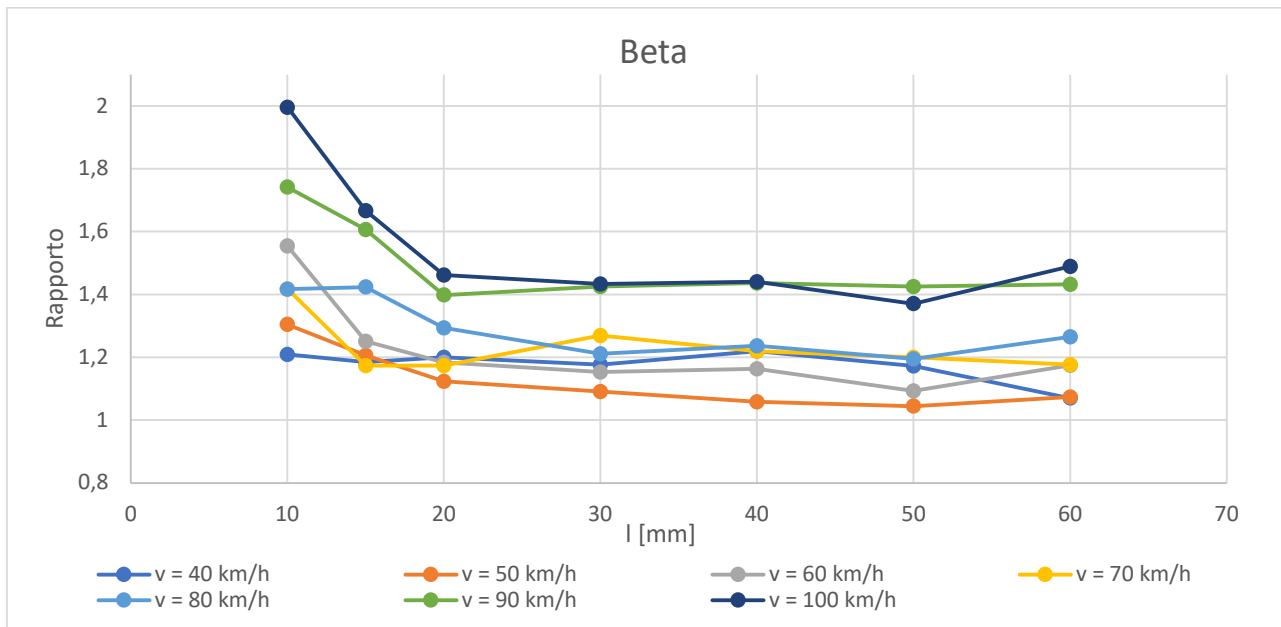


Figura 36 rapporto valori efficaci per diversi difetti e velocità

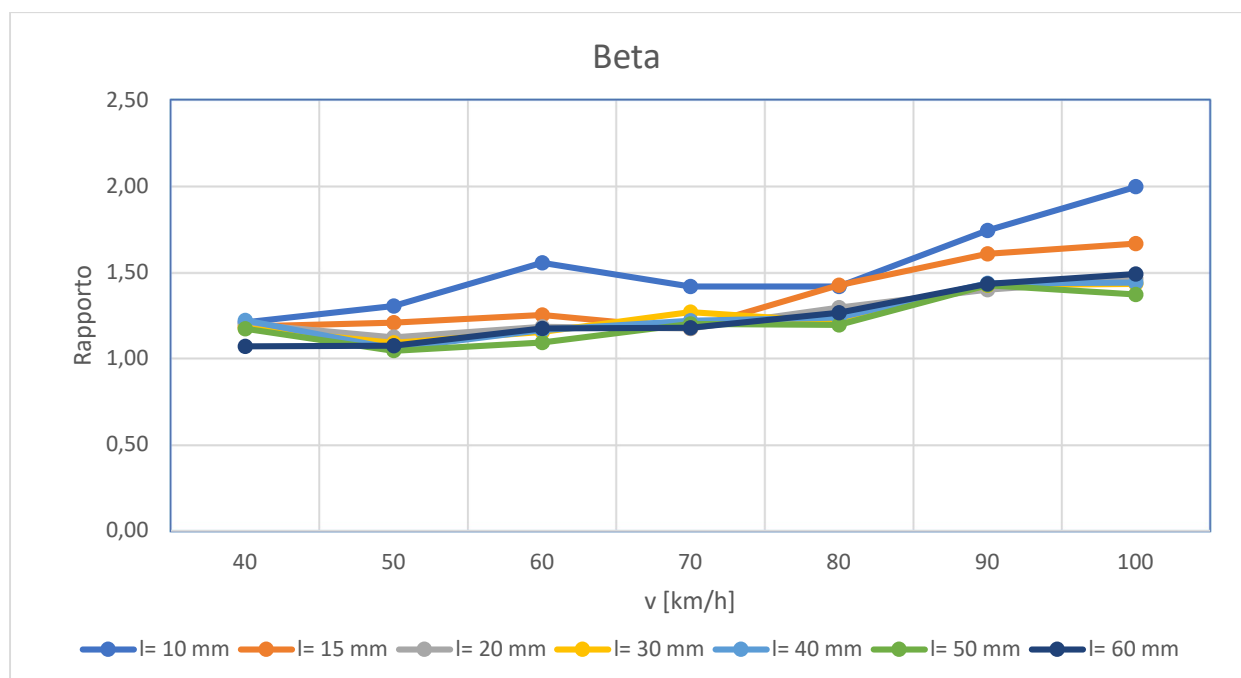


Figura 37 rapporto valori efficaci per diversi difetti e velocità

Dai grafici riportati dell'andamento del rapporto, che chiameremo  $\beta$ , tra valore efficace di accelerazione calcolato sul segnale teorico su la media del valore efficace campionato valutata sullo stesso periodo  $T = 10s$  si può notare che non varia fortemente con la dimensione del difetto ma cresce in modo più importante proporzionalmente con la velocità.

Si è verificato che aumentando la frequenza di campionamento il rapporto tende a 1.

Costruendo una curva di  $\beta$  in funzione della velocità si riportano i valori corrispondenti per ogni velocità e l'errore relativo commesso nell'approssimazione per ogni difetto.

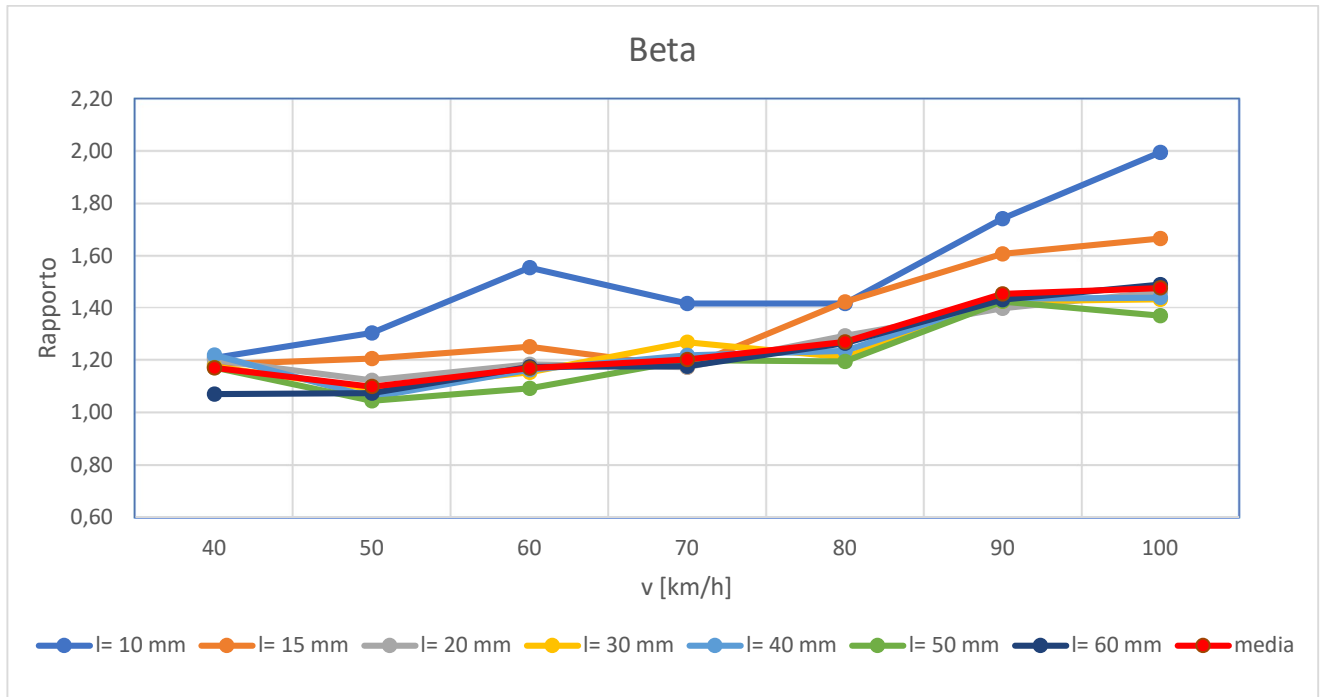


Figura 38 confronto rapporto beta per diversi difetti e diverse velocità

Si nota che al salire della velocità per i difetti più piccoli il rapporto aumenta maggiormente poiché a parità di velocità sono caratterizzati da un tasso di rilevamento più basso.

Velocità[km/h]	$\beta$	Errore relativo %						
40	1,17	-3,28%	-1,21%	-2,53%	-0,45%	-4,21%	-0,17%	8,57%
50	1,10	-18,65%	-9,71%	-2,14%	0,78%	3,76%	4,98%	2,34%
60	1,17	-32,87%	-6,96%	-1,20%	1,44%	0,53%	6,58%	-0,39%
70	1,20	-17,89%	2,37%	2,35%	-5,58%	-1,42%	0,16%	2,11%
80	1,27	-11,55%	-12,04%	-1,83%	4,71%	2,72%	5,97%	0,47%
90	1,45	-19,78%	-10,52%	3,83%	1,98%	1,23%	1,96%	1,52%
100	1,46	-35,16%	-12,82%	1,06%	2,93%	2,49%	7,20%	-0,86%
Difetti [mm]		10	15	20	30	40	50	60

Tabella 1

Si può valutare la media del valore efficace del segnale di accelerazione campionato e moltiplicarlo per il valore correttivo  $\beta$  definito in funzione della velocità per compensare la perdita di informazione dovuta al campionamento a  $F_s = 200 \text{ Hz}$ .

Il prodotto che si ottiene permette di effettuare la stima del difetto  $l$  attraverso la comparazione con la curva dei valori efficaci teorici corrispondente alla velocità del carrello.

Si riporta un esempio:

$$a_{rms \text{ medio } camp}(V = 40 \text{ km/h}) = 1,514 m/s^2$$

$$a_{rms \text{ medio } corretto} = a_{rms \text{ medio } camp} \cdot \beta(V = 40 \text{ km/h})$$

$$a_{rms \text{ medio } corretto} = 1,514 m/s^2 \cdot 1,17 = 1,772 m/s^2$$

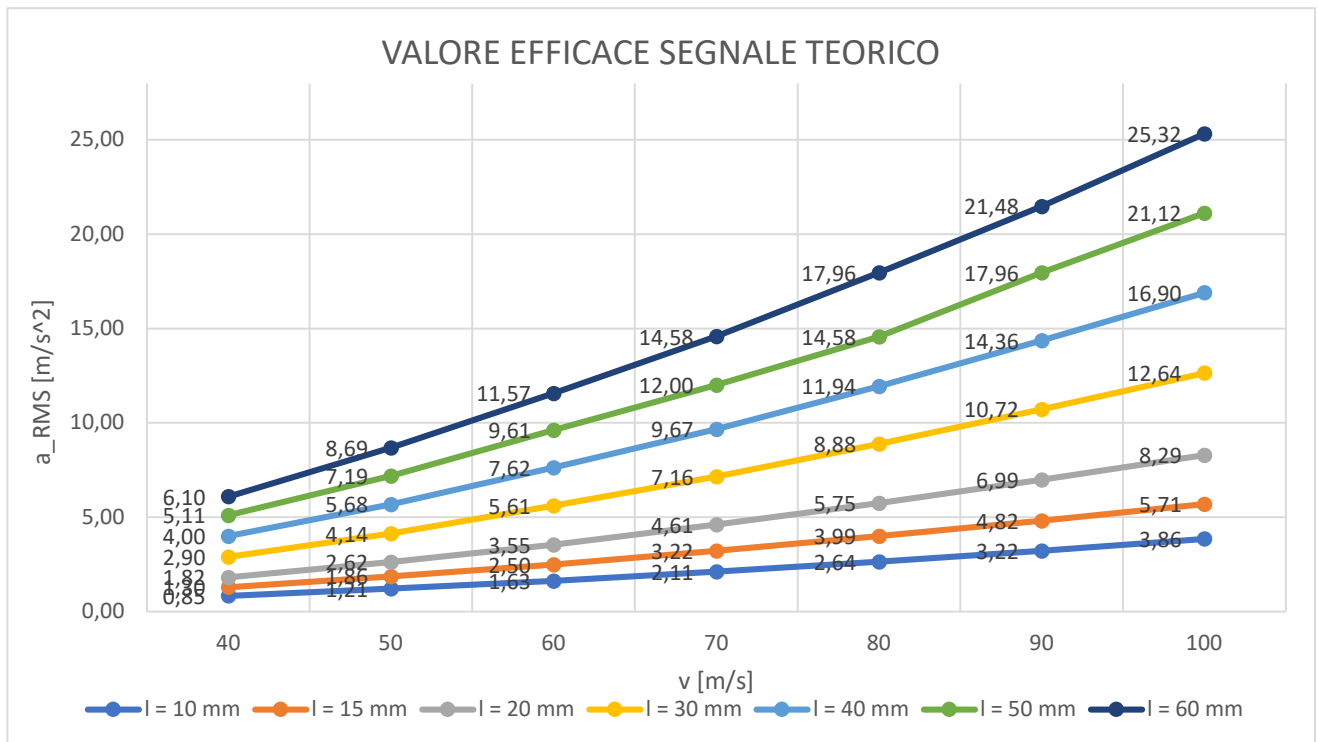


Figura 39 valore efficace segnale teorico per diversi difetti e diverse velocità

$$a_{rms \text{ medio corretto}} = 1,514 m/s^2 \cdot 1,17 = 1,772 m/s^2$$

Entrando nel grafico del valore di  $a_{rms}$  calcolato sul segnale teorico ottengo la prima stima del difetto

$$a_{RMS} \geq a_{RMS\_min\_teo}(V, l)$$

$$a_{RMS} \geq a_{RMS\_min\_teo}(40 km/h, 0.02 m) = 1.28 m/s^2$$

$$a_{RMS} < a_{RMS\_min\_teo}(40 km/h, 0.02 m) = 2.311 m/s^2$$

$$l_{stimato} = 0,02 m$$

La stessa verifica è stata eseguita su diversi set di dati che simulano diversi difetti a velocità costante per confermare che l'errore introdotto dal parametro  $\beta$ , ottenuto dalla media dei  $\beta$  dei singoli difetti a parità di velocità, permette di stimare correttamente l'entità del difetto.

Il parametro  $\beta$  permette di compensare la perdita di informazione del segnale di accelerazione verticale acquisito definito dal tasso di rilevamento.

Il tasso di rilevamento scende all'aumentare della velocità, l'introduzione del fattore  $\beta$  cerca di compensare questa perdita di informazione in funzione della velocità indipendentemente dall'entità del difetto.

La definizione di un range di valori nell'intorno delle curve del valore efficace del segnale teorico permette di identificare il difetto, nota la velocità, di rilevare l'entità del danno verificando in quale intervallo il valore efficace ottenuto ricade.

Si è scelta una definizione del difetto discreta tramite la determinazione di range di valori accettabili nell'intorno della curva teorica di valore efficace definita in funzione della velocità.

Questa scelta permette di compensare in parte eventuali disturbi introdotti dalla rumorosità tipica dell'ambiente di acquisizione in ambito ferroviario, è un metodo semplice e permette in caso di velocità non esattamente costante una corretta valutazione.

### 3.7 Modello Simulink

È stato costruito un modello simulink semplificato del carrello e dell'interazione ruota rotaia per introdurre l'influenza delle masse sul segnale di accelerazione teorico in input.

Ipotesizzo in questo modello semplificato che la ruota resti in aderenza con la rotaia senza saltare, si trascurano le irregolarità del tracciato  $z_{rot} = z_0 = 0$  e il suo moto relativo  $\dot{z}_{rot} = 0$ .

In input al sistema, partendo dall'equilibrio verticale delle forze agenti sulla ruota, inserisco la forza impulsiva teorica  $I$  che ho definito come:

$$I = m_w \cdot YYdd$$

Dove  $YYdd$  è un vettore costituito dalla ripetizione della forma di accelerazione teorica che dipende dal diametro  $D$ , del difetto  $l$  e della velocità  $V$  imposte costanti.

Equilibrio delle forze sulla ruota:

$$m_w \ddot{z}_w = k_{prim}(z_{carr} - z_{whe}) + c_{prim}(\dot{z}_{carr} - \dot{z}_{wheel}) - k_{rot}(z_{wheel} - z_{rot}) - c_{rot}(\dot{z}_{wheel} - \dot{z}_{rot}) + I$$

Equilibrio al carrello:

$$m_{cass} \ddot{z}_{carr} = k_{sec}(z_{cass} - z_{carr}) + c_{sec}(\dot{z}_{cass} - \dot{z}_{carr}) - k_{pri}(z_{carr} - z_{wheel}) - c_{prim}(\dot{z}_{carr} - \dot{z}_{wheel})$$

Equilibrio alla cassa:

$$m_{cass} \ddot{z}_{cass} = -k_{sec}(z_{cass} - z_{carr}) - c_{sec}(\dot{z}_{cass} - \dot{z}_{carr})$$

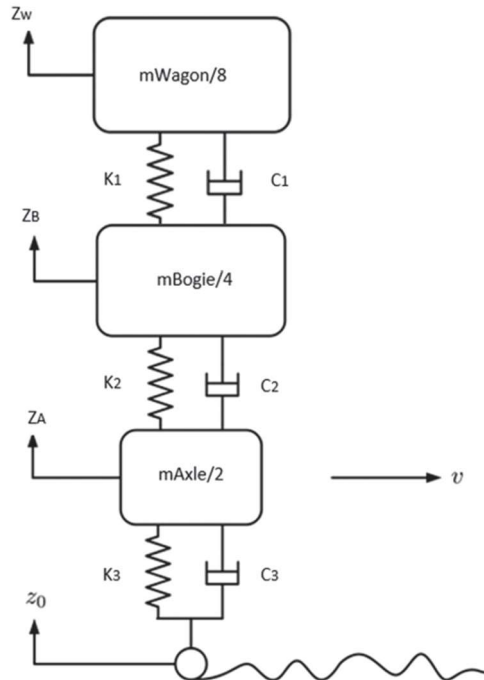


Figura 40 modello analitico semplificato

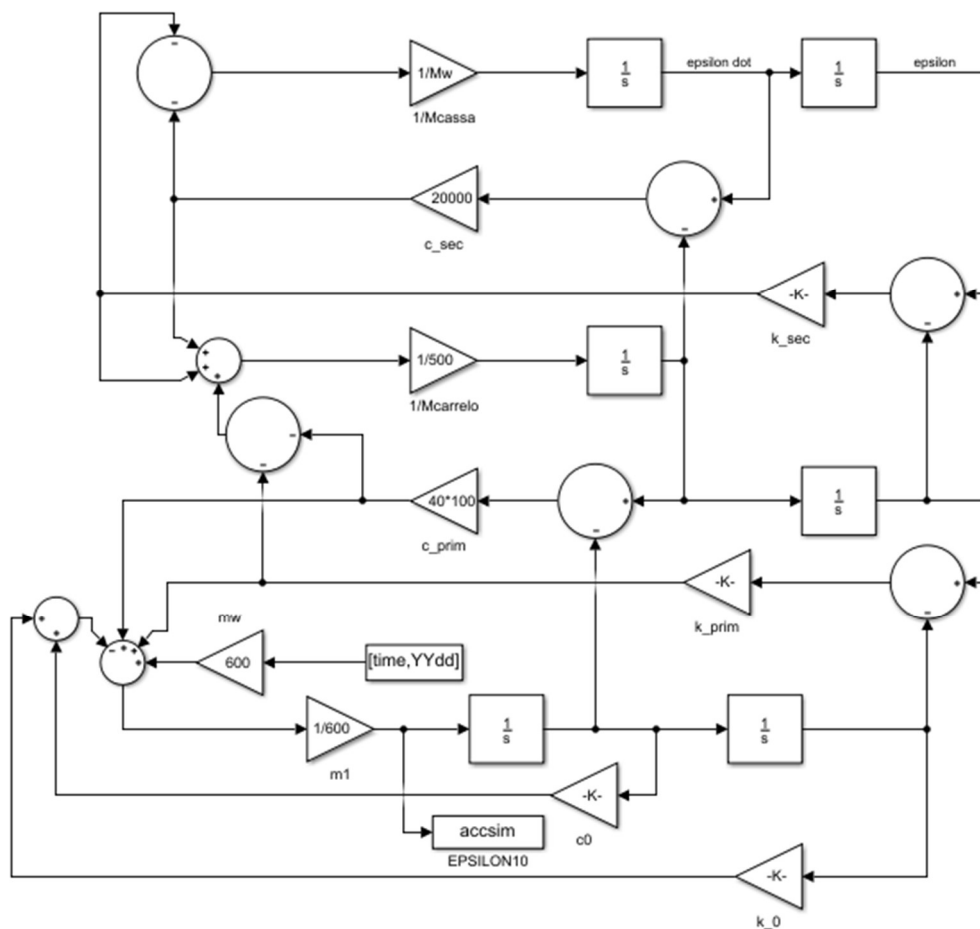


Figura 41 modello a blocchi simulink

Parametri imposti al modello simulink		
$1/8 M_{cassa}$	8000	Kg
$k_{secondaria}$	$56 \cdot 10^6$	N/m
$c_{secondaria}$	$20 \cdot 10^3$	N·s/m
$1/4 M_{carrello}$	500	Kg
$k_{primaria}$	$1350 \cdot 10^3$	N/m
$c_{primaria}$	$4 \cdot 10^3$	N·s/m
$1/2 M_{sala}$	600	Kg
$k_0$	$188 \cdot 10^6$	N/m
$c_0$	$100 \cdot 10^3$	N·s/m

Tabella 2

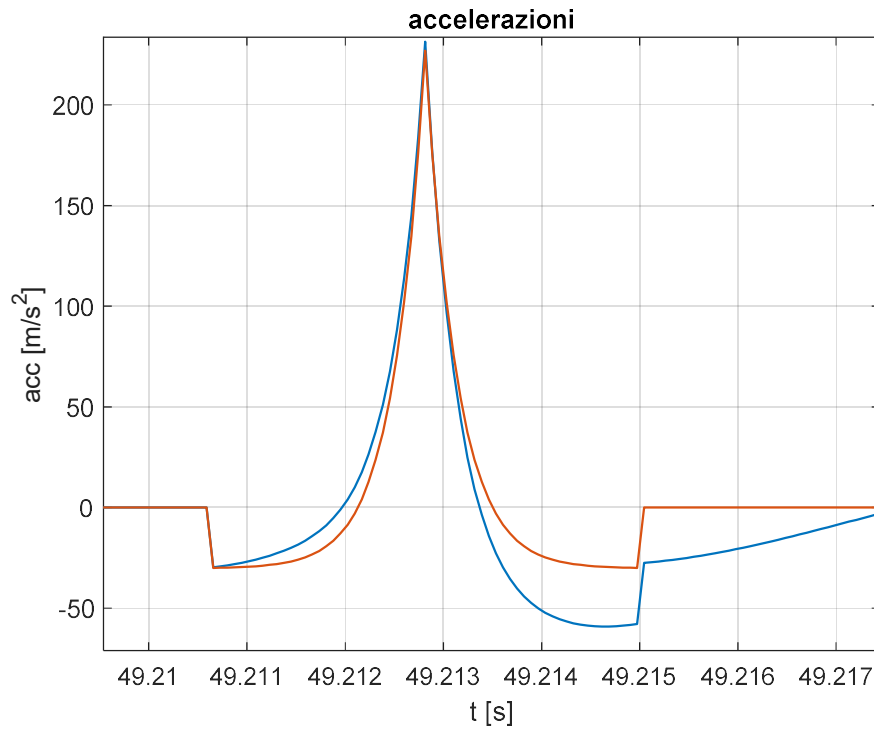


Figura 42  $l=60\text{ mm}$   $v=50\text{km/h}$

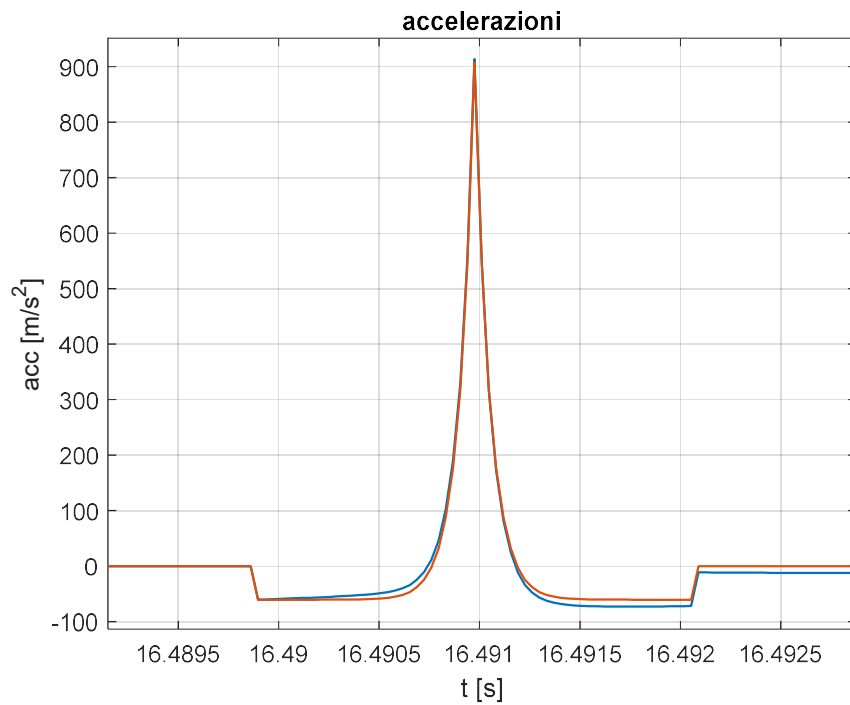


Figura 43  $l=60\text{ mm}$   $v=100\text{km/h}$

Si nota che ad alte velocità l'influenza relativa alla deformazione della forma di accelerazione dovuta dalla dinamica del carrello diventa meno rilevante.

Si riportano nei grafici seguenti il confronto tra segnale ottenuto dal modello e i punti ottenuti dal campionamento a  $F_s = 200\text{Hz}$  del medesimo segnale.

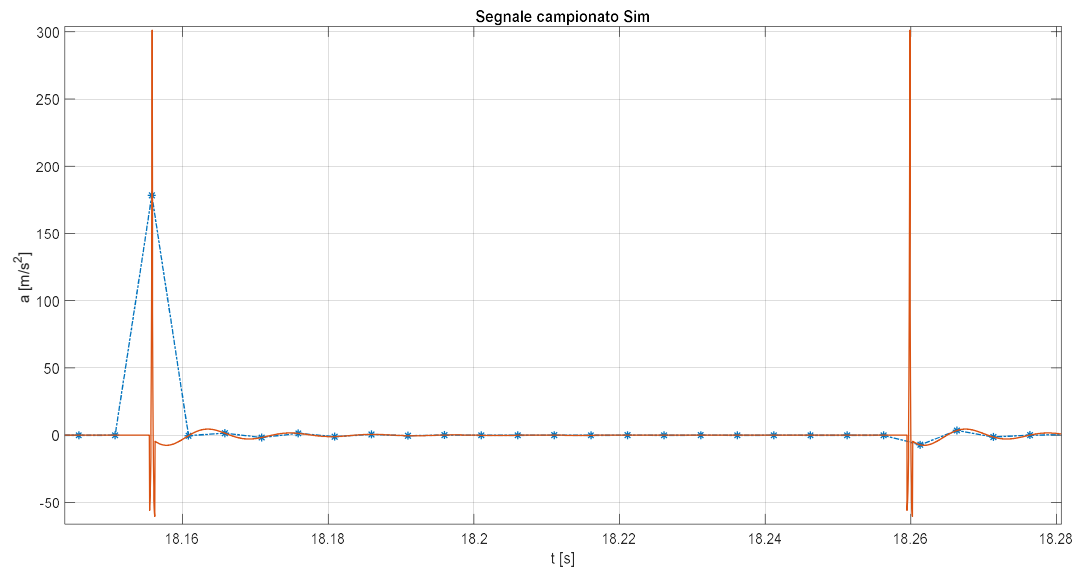


Figura 44  $l = 20 \text{ mm}$   $v = 100 \text{ km/h}$

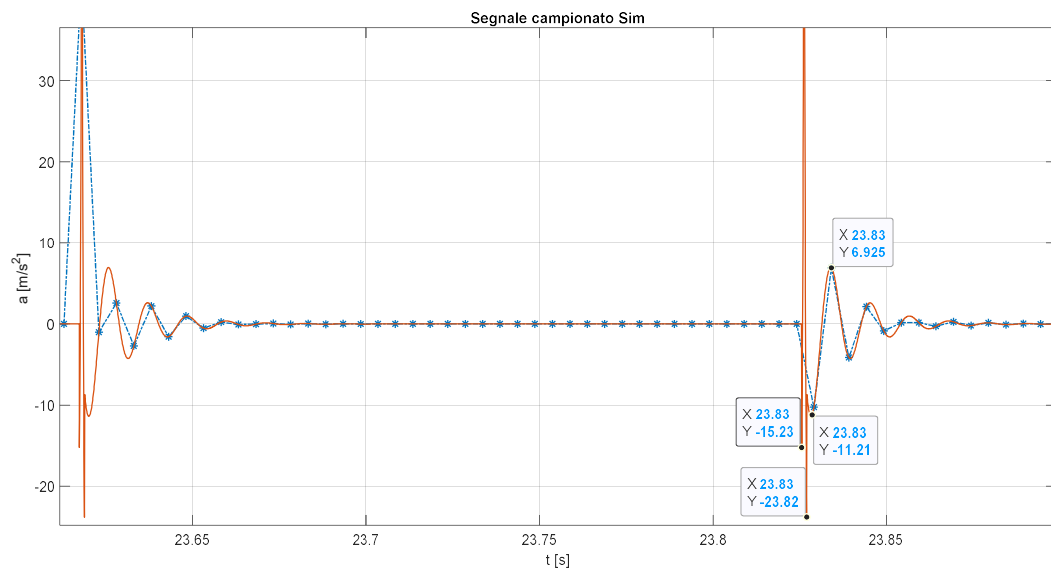


Figura 45  $l = 20 \text{ mm}$   $v = 50 \text{ km/h}$

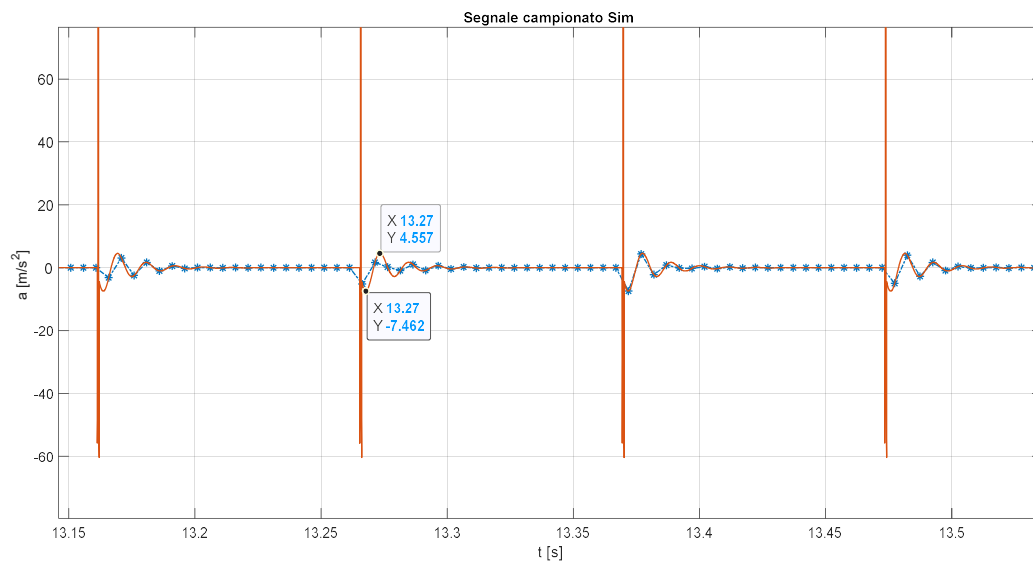


Figura 46  $l=20 \text{ mm}$   $v=100 \text{ km/h}$

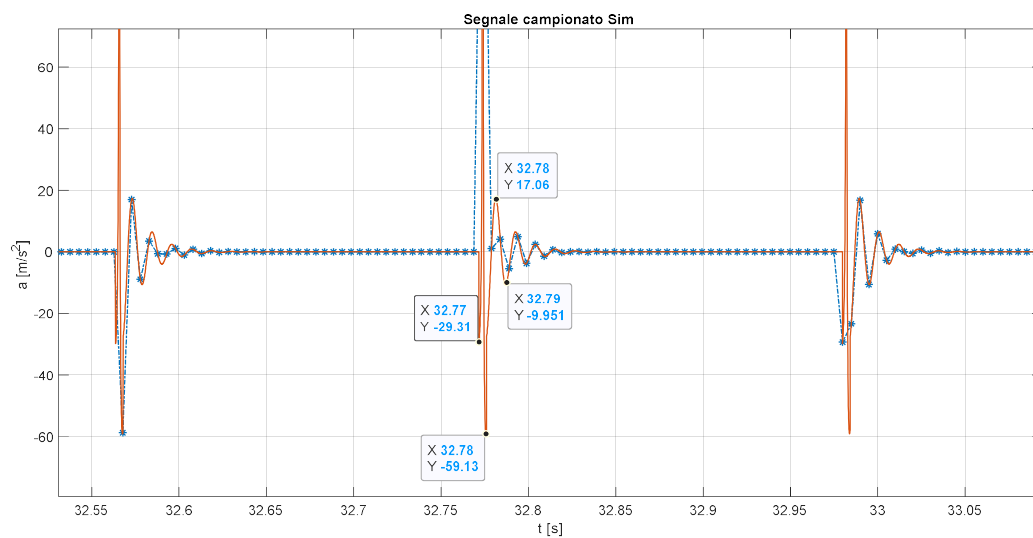


Figura 47  $l=60 \text{ mm}$   $v=50 \text{ km/h}$

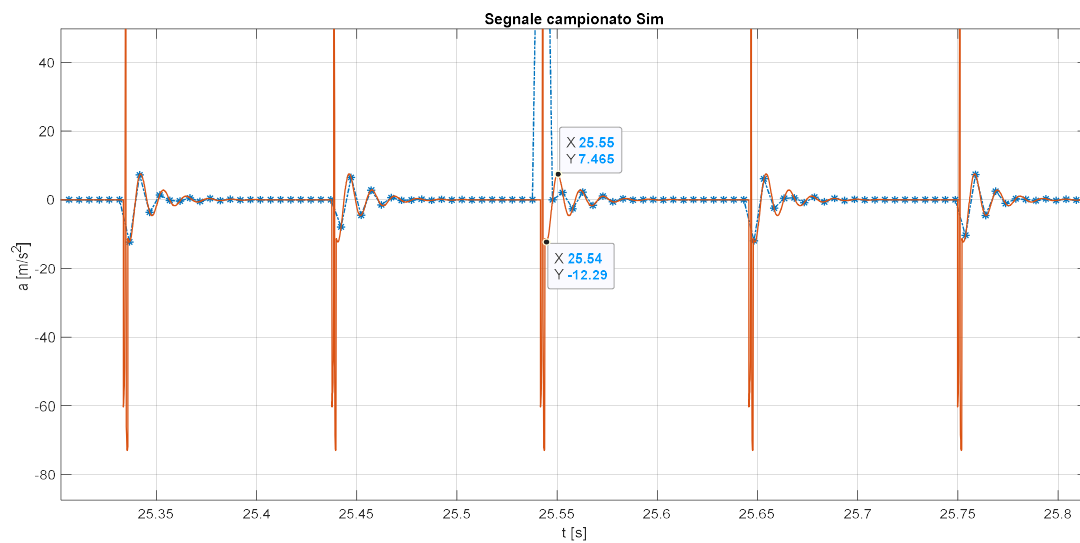


Figura 48  $l=60 \text{ mm}$   $v=100 \text{ km/h}$



- Si nota che con il modello simulink si introduce un effetto di disturbo dovuto alle masse del sistema.
- Per difetti più grandi si nota un disturbo più rilevante a parità di velocità.
- Ad alte velocità il disturbo è sempre proporzionale alla dimensione del difetto ma la differenza tra segnale teorico e segnale risultante risulta essere più piccola.
- La variazione del valore efficace del segnale ottenuto da simulink rispetto a quello teorico risulta leggermente maggiorato dell'ordine di  $0,5 \text{ m/s}^2$ .
- La valutazione del valore efficace secondo il modello teorico risulta applicabile al nuovo segnale ottenuto.
- Valutando in un periodo definito il valore del picco posso definire l'entità del difetto che deve essere confermata dal valore efficace.
- Il valore del picco massimo rilevato a causa dei limiti del campionamento a  $F_s = 200 \text{ Hz}$  non sempre rispecchia l'entità del danno.
- Risulta più affidabile la valutazione del difetto tramite la media del valore efficace anche se viene influenzata dal rumore della dinamica associata, ciò aumenta la stima dell'entità del danno in particolare per i difetti piccoli alle basse velocità.
- Per difetti maggiori o uguali ai 20mm la valutazione dell'entità del difetto tramite il valore efficace di accelerazione verticale non è significativamente influenzata dalla dinamica del carrello associata.

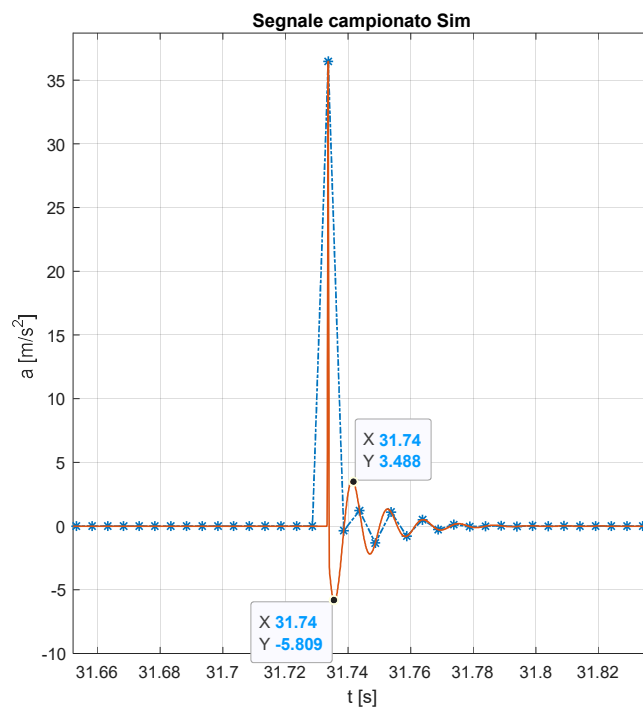


Figura 49  $l=10 \text{ mm}$   $v=50 \text{ km/h}$

Il disturbo al segnale di accelerazione introdotto dalla dinamica del carrello permette una migliore rilevazione della periodicità del ripetersi del difetto anche per difetti di piccola entità (10mm).

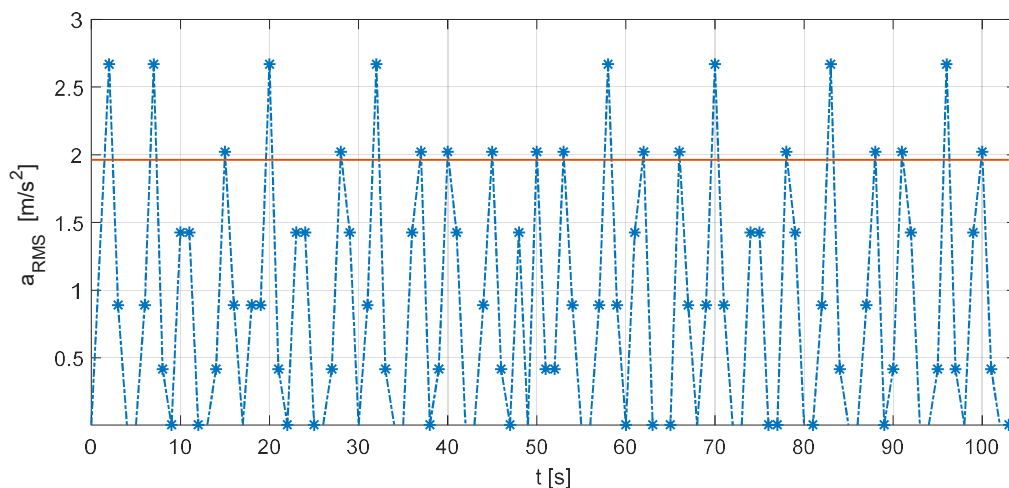


Figura 50  $l = 10 \text{ mm}$   $v=50 \text{ km/h}$

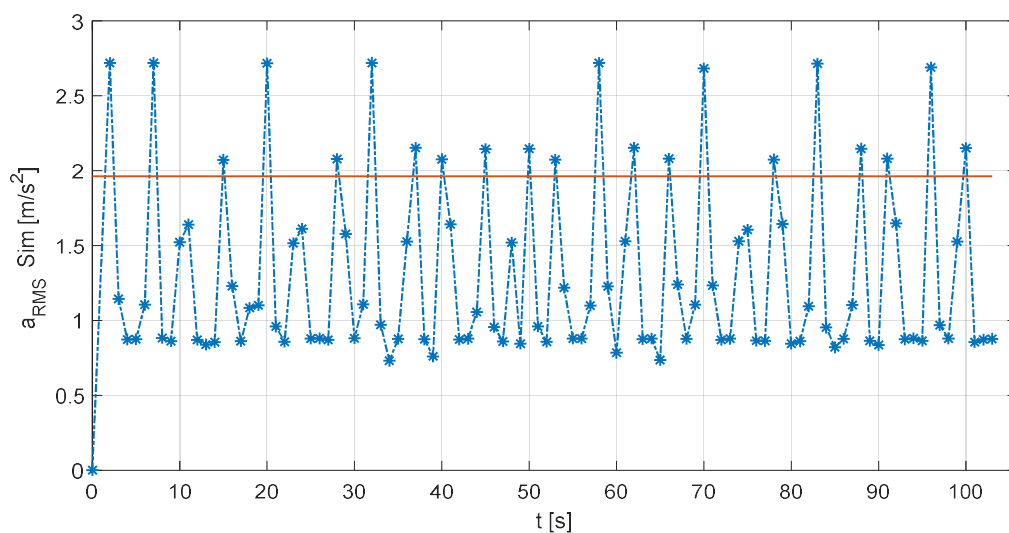


Figura 51  $l = 10 \text{ mm}$   $v=50 \text{ km/h}$

Si confronta il segnale ottenuto per lo stesso difetto rispettivamente dal modello teorico con quello ottenuto dal modello simulink che tiene conto della dinamica associata al carrello ferroviario.

Si nota che la numerosità dei picchi che supera la soglia del rumore è la medesima, e il valore dei picchi che hanno superato la soglia di valore efficace a parità di velocità e dimensione del difetto non è significativamente differente al valore dei picchi del valore efficace ottenuto dal segnale teorico

Si può affermare che nel secondo caso l'introduzione del rumore dovuto dalla dinamica simulata del carrello non influisce sui picchi di  $a_{RMS}$  ma solo sul valor medio che risulta più grande.

Il valore efficace medio valutato su un intervallo  $T = 10s$  fornisce una valutazione del difetto più stabile rispetto al picco di valore efficace ma è affetta da un incremento dovuto al rumore.

La soglia del rumore garantisce la rilevazione della presenza del difetto senza che sia influenzata da sovrastime dovute al disturbo a più basse frequenze introdotto dalle inerzie.

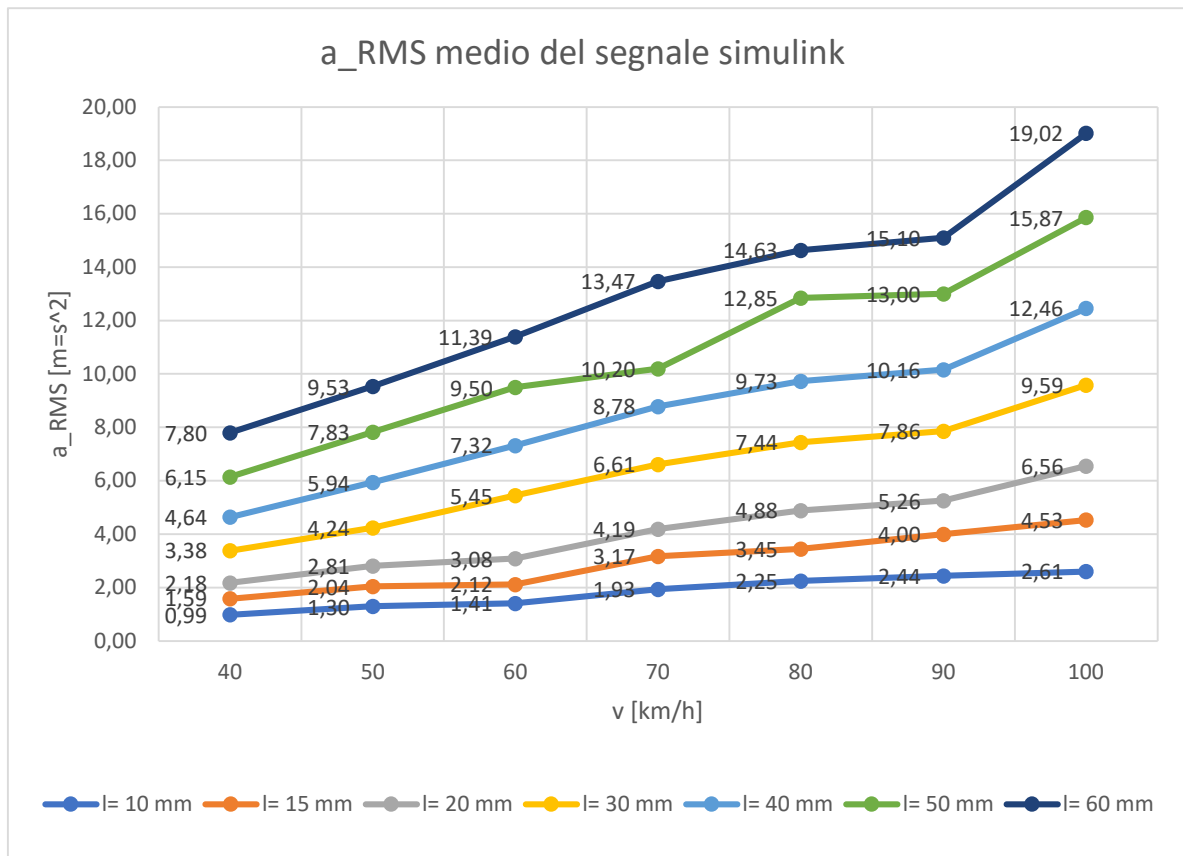


Figura 52 valore efficace da campionamento segnale modello simulink per diversi difetti e velocità

In questo grafico sono riportate le medie dei valori efficaci di accelerazione ottenute su un periodo  $T = 10s$  del valore efficace ottenuto dal campionamento del segnale di accelerazione ottenuto attraverso il modello simulink che tiene conto della dinamica associata del carrello

Si nota che in generale rispetto al valore efficace medio rilevato dal campionamento del segnale teorico, l'introduzione del disturbo a bassa frequenza introdotto dalle inerzie ha aumentato il valor medio efficace di accelerazione rilevato.

Questo incremento comunque è contenuto e permette ancora una corretta stima del difetto tramite il medesimo processo introdotto precedentemente.

## 4 Analisi contenuto in frequenza dei segnali di accelerazione teorici

L'analisi spettrale studia lo spettro di frequenza contenuto in dati discreti e campionati in modo uniforme. La trasformata di Fourier è uno strumento che rivela i componenti di frequenza di un segnale nel dominio del tempo rappresentandolo nel dominio delle frequenze.

La trasformata di Fourier è definita per un vettore  $x$  con  $n$  punti campionati uniformemente da

$$y_{k+1} = \sum_{j=0}^{n-1} \omega^{jk} x_{j+1}$$

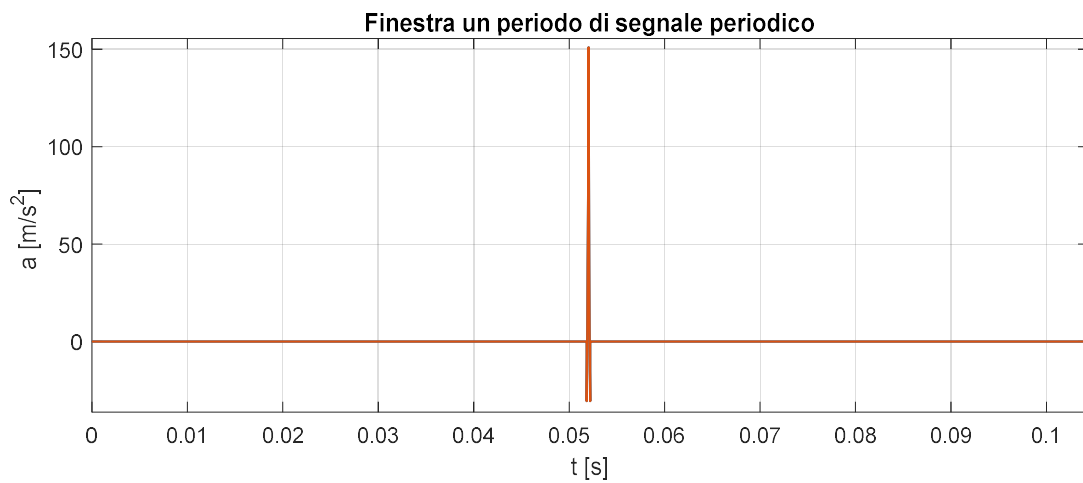
$\omega = e^{2\pi i/n}$  è una delle  $n$  radici complesse dell'unità dove  $i$  è l'unità immaginaria.

Per  $x$  e  $y$ , gli indici  $j$  e  $k$  vanno da 0 a  $n - 1$ .

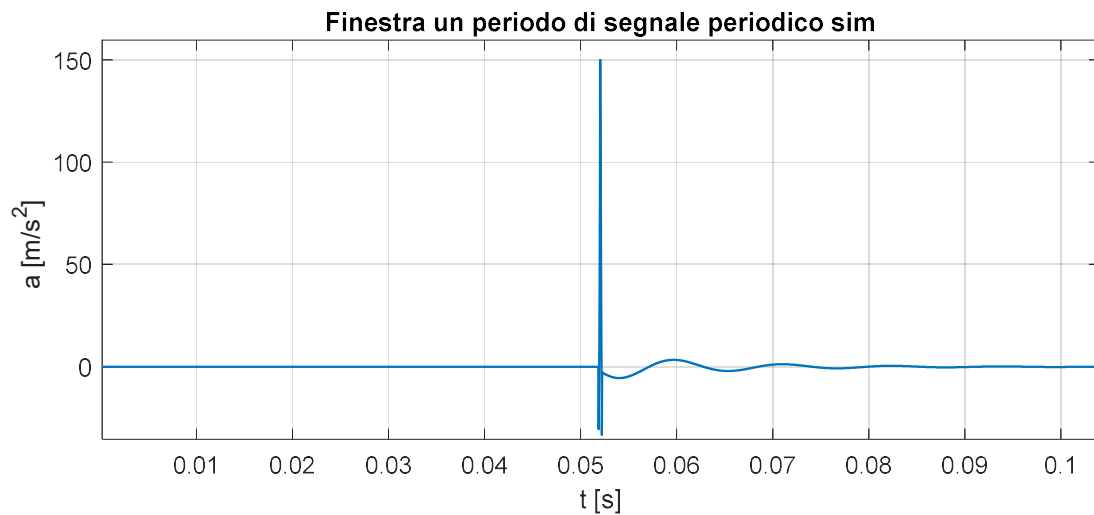
La funzione **fft** in MATLAB® utilizza un algoritmo di trasformata di Fourier veloce per calcolare la trasformata di Fourier dei dati.

```
L = length(S);  
Fs = 1/time(2); % Sampling frequency  
f = (1/time(2)) * (0:(L/2)) / L;  
t = time; % Time vector  
  
Y = fft(S);  
P2 = abs(Y/L);  
P1 = P2(1:L/2+1);  
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);  
  
figure()  
plot(f,P1)  
grid on  
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of S(t)')  
xlabel('f (Hz)')  
ylabel('|P1(f)|')
```

Per effettuare l'analisi dei segnali di accelerazione verticale ottenuti si sceglie di analizzare il segnale periodico ottenuto definendo una finestra di analisi nel dominio del tempo corrispondente esattamente a un giro di ruota.



**Figura 53**  $l=10\text{mm}$   $V=100\text{km/h}$



**Figura 54**  $l=10\text{mm}$   $V=100\text{km/h}$

Tramite la funzione fft di matlab ottengo l'analisi spettrale dei due segnali

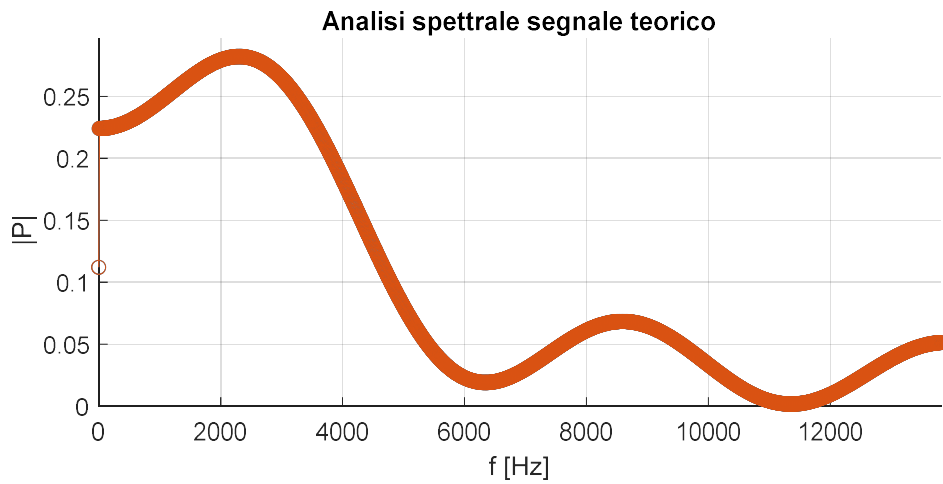


Figura 55  $l=10\text{mm}$   $V=100\text{km/h}$

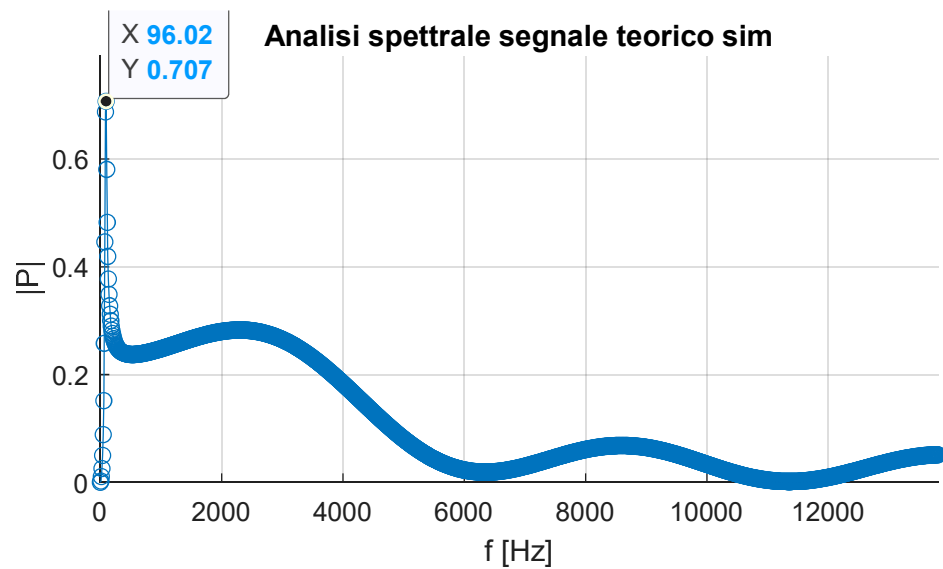


Figura 56  $l=10\text{mm}$   $V=100\text{km/h}$

Per giustificare e capire l'analisi spettrale del segnale analizzo l'accelerazione nel dominio del tempo



Figura 57  $l=10\text{mm}$   $v=100\text{km/h}$

Posso vedere il segnale dell'impulso dovuto al difetto ruota per questo caso particolare come la somma di due onde impulsive particolari una quadrata e una triangolare.

- Definisco  $\tau_0$  il periodo di tempo in cui si manifesta l'impulso
- Definisco  $T_0$  il periodo dell'onda del treno di impulsi.
- Definisco  $T_c$  il passo infinitesimo temporale tra due punti successivi che descrivono la forma di accelerazione.

$\frac{1}{2 \cdot T_c}$  definisce la frequenza massima nell'asse delle frequenze dell'analisi spettrale del segnale

$\frac{1}{T_0}$  definisce la distanza sull'asse delle frequenze tra le armoniche che approssimano la forma d'onda

Per capire e giustificare lo spettro di potenza ottenuto si riportano alcuni casi particolari da cui ci ricondurremo al risultato ottenuto.

$$T_c = \frac{px}{V} = \frac{0.001m}{(27,77 \text{ m/s})} = 3,6 * 10^{-5} \text{ s}$$

$$\tau_0 \approx l/V = 3.6 * 10^{-4} \text{ s}$$

$$T_0 \approx 2\pi R/V = 0,104 \text{ s}$$

$$f_{max} = \frac{1}{2 \cdot T_c} = 13889 \text{ Hz}$$

## 4.1 Onda quadra

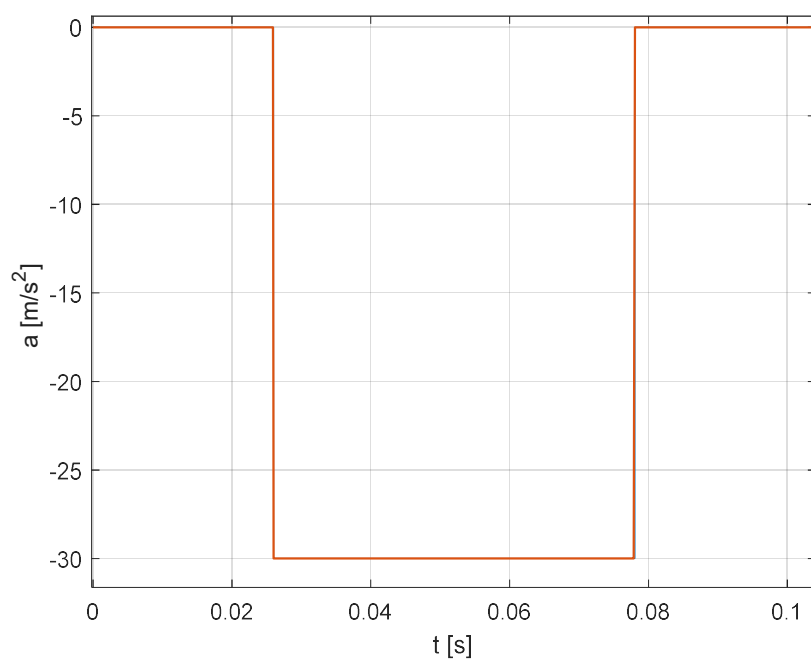


Figura 58  $T_0/\tau = 2$

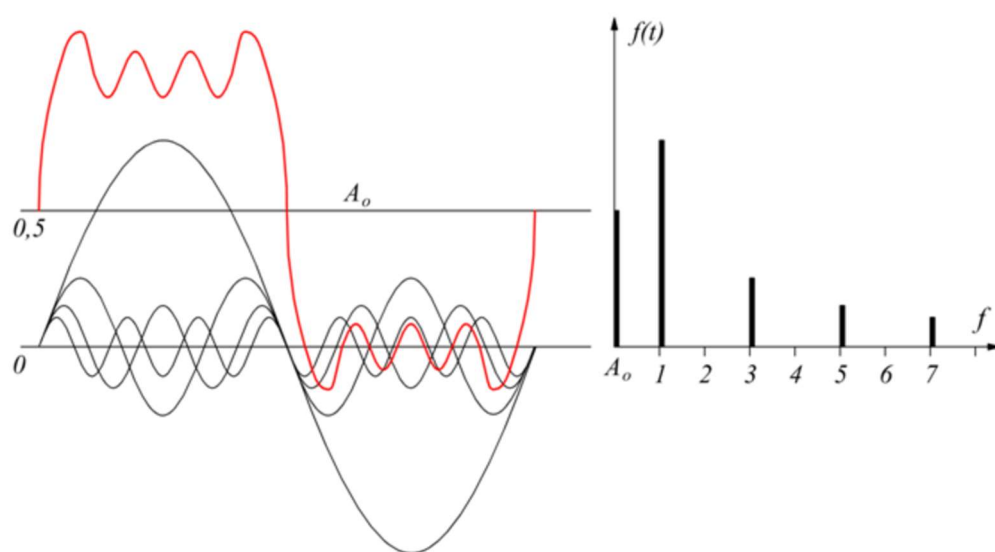


Figura 59 onda quadra scomposizione con trasformata di Fourier



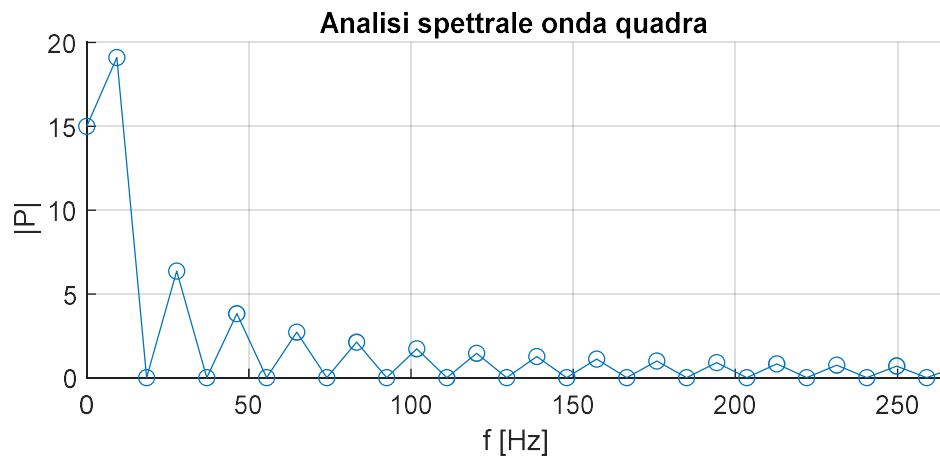


Figura 60 analisi spettrale ottenuta per onda quadra con  $T_0/\tau_0 = 2$

La distanza tra due armoniche successive è definita nel modo seguente:

$$\Delta f_0 = 1/T_0 = \frac{1}{0,104} = 9,61 \text{ Hz}$$

l'armonica 0 ovvero la costante coincide con la media integrale del segnale sul periodo.

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

## 4.2 Effetto scalatura onda quadra

Aumentando il rapporto  $T_0/\tau_0$  riducendo il  $\tau_0$  per un treno di impulsi rettangolari ho la seguente modifica nell'analisi spettrale

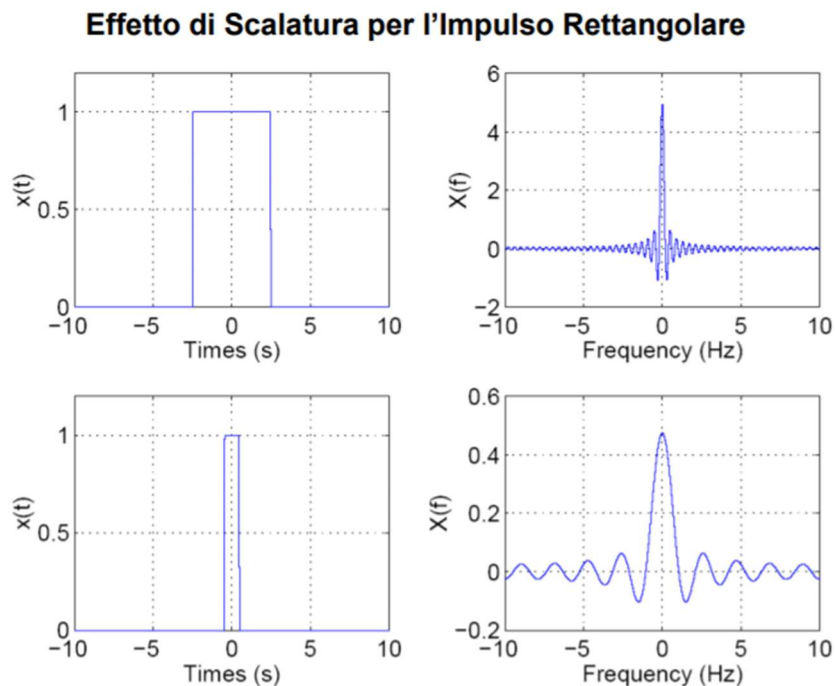


Figura 61 effetto scalatura treno impulsi rettangolari

### Confronto effetto scalatura onda quadra

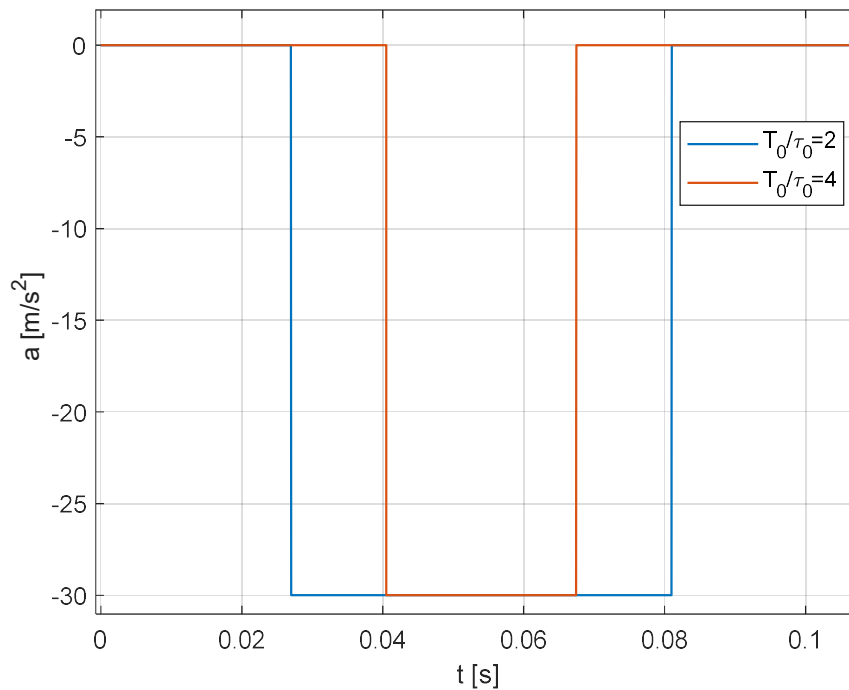


Figura 62 componente rettangolare del segnale accelerazione

L'analisi spettrale del segnale è il valore assoluto di ciò che ottengo da fft ed essendo simmetrico considero solo le frequenze positive, ottengo il seguente grafico dell'analisi spettrale.

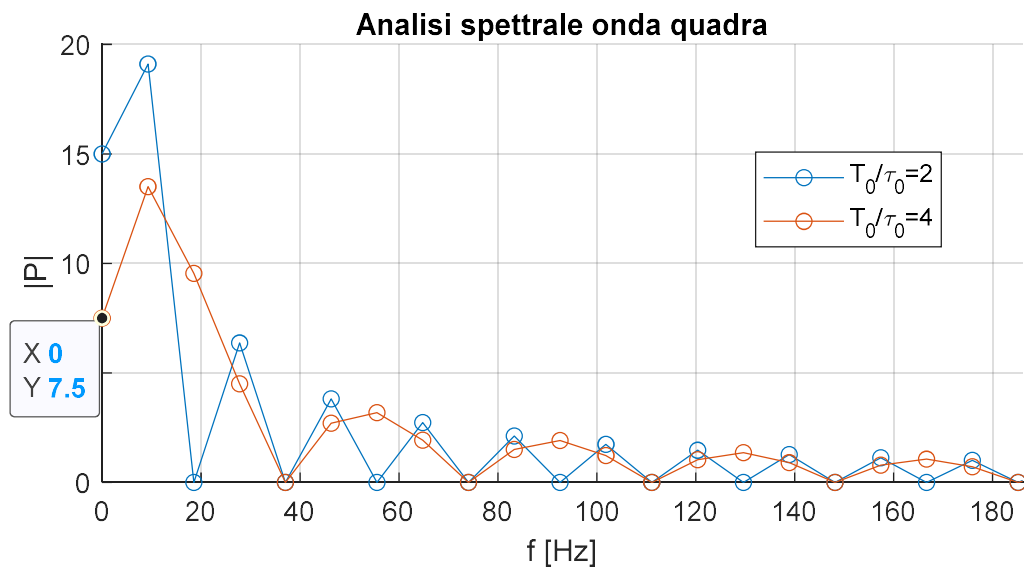


Figura 63 confronto spettri scalatura onda quadra tramite fft matlab

Si nota che coerentemente il termine di ampiezza  $A_0$  risulta per dimezzato per il caso  $T_0 = 4\tau_0$  rispetto al caso  $T_0 = 2\tau_0$

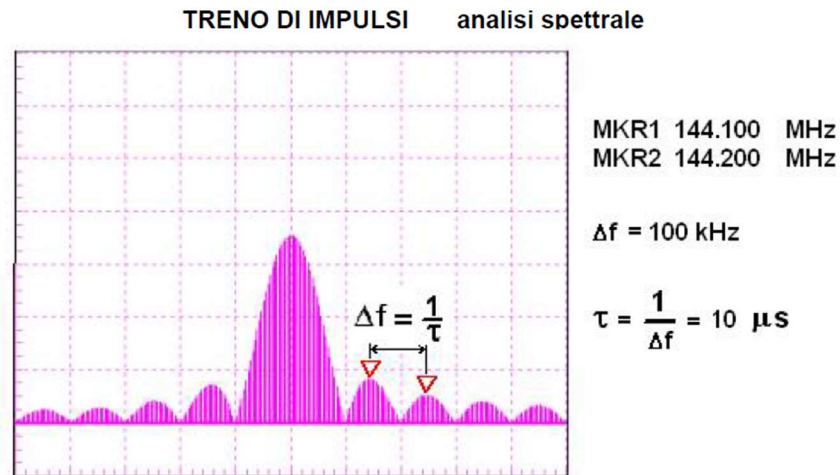


Figura 64 analisi spettrale treno di impulsi rettangolare

Osservando lo spettro in valore assoluto della sequenza di impulsi si osserva che la durata  $\tau_0$  di ogni impulso è identificabile misurando, tramite i marker, l'intervallo di frequenza tra due lobi secondari adiacenti e calcolandone il reciproco

Riduco  $\tau_0$  portando il rapporto  $T_0/\tau_0$  a un valore uguale a quello dell'impulso teorico con  $l = 10 \text{ mm}$  e  $V = 100 \text{ km/h}$  ed eseguo l'analisi spettrale

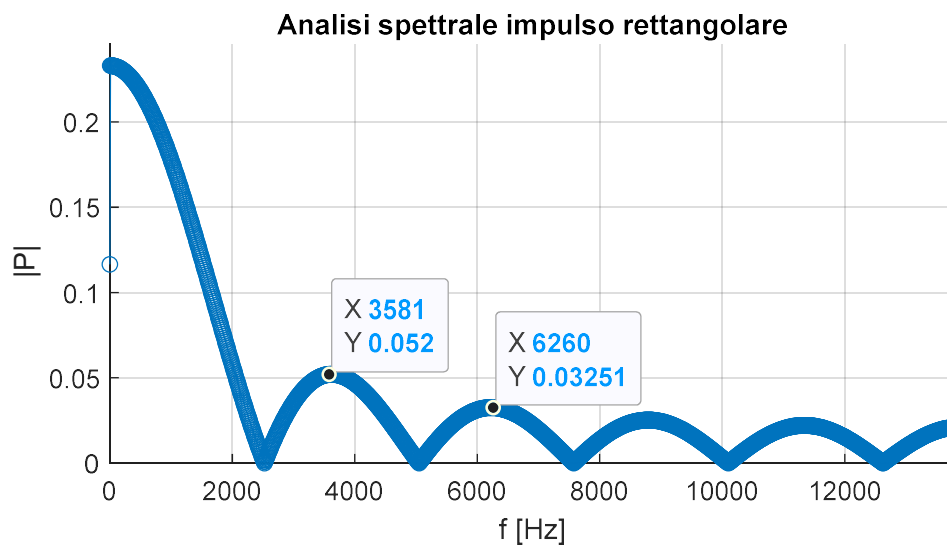


Figura 65 analisi spettrale componente rettangolare del segnale di accelerazione

Si nota che riducendo  $\tau_0$  scende il valor medio sul periodo, scendono le ampiezze delle armoniche a bassa frequenza aumentano quelle al salire della frequenza, aumentano le frequenze diverse da 0.

Si nota che per questo segnale teorico il reciproco della differenza delle frequenze dei picchi tra due lobi secondari adiacenti mi restituisce il  $\tau_0$  dell'impulso

$$\frac{1}{\Delta f} = \frac{1}{(6260 - 3581)} = 3.73 \cdot 10^{-4} \text{ s} \approx \tau_0 = 3.6 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Aumentando ulteriormente  $T_0/\tau_0$  riducendo il  $\tau_0$  si arriva al caso limite del delta di Dirac dove tutte le frequenze sono eccitate alla stessa ampiezza

### 4.3 Scalatura onda triangolare

Si riportano due onde triangolari con stesso  $T_0$  e  $T_c$  del segnale di accelerazione analizzato con differente  $\tau_0$  per analizzare l'effetto della scalatura di un onda triangolare

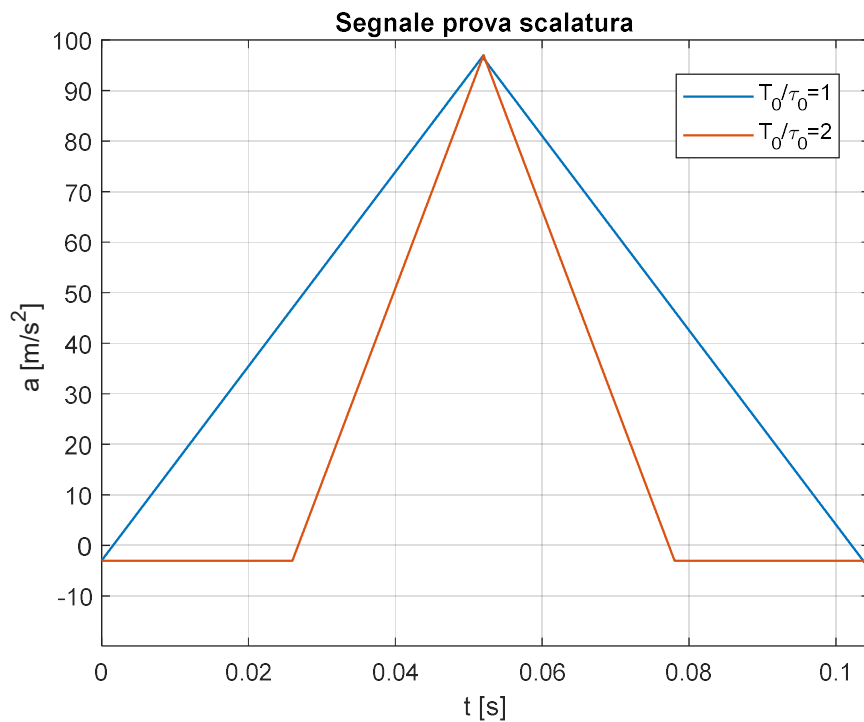


Figura 66 scalatura onda triangolare

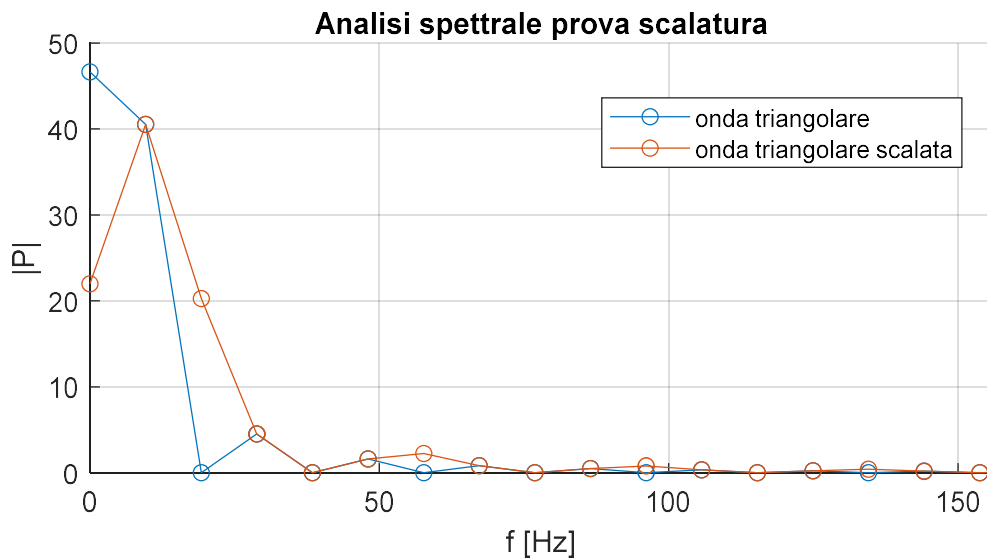


Figura 67 confronto analisi spettrale scalatura onda triangolare tramite fft matlab

Si può notare che come previsto dalla teoria al ridursi  $\tau_0$  si ha una attenuazione delle ampiezze a basse frequenze e un aumento al salire della frequenza.

Aumenta il numero delle frequenze diverse da zero.

Si nota il dimezzamento dell'ampiezza  $A_0$  che rappresenta la media integrale sul periodo del segnale.

### Effetto di Scalatura per l'Impulso Triangolare

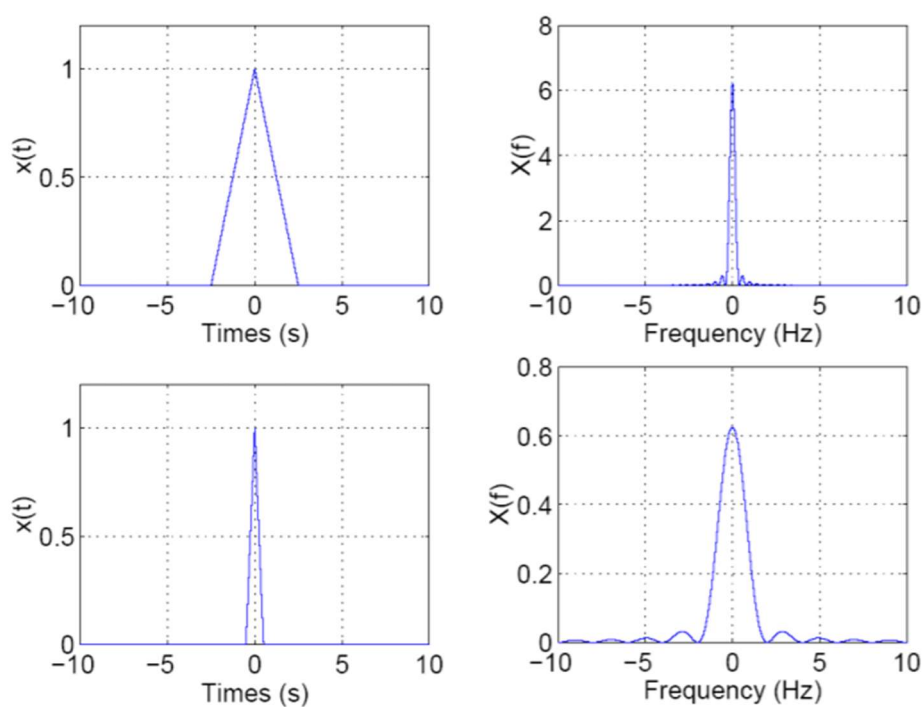


Figura 68 spettro teorico scalatura onda triangolare

Si impone rapporto  $\frac{T_0}{\tau_0} = 289$  simile a quello del treno di impulsi che descrive l'accelerazione verticale di una ruota difettosa

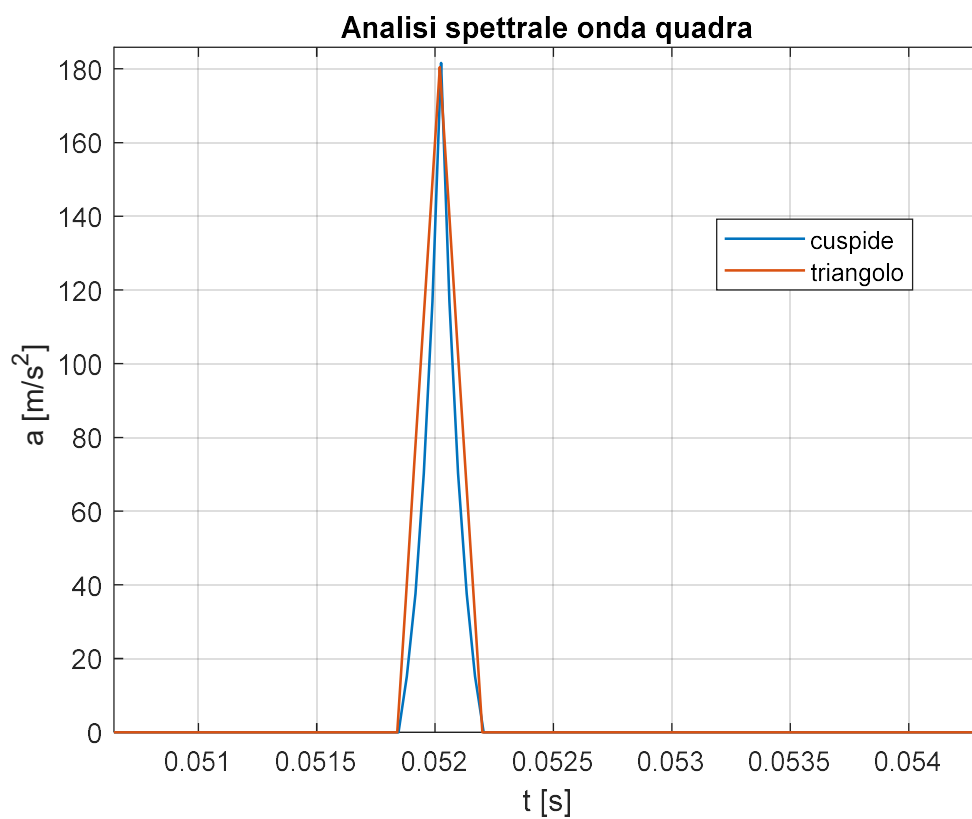


Figura 69 confronto forme

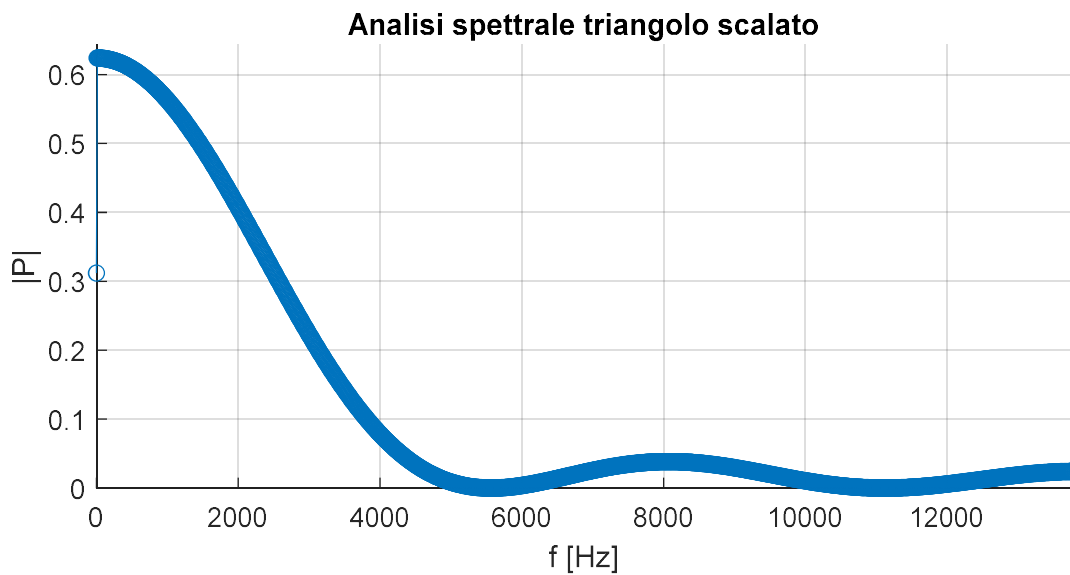


Figura 70 segnale triangolare riscaloato con stesso  $\tau_0$

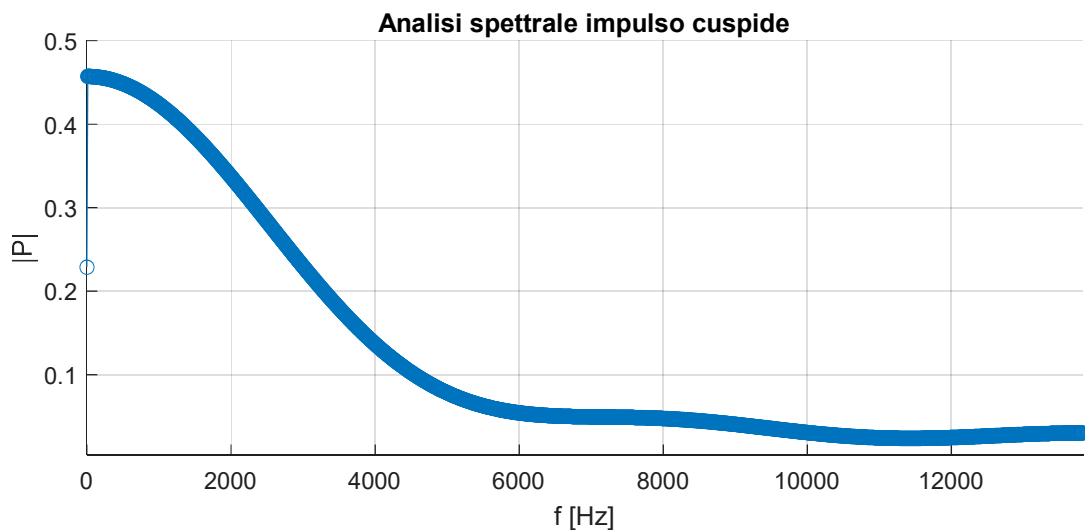


Figura 71 analisi spettrale parte cuspidale del segnale di accelerazione

Dal confronto del segnale semplificato con un triangolo con il segnale ipotizzato più complesso si nota che in questo caso le distribuzioni dello spettro di potenza virtuale hanno una forma simile.

La distribuzione della forma a cuspidale rispetto al triangolo ha i lobi secondari sono meno pronunciati e le ampiezze sono tutte diverse da 0.

Le ampiezze e il valor medio nel caso della cuspidale rispetto al triangolo sono più basse alle basse frequenze e maggiori alle alte frequenze poiché il segnale a cuspidale è più impulsivo di quello a triangolo.

Sommando i segnali riottengo il segnale originario e verifico che la somma delle trasformate corrisponde alla trasformata del segnale originale.

#### 4.4 Analisi segnale complesso al variare del difetto

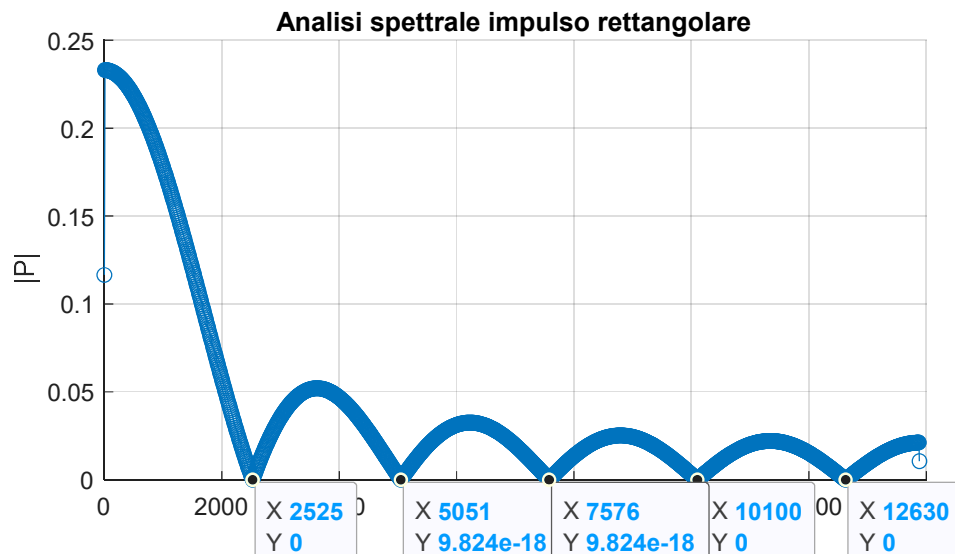


Figura 72 analisi spettrale treno impulsi rettangolari  $l=10\text{mm}$   $V=100\text{km/h}$

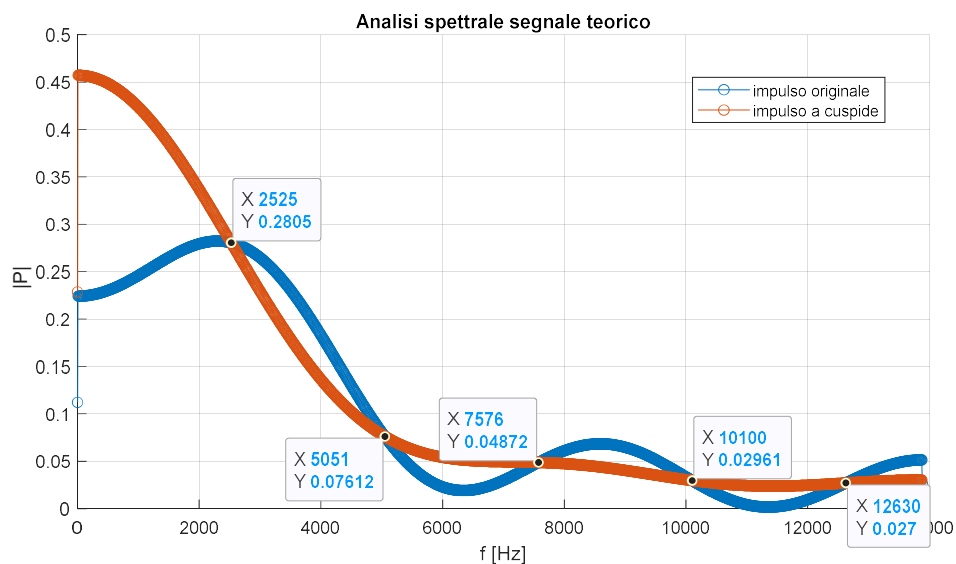


Figura 73  $l=10\text{mm}$   $V=100\text{km/h}$

Dal confronto proposto si verifica che il contenuto in frequenza ottenuto dalla somma dei segnali è uguale alla somma del contenuto in frequenza dei segnali secondo la scomposizione di Fourier.

Le frequenze dove lo spettro dell'impulso originale coincide con quello dell'impulso a cuspid sono quelle in cui è nulla l'ampiezza nello spettro dell'impulso rettangolare.

Le ampiezze delle frequenze del segnale originale che sono minori delle corrispondenti dell'impulso a cuspid è dovuto al fatto che in quelle frequenze il contenuto della componente di impulso rettangolare ha segno opposto, viceversa dove sono maggiori i segni sono concordi.

Si può in oltre notare che i lobi secondari della componente rettangolare del treno di impulsi possono ancora essere ben individuabili dall'analisi spettrale del segnale composto.

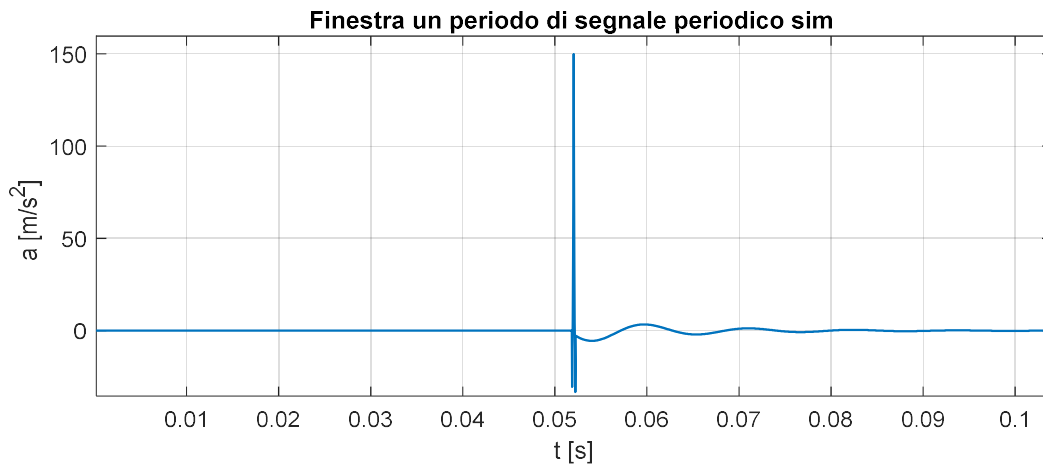


Figura 74  $l=10\text{mm}$   $V=100\text{km/h}$

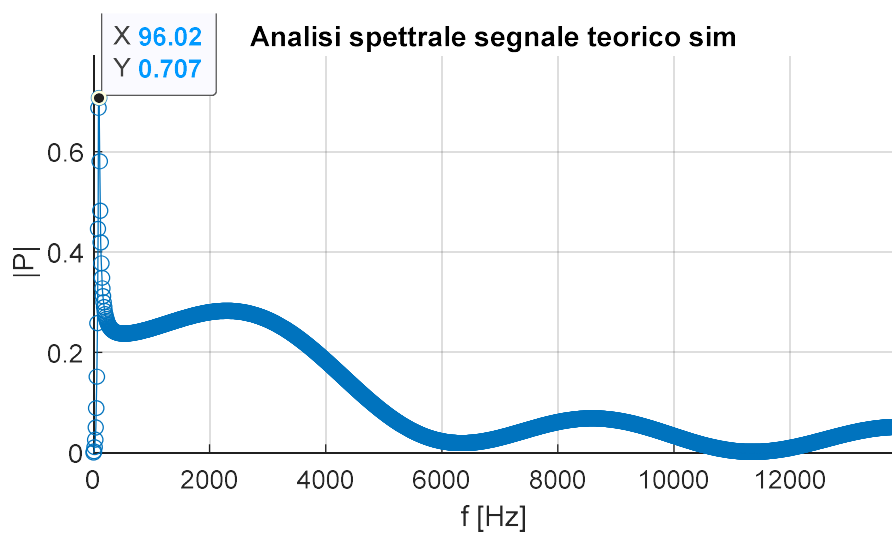


Figura 75  $l=10\text{mm}$   $V=100\text{km/h}$

Si nota che l'introduzione della dinamica associata riduce l'ampiezza delle armoniche alle basse frequenze e imponendo l'equilibrio delle forze il valor medio del segnale sul periodo diventa nullo.

In oltre introduce una componente armonica non impulsiva ben distinguibile a una frequenza 96.02Hz.

Si possono quindi distinguere le componenti ad alta frequenza dovute al treno di impulsi e si può distinguere un picco di frequenze nell'intorno dei 100Hz dovuto alla dinamica associata al carrello.



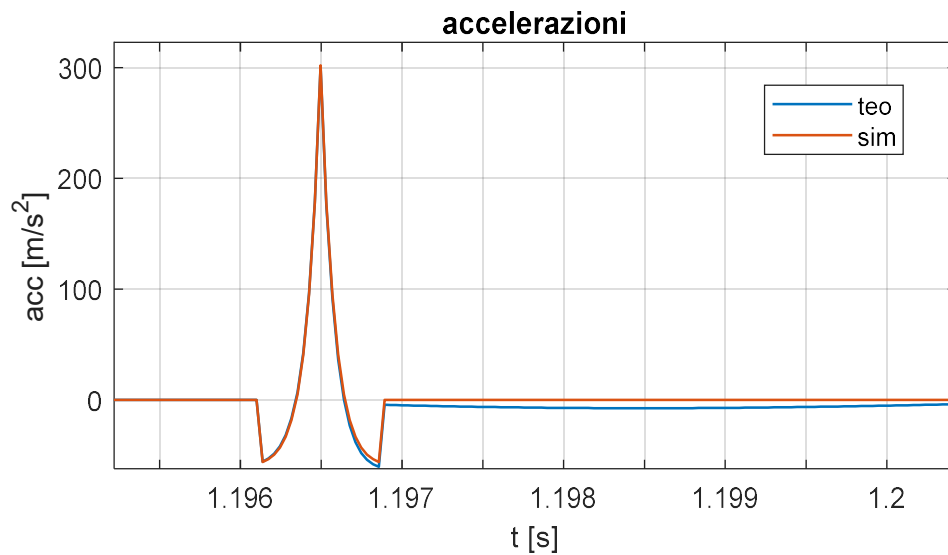


Figura 76  $l=20 \text{ mm}$   $v=100\text{km/h}$

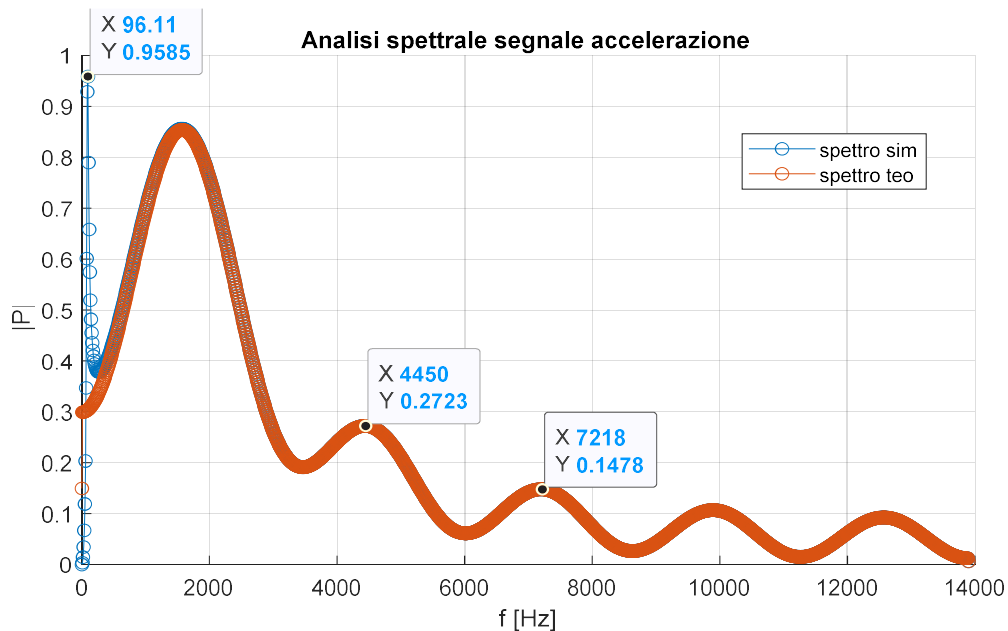


Figura 77  $l=20 \text{ mm}$   $v=100\text{km/h}$

$$\tau_0 = l/V = 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$\frac{2}{\Delta f} = \frac{2}{(7218 - 4450)} = 7,225 \cdot 10^{-3} \text{ s} \approx \tau_0$$

Aumentando la dimensione del difetto si nota che la dimensione dei lobi secondari corrispondenti alla parte di impulso rettangolare diminuiscono in lunghezza coerentemente con quanto ci si aspetta dalla teoria.

Posizionando i marker su due picchi successivi ritrovo il  $\tau_0$  dell'impulso.

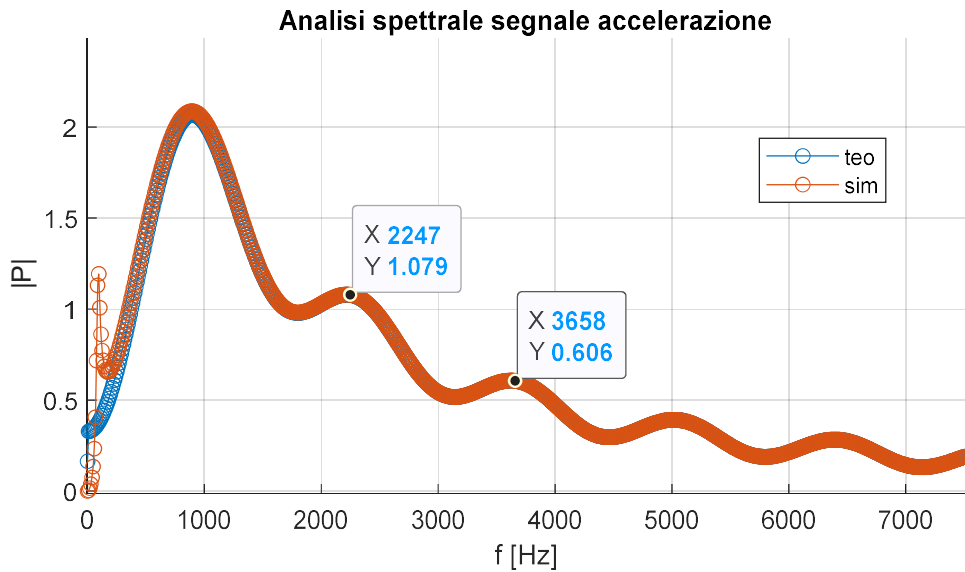


Figura 78 dettaglio  $l=40\text{mm}$   $v=100\text{km/h}$

Si nota che il segnale che ottenuto dal modello simulink introduce una frequenza propria del modello in risposta all'impatto. Le ampiezze rispetto al caso con  $l=10\text{mm}$  è più grande.

Il reciproco della differenza delle frequenze di due lobi secondari adiacenti del treno di impulsi rettangolare corrisponde al  $\tau_0$  dell'impulso. Essendo il contenuto in frequenza della somma dei segnali equivalente alla somma del contenuto in frequenza dei segnali secondo la scomposizione di Fourier è ancora possibile ricavare questo parametro.

Per una più semplice visualizzazione però si è scelto di posizionare il marker i non tra due lobi secondari adiacenti dello spettro della componente rettangolare che corrisponderebbe a il picco di un lobo secondario e alla valle successiva, ma tra due picchi successivi.

Pertanto la determinazione di  $\tau_0$  è la seguente:

$$\tau_0 = l/V = 1.44 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$\frac{2}{\Delta f} = \frac{2}{(3658 - 2247)} = 1.417 \cdot 10^{-3} \text{ s} \approx \tau_0$$

#### 4.5 Analisi del segnale a una nuova velocità di riferimento al variare del difetto

- $V = 70 \text{ km/h}$
- $T_c = \frac{px}{V} = \frac{0.001m}{(19.44 \text{ m/s})} = 5.14 \cdot 10^{-5} \text{ s}$
- $\tau_0 \approx \frac{l}{V} = \frac{0.04}{(19.44 \text{ m/s})} = 2.057 \cdot 10^{-3} \text{ s}$
- $T_0 \approx 2\pi R/V = 0,148 \text{ s}$
- $f_{max} = \frac{1}{2T_c} = 9720 \text{ Hz}$

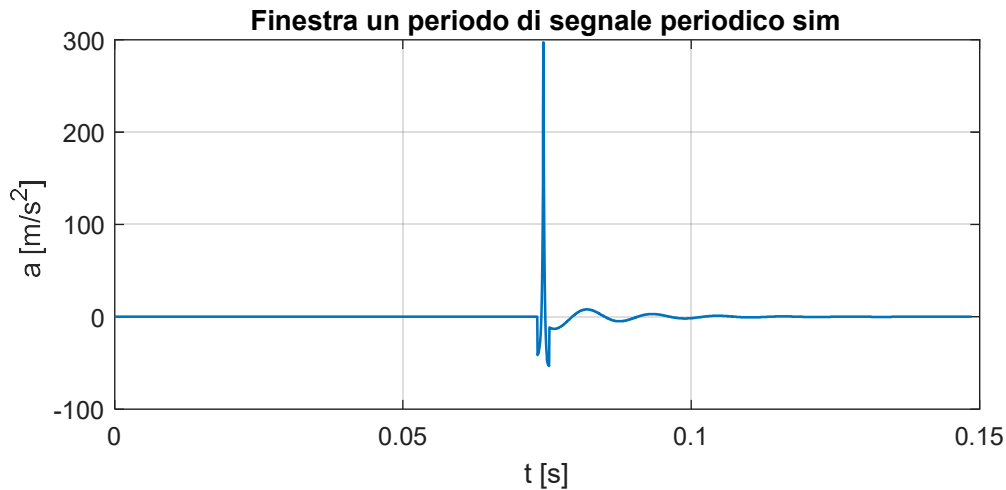


Figura 79  $l=40\text{mm}$   $v=70\text{km/h}$

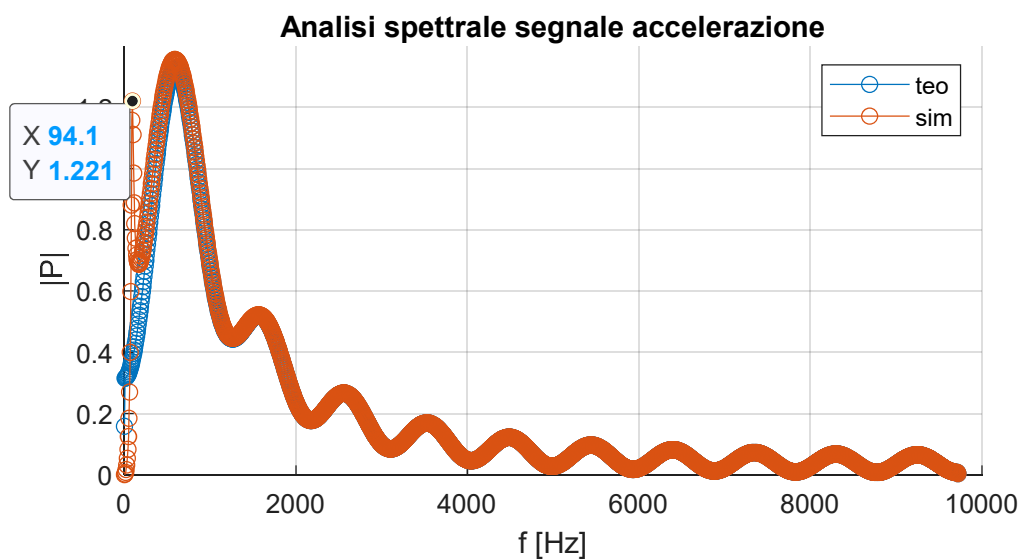


Figura 80  $l=40\text{mm}$   $v=70\text{km/h}$

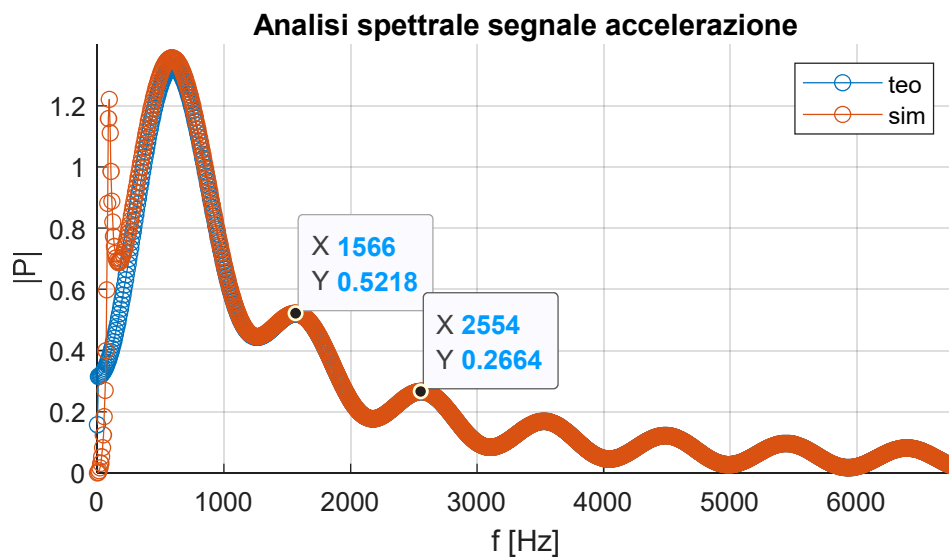


Figura 81  $l=40\text{mm}$   $v=70\text{km/h}$

Si nota che la variazione di velocità influisce debolmente sulla frequenza propria di oscillazione della dinamica associata al carrello.

È ancora verificata la seguente relazione

$$\frac{2}{\Delta f} = \frac{2}{(2552 - 1566)} = 2,024 \cdot 10^{-3} \text{ s} \approx \tau_0 = 2.057 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

Si riporta infine per il caso con difetto  $l = 10\text{mm}$

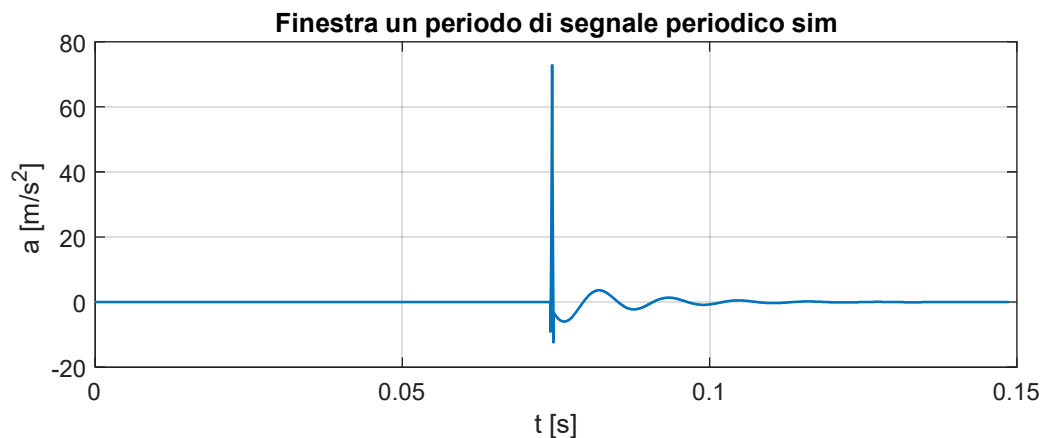


Figura 82  $l=10\text{mm}$   $v=70\text{km/h}$

$$\tau_0 \approx \frac{l}{V} = \frac{0.01\text{m}}{(19.44\text{m/s})} = 5.14 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

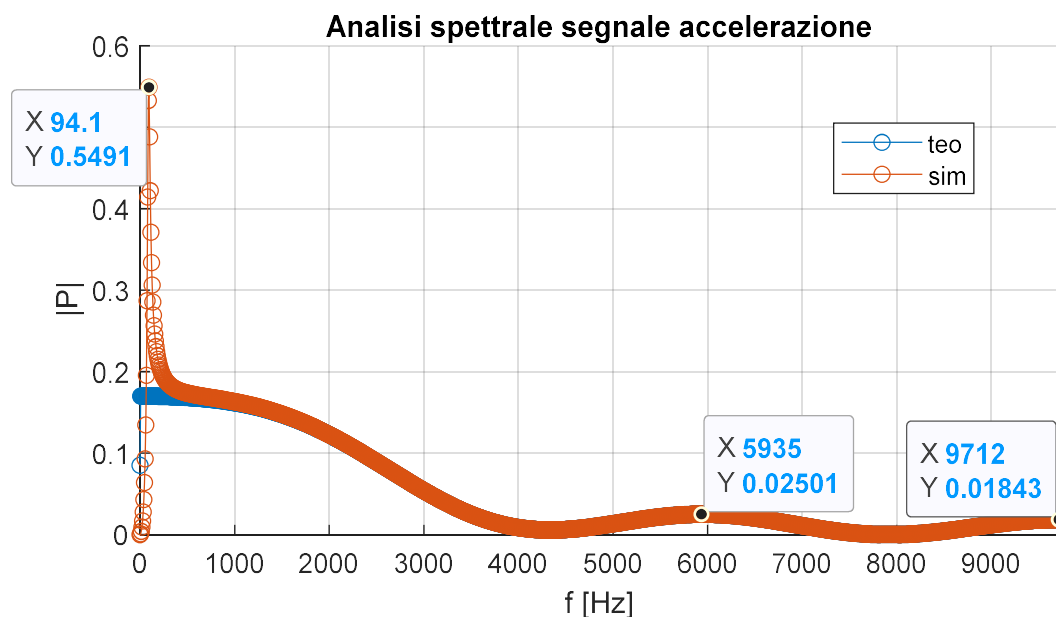


Figura 83  $l=10\text{mm}$   $v=70\text{km/h}$

$$\frac{2}{\Delta f} = \frac{2}{(9712 - 5935)} = 5.29 \cdot 10^{-3} \text{ s} \approx \tau_0 = 5.14 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

- Per l'equilibrio dinamico alla ruota la media integrale del segnale ottenuto dal modello simulink sul periodo risulta nulla.
- Si deduce che più il segnale è impulsivo maggiore è il numero di armoniche diverse da zero e l'ampiezza delle armoniche eccitate sono più simili tra loro, ci si avvicina al caso particolare del delta di Dirac.
- Il valore delle ampiezze delle armoniche dovuto all'impatto aumenta con l'aumentare della violenza dell'impatto, ovvero aumentano con la velocità a parità del difetto, e con l'aumentare dell'entità del difetto a parità di velocità.
- l'ampiezza delle armoniche introdotte dalla dinamica associata del carrello cresce proporzionalmente con la dimensione del difetto, la frequenza dell'armonica principale invece risulta dipendere solo dalla velocità orizzontale.
- Il periodo  $\tau_0$  è ottenibile dallo spettro di un treno di impulsi rettangolari dal rapporto  $\frac{1}{\Delta f}$  dove  $\Delta f$  è la differenza dei picchi di due lobi secondari adiacenti, per il segnale composto risulta ancora ottenibile, per una lettura più semplice si sceglie di posizionare i due marker su due picchi successivi e pertanto risulta  $\frac{2}{\Delta f} \approx \tau_0$

V	km/h	50	50	50
l	mm	10	20	40
mean_teo	m/s <sup>2</sup>	0,06	0,1147	0,153
f_din_sim	Hz	91,22	91,22	91,22
Amp_din_sim	m/s <sup>2</sup>	0,3893	0,7584	1,214

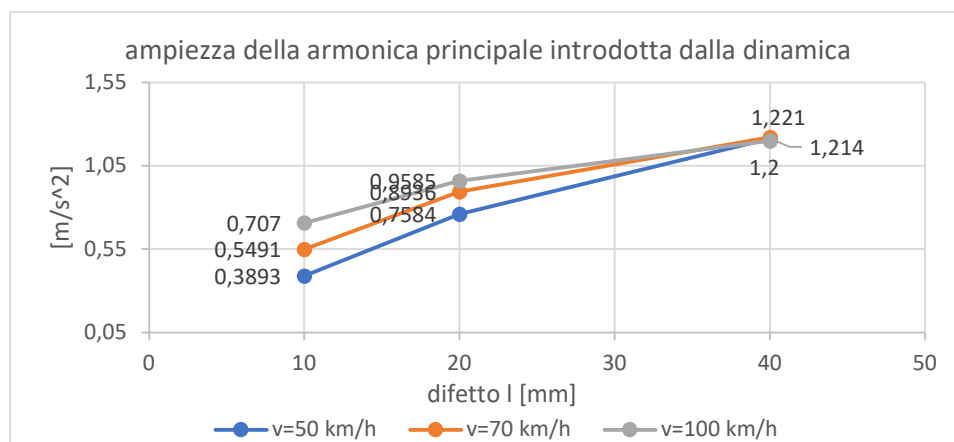
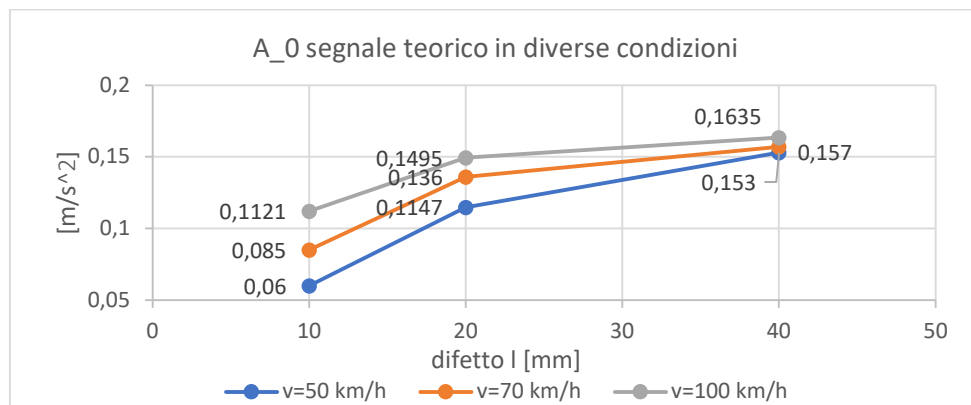
Tabella 3

V	km/h	70	70	70
l	mm	10	20	40
mean_teo	m/s <sup>2</sup>	0,085	0,136	0,157
f_din_sim	Hz	94,1	94,1	94,1
Amp_din_sim	m/s <sup>2</sup>	0,5491	0,8936	1,221

Tabella 4

V	km/h	100	100	100
l	mm	10	20	40
mean_teo	m/s <sup>2</sup>	0,1121	0,1495	0,1635
f_din_sim	Hz	96,02	96,02	96,02
Amp_din_sim	m/s <sup>2</sup>	0,707	0,9585	1,193

Tabella 5



- Da un'analisi riassuntiva globale si nota che la frequenza con ampiezza massima dovuta alla dinamica associata al carrello dipende solo dalla velocità.
- La media integrale sul periodo del segnale in ingresso cresce in modo non lineare con la velocità e con l'ampiezza del difetto.
- La media integrale sul periodo del segnale di accelerazione in output dal modello simulink è nulla poiché è stato imposto l'equilibrio alla ruota.
- L'ampiezza massima dovuta alla dinamica associata cresce in modo non lineare con l'incremento della velocità e del difetto.
- La crescita della media integrale sul periodo del segnale in input e dell'ampiezza massima dovuta alla dinamica del carrello che impone l'equilibrio alla ruota hanno andamenti simili al variare di velocità e difetto ipotizzato.

## 4.6 Confronto con dati sperimentali

Per convalidare i segnali teorici costruiti dal modello proposto si propone un confronto tra il contenuto in frequenza ottenuto dall'analisi spettrale delle curve simulate con lo spettro di Fourier ottenuto dall'analisi di dati sperimentali.

Si riportano i dati ottenuti dal progetto di ricerca CargoCBM [4] tramite un sistema di monitoraggio da loro ideato.

Le misurazioni riportate sono state eseguite su un carrello merci LEILA e sono state originariamente registrate per analizzare il comportamento di marcia di questo tipo di carrello di nuova concezione. Anche se non è il carrello più comunemente utilizzato, i risultati dovrebbero essere simili per il carrello standard Y25. Questi dati sono interessanti perchè il carrello originariamente era in condizioni molto buone e durante la misurazione si è verificato il wheelflat.

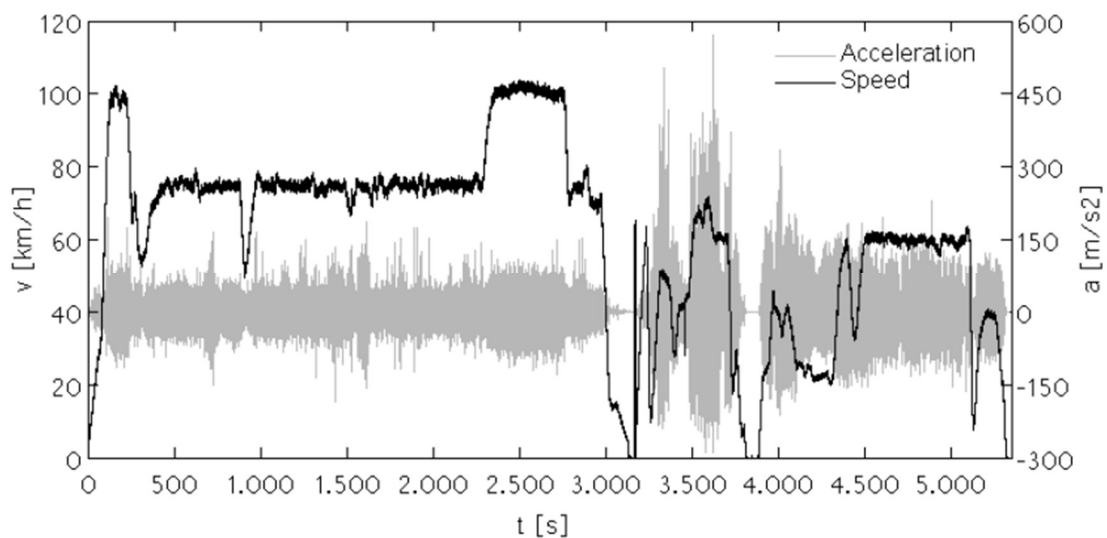
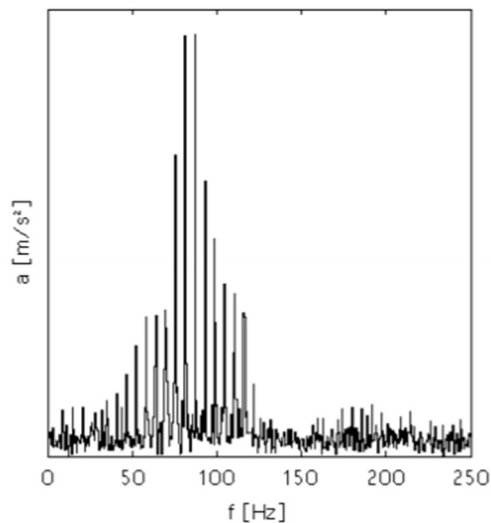


Figura 84 Time-velocity/time-vertical acceleration axle box diagram

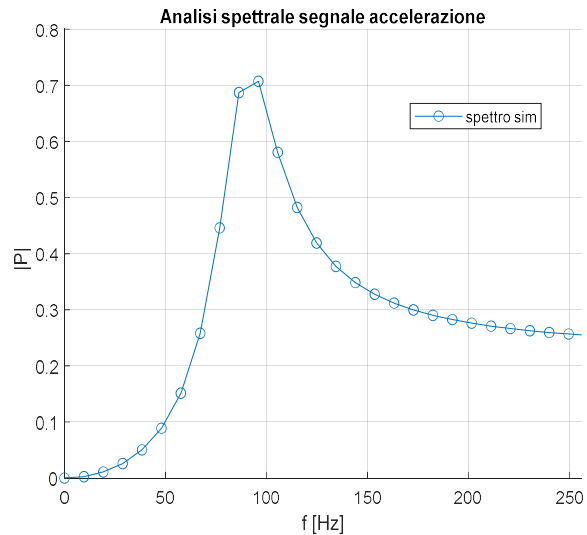
I dati sono stati registrati con una frequenza di campionamento di 500 Hz e una risoluzione di 16 bit.

La condizione da 0 a 3000 è chiamata "buona", la condizione da 4000 in avanti è chiamata "cattiva" poiché a seguito delle frenate eseguite dal convoglio nell'intervallo da 3000 a 4000 si è generato il difetto del wheelflat.

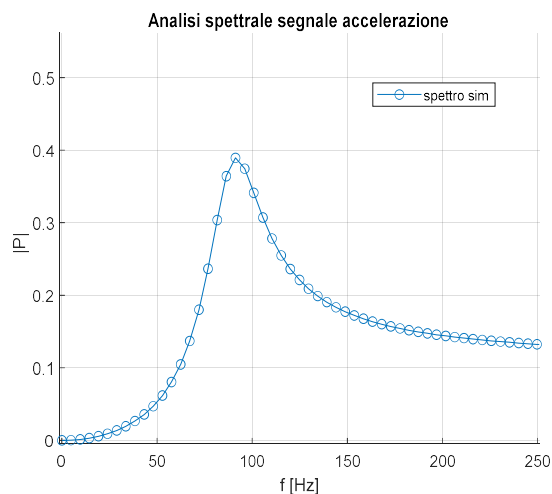
Si riporta l'analisi dello spettro di Fourier del set di dati della condizione "cattiva" per verificare la coerenza con lo spettro ottenuto dai dati simulati dal modello proposto dal lavoro di tesi.



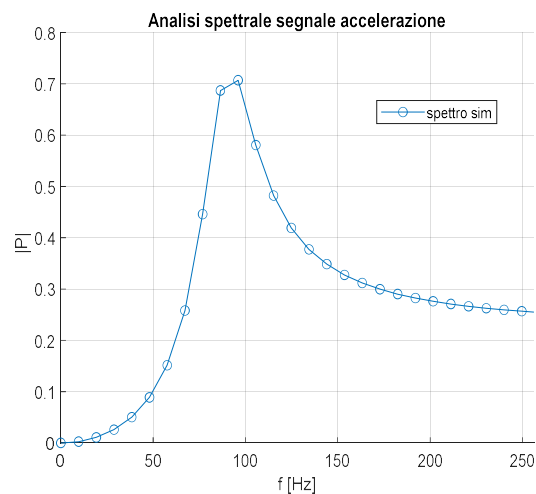
spettro Fourier dei dati sperimentali



l=10mm v=70 km/h



l=10mm v=50 km/h



l=10mm v=100km/h

Figura 85 confronto analisi spettrale di diversi segnali di accelerazione

Il campionamento dell'accelerazione verticale del lavoro di ricerca riportato è stato effettuato a  $F_s = 500\text{Hz}$ , per il teorema di Nyquist la massima frequenza valutabile è al di sotto di  $f_s/2 = 250\text{Hz}$ .

Prendendo un margine un po' più ampio, valutando lo spettro al di sotto di  $f_s/4 = 125\text{Hz}$ , dal confronto con lo spettro dei dati simulati si nota che per velocità medie differenti e dimensioni differenti del difetto la forma dello spettro di Fourier è simile a quella ottenuta dai dati sperimentali riportati.

I dati delle simulazioni del modello proposto dovranno essere convalidati in futuro con ulteriori verifiche sul campo, in prima istanza però si è potuto verificare tramite il confronto proposto la coerenza del modello con i dati sperimentali del lavoro di ricerca citato.



## 5 Algoritmo di rilevamento sviluppato

### 5.1 Trigger di Schmitt

Si possono applicare delle bande di filtraggio in funzione della velocità per escludere il rumore introdotto dalle masse dalla valutazione del segnale per il rilevamento dei picchi.

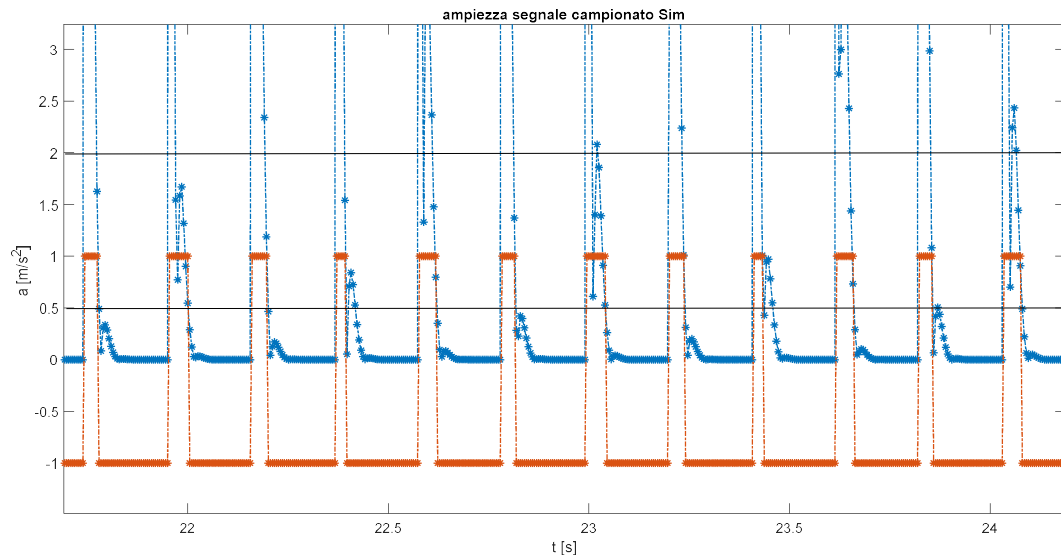


Figura 86  $l=60 \text{ mm}$   $v=50 \text{ km/h}$

Applicando all'ampiezza del segnale campionato un filtraggio del tipo trigger di Schmitt con soglia alta a  $2 \text{ m/s}^2$  e soglia bassa a  $0.5 \text{ m/s}^2$  è possibile effettuare il rilevamento dei picchi in un dato periodo con un certo errore relativo, si riportano alcune rilevazioni indicative.

$V = 50 \text{ km/h}$	$l = 0.01 \text{ m}$	$l = 0.015 \text{ m}$	$l = 0.02 \text{ m}$	$l = 0.03 \text{ m}$	$l = 0.04 \text{ m}$	$l = 0.06 \text{ m}$
Picchi rilevati	463	493	512	507	524	533
Err relativo%	-8%	-1,4%	2,4%	1,4%	4,8%	6,6%
$V = 80 \text{ km/h}$	$l = 0.01 \text{ m}$	$l = 0.015 \text{ m}$	$l = 0.02 \text{ m}$	$l = 0.03 \text{ m}$	$l = 0.04 \text{ m}$	$l = 0.06 \text{ m}$
Picchi rilevati	455	480	487	499	506	511
Err relativo%	-9%	-4%	-2,6%	-0,2%	1,2%	2,2%
$V = 100 \text{ km/h}$	$l = 0.01 \text{ m}$	$l = 0.015 \text{ m}$	$l = 0.02 \text{ m}$	$l = 0.03 \text{ m}$	$l = 0.04 \text{ m}$	$l = 0.06 \text{ m}$
Picchi rilevati	433	464	477	479	482	497
Err relativo%	-13,4%	-7,2%	-4,60%	-4,20%	-3,60%	-0,60%

Tabella 6

È quindi possibile sfruttare l'analisi del segnale di accelerazione come conta urti per verificare se la numerosità degli urti rilevati è coerente con la velocità del convoglio misurata e che quindi si tratti proprio di un danno ruota e non di altre possibili fonti di disturbo.

Si nota che per rilevare la periodicità del difetto più piccolo considerato è necessario al salire della velocità ammettere un errore più grande rispetto agli altri tipi di difetto a causa del tasso di rilevamento più basso.

## 5.2 Descrizione dell'algoritmo

Sono stati analizzati i segnali a diverse velocità e con diversi difetti ottenuti dal modello simulink.

È stato dunque applicato l'algoritmo prima descritto per verificare la presenza del difetto.

Su matlab è stato implementato il controllo della periodicità del disturbo di accelerazione analizzando il segnale di ampiezza campionato tramite il trigger di Schmitt.

La verifica viene fatta analizzando il vettore in un periodo definito di tempo  $\Delta T = 10s$ .

La soglia alta di rilevamento esclude le accelerazioni al di sotto della soglia di attenzione, la soglia bassa evita che le oscillazioni di ampiezza nel breve transitorio dovute all'impatto vengano lette come più disturbi.

Si ottiene dunque una stima del periodo che intercorre tra i picchi rilevati e verifico che sia coerente con quello stimato in funzione della velocità rilevata.

```
%% Trigger schmitt verifica periodicità
o=-1;
O=zeros(1,length(BB(start:fin)));
for k=1:length(BB(start:fin))
    if BB(start+k)>2
        o=1;
        O(k)=o;
    elseif BB(start+k)<=0.2
        o=-1;
        O(k)=o;
    else
        O(k)=o;
    end
end
prod=O(1:end-1).*O(2:end);
indT=find(prod<0);
indT=downsample(indT,2);
deltaT=mean(diff(timme(indT)))
Bril=sum(prod<0)/2;
deltaT_Ver=1/(V/3.6/(2*pi*0.46))

%%verifica errore
err=abs((deltaT_Ver-deltaT)/deltaT_Ver)*100;

if err<=6;
    fprintf('confermato disturbo periodico err=%f',err)
else
    fprintf('disturbo random')
end
```

Verifico l'entità del possibile difetto confrontando il valore efficace medio rilevato nel periodo analizzato  $\Delta T$  con quello del segnale teorico.

Il valore efficace medio rilevato viene moltiplicato per il  $\beta$  corrispondente alla velocità corrente.

Nota la velocità, dalla curva del valore efficace teorico per ogni difetto ricavo una finestra di valore efficace e verifico in quale finestra il prodotto  $\beta$  per il valore efficace medio che ho ottenuto dal campionamento appartiene.

In questo modo identifico l'entità del danno

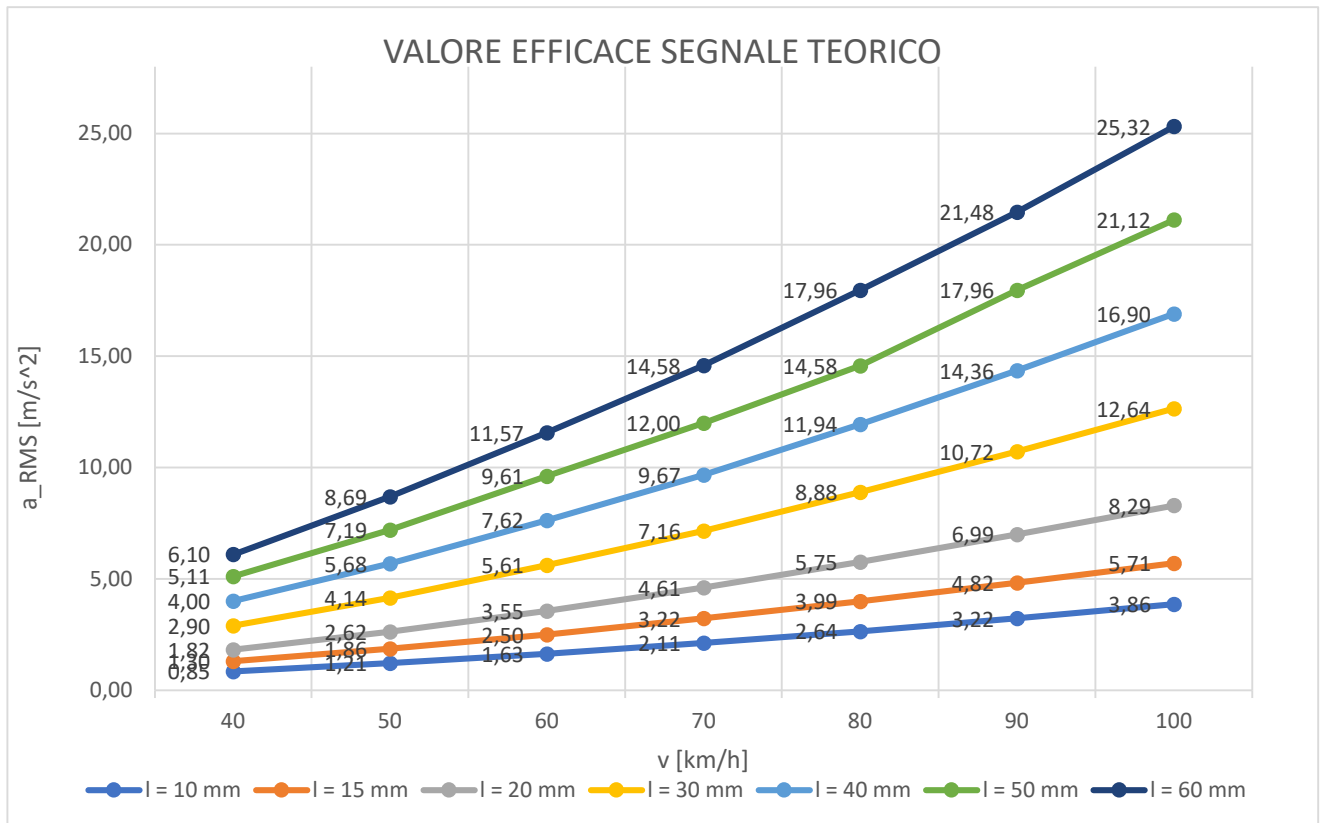


Figura 87 valori efficaci di riferimento per identificazione entità danno wheel-flat

```
%% Valutazione RMS medio
ind=find(velocit==V)
matr_rms=[0,armsdo(ind,:)]
%matr_rms_s=As(ind,:);
rms_M=mean(accS(Tstart:Tstart+DT))*beta(ind)
id=find(rms_M>=matr_rms);
id=id(end);
difetto_stimato=elle(id)%va da 0, difetto troppo piccolo a 0.06 bisogna
intervenire
```

ammettendo un margine di errore questo vettore `matr_rms=[0,armsdo(ind,:)]` contiene i limiti inferiori dei valori efficaci, se il valore efficace rilevato sarà inferiore a tutti i valori contenuti in `armsdo(ind,:)` sicuramente non potrà essere minore di 0 in quanto il valore efficace è per definizione maggiore o uguale a 0. In quel caso non sarà rilevato alcun difetto.

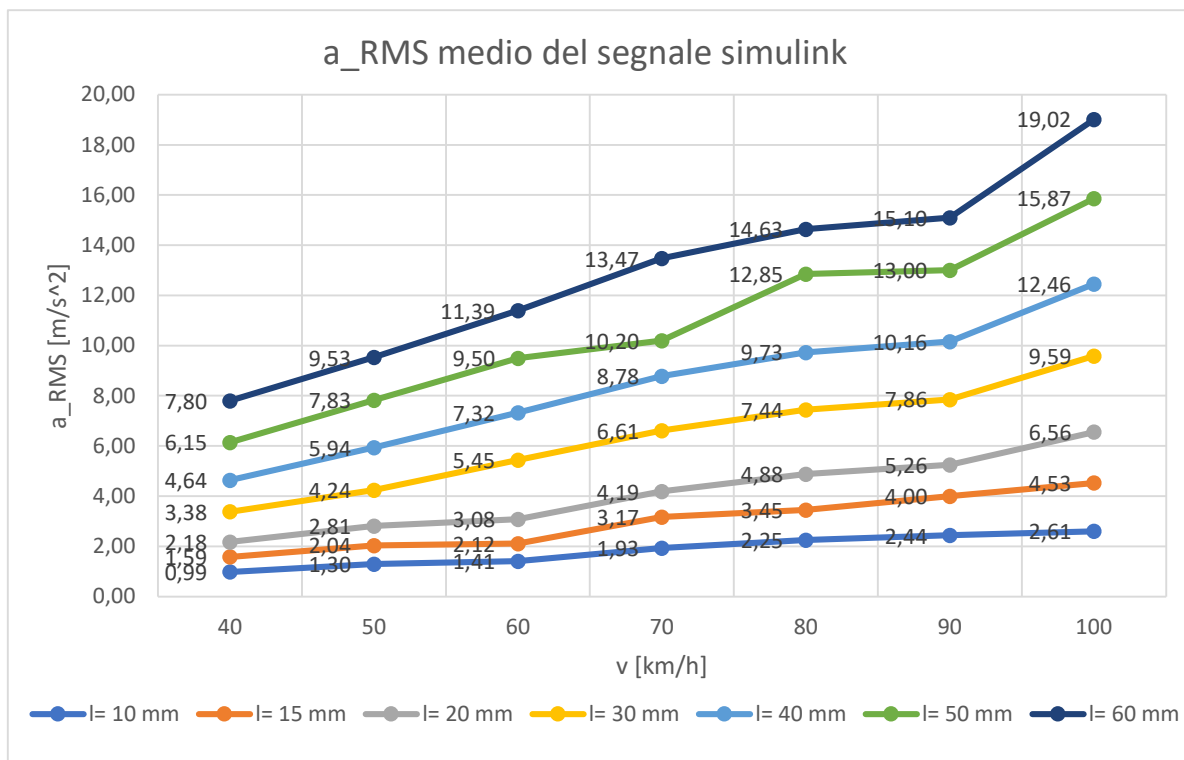


Figura 88 valore efficace da campionamento segnale modello simulink per diversi difetti e velocità

Valutazione dell'algoritmo del segnale di accelerazione verticale per un difetto di piccola entità (10mm) a velocità costante:

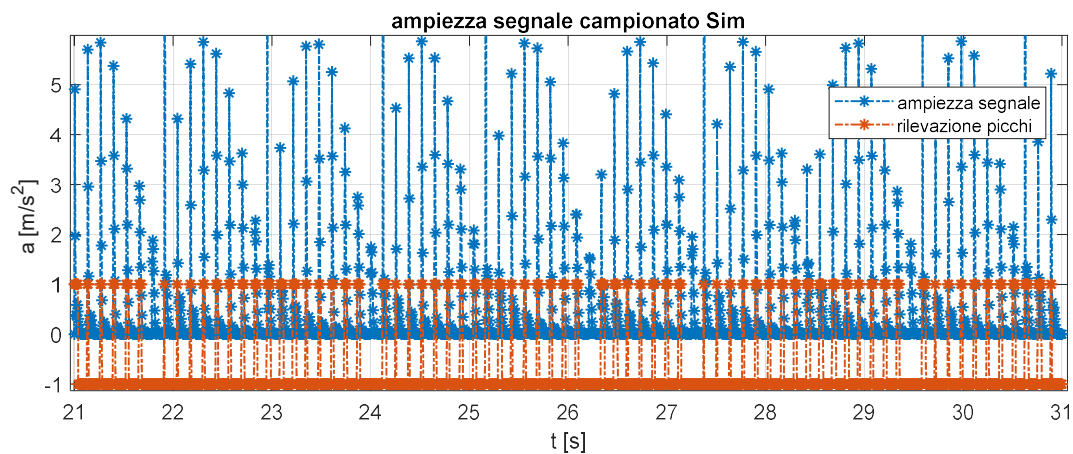


Figura 89 l=10 mm v=80km/h

$$\Delta T_{stimato} = \frac{T}{N} = 0.1394 \text{ s}$$

$$\Delta T_{verifica} = \frac{2\pi R}{V} = 0.1301 \text{ s}$$

$$\Delta T_{stima} \approx \Delta T_{verifica}$$

$$err = \frac{|\Delta T_{verifica} - \Delta T_{stimato}|}{\Delta T_{verifica}} = 7.15\%$$

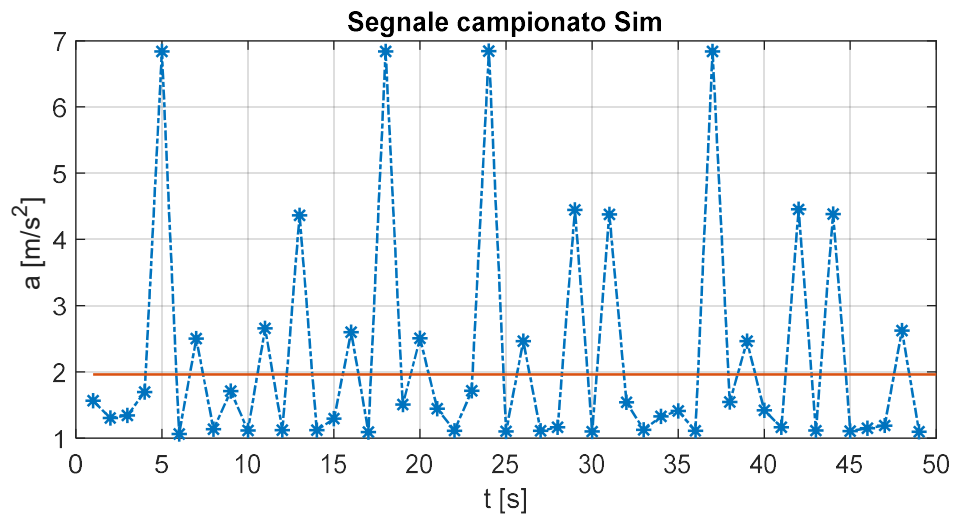


Figura 90  $l=10 \text{ mm}$   $v=80 \text{ km/h}$

Si conferma che Il valore efficace supera la soglia del rumore di 0,2g

Valutazione RMS media:

$$a_{RMS\_media} = 2.31 \text{ m/s}^2$$

$$a_{RMS} = a_{RMS\_media} \cdot \beta(V) = a_{RMS\_media} \cdot \beta(80 \text{ km/h}) = a_{RMS\_media} \cdot 1,27$$

In funzione della velocità  $V$  e del prodotto  $a_{RMS\_media} \cdot \beta(V)$  si identifica l'intervallo di valore efficace di accelerazione del segnale teorico.

$$a_{RMS} = 2.934 \text{ m/s}^2$$

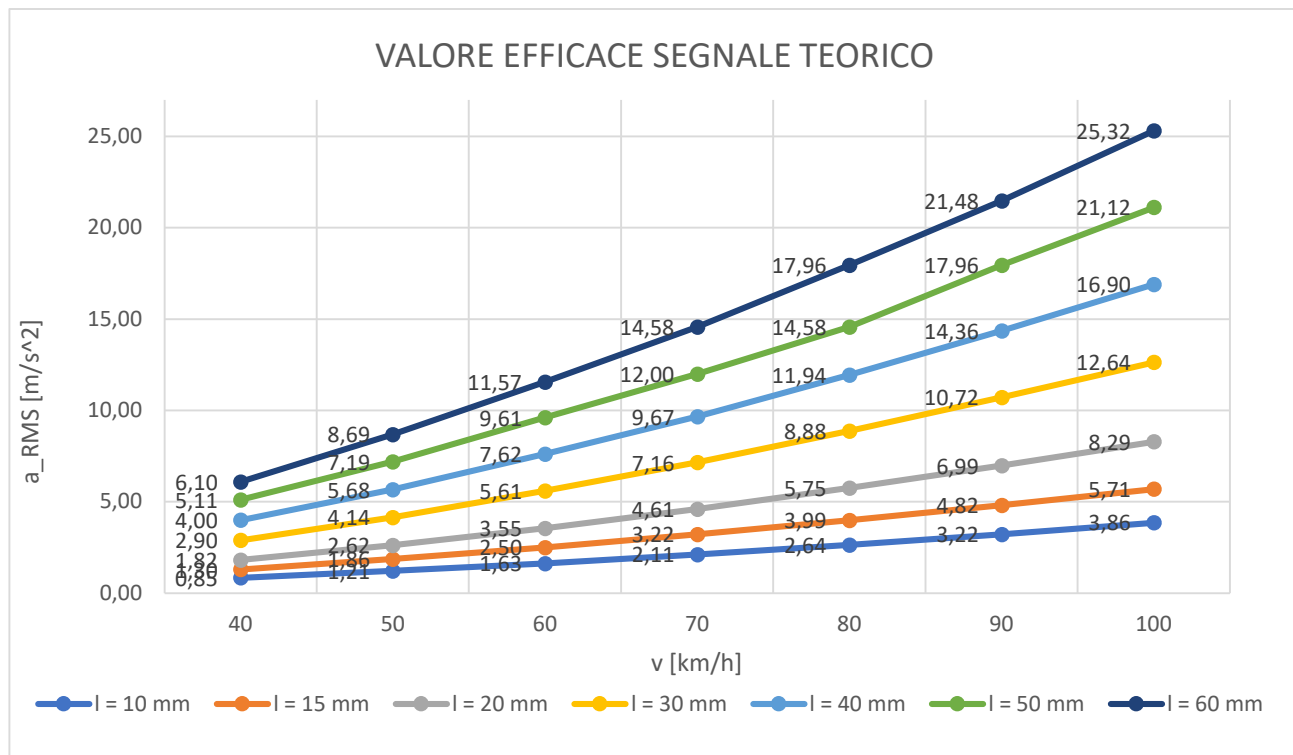


Figura 91 valori efficaci di riferimento per la definizione del danno

$$a_{RMS} \geq a_{RMS\_min\_teo}(V, l)$$

$$a_{RMS} \geq a_{RMS\_min\_teo}(80km/h, 0.01m) = 2.2825m/s^2$$

$$a_{RMS} < a_{RMS\_min\_teo}(80km/h, 0.02m) = 4.565 m/s^2$$

Questo intervallo identifica l'entità del difetto  $l$  che in questo caso è  $l = 10mm$

Si riporta sinteticamente i risultati dell'analisi svolta dall'algoritmo su tutti gli intervalli  $T_i$  del segnale di accelerazione riportato

Rilevazione della periodicità del difetto tramite l'analisi del segnale con il trigger di shmitt

T [s]	V [km/h]	Dt_ver [s]	Dt [s]	Err %
1-11	80,00	0,1301	0,198	8.07
11-21	80,00	0,1301	0.1389	6.82
21-31	80,00	0,1301	0.1394	7,15
31-41	80,00	0,1301	0.1374	5.66
41-51	80,00	0,1301	0.1396	7.31

Tabella 7

Si valuta dell'entità del difetto tramite la media del valore efficace di accelerazione corrispondente ad ogni periodo  $T = 10s$ .

T [s]	V [km/h]	beta	A_RMSm [ $m/s^2$ ]
1-11	80,00	1,27	2,1386
11-21	80,00	1,27	2,31
21-31	80,00	1,27	2,31
31-41	80,00	1,27	2,48
41-51	80,00	1,27	2,014

Tabella 8

Nota la velocità  $V$  costante ricavo i coefficienti  $\beta$ .

Dal prodotto di  $\beta_i \cdot a_{RMS} m_i$  identifico l'intervallo di valori efficaci di accelerazioni che mi definisce l'entità del difetto rilevato.

T [s]	Acc [ $m/s^2$ ]	Inf [ $m/s^2$ ]	Sup [ $m/s^2$ ]	L [mm]
1-11	2,716	2,2825	4,565	10,00
11-21	2,934	2,2825	4,565	10,00
21-31	2,934	2,2825	4,565	10,00
31-41	3,15	2,2825	4,565	10,00
41-51	2,56	2,2825	4,565	10,00

Tabella 9

- Per velocità superiori la valutazione del valore efficace di accelerazione permette di identificare il difetto  $l=10\text{mm}$  ma la conferma data dalla valutazione del picco non è più possibile poiché al salire della velocità il tasso di rilevamento dei picchi scende sotto una soglia utile per la valutazione del difetto.
- La valutazione del ripetersi del difetto tramite la doppia soglia impostata diventa più imprecisa con l'aumentare della velocità a parità di difetto.
- la valutazione del superamento della soglia del rumore certifica la rilevazione di picchi, e la verifica con il trigger di Schmitt permette di verificare che il disturbo rilevato sia periodico e coerente con la velocità del convoglio ferroviario.
- Esclusi altri tipi di difetti grazie le verifiche precedenti si può valutare l'entità del difetto con il valore efficace medio di accelerazione calcolato sul periodo  $T$ .
- Il trigger di Schmitt risulta abbastanza preciso nel rilevare il periodo che intercorre tra due urti.
- La rilevazione del numero di urti tramite l'analisi del segnale di accelerazione peggiora in maniera più rapida all'aumentare della velocità per difetti più piccoli, ad esempio per un difetto  $l = 10\text{mm}$  per velocità superiori a  $v = 80\text{km/h}$  si nota un errore relativo nell'intorno del 10%.

Si riporta lo schema logico dell'algoritmo in figura (92).

La parte di algoritmo descritta e sviluppata nel presente capitolo parte dalla prima verifica del superamento della soglia del rumore e prosegue con la definizione della velocità del carrello assunta costante, la verifica della ripetizione dell'urto coerente con la velocità rilevata, l'identificazione del parametro  $\beta$  e la valutazione dell'entità del danno tramite la valutazione del valore efficace nota la velocità orizzontale.

La parte di algoritmo descritta in questo capitolo non ha trattato tutta quella serie di verifiche preliminari del segnale di accelerazione che escludono la correlazione dell'anomalia nel segnale con il wheelflat.

L'algoritmo proposto esclude dall'analisi del wheelflat i segnali di accelerazione con valori anomali che se confermati da altri accelerometri manda un allarme di rischio deragliamento, altrimenti se tali valori anomali non sono rilevati anche dagli altri accelerometri sono considerati dei falsi positivi.

Tramite la verifica GPS vengono esclusi i disturbi dovuti a tratti di tracciato critici come ad esempio gli scambi ferroviari.

Tramite il confronto della variazione del valore efficace di accelerazione delle boccole in linea si escludono disturbi del segnale di accelerazione dovuti a danni locali del tracciato non registrati.

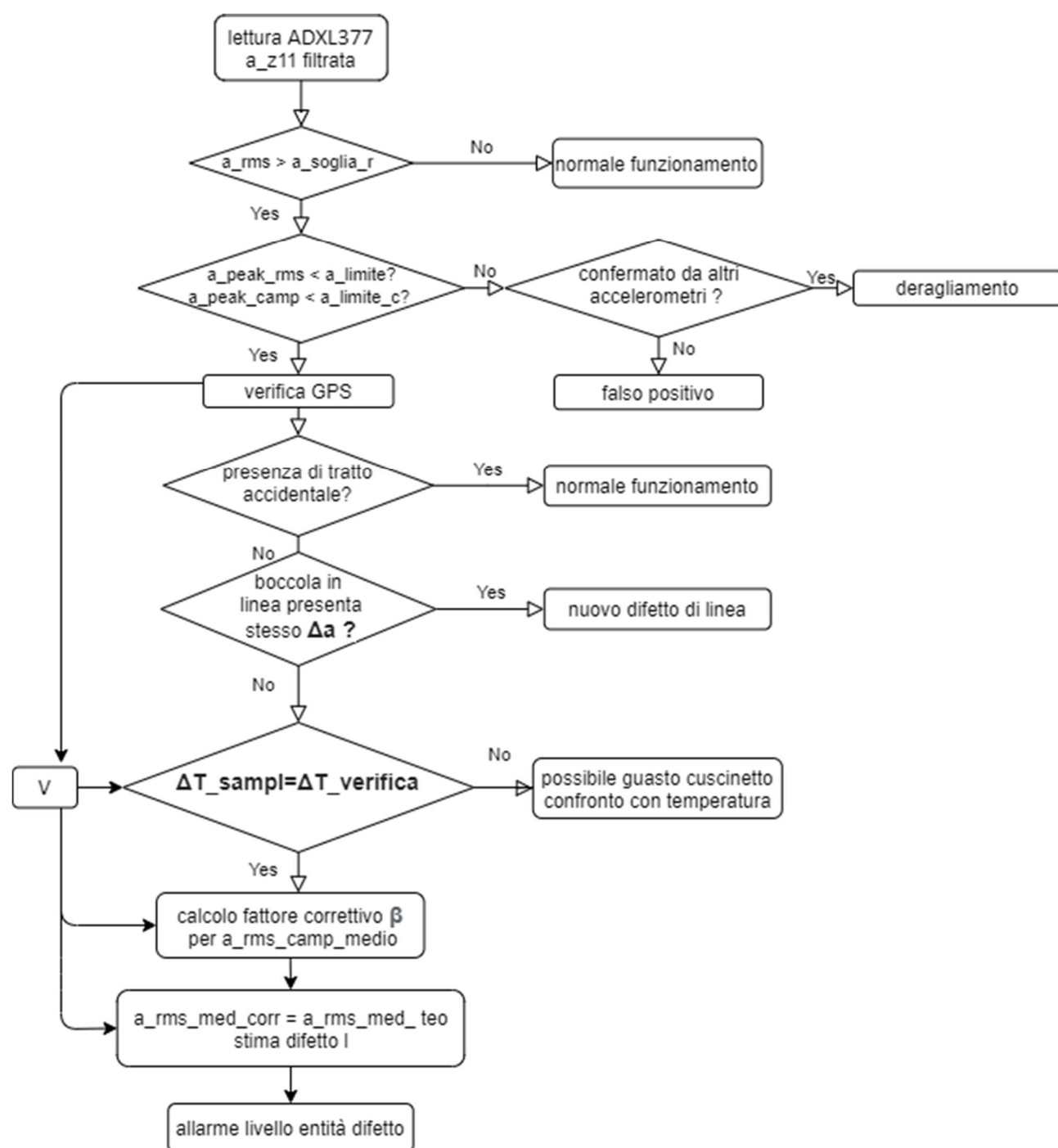


Figura 92 schema logico algoritmo di rilevamento proposto



## 6 Simulazione variazione di velocità

Vengono riportati e analizzati alcuni esempi di frenata tipica per un convoglio ferroviario merci di cui sono state acquisite alcune grandezze significative dal sistema di monitoraggio costruito dal gruppo di ricerca di Ingegneria Ferroviaria del Politecnico di Torino [8].

Noto il modello dell'accelerazione verticale per una ruota con difetto a velocità costante, si cerca di generare un nuovo segnale di accelerazione adattando il modello a velocità costante al caso con velocità orizzontale non costate di cui viene riportato il monitoraggio in figura (93).

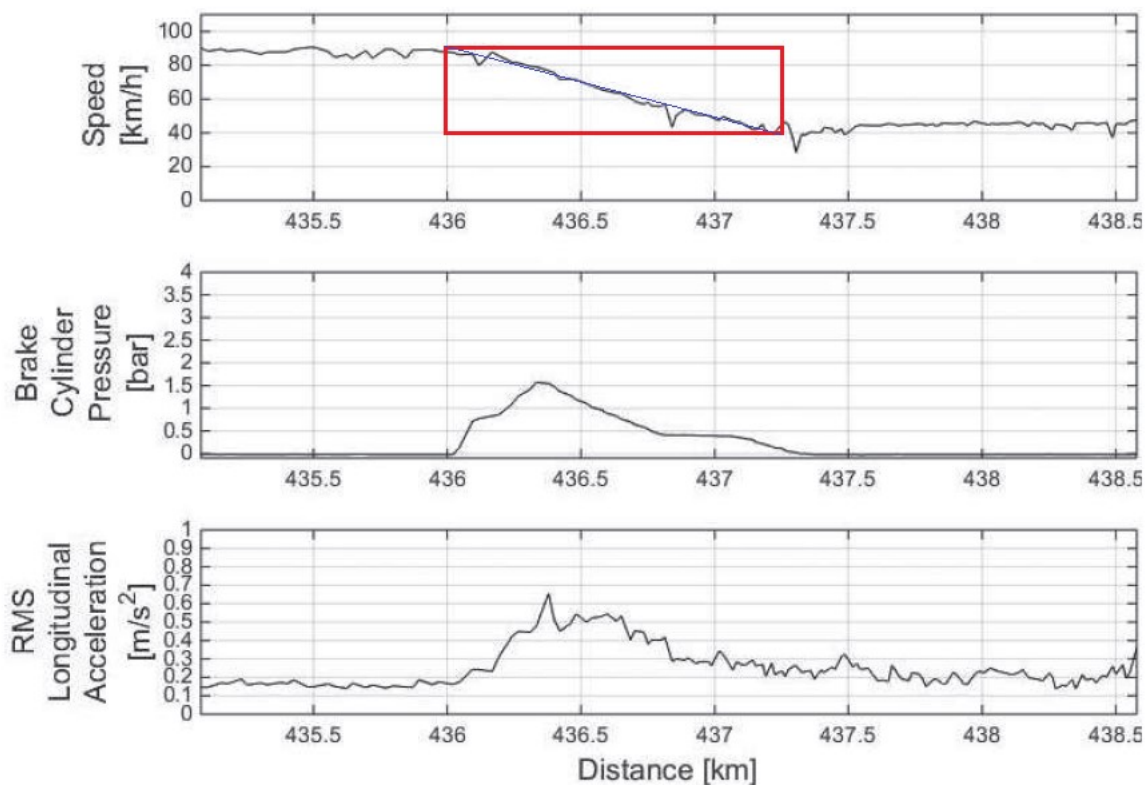


Figura 93 Trend velocità durante la frenata

Il caso riportato descrive una frenata che fa diminuire la velocità da 90km/h a 40km/h linearmente nello spazio, la distanza percorsa durante la frenata è di circa 1500m.

Si riportano nel dominio del tempo i dati acquisiti raffigurati nel grafico in figura (93).

Per la simulazione è stato pensato di dividere la distanza  $d$  percorsa per la circonferenza della ruota.

$$\frac{d}{2\pi R} \approx 520 \text{ giri}$$

È stato quindi discretizzata la distanza in  $k = 52$  segmenti da  $N = 10$  giri di ruota circa 29 m e per ognuno è stata imposta una velocità media costante.

Dalla discretizzazione è stata ricavata la velocità media ed è stata espressa in funzione del tempo e non più della distanza come è riportata nel grafico.

$$i = 1:k$$

$$\Delta V_{tot} = V_{start} - V_{end} = (90 - 40) \text{ km/h}$$

$$\Delta V = \frac{\Delta V_{tot}}{k}$$

$$Vm_i = V_{start} - \frac{\Delta V}{2} - \Delta V \cdot (i - 1)$$

$$\Delta t_i = \frac{d_i}{Vm_i} = \frac{N \cdot 2\pi R}{Vm_i}$$

Il segnale di accelerazione ottenuto dal modello simulink è stato campionato e unito in un unico vettore del segnale di accelerazione verticale campionato.

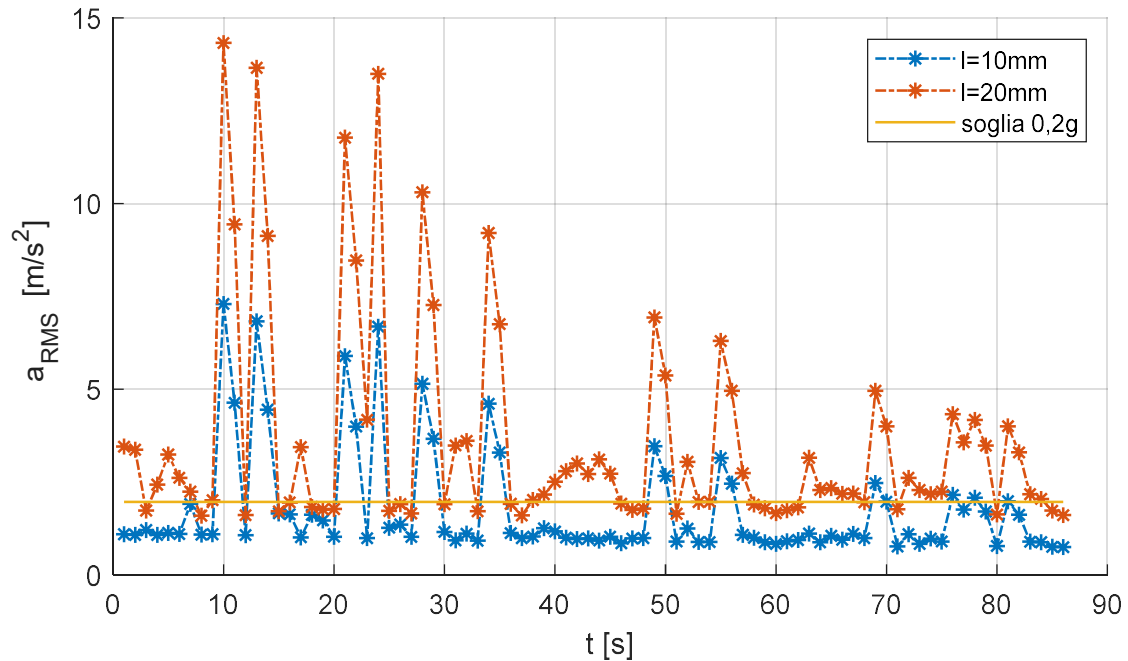


Figura 94 andamento a\_RMS campionato

Si riportano gli andamenti del valore efficace calcolato per ogni secondo e del valore efficace medio calcolato sul periodo di 10 secondi.

Tramite il trigger di Schmitt viene calcolato il periodo medio che intercorre tra gli impatti rilevati.

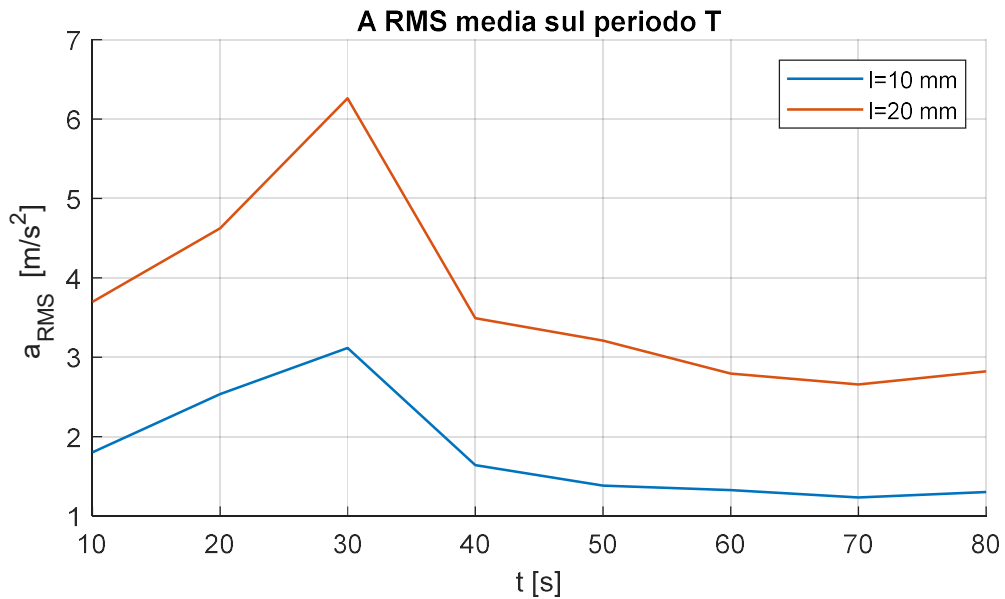


Figura 95 a\_RMS medio ottenuto sul periodo DT=10 s

Si nota che per entrambi i difetti considerati al scendere della velocità il valore efficace di accelerazione tende a una prima salita poiché la diminuzione della velocità migliora il tasso di campionamento del difetto, successivamente diminuisce poiché al diminuire della velocità diminuisce la violenza dell'urto.

Questo aspetto nell'algoritmo di rilevamento è già considerato e compensato dal parametro  $\beta$ .

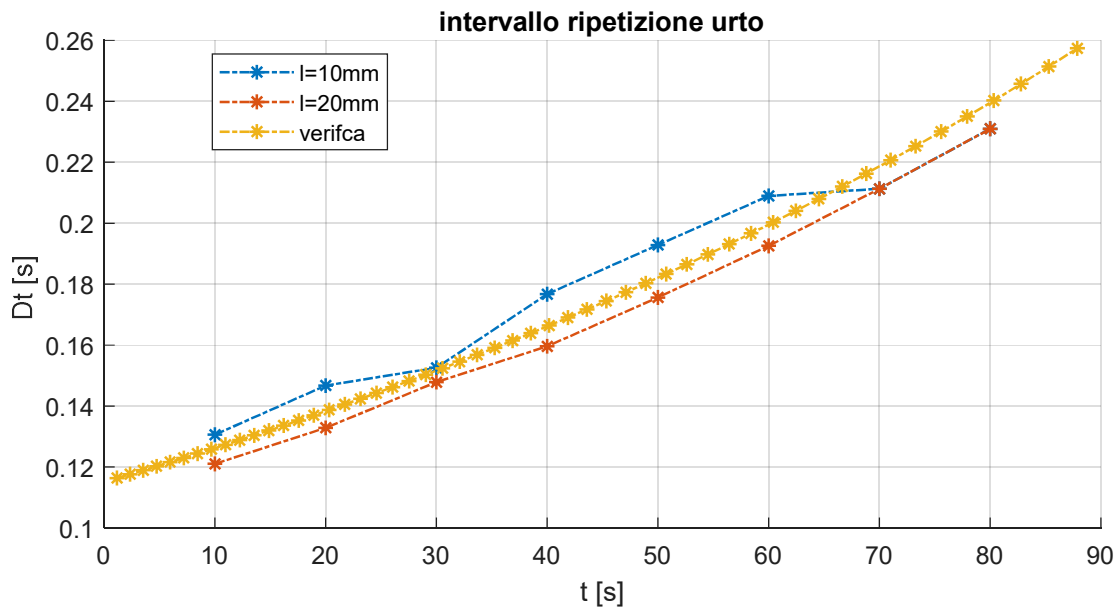


Figura 96 confronto intervallo rilevato tra urti successivi

Si verifica che la media del periodo tra i difetti ottenuta nell'intervallo di monitoraggio di 10 secondi è coerentemente proporzionale alla velocità media con un piccolo margine di errore.

$$dt_{verif_i} = \frac{N_i \cdot 2\pi R}{Vm_i}$$

Si riporta infine come il confronto tra velocità media e velocità media ottenuta dal periodo ottenuto dall'analisi del segnale svolta dal trigger di Schmitt.

$$Vm_{trig_i} = \frac{N_i \cdot 2\pi R}{T}$$

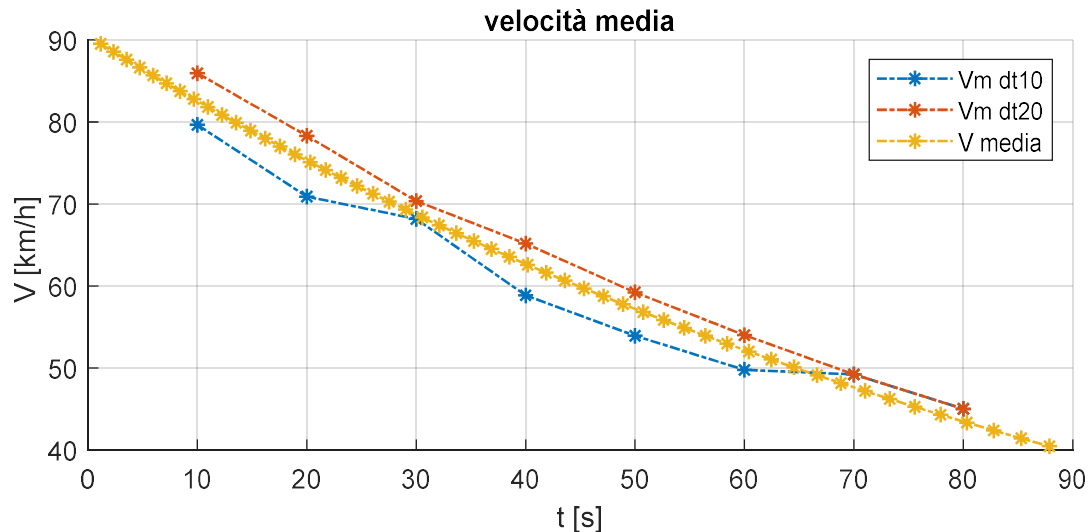


Figura 97 confronto velocità medie rilevate

Si confronta la velocità ricavata dal conteggio dei giri tramite l'analisi del segnale di accelerazione per una ruota difettosa con la velocità media corrispondente al quel periodo.

Essendo  $T = 10s$  il periodo su cui si ricava la velocità media tramite il trigger di Shmitt, approssimando l'andamento della velocità durante la frenata decrescente lineare, si deve confrontare con la velocità rilevata a  $T/2$ .

Si nota che per il difetto da 20mm la velocità media e la velocità media ottenuta dal rilevamento del periodo sono molto simili a differenza del difetto da 10 mm che fino a velocità superiori ai 50km/h sottostima la velocità media corrispondente, ciò è dovuto al fatto che per questo tipo di difetto e con la frequenza di campionamento adottata ad alte velocità il trigger di Schmitt non riesce a rilevare correttamente tutti gli urti della ruota difettosa.

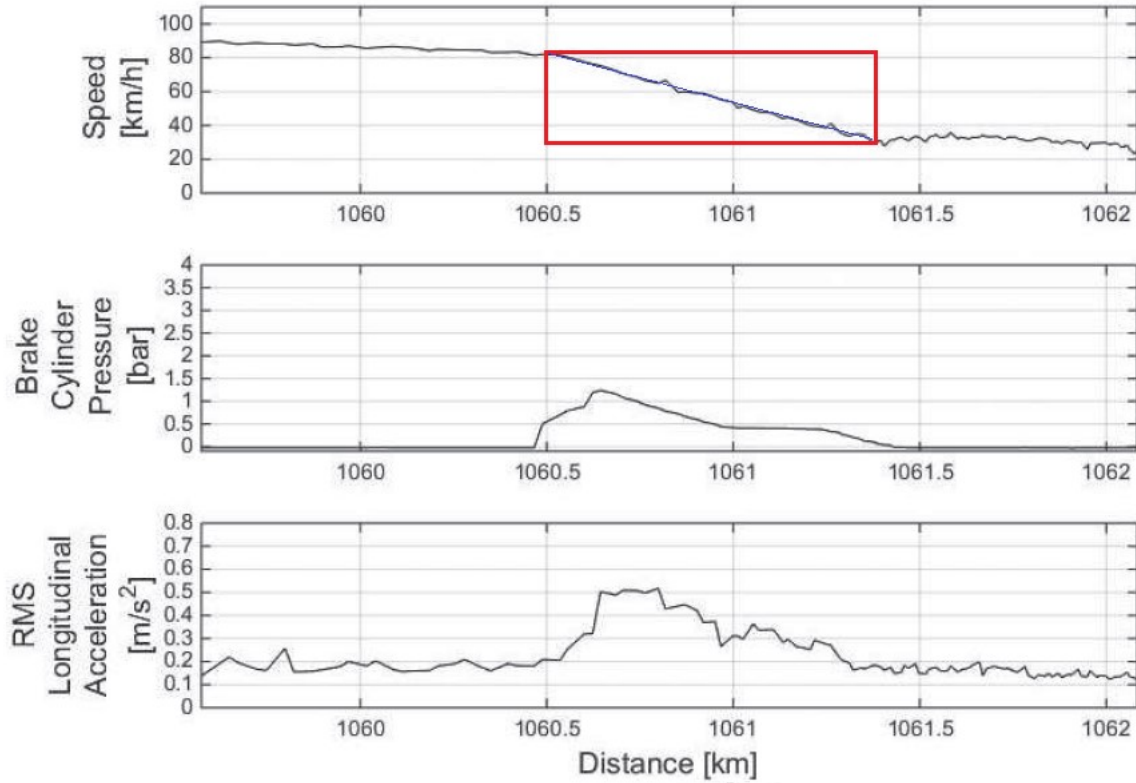


Figura 98 Trend velocità decelerazione durante la frenata

In questo caso il convoglio passa da una velocità di 80km/h a 30km/h in un spazio di frenata di circa 875m.

A questo spazio di frenata corrispondono circa 300 giri di ruota.

$$\frac{d}{2\pi R} \approx 300 \text{ giri}$$

Viene discretizzato in  $k = 30$  intervalli da  $N = 10$  giri di ruota

$$i = 1:k$$

$$\Delta V_{tot} = V_{start} - V_{end} = (80 - 30) \text{ km/h}$$

come nel caso precedente si definiscono gli intervalli temporali e assegno per ognuno una velocità media costante.

$$\Delta V = \frac{\Delta V_{tot}}{k}$$

$$Vm_i = V - \frac{\Delta V}{2} - \Delta V \cdot (i - 1)$$

$$\Delta t_i = \frac{d_i}{Vm_i} = \frac{N \cdot 2\pi R}{Vm_i}$$

Si riportano i grafici così ottenuti

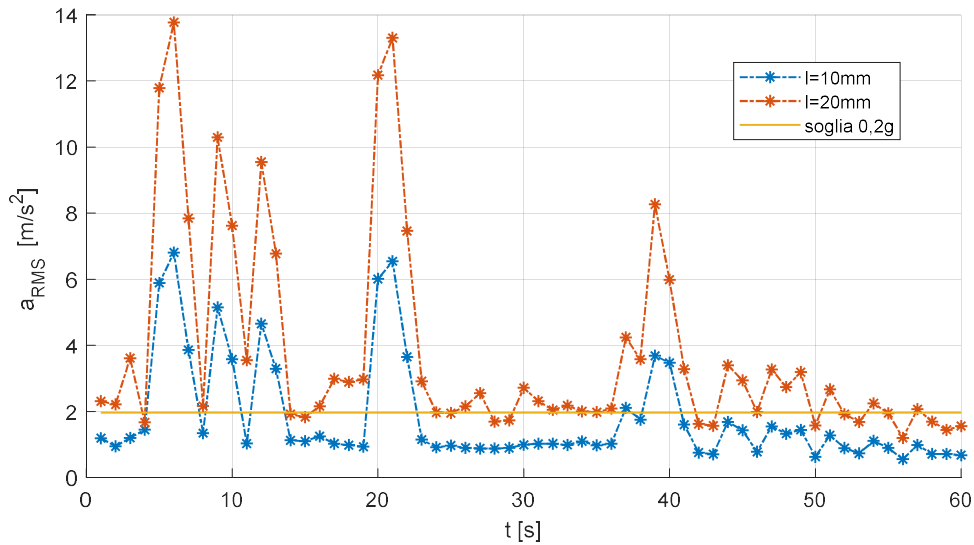


Figura 99 confronto RMS accelerazione

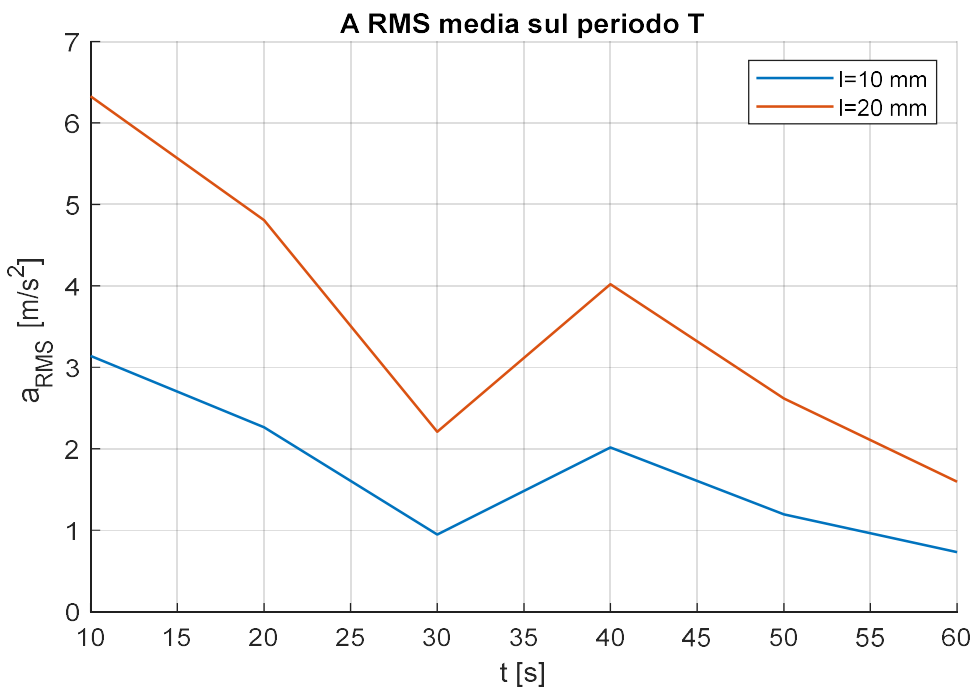


Figura 100 confronto RMS accelerazione su periodi T=10s

- Si nota che come nel caso precedente al diminuire della velocità diminuisce anche il valore efficace medio valutato per ogni  $T_i = 10s$ .
- Si nota che per il difetto da 10mm il valore efficace per velocità inferiori ai 50km/h scende al di sotto della soglia del rumore e non sarebbe più rilevabile dall'algoritmo.
- A conferma confrontando i grafici si nota che dopo il quarantacinquesimo secondo da inizio frenata la velocità media scende sotto i 40km/h

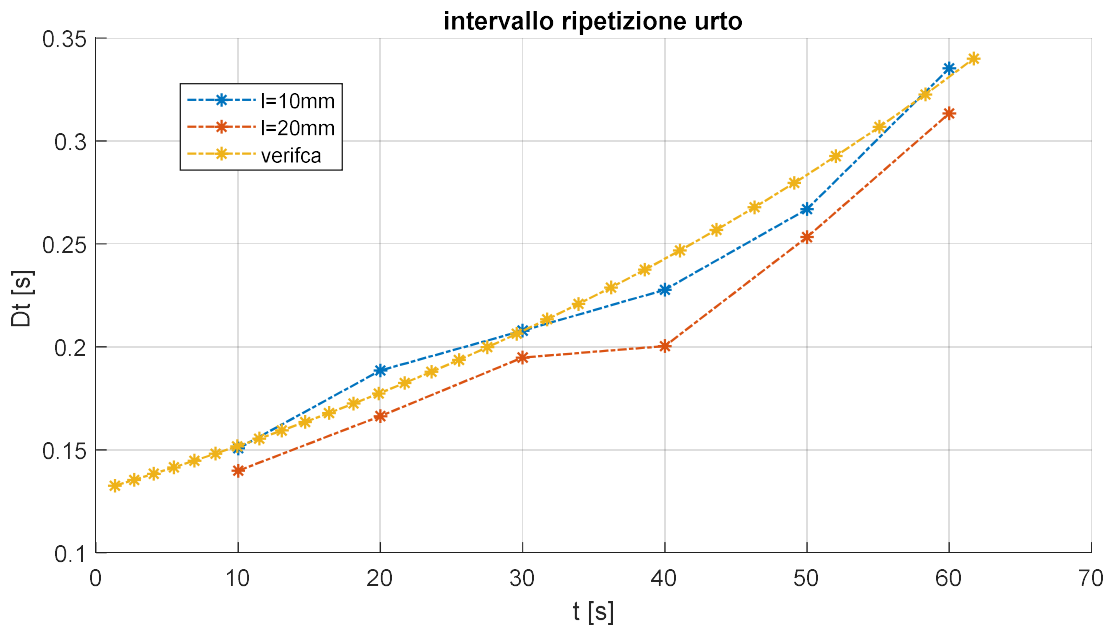


Figura 101 confronto intervallo medio tra due urti su un periodo  $T=10s$

- Con il diminuire della velocità si nota che il periodo che intercorre tra gli urti aumenta.
- Il valore efficace del segnale di accelerazione ottenuto dal modello simulink per il difetto da 10mm scende sotto la soglia del rumore.
- Il trigger di Schmitt per come è stato impostato può ancora riuscire a rilevare l'urto periodico grazie all'analisi del rumore a più basse frequenze dovuto alla dinamica del carrello modellata.
- In questo caso di frenata che parte da una velocità di 80km/h minore rispetto al caso precedente, si nota che il rilevamento del periodo degli urti come nel caso precedente per il difetto più piccolo di 10mm è più efficace al di sotto dei 50 km/h.

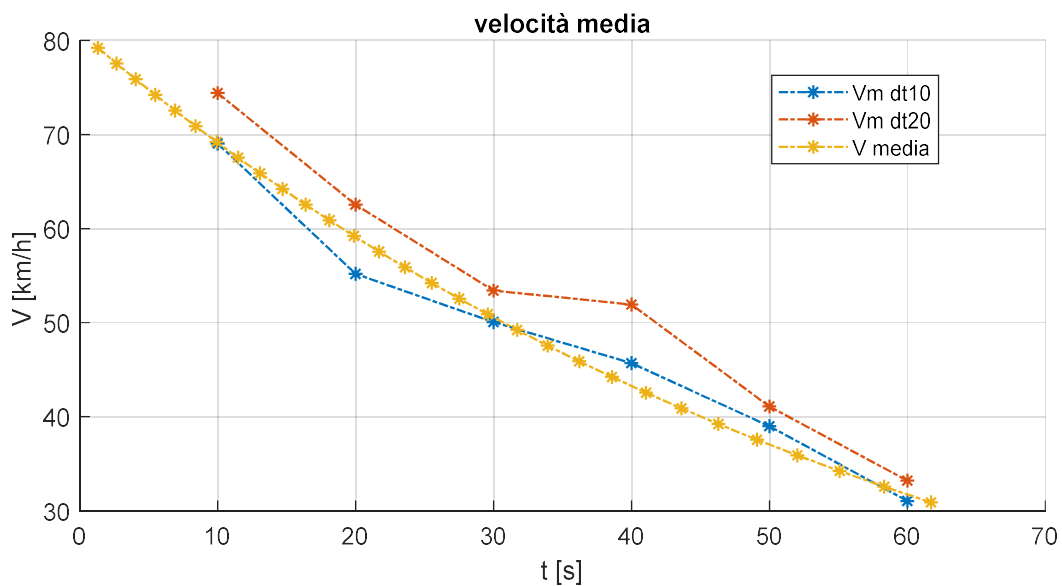


Figura 102 confronto velocità media con velocità media ricavata da intervallo medio tra due urti

## 6.1 Rilevamento entità difetto tramite algoritmo

Nel capitolo precedente è stata riprodotta una simulazione dell'andamento delle accelerazioni verticali nel caso di ruota difettosa durante una frenata.

In questo capitolo vengono processate le informazioni acquisite dal campionamento dei dati prodotti dalla simulazione dall'algoritmo di rilevamento proposto per verificare la sua efficacia anche in queste condizioni del moto del convoglio ferroviario.

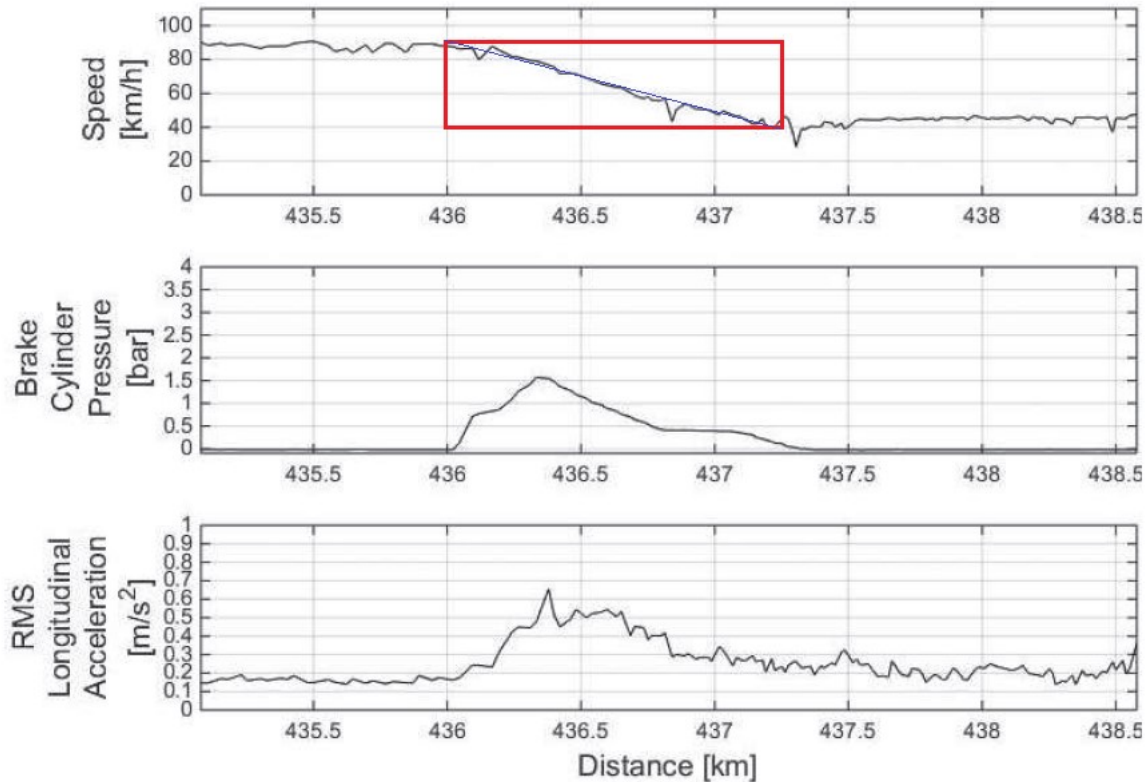


Figura 103 Trend velocità durante frenata

Viene processato il segnale di valore efficace di accelerazione ottenuto dalla simulazione della frenata riportata in figura (103).



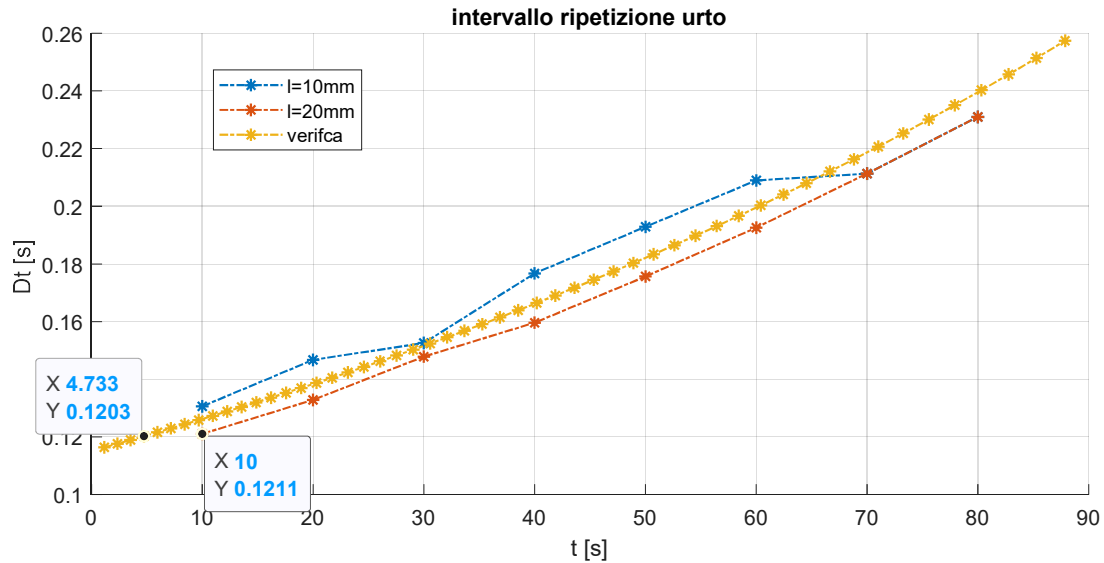


Figura 104 confronto intervallo medio tra urti successivi

Vengono analizzati dall'algoritmo i primi 10 secondi monitorati per la verifica della periodicità del difetto coerente con la velocità.

Viene ora riportato il processamento dei dati ottenuti dalla simulazione del caso di ruota difettosa con l=20mm.

Verifica periodicità

$$\Delta T_{stimato\_i} = \frac{T}{N} = 0.1211s$$

$$\Delta T_{verifica} = \frac{2\pi R}{Vm_i} = 0.1228s$$

$$\Delta T_{stimato} \approx \Delta T_{verifica}$$

$$err = \frac{|\Delta T_{verifica} - \Delta T_{stima}|}{\Delta T_{verifica}} = 1.426\%$$

Confermata periodicità

Viene riportata sinteticamente la verifica della periodicità per i tratti successivi

T [s]	Dt [s]	Dt_ver [s]	Err %	Vm [km/h]
0-10	0,121	0,121	0,31	86,71
10-20	0,133	0,133	0,42	77,02
20-30	0,148	0,146	1,26	70,29
30-40	0,160	0,159	0,47	65,52
40-50	0,176	0,174	0,81	58,75
50-60	0,193	0,193	0,16	52,98
60-70	0,211	0,212	0,22	48,17
70-80	0,231	0,230	0,57	45,3

Tabella 10

Per il caso analizzato l'algoritmo riesce ad analizzare molto bene il segnale di accelerazione ottenuto, ottenendo degli errori sulla stima del periodo tra gli urti periodici per una ruota con questo tipo di difetto molto bassi.

Nota la velocità media del convoglio si procede all'analisi del valore efficace di accelerazione.

$$V = 86,7\text{km/h} \approx 90\text{km/h}$$

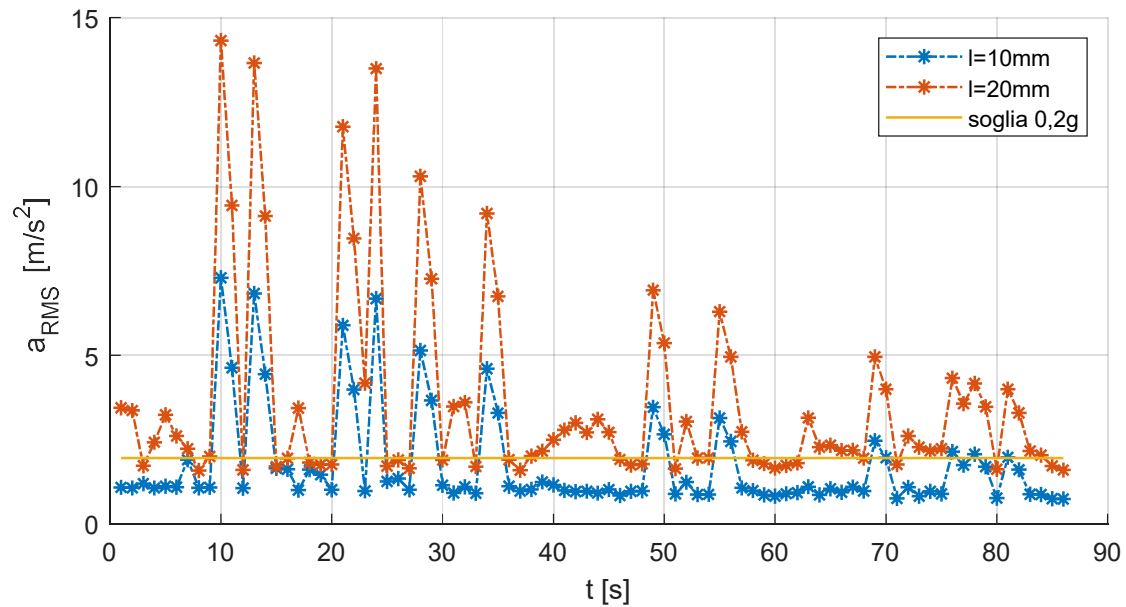


Figura 105 confronto RMS accelerazione rilevata dalla simulazione di difetti diversi per stessa frenata

Valutazione RMS media:

$$a_{RMS\_media\_i} = 3.7\text{m/s}^2$$

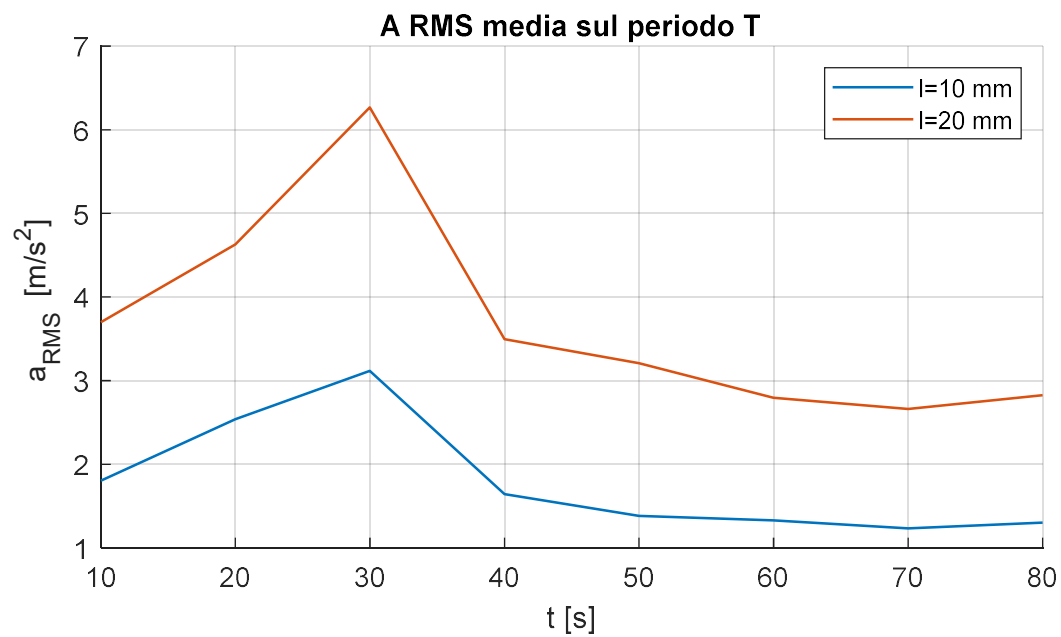


Figura 106  $a_{RMS}$  medio ottenuto sul periodo  $DT=10\text{ s}$

$$a_{RMS} = a_{RMS\_media} \cdot \beta(V) = a_{RMS\_media} \cdot 1,46$$

$$a_{RMS} = 5.36m/s^2$$

$$a_{RMS} \geq a_{RMS\_min\_teo}(V, l)$$

$$a_{RMS} \geq a_{RMS\_min\_teo}(90km/h, 0.02m) = 5.13m/s^2$$

$$a_{RMS} < a_{RMS\_min\_teo}(90km/h, 0.03m) = 8.91$$

È quindi confermato il difetto  $l = 20 \text{ mm}$  anche nel caso con variazione di velocità

Si riporta sinteticamente l'esito del monitoraggio dell'algoritmo anche per i tratti successivi.

T [s]	Vm [km/h]	V [km/h]	beta	A_RMSm [m/s^2]
0-10	86,71	90,00	1,45	3,70
10-20	77,02	80,00	1,27	4,62
20-30	70,29	70,00	1,20	6,25
30-40	65,52	70,00	1,17	3,50
40-50	58,75	60,00	1,10	3,20
50-60	52,98	50,00	1,10	2,80
60-70	48,17	50,00	1,10	2,66
70-80	45,3	50,00	1,10	2,83

Tabella 11

Nella tabella 2 si riportano nella prima colonna gli estremi del periodo  $T_i$  monitorato, nella colonna successiva le velocità medie, segue la loro approssimazione il beta corrispondente alla velocità media approssimata e il valore efficace di accelerazione medio rilevato sul periodo monitorato corrispondente.

T [s]	Acc [m/s^2]	Inf [m/s^2]	Sup [m/s^2]	L [mm]
0-10	5,36	5,13	8,91	20,00
10-20	5,87	4,56	7,34	20,00
20-30	7,50	5,89	8,42	30,00
30-40	4,10	3,92	5,89	20,00
40-50	3,52	2,55	4,60	20,00
50-60	3,07	1,90	3,37	20,00
60-70	2,93	1,90	3,37	20,00
70-80	3,11	1,90	3,37	20,00

Tabella 12

Nella tabella 3 sono riportati per i periodi corrispondenti nella seconda colonna il prodotto  $\beta_i \cdot a_{RMS}m_i$

Nella terza e quarta colonna vi sono riportati rispettivamente gli estremi inferiori e superiori di valore efficace teorico in cui cade il prodotto ottenuto nella seconda colonna.

Questi intervalli definiscono l'entità del difetto  $l$  rilevato in funzione del prodotto  $\beta_i \cdot a_{RMS}m_i$ .

Si può affermare che la definizione dell'entità del danno discreta, tramite l'individuazione di range di valori efficaci di accelerazione nell'intorno del valore teorico in cui può ricadere il valore efficace rilevato, permette la corretta valutazione del difetto anche se la velocità del carrello relativa ai dati campionati non è costante.

Si riporta lo studio, da parte dell'algoritmo proposto, della stessa frenata nell'ipotesi di un difetto da 10mm (curva blu).

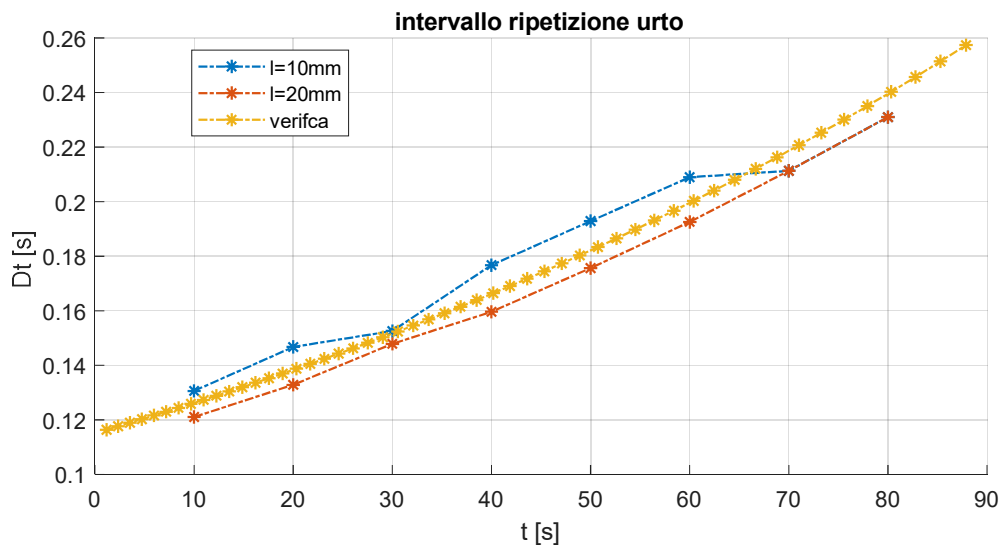


Figura 107 confronto intervallo medio tra urti successivi

T [s]	Dt [s]	Dt_ver [s]	Err %	Vm [km/h]
0-10	0,131	0,121	7,56	86,71
10-20	0,147	0,133	9,98	77,02
20-30	0,153	0,146	4,50	70,29
30-40	0,177	0,159	11,23	65,52
40-50	0,193	0,174	10,69	58,75
50-60	0,209	0,193	8,34	52,98
60-70	0,211	0,212	0,22	48,17
70-80	0,231	0,230	0,57	45,3

Tabella 13

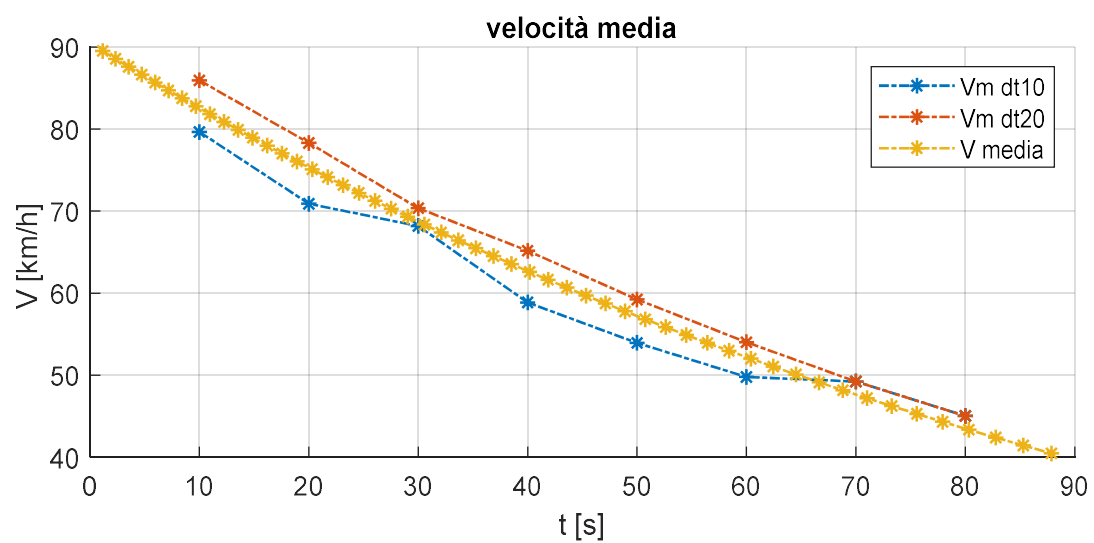


Figura 108 confronto velocità medie

- Si nota che per il difetto ipotizzato di 10mm l'algoritmo nell'analisi del segnale per la valutazione del periodo di ripetizione dell'urto dovuto alla ruota difettosa è più impreciso rispetto al caso precedente, raggiungendo valori di errore rispetto al  $\Delta T_{verifica}$  medio anche del 12%.
- Non tutti gli urti vengono rilevati infatti il  $\Delta T_{stimato}$  medio risulta più grande del  $\Delta T_{verifica}$  medio.
- Si evidenzia che nei tratti finali dove la velocità media scende nell'intorno dei 50km/h l'errore sulla stima della periodicità della ripetizione dell'urto della ruota difettosa scende.
- Poiché il difetto è piccolo fissata la frequenza di campionamento  $F_s = 200Hz$  risulta più semplice rilevarlo a velocità più basse.
- Di seguito si riporta l'analisi del valore efficace di accelerazione rilevato effettuata dall'algoritmo.

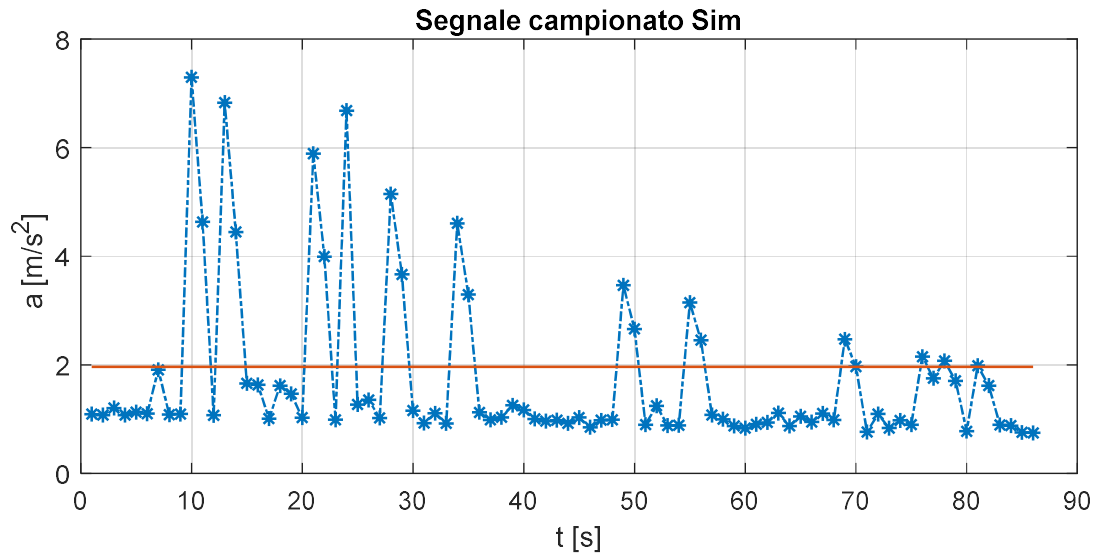


Figura 109 Trend RMS accelerazione per l=10mm

Valutazione RMS media per questo caso in analisi corrisponde alla curva blu:

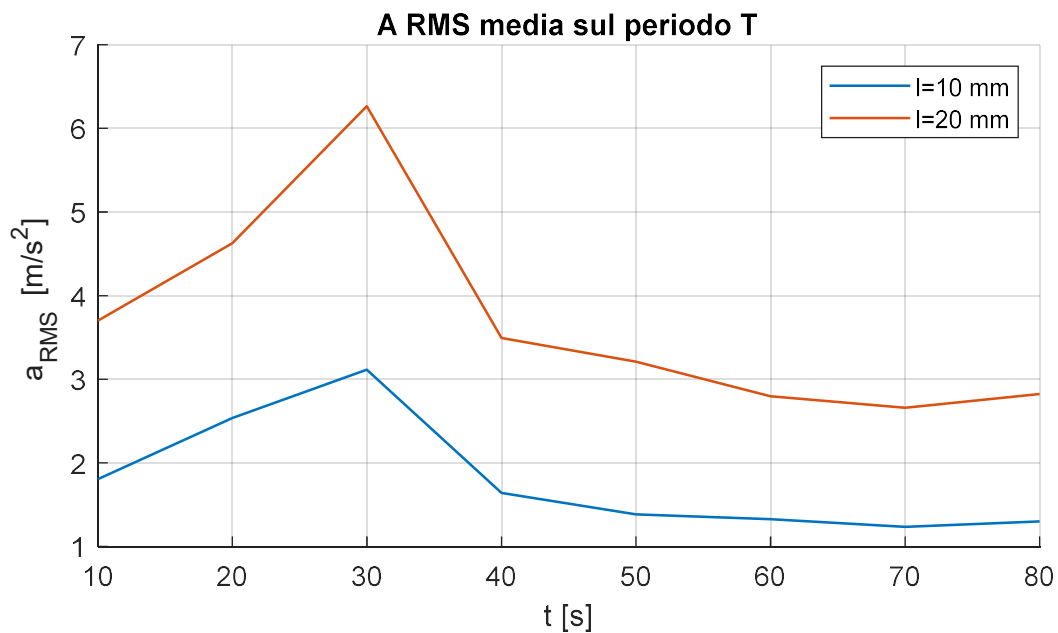


Figura 110 confronto RMS accelerazione medio su intervalli T=10s

Come nel caso precedente si riportano per ogni periodo analizzato dall'algoritmo le velocità medie corrispondenti e la loro approssimazione, il beta corrispondente alla velocità rilevata e la media del valore efficace di accelerazione del periodo considerato

T [s]	V <sub>m</sub> [km/h]	V [km/h]	beta	A_RMSm [m/s <sup>2</sup> ]
0-10	86,71	90,00	1,45	1,80
10-20	77,02	80,00	1,27	2,54
20-30	70,29	70,00	1,20	3,12
30-40	65,52	70,00	1,17	1,68
40-50	58,75	60,00	1,10	1,38
50-60	52,98	50,00	1,10	1,33
60-70	48,17	50,00	1,10	1,23
70-80	45,3	50,00	1,10	1,30

Tabella 14

Nella tabella successiva per ogni periodo si riporta il prodotto  $\beta_i \cdot a_{RMS}m_i$  e, nota la velocità, sono definiti gli intervalli di valore efficace in cui ricadono.

Viene dunque riportato la dimensione del difetto corrispondente all'intervallo identificato dal rapporto  $\beta_i \cdot a_{RMS}m_i$  per ogni periodo analizzato.

T [s]	Acc [m/s <sup>2</sup> ]	Inf [m/s <sup>2</sup> ]	Sup [m/s <sup>2</sup> ]	L [mm]
0-10	2,62	2,57	5,13	10,00
10-20	3,22	2,28	4,56	10,00
20-30	3,74	2,28	3,92	10,00
30-40	1,96	1,96	3,92	10,00
40-50	1,52	1,28	2,55	10,00
50-60	1,46	0,95	1,90	10,00
60-70	1,36	0,95	1,90	10,00
70-80	1,43	0,95	1,90	10,00

Tabella 15

- Si nota che il valore efficace di accelerazione anche per un difetto piccolo come quello analizzato (10mm) fino ai 50km/h supera la soglia del rumore e permette il rilevamento del difetto.
- L'analisi del valore efficace di accelerazione medio permette la corretta stima del difetto.
- Dall'analisi descritta si può affermare che la valutazione del difetto tramite l'individuazione di range, in funzione della velocità, in cui può ricadere il valore efficace di accelerazione permette di compensare variazioni contenute della velocità nell'intervallo di analisi imposto  $T = 10s$  e quindi eseguire una corretta valutazione dell'entità del difetto.

## 7 Possibili miglioramenti del modello

Il modello simulink proposto può essere arricchito introducendo irregolarità al tracciato considerato.

$$z_{rot} = z_0 \neq 0$$

L'introduzione di irregolarità permette di tener conto dei difetti di corrugazione del tracciato.

Questi sono classificati in termini di lunghezza d'onda come ondulazione della traccia a passo corto (lunghezza d'onda di 30–80 mm), traccia a passo medio di ondulazione (lunghezza d'onda 200–300 mm) e ondulazione della pista a passo lungo ( $\approx 1500$  mm lunghezza d'onda).

L'ondulazione della superficie della rotaia può essere descritta utilizzando la seguente equazione

$$z_{rot}(x) = A \cdot \sin\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right)$$

Si può riscrivere in funzione del tempo ricordando che  $x = V \cdot t$  dove per  $V$  si può imporre la velocità del convoglio assunta.

$$z_{rot}(t) = A \cdot \sin\left(2\pi \frac{V \cdot t}{\lambda}\right)$$

Nell'equazione proposta il simbolo  $A$  rappresenta l'ampiezza del difetto e  $\lambda$  corrisponde alla lunghezza d'onda del difetto di ondulazione.

Si può considerare anche la presenza di giunti sul tracciato sommando all'equilibrio della ruota la forza introdotta da questo difetto. Questa forza può essere descritta come:

$$k_{rot} \cdot (z_{joint})$$

Dove  $k_{rot}$  è la rigidità che simula il contatto ruota rotaia e  $z_{joint}$  la brusca variazione di quota locale introdotta dal giunto che può essere modellata come una funzione a gradino.

Di seguito si riportano le equazioni modificate per tener conto di questi ulteriori aspetti:

viene imposto:

$$\dot{z}_{rot} = 0$$

$$I = m_w \cdot YYdd$$

Dove  $YYdd$  è la forma di accelerazione teorica definita in funzione del diametro, del difetto  $I$  e della velocità del convoglio ferroviario.

Equilibrio alla cassa:

$$m_{cass}\ddot{z}_{cass} = -k_{sec}(z_{cass} - z_{carr}) - c_{sec}(\dot{z}_{cass} - \dot{z}_{carr})$$

Equilibrio al carrello:

$$m_{carr}\ddot{z}_{carr} = k_{sec}(z_{cass} - z_{carr}) + c_{sec}(\dot{z}_{cass} - \dot{z}_{carr}) - k_{prim}(z_{carr} - z_{wheel}) - c_{prim}(\dot{z}_{carr} - \dot{z}_{wheel})$$

Equilibrio delle forze sulla ruota:

$$m_w\ddot{z}_w = k_{prim}(z_{carr} - z_{wheel}) + c_{prim}(\dot{z}_{carr} - \dot{z}_{wheel}) - k_{rot}(z_{wheel} - z_{rot}) - c_{rot}(\dot{z}_{wheel}) + k_{rot}(z_{joint}) + I$$

Di seguito si riporta il modello simulink modificato in modo opportuno per introdurre un difetto di corrugazione del tracciato, in particolare si introduce una corrugazione di traccia a passo medio di ondulazione (lunghezza d'onda  $\lambda = 400 \text{ mm}$  )

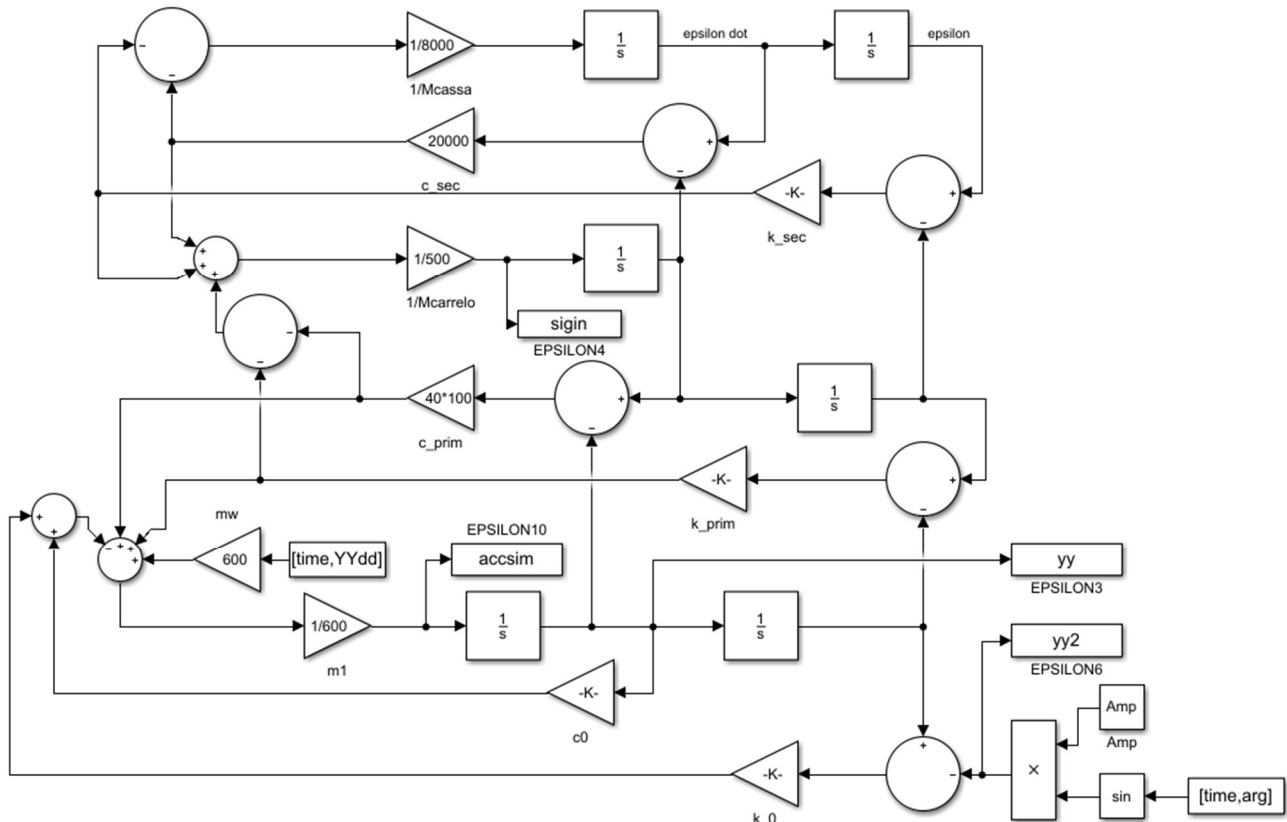


Figura 111 nuovo modello simulink

Il vettore arg corrisponde a vettore dell'argomento del seno che descrive l'ondulazione del tracciato:  $2\pi \frac{V \cdot t}{\lambda}$

La costante Amp invece è l'ampiezza dell'ondulazione che è stata imposta  $A = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}$

Dal prodotto si ottiene quindi

$$z_{rot}(t) = A \cdot \sin\left(2\pi \frac{V \cdot t}{\lambda}\right)$$



Si riporta la forma di accelerazione risultante per una ruota difettosa con difetto  $l = 10\text{mm}$  che viaggia a  $V = 50\text{km/h}$  tenendo conto anche del difetto di ondulazione del tracciato appena descritto.  
 $\lambda = 400\text{ mm}$ ,  $A = 2 \cdot 10^{-5}\text{m}$ .

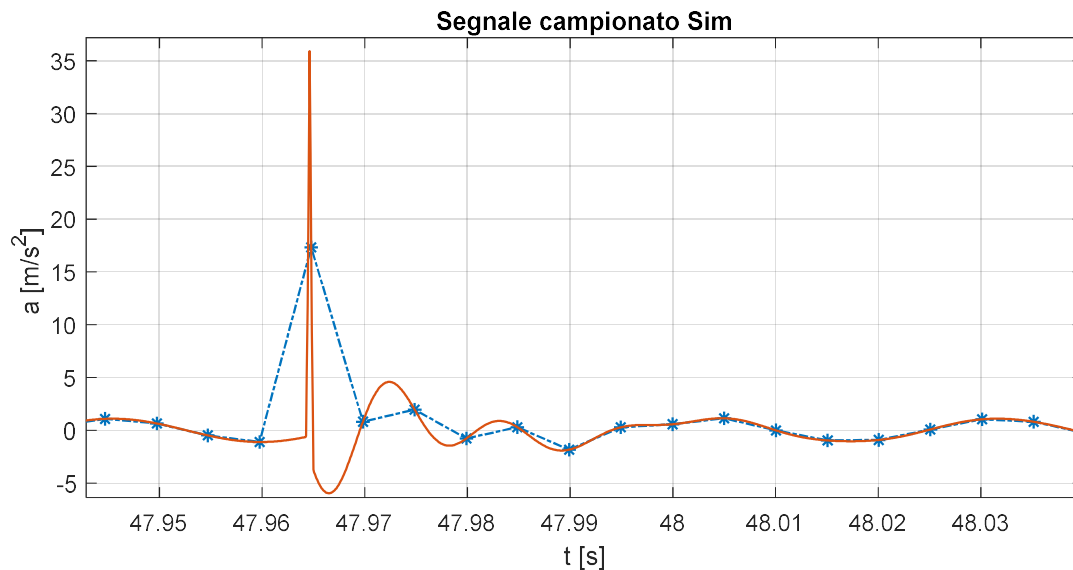


Figura 112  $l=10\text{mm}$   $V=50\text{km/h}$

si nota dal grafico riportato che vi è una sovrapposizione degli effetti. L'urto dovuto al wheel flat risulta invariato, mentre la parte finale della dinamica associata al carrello in reazione all'urto viene in parte influenzata dall'ondulazione del tracciato.

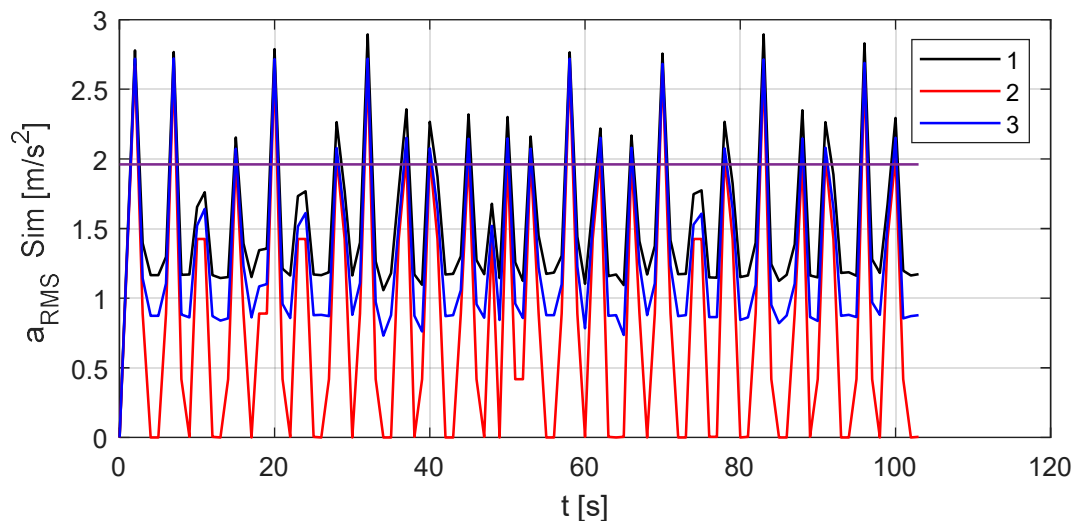


Figura 113 confronto valori efficaci di accelerazione ottenuti dal campionamento,  $l=10\text{mm}$   $V=50\text{km/h}$

Nel figura (113) si confrontano i valori efficaci di accelerazione ottenuti per una ruota con difetto  $l = 10\text{mm}$  che viaggia a velocità costante  $V = 50\text{km/h}$  in un periodo  $t = 105\text{ s}$ .

La curva 2 rossa è il caso dove ho campionato solo la forma teorica di accelerazione dell'urto dovuto al wheel-flat. Si nota che con una frequenza di campionamento  $F_s = 200\text{Hz}$  ad ogni secondo non riesce sempre a campionare un picco e quindi otteniamo dei valori di RMS di accelerazione pari a 0.

La curva 3 blu è ottenuta dal campionamento del segnale di accelerazione ottenuto dal modello simulink che tiene conto di una dinamica associata del carrello.

Si nota che la dinamica del carrello introduce un rumore che viene rilevato dal campionamento ottenendo un valore efficace minimo nell'intorno di  $1m/s^2$ , ciò però non influisce in modo significativo sul valore massimo di valore efficace rilevato.

La curva 1 nera è ottenuta dal campionamento del segnale di accelerazione ottenuto dal modello simulink che tiene conto di un tratto di tracciato dove si ripete un difetto di ondulazione precedentemente descritto.

Si nota che l'introduzione nel modello di questo aspetto genera un ulteriore rumore nel segnale di accelerazione prodotto che fa aumentare ulteriormente il valore minimo di accelerazione efficace rilevata di circa  $0,25m/s^2$ .

Anche in questo ultimo caso l'influenza sui valori massimi di valore efficace di accelerazione ottenuto dal campionamento del segnale è trascurabile.

Questo perché i valori massimi corrispondono alla rilevazione del picco dovuto all'urto della ruota difettosa che risulta poco influenzato dal disturbo introdotto dalla dinamica del carrello e dal difetto di ondulazione del tracciato.

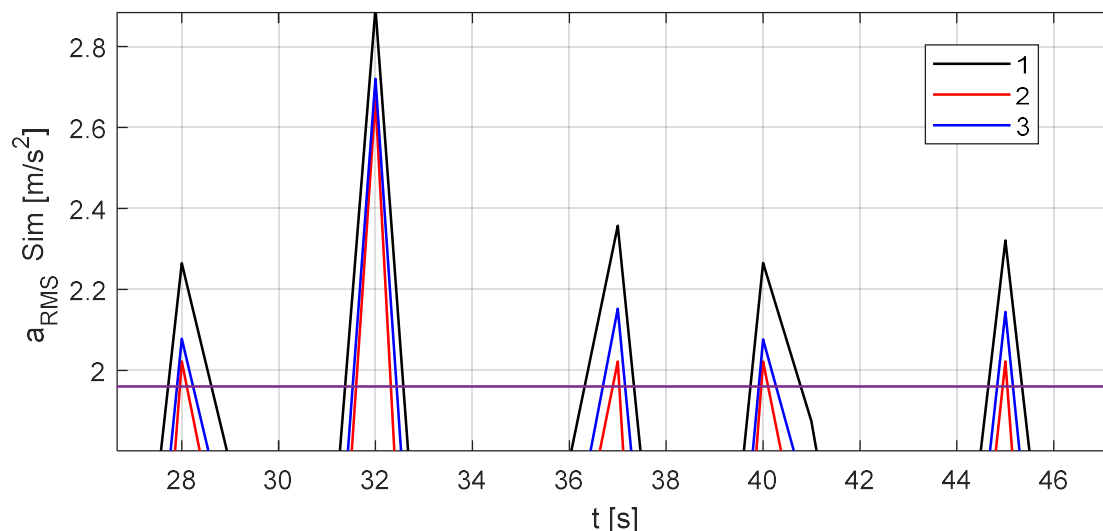


Figura 114 dettaglio variazione picchi  $a_{RMS}$ ,  $l=10mm$   $V=50km/h$

Si riporta l'analisi tramite l'algoritmo di rilevamento proposto dei primi 50 secondi del segnale di accelerazione verticale ottenuto dal modello simulink che tiene conto di un tracciato con difetto di ondulazione.

Il picco di valore efficace di accelerazione supera la soglia del rumore posta a  $0,2g$ .

Il periodo tra urti successivi rilevato tramite il trigger di schmitt permette di constatare la periodicità di ripetizione del difetto ad ogni giro di ruota.

T [s]	V [km/h]	Dt_ver [s]	Dt [s]	Err %
0-10	50,00	0,208	0,198	4,70
10-20	50,00	0,208	0,206	0,86
20-30	50,00	0,208	0,206	0,95
30-40	50,00	0,208	0,202	3,11
40-50	50,00	0,208	0,208	0,01

Tabella 16

Si procede ora alla valutazione dell'entità del difetto tramite la media del valore efficace di accelerazione corrispondente ad ogni periodo  $T = 10s$ .

T [s]	V [km/h]	beta	A_RMSm [m/s^2]
0-10	50,00	1,10	1,48
10-20	50,00	1,10	1,51
20-30	50,00	1,10	1,45
30-40	50,00	1,10	1,67
40-50	50,00	1,10	1,52

Tabella 17

Nota la velocità  $V$  costante ricavo i coefficienti  $\beta$ .

Dal prodotto di  $\beta_i \cdot a_{RMS} m_i$  identifico l'intervallo di valori efficaci di accelerazioni che mi definisce l'entità del difetto rilevato.

T [s]	Acc [m/s^2]	Inf [m/s^2]	Sup [m/s^2]	L [mm]
0-10	1,63	1,00	1,91	10,00
10-20	1,66	1,00	1,91	10,00
20-30	1,60	1,00	1,91	10,00
30-40	1,83	1,00	1,91	10,00
40-50	1,67	1,00	1,91	10,00

Tabella 18

Dal confronto tra valore efficace medio rilevato dal campionamento, tra il caso senza e con difetto di ondulazione del tracciato, per ogni intervallo  $T = 10s$  si nota che per una ruota con difetto  $l = 10mm$  vi è un'importante variazione di accelerazione.

T [s]	A_RMSm old[m/s^2]	A_RMSm ond [m/s^2]	incremento %
0-10	1,30	1,48	13,83%
10-20	1,29	1,51	16,78%
20-30	1,20	1,45	21,05%
30-40	1,40	1,67	18,77%
40-50	1,26	1,52	20,06%

Tabella 19

Questa variazione può essere facilmente identificata dal confronto della variazione di accelerazione rilevata dalle boccole del carrello monitorato sulla stessa linea.

La variazione media di accelerazione si aggira sui  $0,23m/s^2$ .

Questo incremento permette ancora di rilevare correttamente l'entità del difetto se il carrello ferroviario viaggia a velocità costante  $V = 50km/h$

Si nota che all'aumentare della velocità questa variazione di accelerazione aumenta in modo non lineare

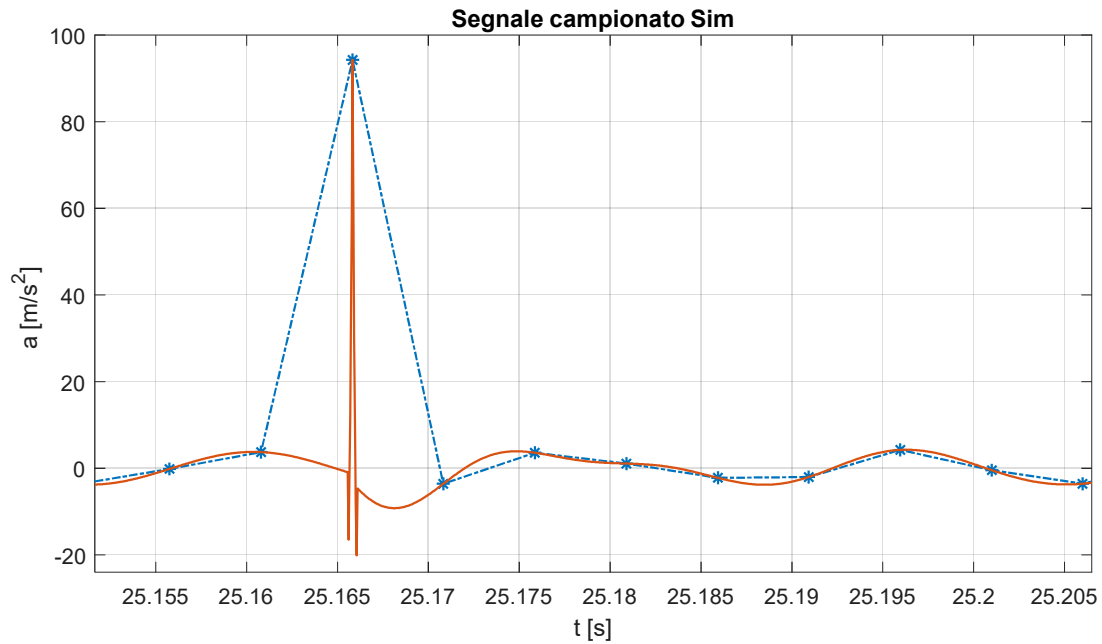


Figura 115  $l=10\text{mm}$   $V=80\text{km/h}$

Si nota che nel caso in cui si considera velocità del carrello costante pari a 80km/h l'influenza introdotta dal difetto di ondulazione del tracciato diventa molto più rilevante e non permette un corretto rilevamento del difetto.

In particolare osservando la figura (115) l'influenza sul segnale di accelerazione dell'ondulazione del tracciato risulta più rilevante della dinamica del carrello.

E osservando la figura (116) non permette più una corretta valutazione dell'entità del difetto del wheel flat.

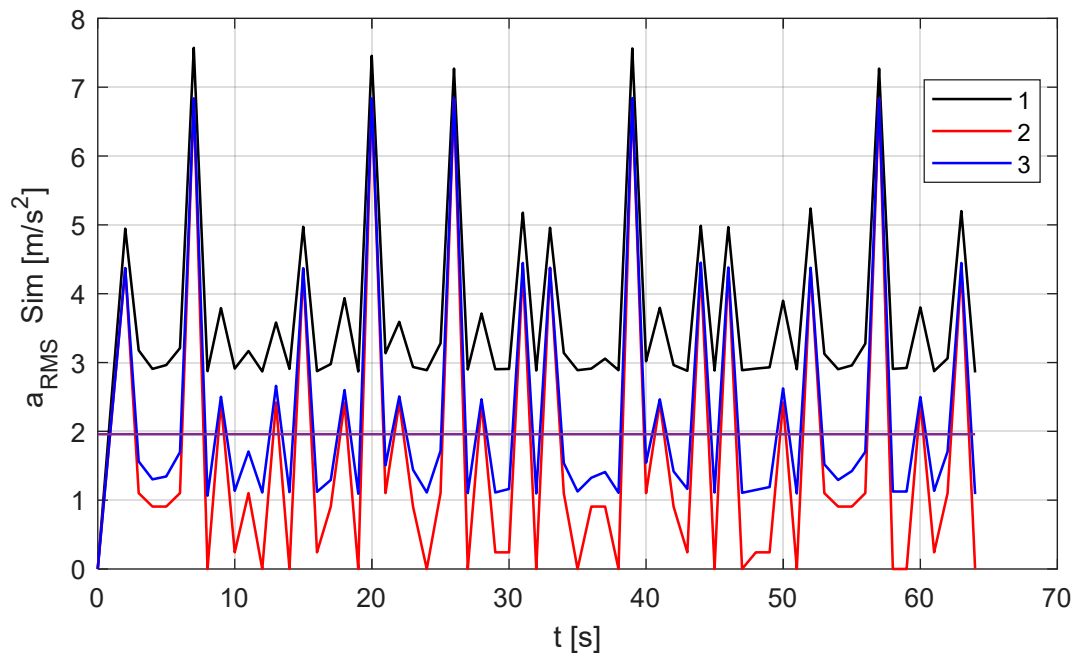
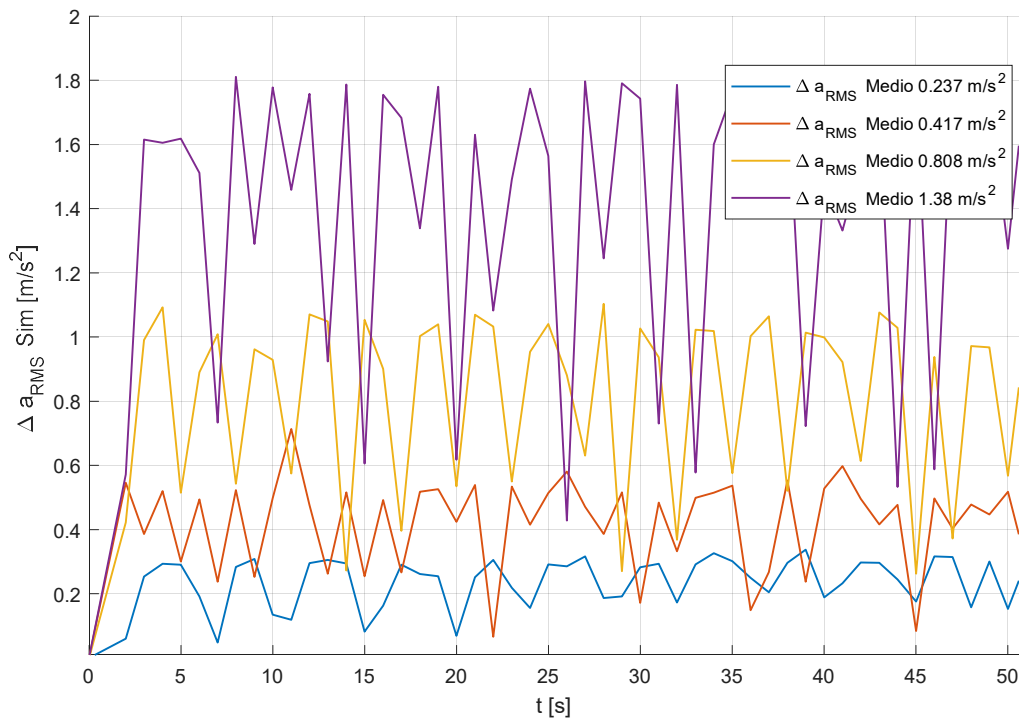


Figura 116  $l=10\text{mm}$   $V=80\text{km/h}$

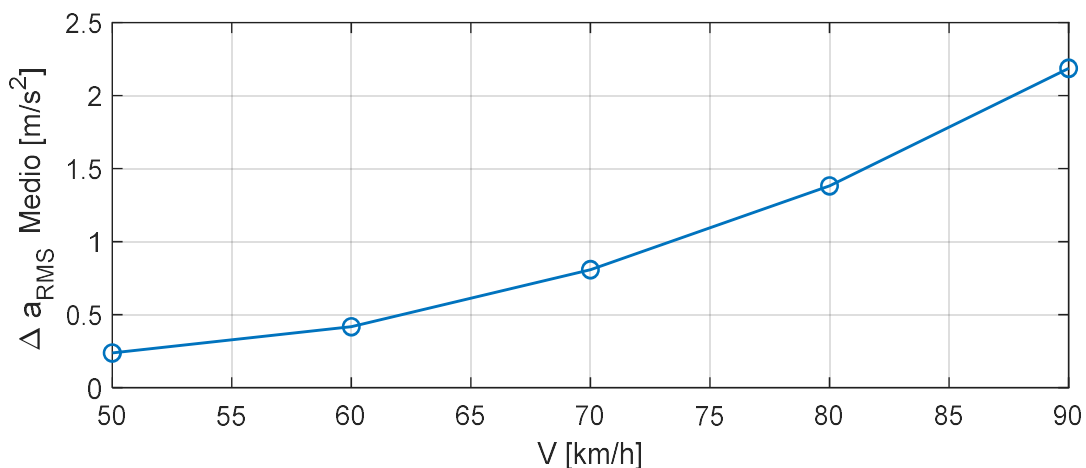


**Figura 117 confronto variazione RMS accelerazione al variare della velocità**

Si riporta l'andamento su un periodo di 50s della differenza tra il segnale di accelerazione della ruota difettosa con il rumore introdotto dal difetto di ondulazione del tracciato e il segnale di accelerazione del wheel flat con tracciato senza difetti.

Si nota che questa differenza cresce in modo non lineare con l'aumento della velocità.

Si riporta nello specifico la media ottenuta su un periodo di 50s dell'incremento del valore efficace di accelerazione rilevato all'aumentare della velocità



**Figura 118 incremento medio di RMS al variare della velocità  $\lambda = 400$  mm**

L'incremento diventa sempre più rilevante all'aumentare della velocità.

L'individuazione di questo tipo di difetto del tracciato può essere quindi facilmente riconosciuto confrontando l'incremento di valore efficace di accelerazione rilevato dalle boccole in linea del carrello monitorato.

Si nota, analizzando lo spettro di un periodo figura (119), la presenza di un nuovo picco di frequenza a 33.63 Hz che corrisponde a  $V/\lambda$  il rapporto tra la lunghezza d'onda del difetto di corrugazione del tracciato fratto la velocità del carrello.

Per il caso riportato in figura (119)  $V = 50 \text{ km/h}$ ,  $\lambda = 400 \text{ mm}$ ,  $f_{\text{difetto}} = \frac{V}{\lambda} \approx 34,7 \text{ Hz}$

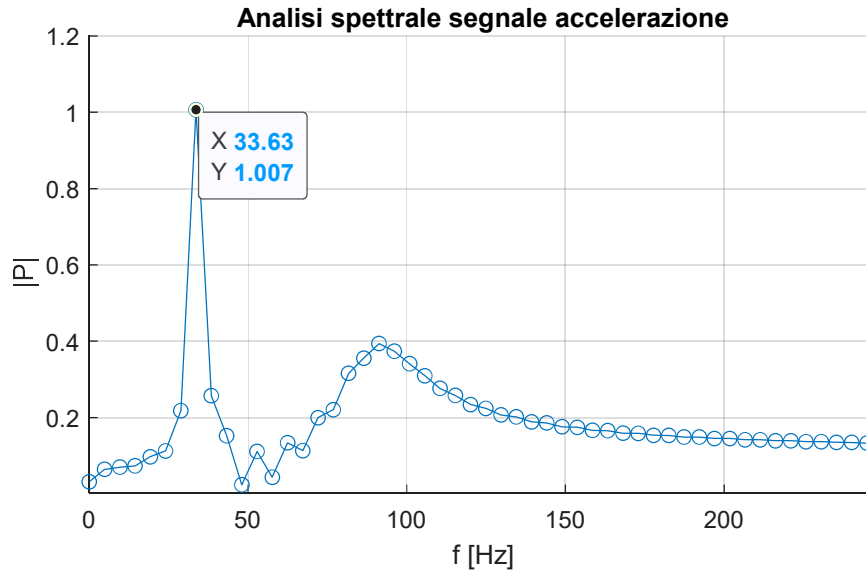


Figura 119  $\lambda=10\text{mm}$   $v=50\text{km/h}$

Variando la velocità del carrello si riporta l'incremento medio del valore efficace di accelerazione rispetto al segnale con il tracciato non difettoso a parità di wheel flat.

Frequenza massima del disturbo considerata, dovuto a questo esempio di difetto, è con  $V = 90 \text{ km/h}$ ,  $f_{\text{max}} = V/\lambda = 62.5 \text{ Hz}$

Assumendo invece una lunghezza d'onda del difetto del tracciato  $\lambda = 200 \text{ mm}$  e  $A = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

Al variare della velocità si ottiene il seguente incremento medio del valore efficace di accelerazione rispetto al segnale con il tracciato non difettoso a parità di wheel flat.

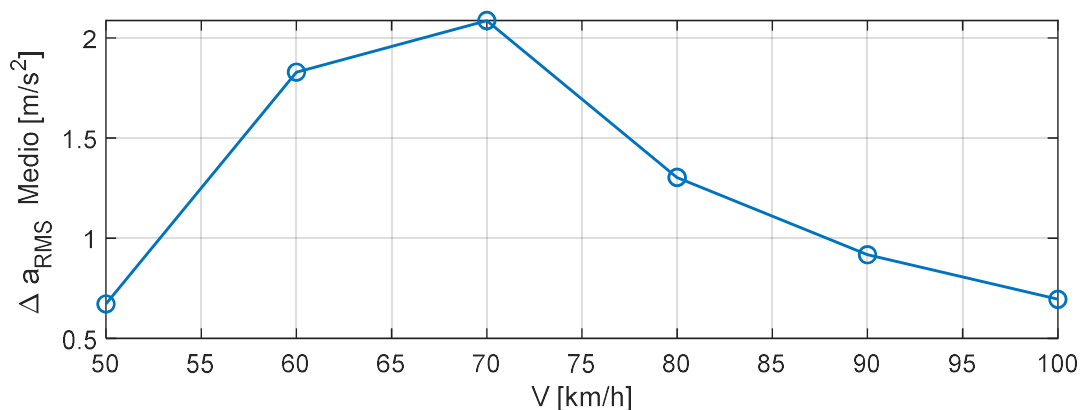


Figura 120 incremento medio di RMS al variare della velocità,  $\lambda = 200 \text{ mm}$

Questo andamento non lineare è giustificato dal confronto tra la frequenza del disturbo introdotto dal difetto del tracciato, definita da  $V/\lambda$ , e il diagramma di bode del modello.

$V$ [km/h]	$\lambda$ [mm]	$f$ [Hz]	$\Delta a_{RMS}$ [m/s <sup>2</sup> ]
50	200	69,4	0,67
60	200	83,3	1,82
70	200	97,2	2,08
80	200	111,1	1,30
90	200	125	0,91
100	200	138,9	0,69

Tabella 20

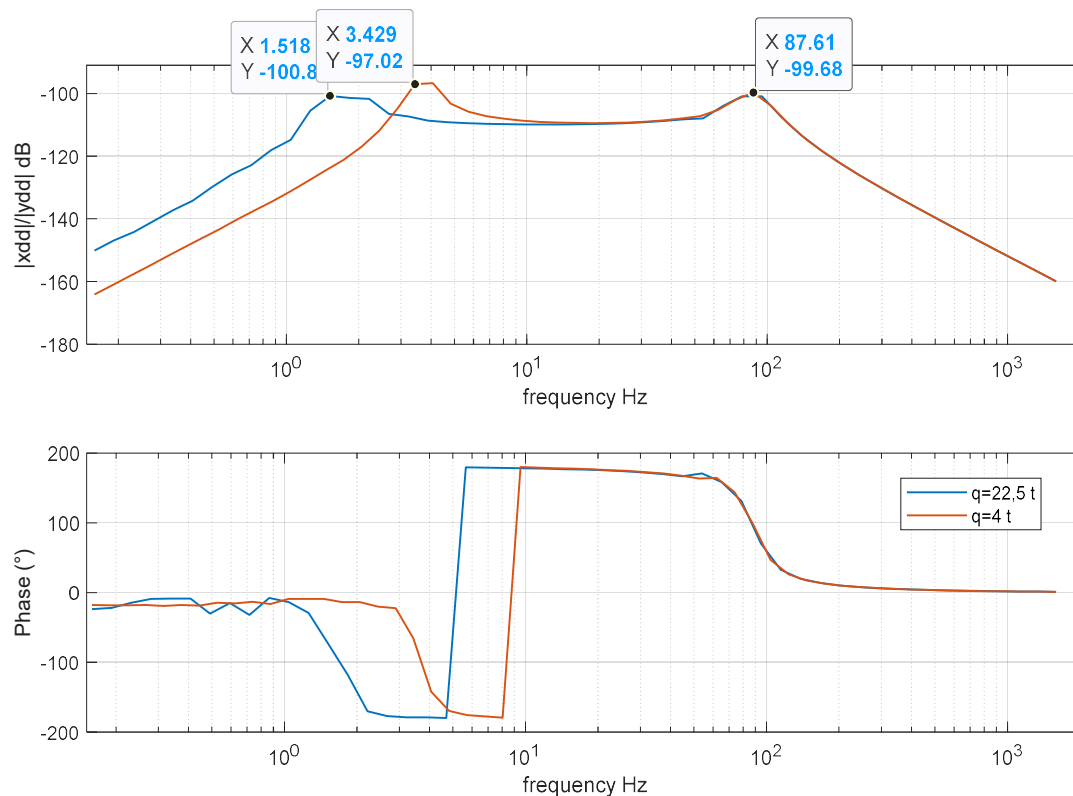


Figura 121 diagramma di bode del modello

Le due curve riportate in figura(121) si riferiscono a due carichi per asse  $q$  differenti imposti al modello del carrello, dal confronto si nota che la variazione del carico per asse sul diagramma di bode del carrello costruito influisce solo sul picco a bassa frequenza.

Osservando la figura (120) di cui riportano i valori in tabella (21), si nota che passando da 50 a 60km/h vi è un forte incremento del valore efficace di accelerazione, ciò è dovuto all'aumento della velocità e di una frequenza del disturbo più vicina al picco del diagramma di bode del modello.

Ai 70km/h vi è un incremento attenuato dovuto all'aumento della velocità ma con una frequenza del disturbo che inizia ad essere attenuata dal modello.

Per le velocità successive 80, 90, 100 km/h diminuisce l'entità del valore efficace aggiunto dal difetto poiché prevale l'attenuazione del modello sull'incremento dovuto all'aumentare della velocità.

## 8 Conclusioni

Il modello teorico di accelerazione ha permesso di definire l'accelerazione verticale dovuta a difetto del wheel flat in funzione della lunghezza del difetto  $l$ , del diametro della ruota  $D$ , e della velocità del carrello  $V$ .

il parametro  $\beta$ , preso un periodo di riferimento  $T = 10s$ , è ricavato dal rapporto tra il valore efficace di accelerazione ottenuto dal campionamento del segnale e il valore efficace del segnale nel periodo temporale considerato.

Si è verificato che l'errore che introduce il parametro  $\beta$  permette la valutazione corretta dell'entità del difetto.

Con l'introduzione del parametro beta che è il rapporto tra il valore efficace del segnale teorico sul valore efficace del segnale campionato, si cerca di compensare in parte la perdita di informazione, dovuta al campionamento del segnale, in funzione della velocità del carrello indipendentemente dalla dimensione del difetto.

È stato ideato un semplice algoritmo di rilevamento che analizzando il campionamento dell'accelerazione teorica permetta di identificare l'entità del difetto nota la velocità e il valore efficace medio di accelerazione ottenuto su un periodo  $T = 10s$ .

Il modello simulink proposto cerca di modellare in modo semplice la dinamica del carrello, la dinamica associata introduce un rumore al segnale teorico di accelerazione che descrive il difetto.

Si è dunque analizzato il nuovo segnale ottenuto dal modello simulink, che tiene conto anche della dinamica associata del carrello ipotizzando velocità del carrello costante, per verificare se, definito il modello teorico di accelerazione, fosse possibile identificare l'entità del difetto.

Analizzando l'ampiezza del segnale tramite il trigger di Schmitt si è introdotto un controllo sulla manifestazione periodica dell'urto e la sua coerenza con la velocità del carrello rilevata.

Dall'indagine condotta l'algoritmo di rilevamento proposto riesce a identificare correttamente l'entità del difetto dal segnale ottenuto dal modello simulink.

L'algoritmo proposto per identificare il wheelflat per non confonderlo con altri disturbi tramite l'analisi del segnale di accelerazione verifica che la ripetizione dell'urto sia coerente con la velocità rilevata e l'entità del difetto tramite il valore efficace.

Nella fase successiva presi i dati del monitoraggio di alcune frenate tipiche di un convoglio ferroviario merci, è stato adattato il modello a velocità costante per approssimare il comportamento durante una frenata.

Il nuovo segnale ottenuto è stato processato dall'algoritmo per verificare la corretta stima del difetto e la relazione tra variazione di velocità e variazione del valore efficace di accelerazione rilevato.

Si è verificato che l'algoritmo valutando un periodo  $T = 10s$  relativamente breve e riferendosi alla velocità media del periodo analizzato, la variazione di velocità rispetto a quella media è contenuta e dunque l'algoritmo riesce ancora a valutare correttamente l'entità del difetto.

La validazione del modello teorico del wheelflat tramite verifiche sperimentali potrà permettere la valutazione non solo del difetto tramite la valutazione del valore efficace ma anche la conferma tramite la valutazione della variazione efficace coerente con la variazione della velocità del carrello.



Nell'ultimo capitolo sono stati introdotti alcuni aspetti per miglioramenti futuri del modello proposto per considerare alcune particolari condizioni.

È stato arricchito il modello per tener conto di un tratto di tracciato difettoso, e definito il difetto dal modello si è rilevato un aumento del disturbo quadratico con l'aumento della velocità imposta al carrello.

Si è notato che il rilevamento è ancora possibile a basse velocità (50-60 km/h) ma ad alte velocità il disturbo non permette una corretta valutazione del difetto.

L'aumento di accelerazione influisce in modo importante anche sul valor medio di accelerazione rilevato, pertanto risulta semplice per il sistema di monitoraggio, dal confronto delle variazioni di RMS di accelerazioni rilevate dalle boccole in linea del carrello monitorato, riconoscere un nuovo tratto di linea danneggiato.

Dall'analisi del contenuto in frequenza si è constatato che la variazione dell'ampiezza del disturbo introdotto dal difetto di ondulazione nel modello è coerente con il diagramma di bode del modello dinamico.

Un limite del modello adottato per le simulazioni è il contatto ruota rotaia che è stato modellato con un semplice collegamento molla smorzatore.

Il modello del wheelflat e l'algoritmo di rilevamento proposto dovranno essere successivamente sottoposti a prove sul campo per effettuare la loro validazione.

## Bibliografia

- [1] Steenbergen, Michaël J. "The Role of the Contact Geometry in Wheel-rail Impact Due to Wheel Flats." *Vehicle System Dynamics* 45.12 (2007): 1097-116. Web.
- [2] Bosso, Nicola, Gugliotta, Antonio, and Zampieri, Nicolò. "Wheel Flat Detection Algorithm for Onboard Diagnostic." *Measurement : Journal of the International Measurement Confederation* 123 (2018): 193-202. Web.
- [3] Bernal, Esteban, Spiryagin, Maksym, and Cole, Colin. "Wheel Flat Detectability for Y25 Railway Freight Wagon Using Vehicle Component Acceleration Signals." *Vehicle System Dynamics* 58.12 (2019): 1-21. Web.
- [4] Gericke, C, and Hecht, M. "CargoCBM – Feature Generation and Classification for a Condition Monitoring System for Freight Wagons." *Journal of Physics. Conference Series* 364 (2012): 12003. Web.
- [5] Marco Aimar, « Study of an onboard wired-wireless health monitoring system equipped with power save algorithm for freight railway wagons » (2018). Web.
- [6] Prof. Aurelio SOMÀ, Dott. Ing. Marco AIMAR, Ing. Andrea ZANARDELLI, «Dati sperimentali misurati con On Board Unit per il monitoraggio delle condizioni dei carri merci »
- [7] Marco AIMAR, «STUDIO E VERIFICA IN LINEA DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO PER CARRI MERCI INTERMODALI » AIAS 2016 - 672
- [8] Aimar, M, and Somà, A. "Study and Results of an Onboard Brake Monitoring System for Freight Wagons." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F, Journal of Rail and Rapid Transit* 232.5 (2018): 1277-294. Web.
- [9] Aimar M., Somà A., Fraccarollo F. "An on-board braking monitoring system for intermodal freight trains" (2016). Web.
- [10] Li, Chunsheng, Luo, Shihui, Cole, Colin, and Spiryagin, Maksym. "An Overview: Modern Techniques for Railway Vehicle On-board Health Monitoring Systems." *Vehicle System Dynamics* 55.7 (2017): 1045-070. Web.
- [11] <http://www.edutecnica.it/elettronica/fourier/fourier.htm>
- [12] [https://didattica.uniroma2.it/files/index/insegnamento/172583-Segnali 02\\_Serie di Fourier](https://didattica.uniroma2.it/files/index/insegnamento/172583-Segnali%20Serie%20di%20Fourier)
- [13] A.R.I. Sezione di Parma Conversazioni del 1° Venerdì del Mese, 6 marzo 2015, «L'ANALIZZATORE DI SPETTRO DEL LABORATORIO DEL RADIOAMATORE»
- [14] Wu, T.X. "Effects on Short Pitch Rail Corrugation Growth of a Rail Vibration Absorber/damper." *Wear* 271.1 (2011): 339-48. Web.

[15] Bernal, Esteban, Spiriyagin, Maksym, and Cole, Colin. "Ultra-low Power Sensor Node for On-board Railway Wagon Monitoring." *IEEE Sensors Journal* (2020): 1. Web.

[16] Bian, Jian, Gu, Yuantong, and Murray, Martin Howard. "A Dynamic Wheel-rail Impact Analysis of Railway Track under Wheel Flat by Finite Element Analysis." *Vehicle System Dynamics* 51.6 (2013): 784-97. Web.