



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E SCIENZE
MATEMATICHE

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**Progettazione del set-up strumentale per la misurazione delle oscillazioni
torsionali in un albero a camme di un motore ad alte prestazioni**

**Design of the instrumental set-up for measuring the torsion oscillations in a
camshaft of a high-performance engine**

Relatore:

Prof. Paolo Castellini

Tesi di Laurea di:

Matteo Fiorani

Anno Accademico 2020/2021

SOMMARIO

INTRODUZIONE.....	3
1.1 VIBRAZIONI TORSIONALI	4
1.2 DESCRIZIONE BANCO PROVA PRINCIPALE	5
2.1 PROGETTAZIONE DEL SET-UP STRUMENTALE:.....	11
2.1.1 MISURE DIRETTE:	12
2.1.2 ACCELEROMETRI LINEARI:	12
2.1.3 DOPPIO INTERFEROMETRO LASER:.....	13
2.2.1 TECNICHE CODER-BASED :.....	14
2.2.2 PICK-UP MAGNETICI:	15
2.2.3 SENSORI OTTICI:.....	16
3.1 SCELTA DEL SENSORE:	18
4.1 BANCO PROVA SPERIMENTALE.....	20
4.2 ANALISI SEGNALE.....	26

INTRODUZIONE

La passione per il motorsport (in particolare per la MotoGP), la possibilità di collaborare con un'azienda come Ducati Motor Holding S.p.a., unite all'interesse verso le misurazioni meccaniche, sono state le principali ragioni della scelta del tirocinio.

Il lavoro di tesi svolto è parte di un progetto più ampio che impegna da tempo il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM).

Durante il periodo di apprendistato è stato possibile lavorare direttamente su di un banco prova con una testata Desmosedici GP14, utilizzando all'inizio un set-up di misura preesistente per poi progettarne uno nuovo che fosse più funzionale al nostro scopo:

valutare al meglio le vibrazioni torsionali in un albero a camme di un motore ad alte prestazioni in condizioni di funzionamento parziale, ovvero in assenza di combustione.

Una volta verificato il corretto funzionamento del set-up in queste condizioni, l'intero sistema potrà essere utilizzato per studiare il comportamento dell'albero a camme in condizioni di firing.

1.1 VIBRAZIONI TORSIONALI

Le vibrazioni torsionali sono vibrazioni angolari di un oggetto come, ad esempio, un albero lungo il suo asse di rotazione.

Sono misurate tramite la variazione della velocità di rotazione dell'oggetto nella sua estensione ovvero come variazione della velocità di rotazione all'interno della singola rivoluzione dell'oggetto stesso.

Queste oscillazioni di RPM sono generalmente causate da una coppia motrice, o da un carico, variabili e lungo una linea di trasmissione possono amplificarsi e portare a problemi in termini di comfort, prestazioni ed affidabilità soprattutto in un motore che arriva a velocità angolari elevate.

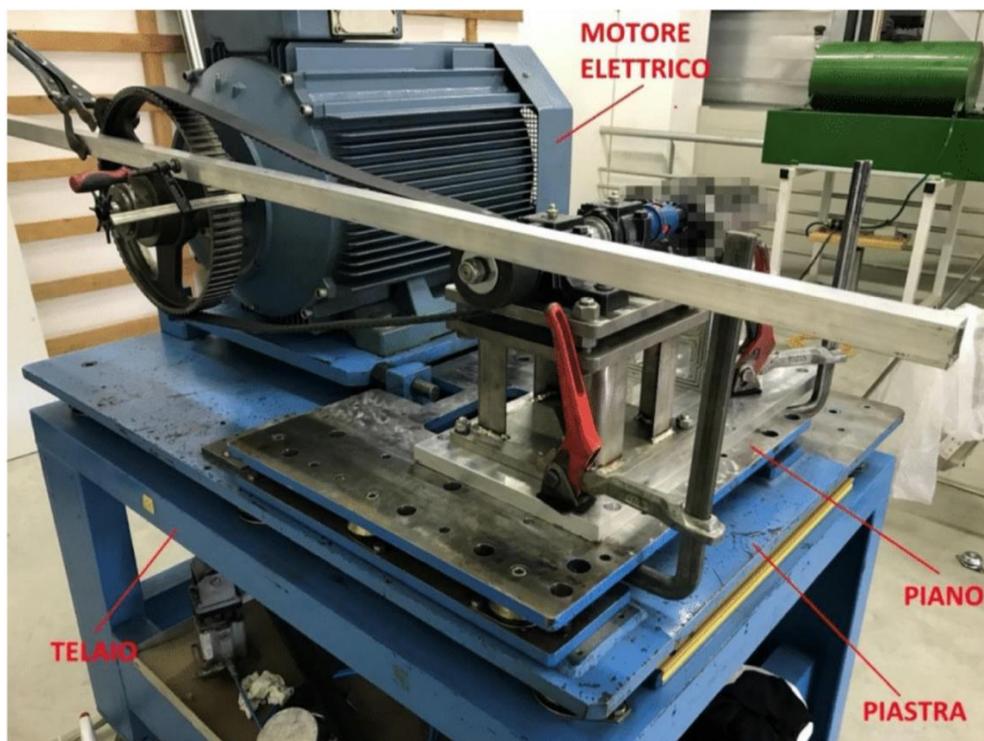
1.2 DESCRIZIONE BANCO PROVA PRINCIPALE

Abbiamo analizzato il caso, seppur in maniera semplificata, della rotazione dell'albero a camme in una testata Ducati motogp.

Il banco prova su cui sono state effettuate le prove era composto da:

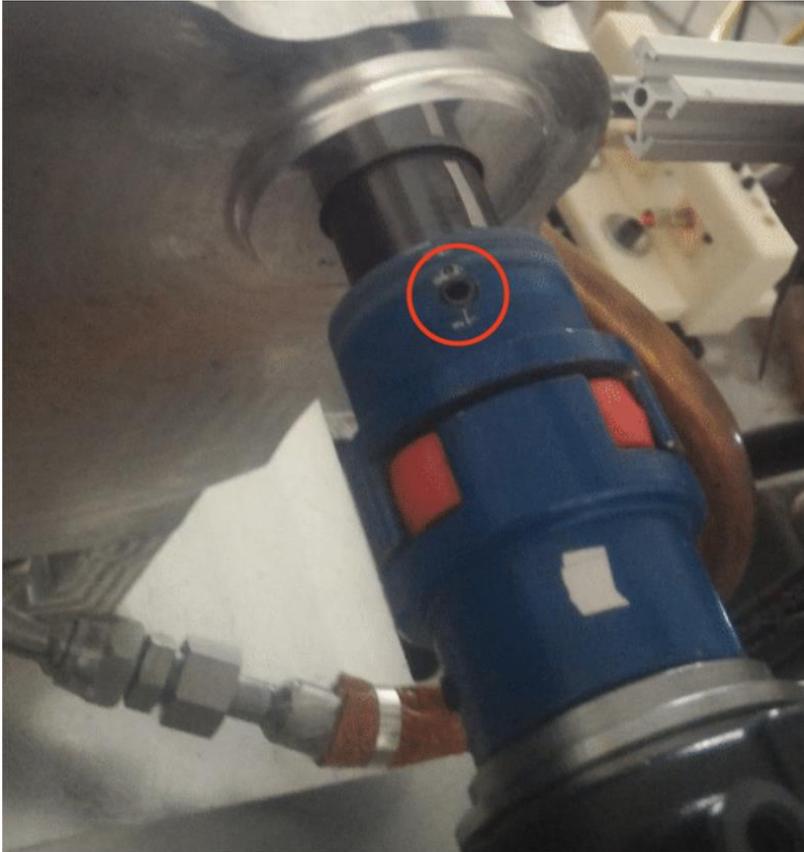
1. telaio in acciaio dotato di quattro piedi regolabili e gommati al fine smorzare i fenomeni vibratorii;
2. piastra rettangolare del medesimo materiale e delle stesse dimensioni perimetrali del telaio, connessa a quest'ultimo tramite sei silent block;
3. motore elettrico da 15 kW ancorato tramite una slitta di acciaio al componente descritto al punto precedente dotato di quattro tensionatori a vite;
4. piano d'acciaio collegato da sei silent block alla piastra sottostante, descritta al punto 2.
5. testata Desmosedici GP14

Sopra il banco era posizionata la testata e l'albero a camme era messo in movimento direttamente dal motore elettrico.

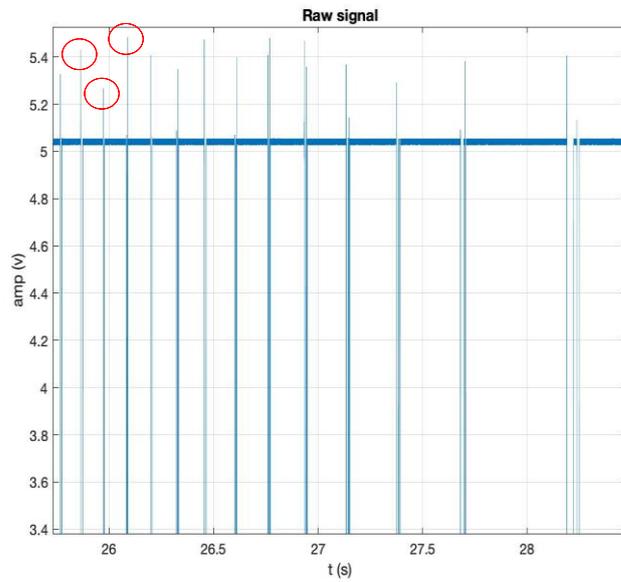


Sono stati posizionati tre accelerometri ed un sensore magnetico, quindi sono state fatte tre prove (run up, velocità costante e coast down) a tre diverse velocità angolari.

Il grano evidenziato in figura veniva rilevato dal sensore magnetico fornendoci la tacca di zero che ci ha permesso di ricavare l'andamento degli rpm nel tempo.

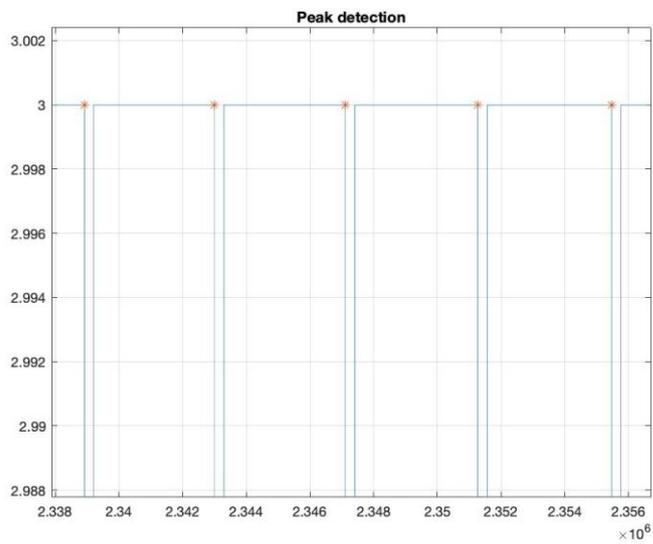


Il sensore magnetico ci restituiva un segnale con molti picchi indesiderati.

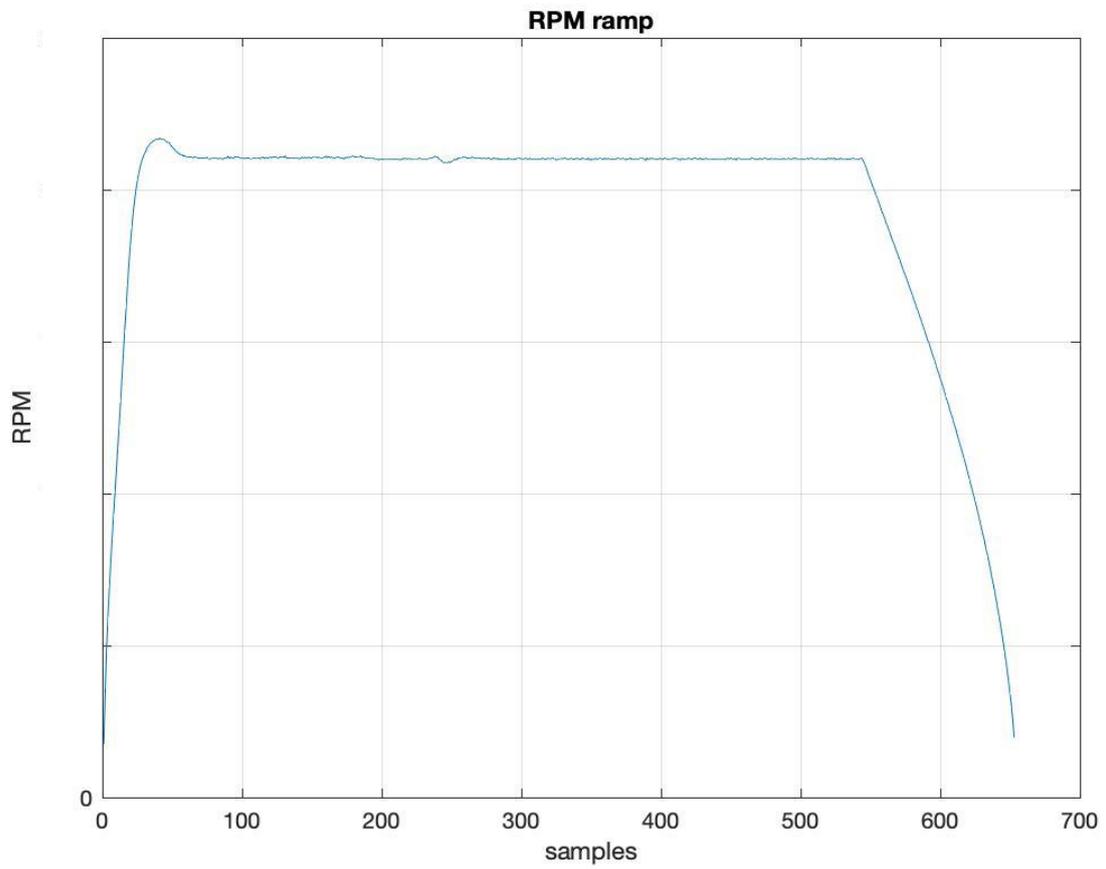


Utilizzando Matlab li abbiamo eliminati in modo da ottenere un segnale alto-basso 'lineare' per poi evidenziare tutti i picchi discendenti con degli asterischi arancioni.

Segnale alto-basso ottenuto:



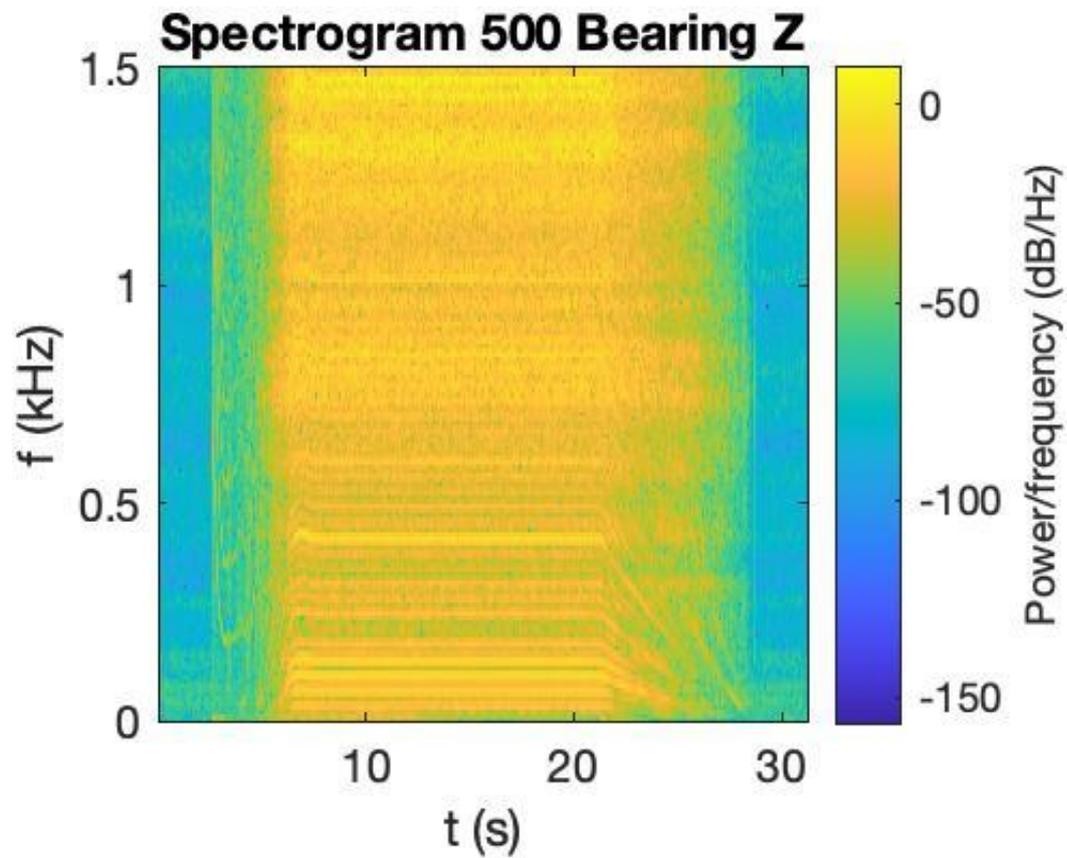
Dalla variazione della distanza tra gli asterischi (periodo del segnale) nel tempo ci siamo ricavati la curva rpm.



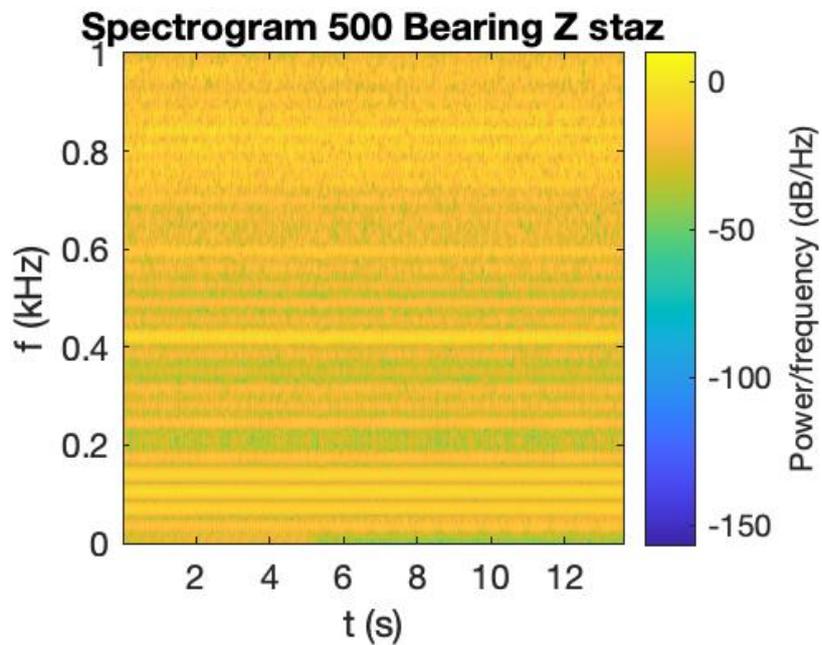
L'andamento della curva rpm così ricavata la ritroviamo anche nello spettrogramma rappresentante le vibrazioni misurate dagli accelerometri.

Le immagini sono relative all'asse z perché lo spettrogramma era più definito ma stessa cosa vale per le altre due direzioni.

Si distinguono chiaramente run up, fase velocità costante e coast down a frequenze diverse.



Ingrandendo sulla parte a velocità costante:



Siamo riusciti ad analizzare solo i dati della prova a rpm più bassi poiché nelle altre due il segnale proveniente dagli accelerometri saturava e questo oltre ad impedirci di operare sui dati ci ha fatto prendere coscienza dell'entità delle vibrazioni che entrano in gioco al salire della velocità di rotazione.

Nella scelta del sensore sarà molto importante quindi la resistenza dello stesso alle vibrazioni.

2.1 PROGETTAZIONE DEL SET-UP

STRUMENTALE:

Nella ricerca di sensori che potessero funzionare bene alle nostre condizioni di utilizzo, oltre a verificare che avessero la giusta resistenza alle vibrazioni, dovevamo pretendere adeguata prontezza e velocità nel rilevare il segnale.

Ipotizzando inizialmente di utilizzare una ruota fonica, abbiamo quantificato il response time di cui avremmo avuto bisogno per descrivere compiutamente la rotazione partendo da dimensione, rpm e numero di denti.

τ (tempo di risposta)	0,1075 ms
RPM	9000,00 giri/min
n°denti max	62,00
lungh.dente+vuoto	2,00 mm
circonferenza	124,00 mm
diametro ruota fonica	39,47 mm
ppr	62,00
frequenza	9,30 kHz

Con questi dati siamo andati alla ricerca del set up strumentale secondo noi più vantaggioso prendendo in considerazione sia le misure dirette che quelle coder-based (o indirette):

2.1.1 MISURE DIRETTE:

2.1.2 ACCELEROMETRI LINEARI:

Due accelerometri lineari posizionati 'face to face' direttamente sull'albero che misurano l'accelerazione tangenziale.

Poiché sono posizionati in maniera discorde le vibrazioni longitudinali registrate da entrambi gli accelerometri si annullano a vicenda.

VANTAGGI:

- Ampio range dinamico determinato direttamente dal range dinamico degli accelerometri
- Sensibilità minima alle vibrazioni longitudinali dell'albero quando gli accelerometri sono allineati correttamente.

SVANTAGGI:

- Costi per acquisire segnale molto alti perché necessita di sistemi complessi
- In alberi piccoli le masse dei due accelerometri potrebbero sbilanciare l'albero
- Ho solo vibrazione e non riesco in nessun modo a risalire alla posizione

2.1.3 DOPPIO INTERFEROMETRO LASER:

Gli interferometri laser possono essere usati per misurare le vibrazioni torsionali.

Il doppio laser serve per rendere trascurabile le vibrazioni longitudinali all'albero e la velocità di rotazione viene misurata tramite lo spostamento doppler

VANTAGGI:

- Misurazione senza contatto
- Bassa sensibilità alle vibrazioni longitudinali all'albero
- Bassa sensibilità alla forma dell'albero
- Strumentazione semplice

SVANTAGGI:

- Dispositivo costoso considerando che spesso viene richiesta la misura della velocità angolare in più punti dell'albero simultaneamente.
- Non ho una posizione assoluta quindi non ho informazioni sull'esatta posizione o velocità angolare
- Le dimensioni del dispositivo ci obbligano a fare le misurazioni in un ambiente grande

2.2.1 TECNICHE CODER-BASED :

In queste tecniche il sensore rileva dei markers (o coders) posizionati direttamente sull'albero dandoci la possibilità di risalire al tempo intercorso tra il passaggio di un marker ed il suo successivo.

La risoluzione è data dal numero di markers posti sull'albero che ci permette anche di risalire alla velocità angolare e, quindi, alle variazioni della stessa.

Per essere in grado di percepire queste variazioni nella maniera più chiara possibile avremo bisogno di una risoluzione elevata che dovrà essere supportata dalla rapidità dello strumento e dalla sua capacità di rilevare markers abbastanza piccoli.

In queste tecniche possono essere utilizzati diversi coders: da strisce di carta con linee nere incollate, o stampate, sull'albero ai denti di un ingranaggio. Sono utilizzati di conseguenza anche diversi tipi di sensori in particolare ottici per zebra tape e magnetici per markers magnetici.

2.2.2 PICK-UP MAGNETICI:

I pick-up magnetici rilevano le variazioni del campo magnetico dovute al passaggio di un dente di una ruota dentata in prossimità del sensore stesso. Sono molto utilizzati per la loro robustezza (bassa sensibilità al fattore ambientale) ed inoltre ovviano al problema dello sbilanciamento dell'albero visto che monitorando il passaggio dei denti già presenti nello stesso non abbiamo bisogno di aggiungere altra massa.

L'albero a causa della sua rotazione provoca variazioni di campo magnetico che il sensore percepisce come variazione di voltaggio (legge di Faraday).

L'effetto hall è viene sfruttato da un circuito elettrico che ci restituisce in output un segnale TTL.

VANTAGGI:

- Sensori economici
- Robusti e poco sensibili a fattori ambientali

SVANTAGGI:

- Il numero di ppt (pulse per revolution) è fisso essendo il numero di denti di una ruota dentata e potrebbe non essere sufficiente a descrivere la torsione in maniera precisa
- La precisione della misura è dipendente dalla deformazione della ruota dentata
- Il sensore per misurare bene deve essere posto molto vicino alla ruota dentata spostamenti reciproci di ruota e sensore potrebbero creare delle vibrazioni torsionali non reali
- Posso misurare la posizione angolare assoluta dell'albero introducendo un dente mancante nella ruota che fungerà da riferimento.

2.2.3 SENSORI OTTICI:

Per misurare vibrazioni torsionali il moto, durante un giro dell'albero deve essere descritto con molta precisione, quindi avrò bisogno di una quantità cospicua di ppr che non sempre questi sensori sono in grado di leggere (soprattutto ad alte velocità). I sensori ottici generano un segnale elettrico proporzionale all'intensità della luce trasportata. La luce viene trasportata attraverso fibre ottiche dalla testa del sensore al ricevitore. Sono usate principalmente due configurazioni:

- 1) a riflessione: emettitore e ricevitore sono posizionati uno sopra l'altro sulla testa del sensore,
- 2) testa a testa: ricevitore ed emettitore sono posizionati in modo tale che l'ostacolo riesca a passare tra i due in modo tale che al passaggio dell'ostacolo non avvenga trasmissione di luce e quindi il sensore non rilevi niente mentre nello spazio tra un ostacolo e l'altro la luce venga trasmessa. Affinché la luce venga bloccata dall'ostacolo occorre che il fascio sia sufficientemente concentrato e quindi soprattutto in presenza di ostacoli piccoli occorre equipaggiare l'emettitore con delle lenti.

I sensori ottici possono essere usati con molti coders se il contrasto tra le righe ed il fondo è sufficiente.

In output ho spesso un segnale TTL (alto-basso).

VANTAGGI:

- Posso usare come coder direttamente i denti di una ruota dentata a patto che la loro superficie rifletta abbastanza luce,
- Posso usare coders che si posizionano direttamente sull'albero come vernice a contrasto o zebra tape,

SVANTAGGI:

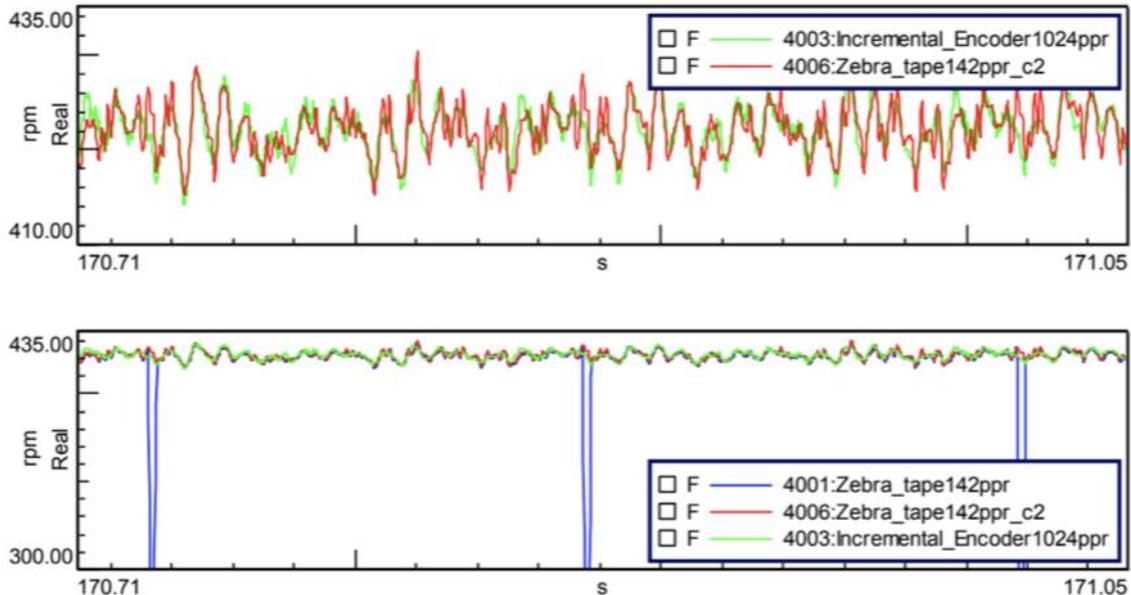
- Molto sensibili a fattori ambientali come sporco e intensità della luce
- La testa del sensore deve essere posizionata molto vicino all'ostacolo il che può essere difficoltoso in ambienti con accessibilità limitata
- I movimenti relativi tra sensore e albero/ruota dentata portano a degli errori di misurazione

- Non avendo facile accesso ad una ruota dentata e volendo evitare il calettamento di encoder sull'albero la scelta è caduta sui sensori a fibra ottica, in particolare utilizzando zebra-tape, che ci avrebbero consentito di:
- Non aggiungere massa all'albero con il rischio di squilibrarlo;
- Avere il numero massimo di tacche leggibili dal sensore con la facilità di una stampa laser;
- Grande facilità di montaggio/rimozione.

Le elevate vibrazioni non avrebbero influito sulla misura stessa;

La scelta dello zebra-tape è stata propiziata oltre che dagli indubbi vantaggi pratici anche dalla lettura dell'articolo "Comparison of torsional vibration measurement techniques" – K.Janssens, L.Britte (LMS International)"

Nel suddetto articolo, attraverso un confronto tra vari metodi di misurazione delle vibrazioni torsionali su di un albero a camme di una Fiat Punto in condizioni operative simili alla nostre, si osserva la bontà delle misurazioni ottenute con questo set-up.



Vediamo infatti che il discostamento della curva rpm ricavata con encoder incrementale e zebra tape è minima.

3.1 SCELTA DEL SENSORE:

Partendo dai calcoli fatti in precedenza, dai cataloghi abbiamo trovato un amplificier della omron che, con un response time di 50 microsecondi, ci avrebbe permesso di leggere tutte le tacche necessarie a descrivere le variazioni di velocità angolare dell'albero in maniera dettagliata.

Fiber Amplifier Units			
Standard models (Dimensions → page 12)			
Appearance	Connecting method	Models	
		NPN output	PNP output
	Pre-wired (2 m)	E3X-HD11 2M	E3X-HD41 2M
	Wire-saving Connector	E3X-HD6	E3X-HD8
	M8 Connector	E3X-HD14	E3X-HD44

Response time	Super-high-speed mode (SHS) *3	NPN outputs: Operate or reset: 50 μ s PNP outputs: Operate or reset: 55 μ s	-
	High-speed mode (HS)	Operate or reset: 250 μ s (default setting)	
	Standard mode (Std)	Operate or reset: 1 ms	
	Giga-power mode (GIGA)	Operate or reset: 16 ms	

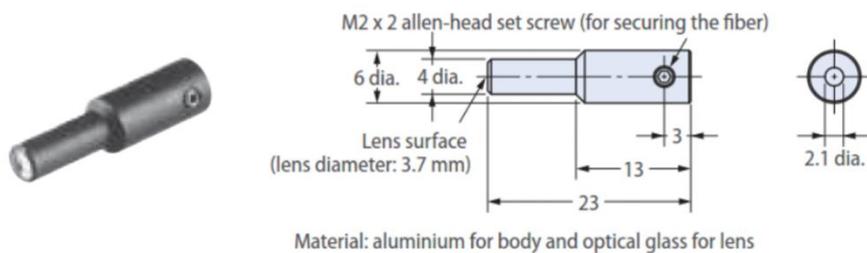
Utilizzando zebra tape il sensore di cui avevamo bisogno era un sensore ottico a riflessione:

Sensor type	Preferred usage	Size	Key feature
 	Precise thin object detection /accurate positioning	dia 3 mm	<ul style="list-style-type: none"> High precision optical axis adjustment Very focused beam
		dia 2 mm	
  	Very small object detection	M6	–
		M3	Spot dia 0.5 mm Spot dia 0.2 mm Spot dia 0.1 mm
		dia 3 mm	–
		dia 2 mm	–
		M6	<ul style="list-style-type: none"> 90° cable exit Hexagonal back
		M3	Spot dia 0.5 to 3mm
		dia 2 mm ^{*3}	Spot dia 0.5 to 1 mm
			Spot dia 0.1 to 0.6 mm

Partendo dalle dimensioni dell'albero abbiamo calcolato che le 'tacche' dello zebra tape, per descrivere adeguatamente la rotazione, sarebbero state di dimensioni molto ridotte.

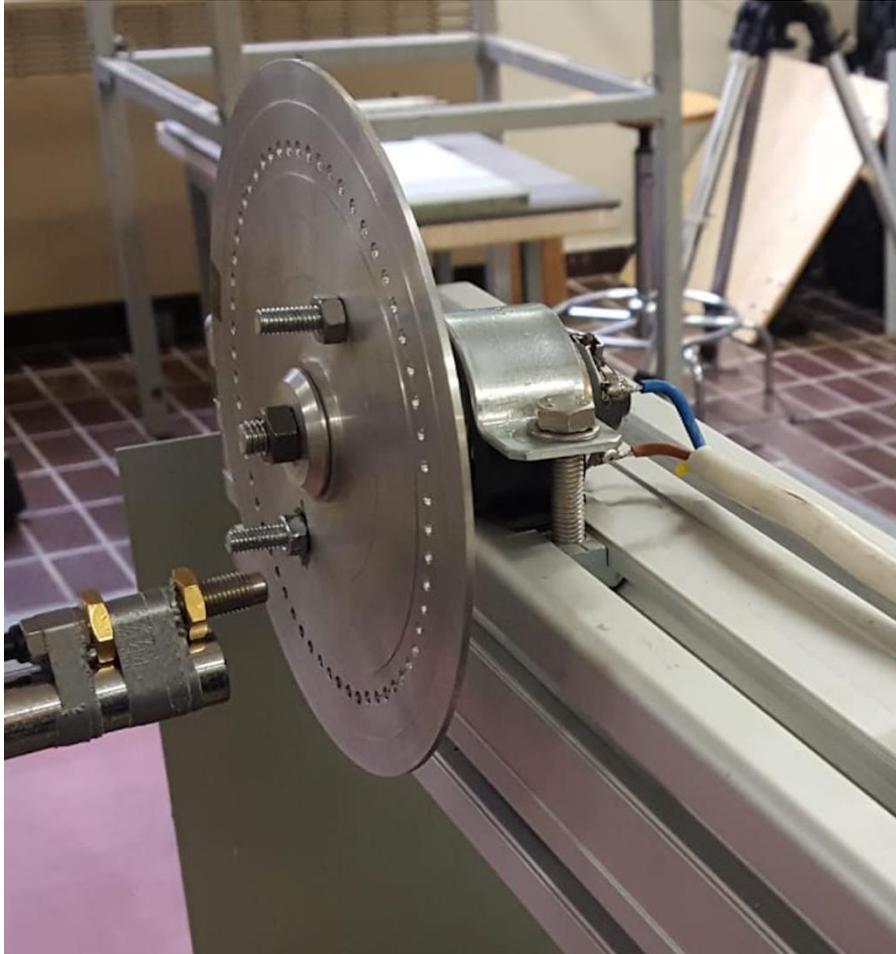
Quindi per ottenere la dimensione dello spot adeguata abbiamo associato al sensore la lente indicata sul catalogo

E39-F3A



4.1 BANCO PROVA SPERIMENTALE

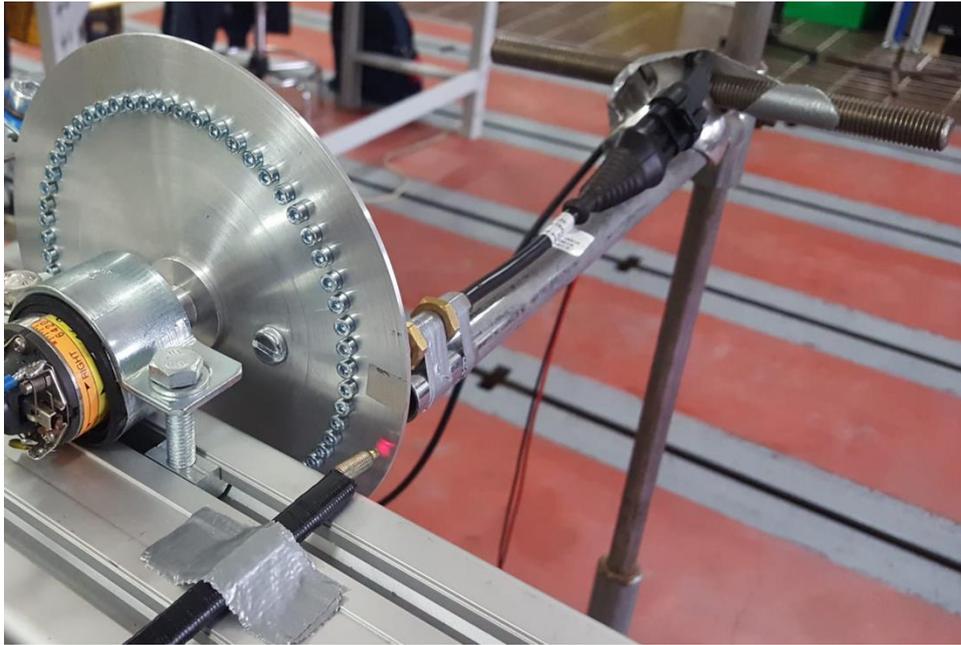
Per acquisire un po' di familiarità con le vibrazioni torsionali e quindi con la misurazione delle variazioni di rpm abbiamo 'costruito' un piccolo banco prova formato da un motorino elettrico al cui albero, tramite un grano, abbiamo fissato una ruota con sessanta fori.



Poiché avremmo utilizzato un sensore magnetico e i fori erano troppo piccoli perché quest'ultimo li rilevasse correttamente abbiamo messo su ogni foro una vite M3 con dado autobloccante.

Abbiamo poi posizionato:

- un accelerometro nel piano a cui era fissato il motore
- il sensore magnetico in prossimità delle viti tramite un cavalletto esterno.



Quindi abbiamo messo su due fori diametrali, più interni rispetto agli altri sessanta, due viti più lunghe e fissato al piano una piastra equipaggiata di un ostacolo flessibile che toccando due volte al giro le viti più lunghe avrebbe simulato la spinta della camma sui bilancieri del sistema Desmodromico.

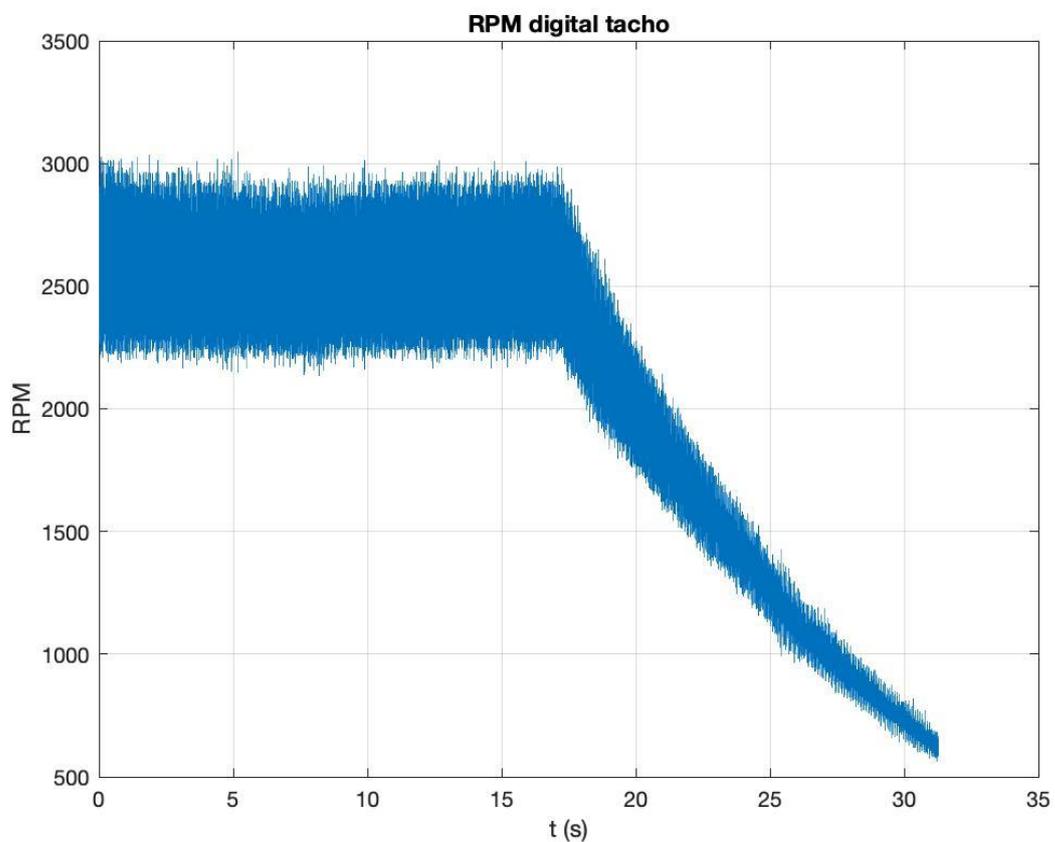


Su questo banco abbiamo fatto diversi test in varie configurazioni e a diverse velocità di rotazione.

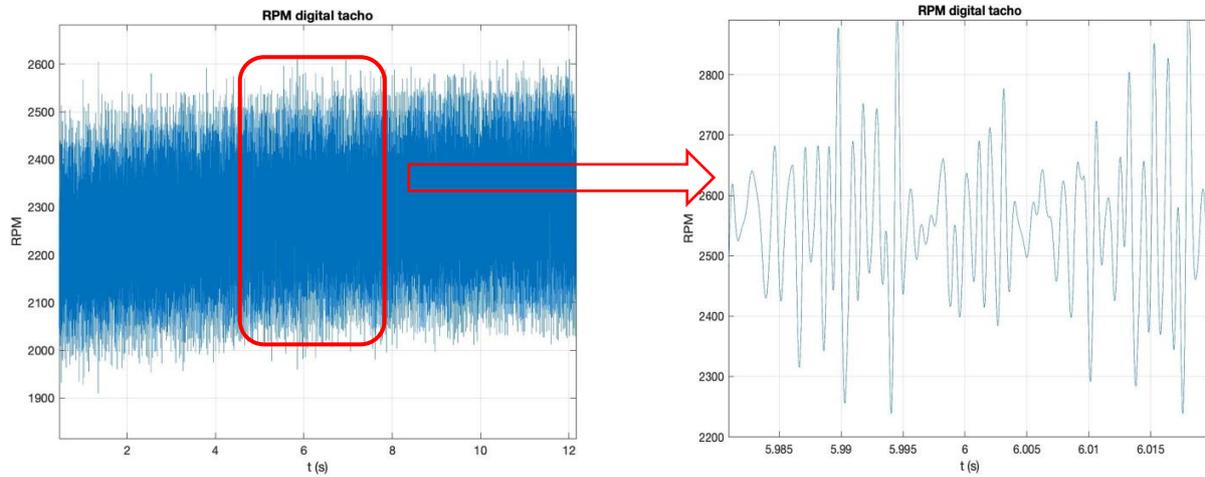
Inizialmente abbiamo riscontrato non poche difficoltà ad ottenere run-up, velocità costante e coast down perché l'alimentatore del motore elettrico si trovava, ogni volta che la ruota incontrava l'ostacolo, a correggere il voltaggio erogato facendo salire in maniera importante gli rpm.

Risultava praticamente impossibile ottenere un aumento lineare degli rpm quindi abbiamo deciso di fare tutti i test con una parte iniziale a velocità costante (ottenuta per tentativi modificando amperaggio e voltaggio) e successivamente un coast down ottenuto spegnendo l'alimentatore.

Raccogliendo i dati e lavorandoli con Matlab, come nel banco con testata Ducati, abbiamo ricavato questa curva:

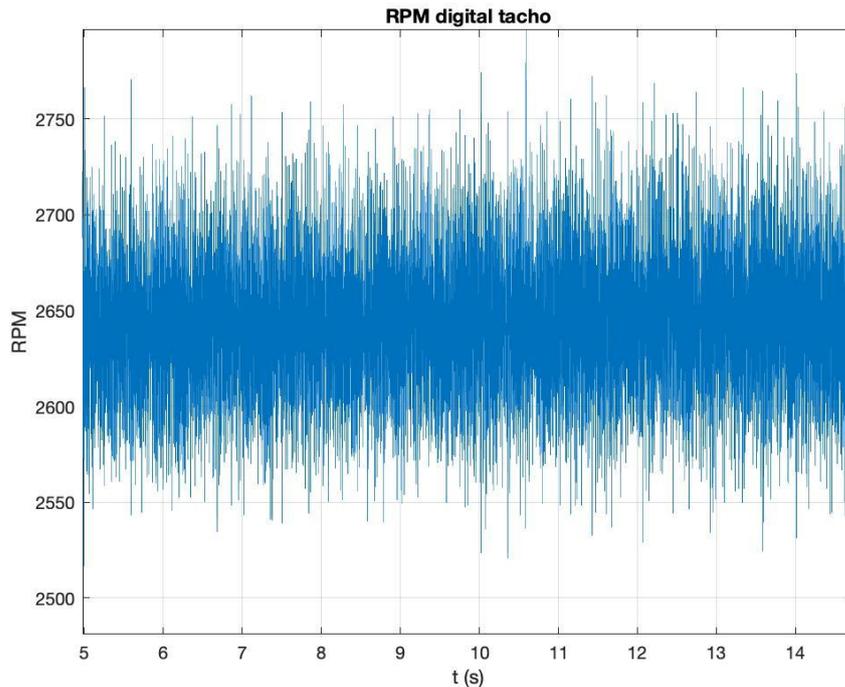


Osservandone l'andamento più da vicino si nota una fluttuazione eccessiva degli rpm difficilmente causata dal solo contatto con l'ostacolo.



La figura infatti mostra come nella curva abbiamo un'escursione di circa 250 rpm dal valore medio.

Per escludere che la fluttuazione fosse dovuta unicamente dal contatto con l'ostacolo abbiamo tolto le viti che andavano in contatto con lo stesso ed abbiamo ripetuto il test.



La curva ottenuta da quest'ultimo continua ad avere una fluttuazione attorno al valore medio all'incirca di 85 rpm il che ci ha portato a formulare altre ipotesi che giustificassero un'escursione così elevata:

- il sensore sta lavorando molto vicino al suo limite e quindi potrebbe perdere in precisione;
- i poli che ha il motorino che abbiamo utilizzato 'correggono' la velocità angolare accelerando o rallentando l'alberino all'interno della singola rivoluzione.

Nonostante questa fluttuazione (presente in tutte le configurazioni con cui sono stati fatti i test) si nota sempre una certa periodicità nell'andamento della curva nelle varie rivoluzioni successive dell'albero.

Ci siamo quindi concentrati, oltre che sugli effetti del contatto con l'ostacolo, anche sulla ripetibilità del segnale ottenuto.

4.2 ANALISI SEGNALE

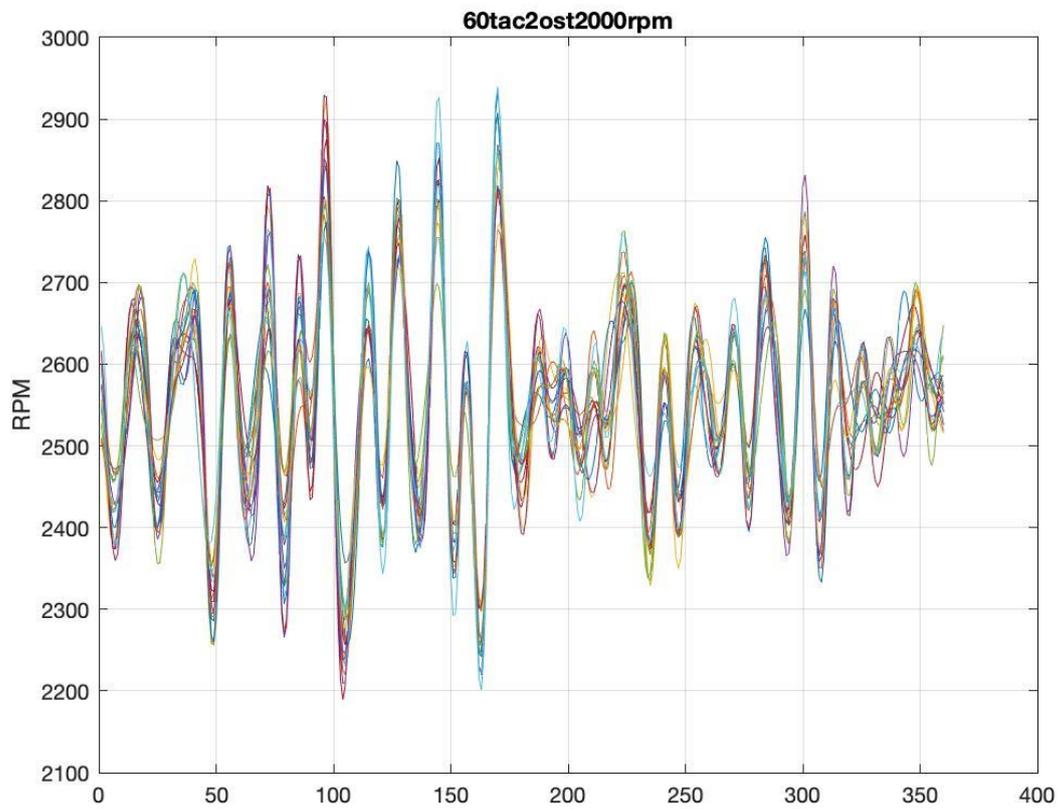
Per evidenziare al meglio la ripetibilità della variazione degli rpm e l'effetto del contatto con l'ostacolo sulla curva abbiamo provato a descrivere di meno il moto, anche per portare meno al limite il sensore, diminuendo il numero di ppr.

Abbiamo rifatto il test prima con 30 e poi con 15 viti togliendo dalle 60 iniziali in maniera simmetrica in modo da non sbilanciare il disco.

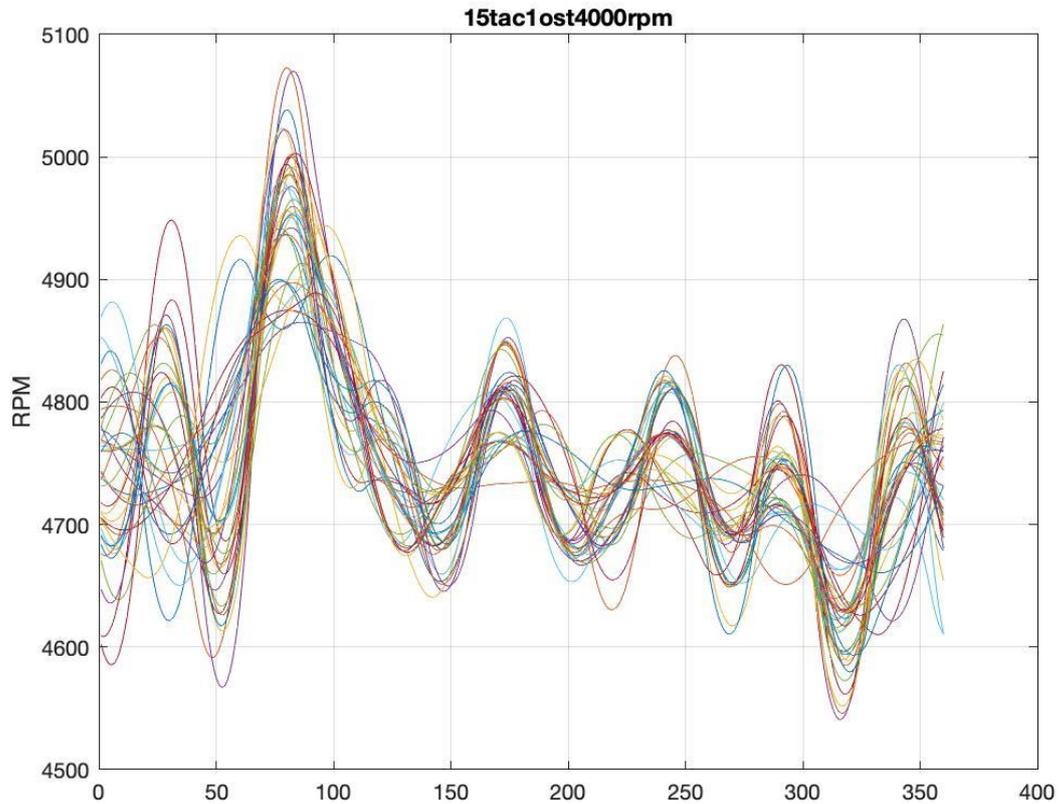
Inoltre, poiché con due ostacoli, soprattutto ad alte velocità, l'impatto era difficilmente individuabile dato che spesso l'ostacolo si trovava in movimento nel momento del contatto con le viti, per semplificare ancora di più il modello abbiamo provato a togliere un ostacolo sostituendo una delle due viti più interne con una della stessa dimensione ma più corta.

In questo modo l'ostacolo non avrebbe toccato più una delle due viti e la distribuzione della massa del disco sarebbe rimasta invariata.

Con Matlab abbiamo paragonato gli andamenti delle curve rpm di n rivoluzioni successive ottenendo la conferma di una ripetibilità molto chiara come possiamo vedere in questa immagine ottenuta dai dati presi a 2000 rpm con due ostacoli e 60 ppr.



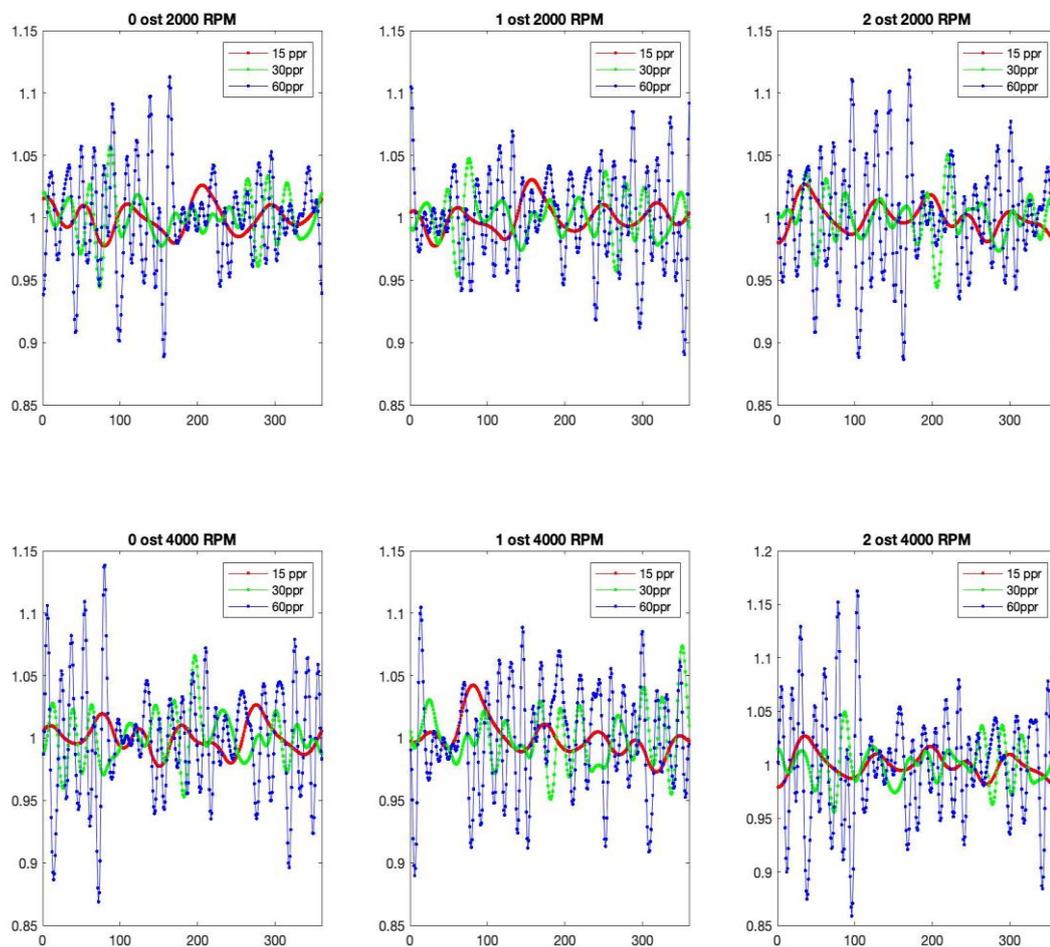
Diminuendo il numero di ppr e togliendo un ostacolo a 4000 rpm con lo stesso codice Matlab notiamo una maggiore dispersione dei dati ma individuiamo in maniera molto più chiara il contatto con l'ostacolo.



Vediamo infatti un picco principale ed il successivo assestamento della curva (andamento paragonabile ad uno smorzamento) che con un maggior numero di ppr e con due contatti al giro non riuscivamo a vedere.

Abbiamo infine reso adimensionale l'asse delle ordinate dividendo per il valore medio di rpm in modo da vedere la fluttuazione attorno al valore medio.

Quindi abbiamo fatto un confronto tra le varie configurazioni:



CONCLUSIONI

Il test fatto sul banco con testata Ducati GP14, con successiva elaborazione dei dati acquisiti, ci ha orientato nella scelta del set-up strumentale migliore che per i motivi sopracitati rimane, per le informazioni in nostro possesso, lo zebra tape con sensore fotoelettrico.

Il lavoro di tesi qui presentato sarà quindi un possibile punto di partenza per dei test più approfonditi sul banco con testata Ducati GP14 volti a determinare lo sfasamento di apertura valvole causato dalle oscillazioni torsionali dell'albero a camme.

Possibili sviluppi futuri potranno consistere in un miglior isolamento del banco alle vibrazioni, e i dati che saranno acquisiti potranno essere confrontati con il modello, seppur teorico, ottenuto attraverso le prove sul banco sperimentale.

BIBLIOGRAFIA

1. “Comparison of torsional vibration measurement techniques” –K.Janssens, L.Britte
(LMS International)
2. e56e_fiber_optic_sensors_group_catalogue_en.pdf
3. OMRON_e88e_e3x-hd_smart_fiber_amplifier_unit_datasheet_en.pdf