



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E SCIENZE MATEMATICHE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica (D.M. 270/04)

**Progettazione della catena di misura per la valutazione
delle oscillazioni torsionali in un albero a camme di un
motore ad alte prestazioni**

Measuring chain design for the evaluation of the torsional oscillation in a
camshaft of a high-performance engine

Relatore:

Prof. Paolo Castellini

Tesi di Laurea di:

Luca D'Isidoro

Anno Accademico 2020/2021

Sommario

Introduzione	1
Capitolo 1: Prima acquisizione sul banco principale	3
1.1 Illustrazione banco.....	3
1.2 Prima acquisizione	9
1.2.1 Setup di misura	9
1.2.2 Acquisizione	11
1.2.3 Processamento dati.....	12
1.2.4 Problematiche riscontrate.....	20
Capitolo 2: Banco prova secondario	21
2.1 Realizzazione del banco	21
2.2 Seconda acquisizione	22
2.2.1 Setup di misura	22
2.2.2 Acquisizione	23
2.2.3 Processamento dati.....	24
2.2.4 Problematiche riscontrate.....	34
Capitolo 3: Seconda acquisizione sul banco principale	35
3.1 Modifiche apportate al banco	35
3.2 Terza acquisizione.....	36
3.2.1 Setup di misura	36
3.2.2 Acquisizione	39
3.2.3 Processamento dati.....	40
Conclusioni e sviluppi futuri	45

Bibliografia.....	46
-------------------	----

Introduzione

La passione per il mondo del motorsport e la possibilità di collaborare con una grande 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 seguente lavoro di tesi è parte di un progetto più grande che ha impegnato il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) già in passato, con la realizzazione di un banco prova per una testata *Desmosedici GP14*, che permettesse di effettuare misurazioni in condizioni di movimentazione valvole.

Durante il periodo di apprendistato è stato possibile lavorare direttamente sulla testata del motore prototipo MotoGP, effettuando inizialmente misurazioni con la precedente sensoristica già presente sul banco, e progettando successivamente una nuova catena di misura che potesse restituire risultati appropriati al fine del lavoro.

Inoltre è stato allestito un secondo banco prova "semplificato" (chiamato banco secondario) con lo scopo di mettere a punto le tecniche di acquisizione e di processamento dati in modo più rapido.

Lo scopo del seguente lavoro è quello di creare una catena di misura che permetta di valutare al meglio le oscillazioni torsionali in un albero a camme di un motore ad alte prestazioni in condizioni di funzionamento parziale, ovvero in assenza di combustione. Verificata la bontà dei risultati, l'intero sistema potrà essere utilizzato per studiare il comportamento dell'albero a camme in condizioni di firing.

La tesi risulta essere strutturata come segue:

- nel capitolo 1 si illustra il banco prova principale e si mostra il precedente set di misura con le relative acquisizioni;
- nel capitolo 2 si mostrano l'allestimento del banco prova secondario e la messa a punto del metodo di processamento dei segnali acquisiti;

- nel capitolo 3 si mostrano le modifiche apportate al banco prova principale, l'installazione della nuova sensoristica e le nuove acquisizioni.

A causa dell'accordo di non divulgazione (NDA) stipulato con Ducati Motor Holding, nel seguente lavoro di tesi non verrà specificata nessuna informazione quantitativa riguardante la costruzione e il funzionamento della testata *Desmosedici GP14*.

Capitolo 1: Prima acquisizione sul banco principale

1.1 Illustrazione banco

Il banco prova, in parte messo a disposizione da *Ducati Motor Holding S.p.a.*, di seguito *DMH*, in parte progettato all'interno del *DIISM* precedentemente a questo lavoro di tesi, è composto dai seguenti macro elementi:

1. struttura portante in acciaio
2. motore elettrico
3. testata *Desmosedici GP14*
4. piastre e supporti trasmissione e testata
5. catena di trasmissione
6. circuito termoregolatore

La struttura portante è un telaio in acciaio dotato di quattro piedi regolabili e gommati al fine smorzare i fenomeni vibratorii; su di essa è montata una piastra rettangolare del medesimo materiale e delle stesse dimensioni perimetrali del telaio, connessa a quest'ultimo tramite sei silent block.

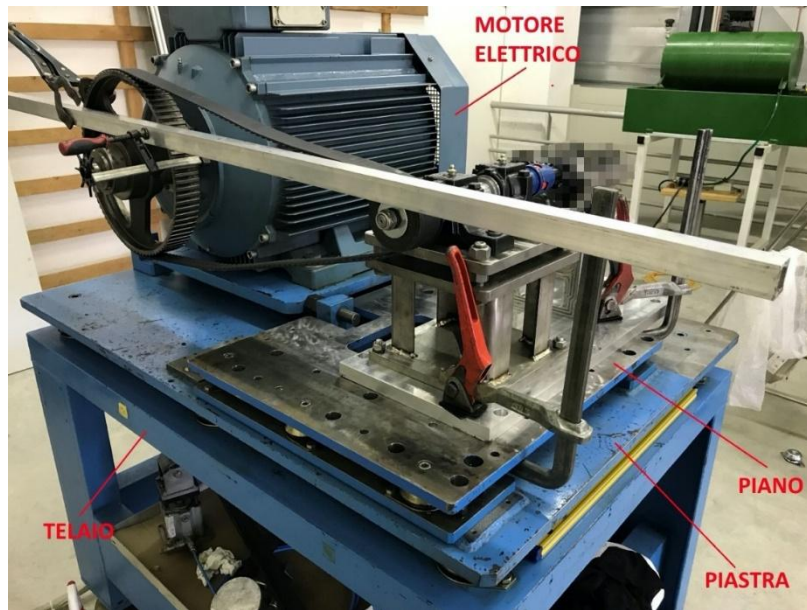


Figura 1. Struttura banco prova principale

Il piano di lavoro non possiede le dimensioni tali da permettere l'installazione dei supporti della trasmissione e della testata, descritti in seguito. È stata quindi realizzata una piastra rettificata in alluminio provvista di fori passanti che permettono l'accoppiamento della stessa con il piano d'acciaio sottostante e, superiormente, con i supporti.

Il banco è movimentato da un motore elettrico da 15 kW, ancorato tramite una slitta di acciaio al piano precedentemente descritto, e dotato di quattro tensionatori a vite.

I due supporti in alluminio della testata sono ricavati dal pieno e presentano delle aperture di alleggerimento, utili anche per il passaggio cavi degli strumenti di misura; Essi hanno la funzione di sostenere fisicamente la testata ma anche di provvedere all'alimentazione dell'olio motore e all'accoppiamento con il coperchio di distribuzione.

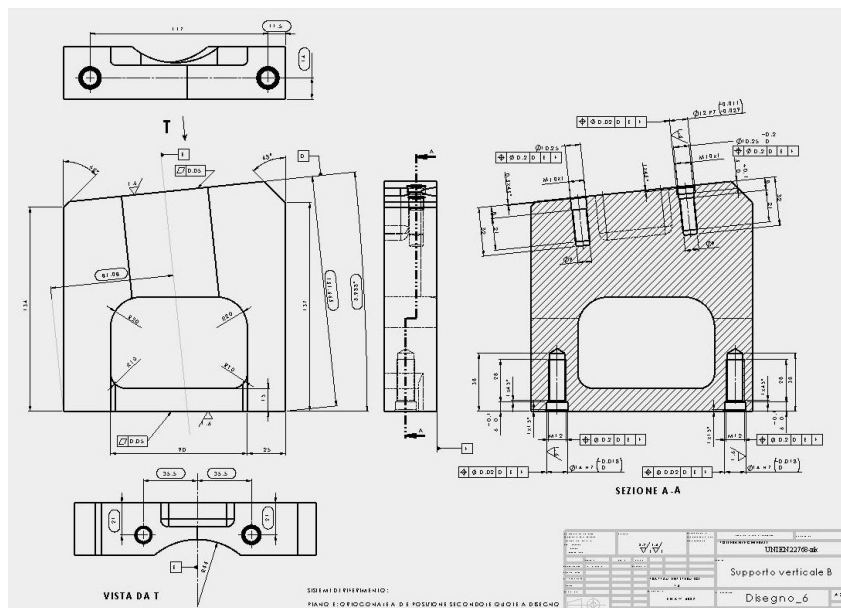


Figura 2. Tavola supporti testata

Il supporto della trasmissione è un castello composto da due piastre in acciaio accoppiate a profili angolari ad L tramite saldatura, e da una terza piastra fissata con viti e bulloni.

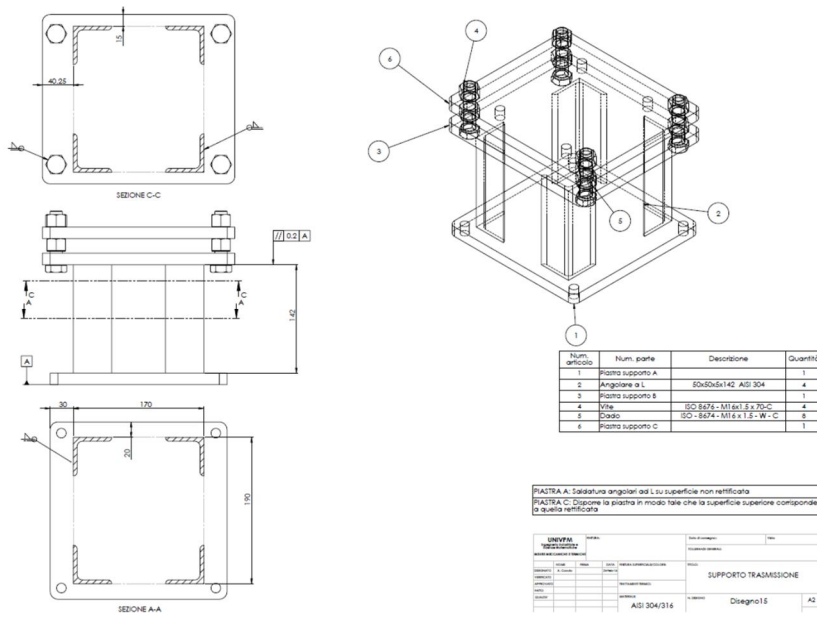


Figura 3. Tavola castello supporto trasmissione

Tra le due piastre superiori sono presenti 4 dadi che consentono una regolazione in altezza della superficie superiore, in modo che essa sia perfettamente parallela alla

piastra rettificata in alluminio e si raggiunga un perfetto allineamento tra l'albero a camme e quello di trasmissione.

Per quanto riguarda il trasferimento del moto dal motore elettrico all'asse a camme si è utilizzato un albero di trasmissione in acciaio da bonifica alle cui estremità sono state calettate, tramite linguette UNI 6604, una puleggia e un giunto ad alta velocità.

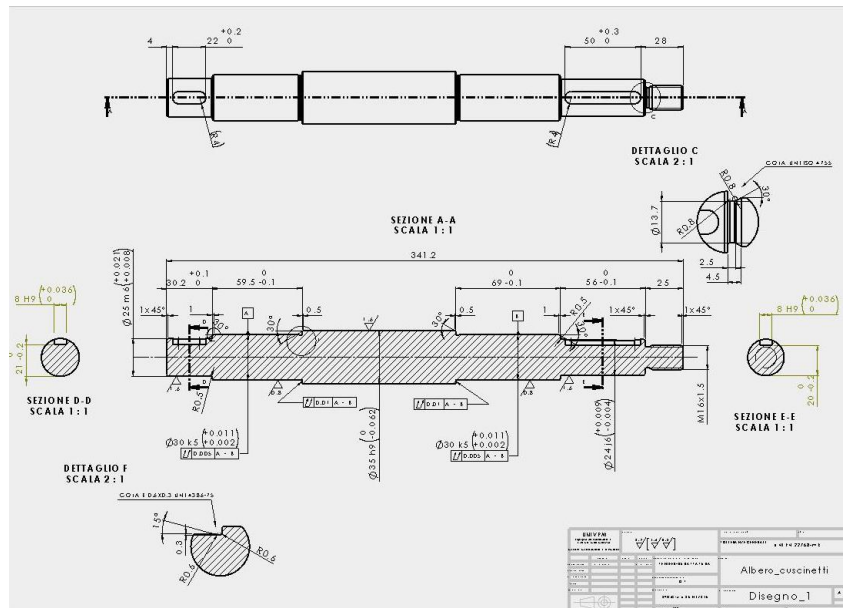


Figura 4. Tavola dell'albero di trasmissione

L'albero è alloggiato su dei supporti ritti ad omega SKF SNL 206-305. Sono presenti dei distanziali che fungono da battuta per i labirinti posti nel tratto di albero a diametro inferiore, che consentono il centraggio ed evitano lo scorrimento assiale dei cuscinetti entro i supporti stessi. Per la movimentazione dell'albero è stata utilizzata una puleggia in acciaio accoppiata ad una cinghia trapezoidale Isoran 607H700. Si è preferito utilizzare un rapporto di trasmissione tra puleggia e asse a camme di 1:4 per assicurarsi che il voltaggio con cui è alimentato il motore garantisca il raggiungimento del numero di giri massimo dell'asse a camme. Il rapporto di trasmissione reale, a causa di approssimazioni durante la progettazione, raggiunge un valore di 1:4,15.

Per completare la trasmissione del moto è stato previsto l'impiego di un alberino in acciaio con trattamento di superfinitura e nitrurazione in cui verrà posta l'altra metà del giunto ad alta velocità. Ovviamente la lunghezza di quest'ultimo e quella dell'albero di

La testata è stata fornita da *DMH* priva del coperchio di distribuzione, per questo motivo il seguente componente è stato progettato e realizzato su misura. Sono stati previsti dei fori per un iniettore e un raccordo del tubo in treccia, che permettono l'ingresso e uscita di olio per la lubrificazione degli ingranaggi della distribuzione.

Il circuito termoregolatore (successivamente *CT*) è stato fornito da *DMH* ed è costituito dai seguenti elementi:

- serbatoio per olio diatermico compreso di resistenza;
- due pompe autoadescanti per olio diatermico (*CALPEDA NM 1/AE-R*) ed olio motore (*CALPEDA T 100E*);
- due scambiatori in controcorrente;
- tre elettrovalvole;
- due PID di controllo temperatura per entrambi gli oli (*OMRON E5CN* per olio diatermico; *OMRON E5EK* per olio motore).
-



Figura 7. Circuito termoregolatore

I collegamenti tra *CT* e testata sono stati realizzati mediante due tubi in treccia che confluiscono separatamente l'olio nella testata per la lubrificazione delle camme e dei bilancieri, e nel coperchio della distribuzione per la lubrificazione delle ruote dentate.

Pressioni e temperature vengono monitorate con manometri a glicerina, valvole di regolazione portata e tre elettrovalvole gestite da due PID di controllo temperatura.



Figura 8. Quadro comandi e PID di controllo temperatura



Figura 9. PID di controllo temperatura

Le temperature da raggiungere per un utilizzo ottimale del banco prova sono circa 145°C e 120°C rispettivamente per l'olio diatermico e per l'olio motore.

1.2 Prima acquisizione

1.2.1 Setup di misura

Si è ritenuto opportuno effettuare una prima acquisizione utilizzando parte del setup di misura già presente sul banco, per avere un riferimento nelle successive acquisizioni.

Il setup comprende un sensore effetto Hall per la misura di giri di ruote foniche ELEN AA02.02.02 [3], del quale viene mostrata una scheda tecnica. Il disturbo magnetico necessario per il funzionamento del sensore viene generato dalla vite di fissaggio del giunto elastico, posizionata in prossimità del sensore con il corretto allineamento dell'asse di lettura, come indicato nella scheda tecnica.

Il sistema in questa configurazione ha 1 ppr (Pulse per Revolution), cioè un impulso per ogni giro dell'albero a camme.

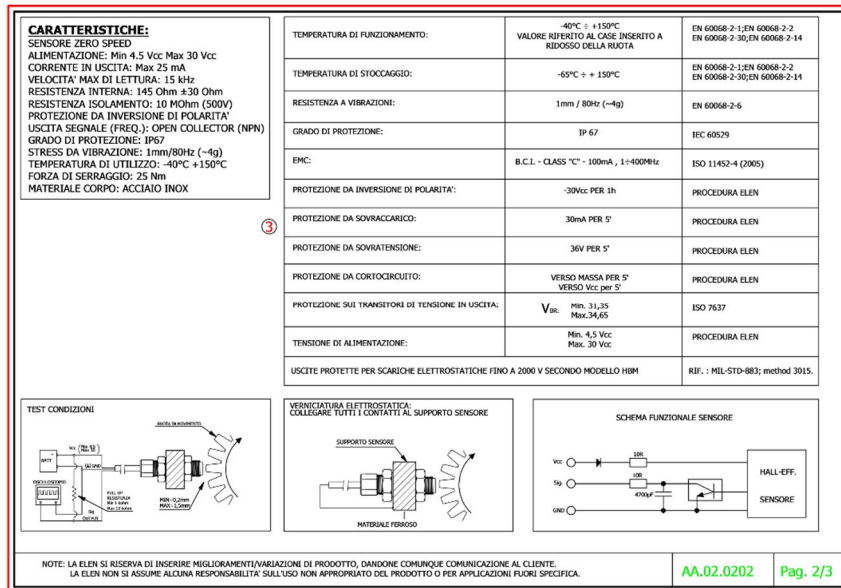
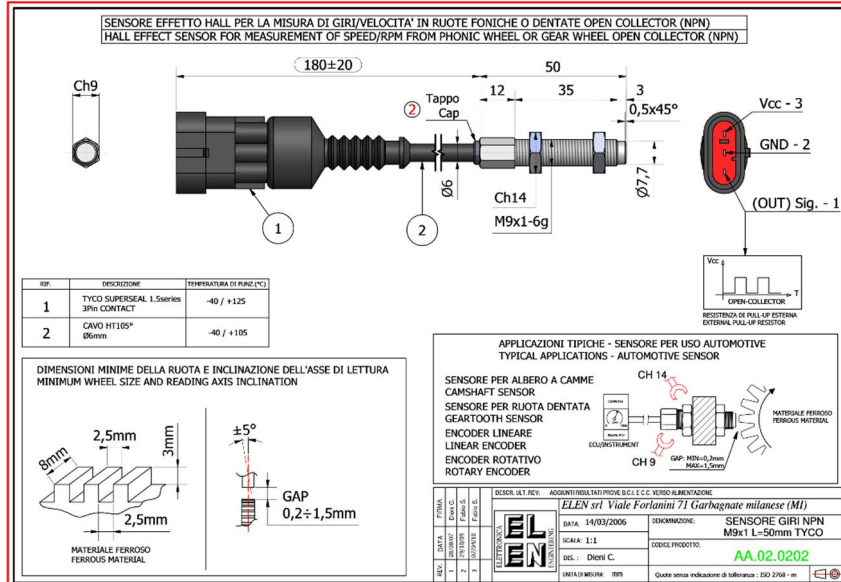


Figura 10. Datasheet ELEN AA.02.02.02

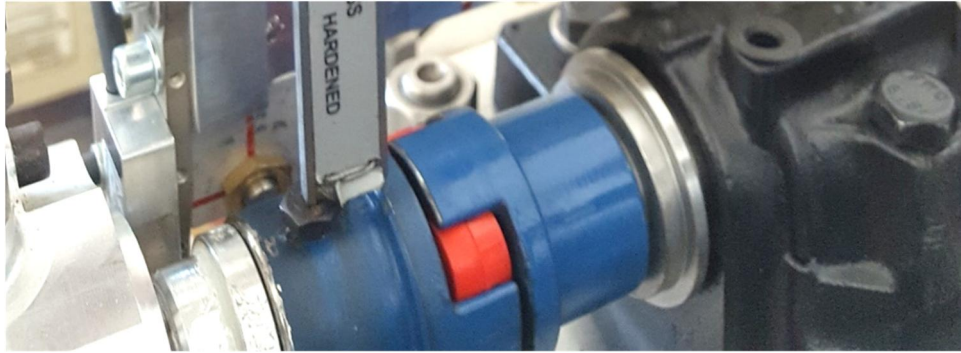


Figura 11. Particolare del sensore a effetto Hall e della vite di fissaggio del giunto ad alta velocità

Sono stati installati degli accelerometri monoassiali PCB PIEZOTRONICS C352C33 sulle superfici dei supporti ritto ad omega e sulla piastra di fissaggio del piano rettificato per valutare la vibrazione sul banco durante il funzionamento.



Figura 12. Accelerometro PCB C352C33 posto sul supporto ritto ad omega

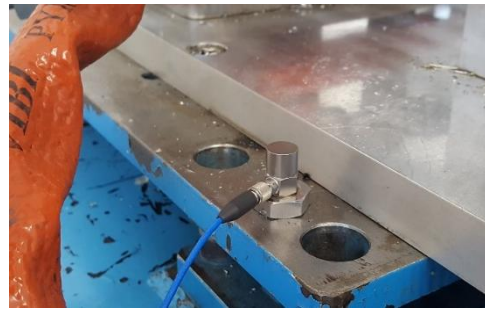


Figura 13. Accelerometro PCB C352C33 posto sulla piastra di fissaggio del piano rettificato

1.2.2 Acquisizione

Come hardware di acquisizione è stato utilizzato un SIEMENS SIMCENTER SCADAS MOBILE accoppiato con il software SIEMENS SIMCENTER TESTLAB.



Figura 14. Siemens Simcenter SCADAS Mobile

In questa prima campagna di misura sono state effettuate 3 acquisizioni a diversi rpm. Non si è potuto raggiungere il valore di giri target poiché superando i 1000 rpm il sensore raggiungeva la condizione di saturazione.

La frequenza di campionamento, mantenuta costante durante tutte le acquisizioni, è pari a 102,4 kHz.

1.2.3 Processamento dati

I dati acquisiti sono poi stati processati in *Matlab*, grazie alla realizzazione di un codice dedicato alla ricostruzione del segnale rpm dal segnale grezzo generato dal sensore a effetto Hall in configurazione 1 ppr.

Di seguito verranno illustrati i principali passaggi della realizzazione del primo script in *Matlab*.

In primo luogo è stata caricata la struttura relativa al test da processare, sono state definite le grandezze fondamentali quali il vettore tempo (t) e la frequenza di campionamento (f_s), poi è stata creata la matrice contenente i dati grezzi del sensore a effetto Hall (s).

```
load('RUNUPrpmInverter.mat')
t=Signal_0.x_values.start_value:Signal_0.x_values.increment:Signal_0.
x_values.number_of_values*Signal_0.x_values.increment;
fs=1/Signal_0.x_values.increment;

data=zeros(length(t),2);
data(:,1)=t;
```



```
data(:,2)=Signal_0.y_values.values;
s=[data(:,1),data(:,2)];
```

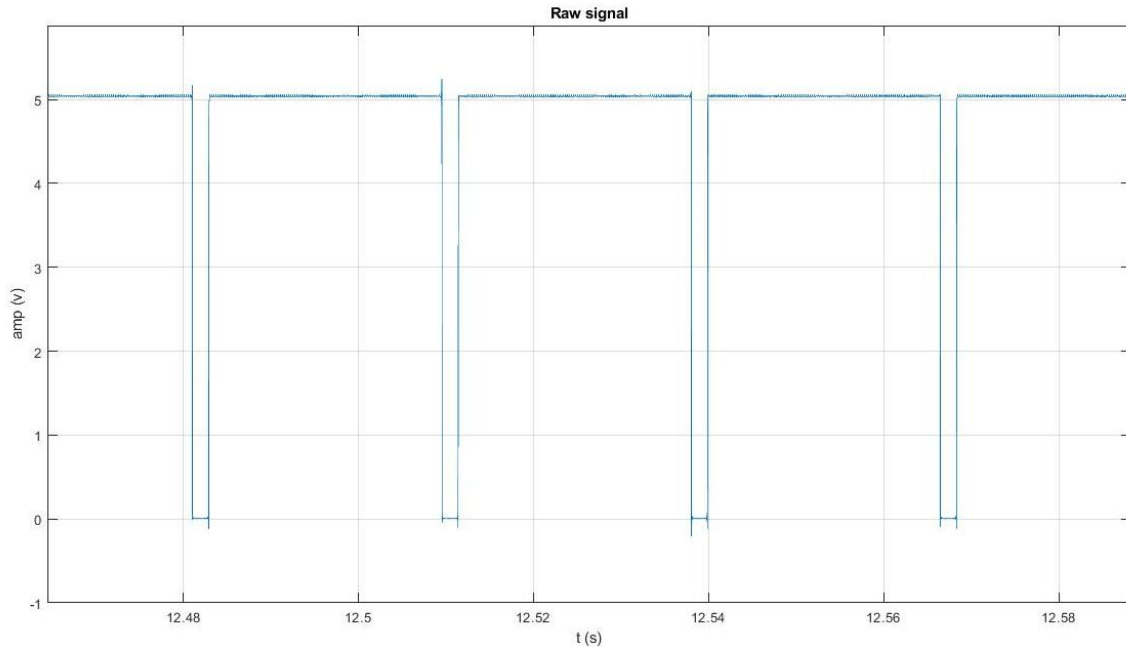


Figura 15. Voltaggio del sensore a effetto Hall (segnale tacca di zero)

La seguente sezione di codice consiste nell'individuazione dei soli picchi di discesa, utili per poi ricavare il segnale rpm; il segnale è stato mandato a saturazione per valori superiori a 3 volt e inferiori a 0 ed è stato creato un ciclo per escludere il picco di salita.

```
bnd=3;
y=data(:,2);
y(y>=bnd)=bnd;
y(y<bnd)=0;

dist=[];
smp=[];
for i=2:length(y)
    dif=y(i)-y(i-1);
    if abs(dif)>2
        a=max(y(i),y(i-1));
        dist=[dist a];
        if a==y(i)
            smp=[smp i];
        else
            smp=[smp i-1];
        end
    end
end
end
```

```

final_peak=[];
final_smp=[];
for i=1:2:length(smp)
    final_peak=[final_peak,dist(i)];
    final_smp=[final_smp,smp(i)];
end
for i=2:length(final_smp)
    dif1=final_smp(i)-final_smp(i-1);
    if dif1<2500
        final_smp(i)=0;
        final_peak(i)=0;
    end
end
end
final_smp(final_smp==0)=[];
final_peak(final_peak==0)=[];

```

Di seguito viene mostrato un plot dei picchi sovrapposti al segnale grezzo del sensore ad effetto Hall.

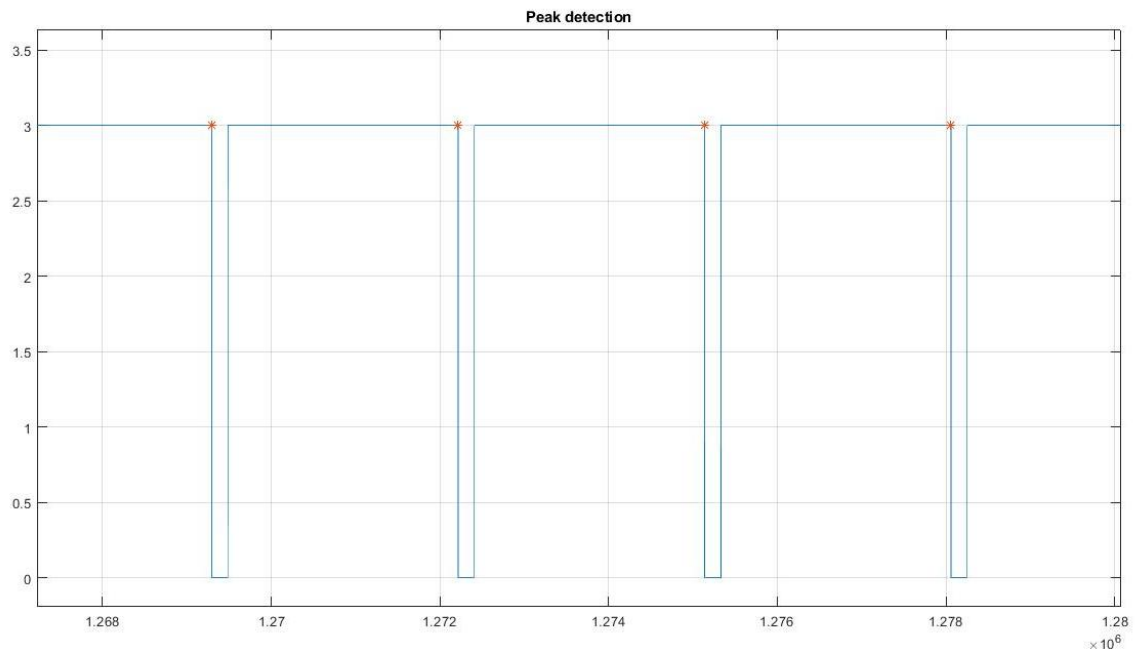


Figura 16. Individuazione dei picchi sul segnale tacca di zero

Si è proceduto a calcolare la distanza tra i picchi e, successivamente, i valori di rpm.

```

t_finalPeak=diff(final_smp)*Signal_0.x_values.increment;
RPM_final=60./t_finalPeak;

```

La velocità angolare è strettamente legata alle distanze tra i picchi: minore è la distanza maggiore sarà la velocità angolare relativa a quell'istante di tempo. Questa analogia è ben visibile nei grafici sottostanti.

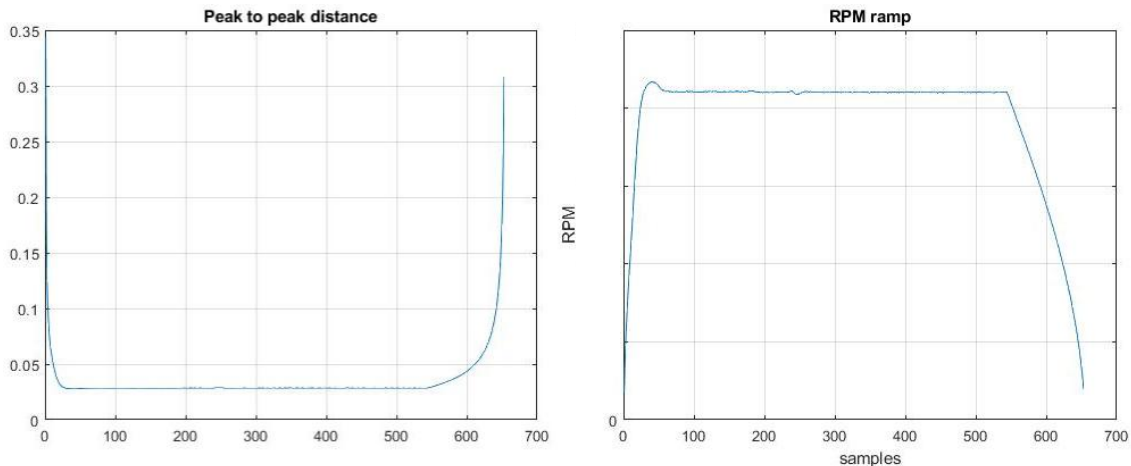


Figura 17. Plot della distanza tra le tacche di zero (a sinistra) e rampa rpm (a destra)

Oltre al segnale del sensore a effetto Hall sono stati processati anche i segnali degli accelerometri installati sul supporto ritto ad omega (di seguito chiamati *Acc.Bearing*) e sulla piastra di fissaggio del piano rettificato (di seguito chiamati *Acc.Flangia*), nelle direzioni x, y, z.

Le accelerazioni sono state valutate con i seguenti operatori:

- *FFT (Fast Fourier Transform)*: per decostruire il segnale nelle sue componenti sinusoidali. La valutazione dell'ampiezza in funzione della frequenza permette di fare un'analisi nel dominio della frequenza per valutare meglio il profilo di vibrazione;
- *PSD (Power Spectral Density)*: calcolata moltiplicando ogni bin in frequenza per il suo congiunto complesso. È più utile di una *FFT* per analizzare vibrazioni casuali perché il valore in ampiezza è normalizzato sulla larghezza del bin di frequenza, quindi indipendente da essa;
- *Spettrogramma*: lavora "spezzando" i dati nel dominio del tempo in una serie di parti (chunk) e prendendo le *FFT* di questi periodi di tempo. Queste serie di *FFT*

vengono poi sovrapposte l'una all'altra per visualizzare come l'ampiezza e la frequenza del segnale variano nel tempo.

```
data6=zeros(length(t),2);
data6(:,1)=t;
data6(:,2)=Signal_1.y_values.values(:,6)*Signal_1.y_values.quantity.u
nit_transformation.factor;
s6=[data6(:,1),data6(:,2)];

f9=figure;
subplot(2,2,1);
plot(data6(:,1),data6(:,2));
xlabel('t (s)')
ylabel('amp (g)')
title('Acc bearing Z')
grid on

subplot(2,2,2);
[freq_data6,amp_data6,psdx_data6]=Mide_FFT_PSD(data6,fs);
plot(freq_data6,amp_data6,'LineWidth',1)
xlabel('f (Hz)');
ylabel('amp (g)');
title('FFT of Acc bearing Z');
grid on

subplot(2,2,3);
loglog(freq_data6,psdx_data6,'LineWidth',1)
xlabel('f (Hz)');
ylabel('amp (g^2/Hz)');
title('PSD of Acc bearing Z');
grid on

subplot(2,2,4);
[x_3D_data6,y_3D_data6,z_3D_data6] = Mide_Spectrogram(data6,fs,10);
surf(x_3D_data6,y_3D_data6,z_3D_data6,'EdgeColor','none')
xlabel('t (s)');
ylabel('f (Hz)');
zlabel('amp');
title('Spectrogram of Acc bearing Z');
grid on
colormap(jet)
```

I maggiori valori di accelerazione sono stati rilevati in corrispondenza dell'*AccFlangia* in direzione y e dell'*AccBearing* in direzione z.

Di seguito vengono messi a confronto i moduli delle accelerazioni le *FFT*, le *PSD*, e gli *Spettrogrammi* rilevati nelle diverse acquisizioni.

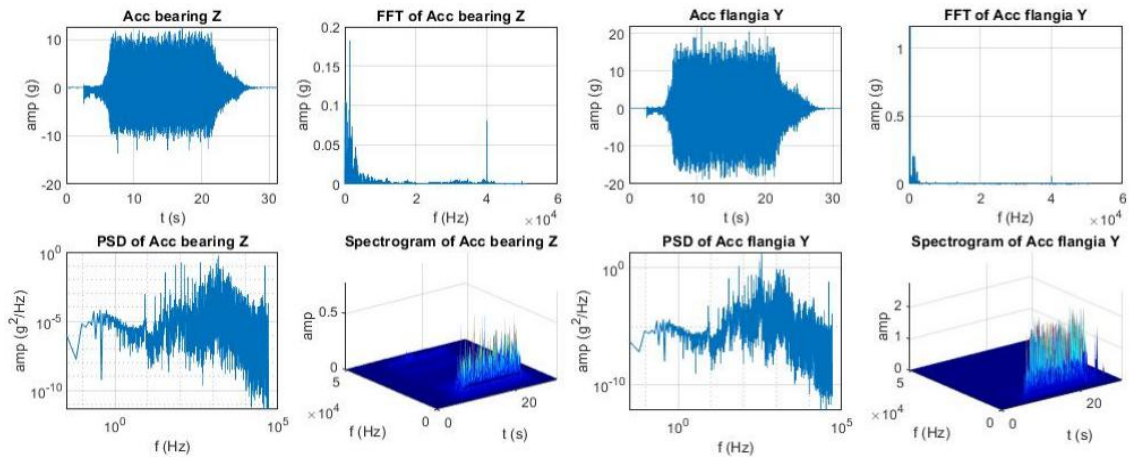


Figura 18. Acc, FFT, PSD e Spettrogramma a "n" rpm dell'asse a camme

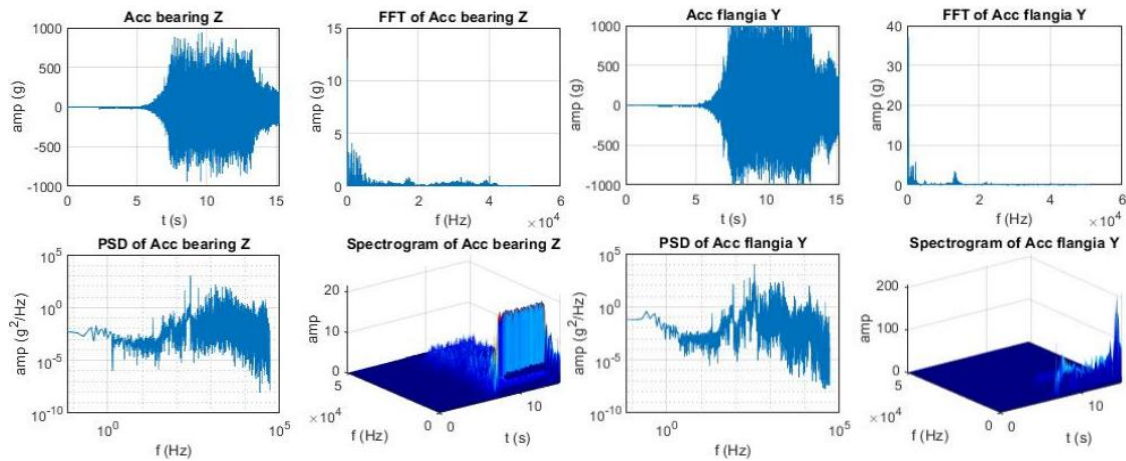


Figura 19. Acc, FFT, PSD e Spettrogramma a "2n" rpm dell'asse a camme

Si nota facilmente che la vibrazione del sistema nel test eseguito a "2n" rpm, pari a circa 1000 g, è di due ordini di grandezza superiore a quella del test effettuato a "n" rpm, pari a circa 10-20 g. Questa differenza di ordini di grandezza è visibile anche sul plot delle FFT.

È stato inoltre realizzato uno spettrogramma bidimensionale impostando la larghezza dei chunk e l'overlap (over).

```
dw=10;
tt=0.15;
n_chunk=tt*fs;
over=0.5;
n_over=over*n_chunk;
```

```

figure;
spectrogram(data2(:,2),n_chunk,n_over,2^18,fs,'yaxis');
xlabel('t (s)')
ylabel('f (kHz)')
xlim([0 25])
ylim([0 1.5])
title('Spectrogram "n" RPM')

```

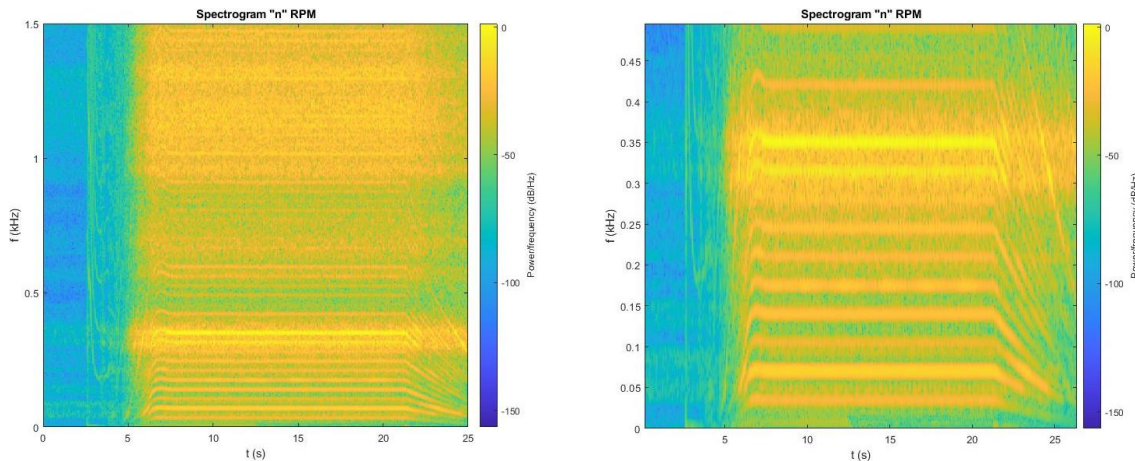


Figura 20. Spettrogramma con overlap Acc. Flangia Y ad "n" rpm

In Figura 20 sono ben visibili le vibrazioni alle diverse frequenze.

Un piccolo miglioramento in termine di vibrazione è stato ottenuto sostituendo la vite di fissaggio del giunto con un grano, eliminando così la massa eccentrica rappresentata dalla testa della vite.

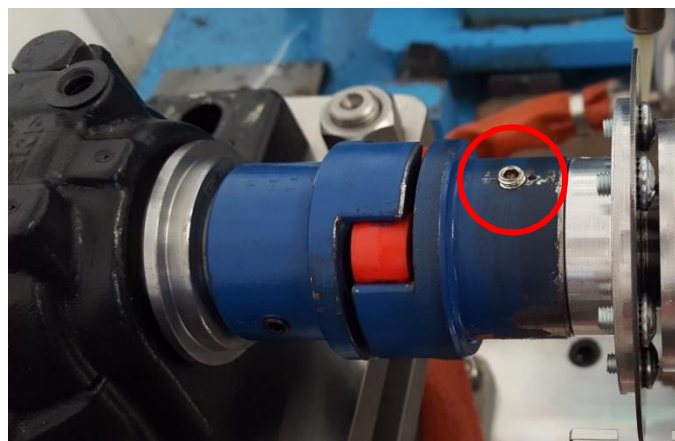


Figura 21. Particolare del grano di fissaggio del giunto ad alta velocità

Si è riscontrato un piccolo miglioramento visibile nelle FFT delle figure 22 e 23.

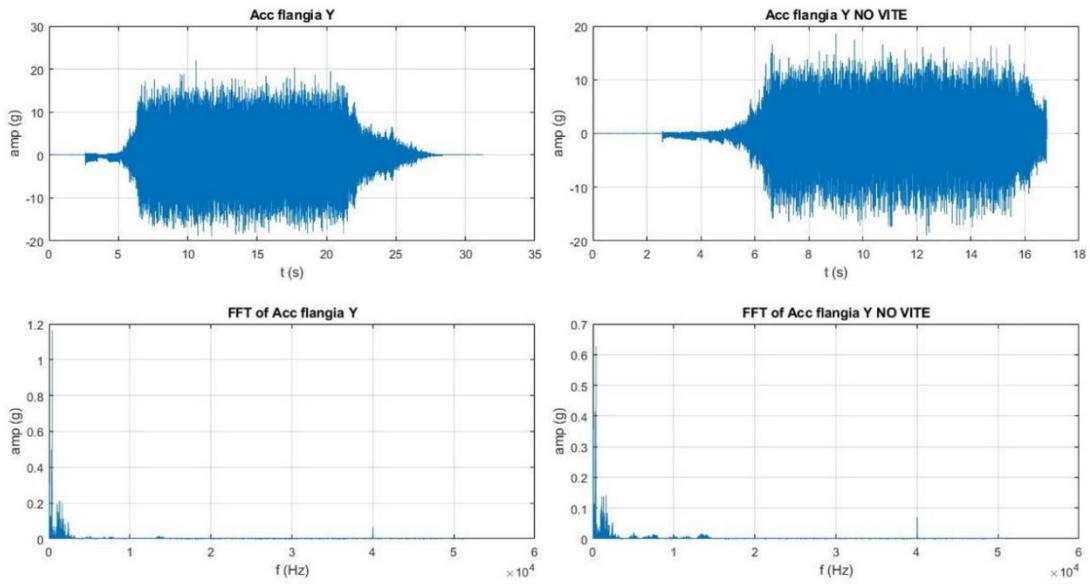


Figura 22. Acc. E FFT a "n" rpm con vite (sinistra) e senza vite (destra) dell'accelerometro posto sulla flangia in direzione Y

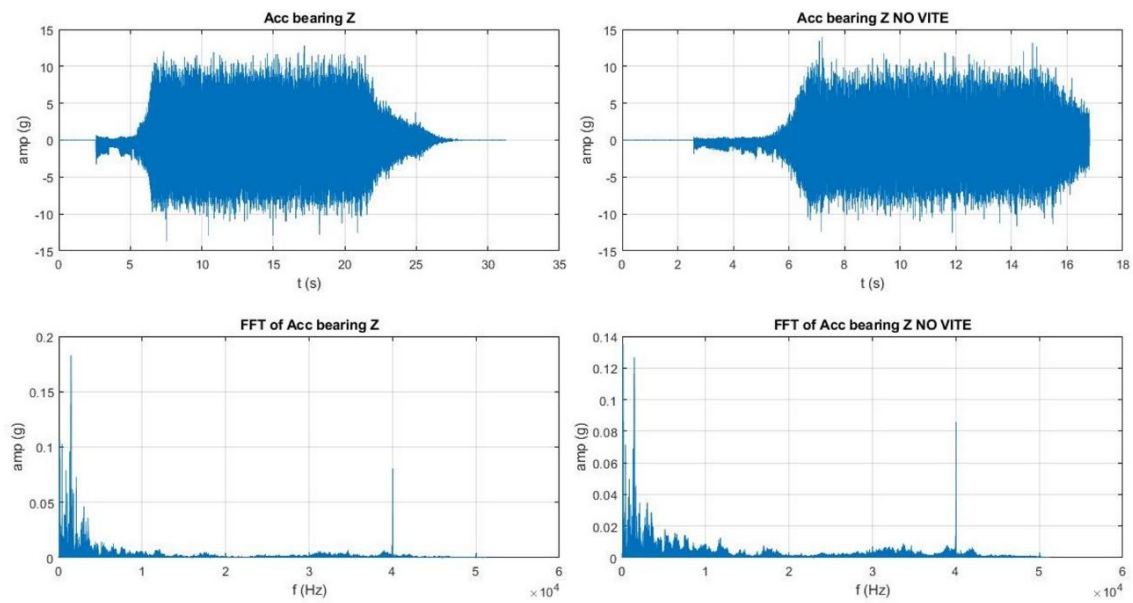


Figura 23. Acc. E FFT a "n" rpm con vite (sinistra) e senza vite (destra) dell'accelerometro posto sul supporto ad omega in direzione Z

1.2.4 Problematiche riscontrate

Come già detto in precedenza, valori di rpm e di vibrazione così elevati mettono in crisi tutta la catena di misura, rendendo impossibile il raggiungimento di valori di velocità angolari pari a quelli di reale funzionamento della testata *Desmosedici GP14*. Inoltre la sensoristica finora utilizzata non permette di osservare e quantificare le oscillazioni torsionali dell'asse a camme.

Capitolo 2: Banco prova secondario

2.1 Realizzazione del banco

La necessità di realizzare un banco prova secondario è sorta per due principali motivi: il primo è derivato dalla temporanea impossibilità di utilizzo del banco principale, poiché si è dovuto procedere con l'ordine di un nuovo sensore; il secondo è derivato dall'esigenza di avere un banco più versatile che permettesse di effettuare misurazioni più rapide, con lo scopo di perfezionare il codice di processamento Matlab eseguendo più test.

È stato realizzato un disco di misura in alluminio, sulla cui superficie sono stati praticati 60 fori equispaziati di diametro 3mm. Su questi fori sono state fissate 60 viti M3 con dadi autobloccanti, per impedirne lo svitamento durante il funzionamento.

Sono stati predisposti altri 2 fori di diametro 6 mm su una circonferenza di raggio minore, per il successivo montaggio di 2 viti M6 utilizzate per immettere un disturbo nel sistema di misura. Il disco è stato montato sull'alberino di un motore elettrico di piccola taglia e fissato con un grano. Il motore a sua volta è stato fissato su una struttura in profilati di alluminio Bosch precedentemente allestita in laboratorio.



Figura 24. Allestimento banco prova secondario, vista posteriore

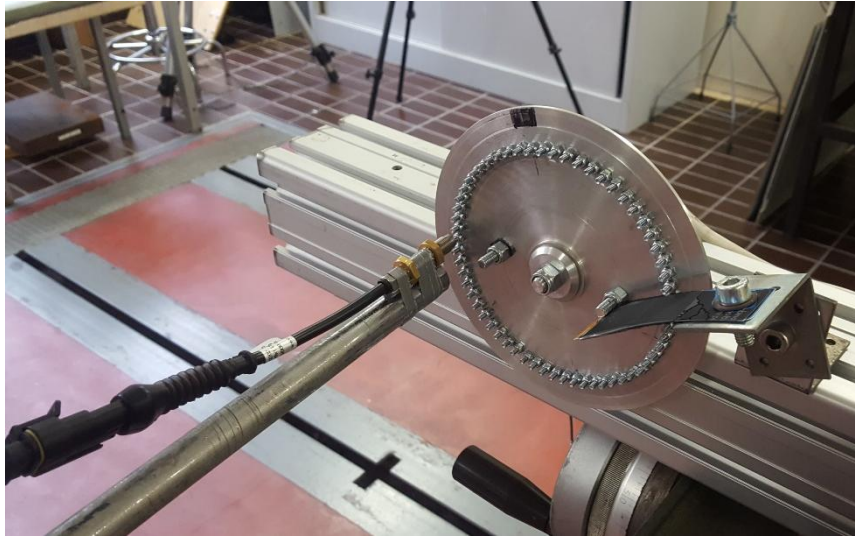


Figura 25. Allestimento banco prova secondario, vista anteriore

Sul profilato in alluminio sono stati montati dei supporti a “L” sui quali è stata fissata una lamina flessibile in materiale plastico. Essa, impattando sulle viti M6 poste al centro del disco (verranno eseguiti tre test con due, una e nessuna vite), produrrà un rallentamento istantaneo con conseguente accelerazione, andando a simulare la spinta della camma sui bilancieri del sistema Desmodromico.

2.2 Seconda acquisizione

2.2.1 Setup di misura

Per la misura dei giri è stato utilizzato effetto *Hall ELEN AA02.02.02* [3], già descritto nel capitolo precedente, con diverse risoluzioni (diversi Pulse per Revolution).

A questo è stato accoppiato un sensore ottico per la rilevazione della tacca di zero.



Figura 26. Particolare del sensore ad effetto Hall (sinistra) e del sensore ottico a destra

Sulla superficie superiore del profilato in alluminio è stato installato un accelerometro PCB PIEZOTRONICS C352C33 ad una distanza di circa 20 cm dal motore elettrico.

2.2.2 Acquisizione

Sono state effettuate le seguenti acquisizioni con frequenza di campionamento costante pari a 102,4 kHz:

- 15 ppr, 0 ostacoli, 2000 rpm;
- 15 ppr, 0 ostacoli, 4000 rpm;
- 15 ppr, 1 ostacolo, 2000 rpm;
- 15 ppr, 1 ostacolo, 4000 rpm;
- 15 ppr, 2 ostacoli, 2000 rpm;
- 15 ppr, 2 ostacoli, 4000 rpm;
- 30 ppr, 0 ostacoli, 2000 rpm;
- 30 ppr, 0 ostacoli, 4000 rpm;
- 30 ppr, 1 ostacolo, 2000 rpm;
- 30 ppr, 1 ostacolo, 4000 rpm;
- 30 ppr, 2 ostacoli, 2000 rpm;
- 30 ppr, 2 ostacoli, 4000 rpm;

- 60 ppr, 0 ostacoli, 2000 rpm;
- 60 ppr, 0 ostacoli, 4000 rpm;
- 60 ppr, 1 ostacolo, 2000 rpm;
- 60 ppr, 1 ostacolo, 4000 rpm;
- 60 ppr, 2 ostacoli, 2000 rpm;
- 60 ppr, 2 ostacoli, 4000 rpm.

Come hardware di acquisizione è stato utilizzato un *SIEMENS SIMCENTER SCADAS MOBILE* accoppiato con il software *SIEMENS SIMCENTER TESTLAB*.

2.2.3 Processamento dati

In questa campagna di test si è partiti dal foglio di calcolo realizzato durante il primo processamento dei dati, andando ad aggiungere la componente torsionale dell'albero a camme, che in questa semplificazione è causata dall'urto della lamina flessibile in materiale plastico sulle viti poste al centro del disco di misura (successivamente chiamati ostacoli).

Altro aspetto importante è costituito dall'acquisizione del segnale TTL digitale degli rpm, oltre al segnale analogico, che permetterà di osservare le fluttuazioni della velocità angolare nel tempo.

Di seguito vengono messi a confronto la rampa di rpm, ricostruita dal segnale analogico mediante la ricerca dei picchi illustrata nel capitolo 1.2.3, e il segnale digitale di rpm.

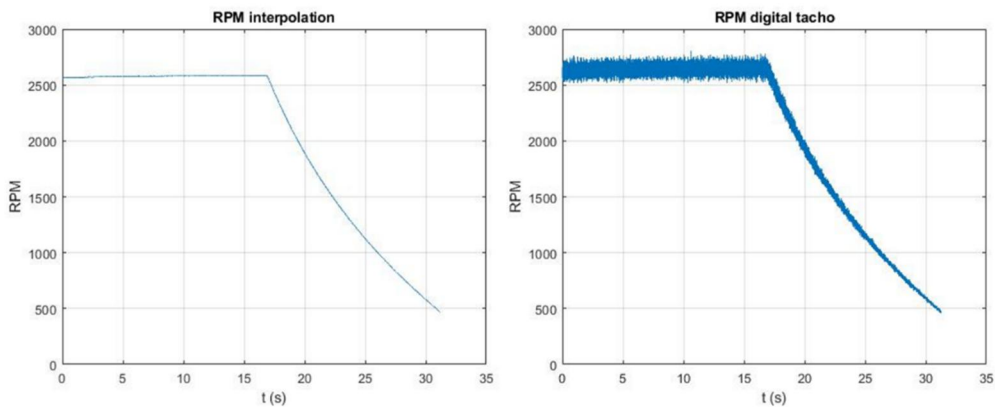


Figura 27. Confronto tra segnale analogico (a sinistra) e digitale degli rpm (a destra)

Se si esamina più da vicino la parte costante del segnale rpm digitale ci si accorge della sua fluttuazione nel tempo. I grafici qui mostrati sono riferiti all'acquisizione "15 ppr, 0 ostacoli, 2000 rpm", in particolare dalla Figura 28 di può notare che la fluttuazione attorno al valor medio (circa 2650 rpm), nel caso con zero ostacoli, si attesta attorno a ± 80 rpm.

Questa fluttuazione presente nella configurazione con 0 ostacoli si è ritenuta attribuibile ai poli del motore elettrico, che cercano di correggere la velocità angolare accelerando e rallentando all'interno della singola rivoluzione.

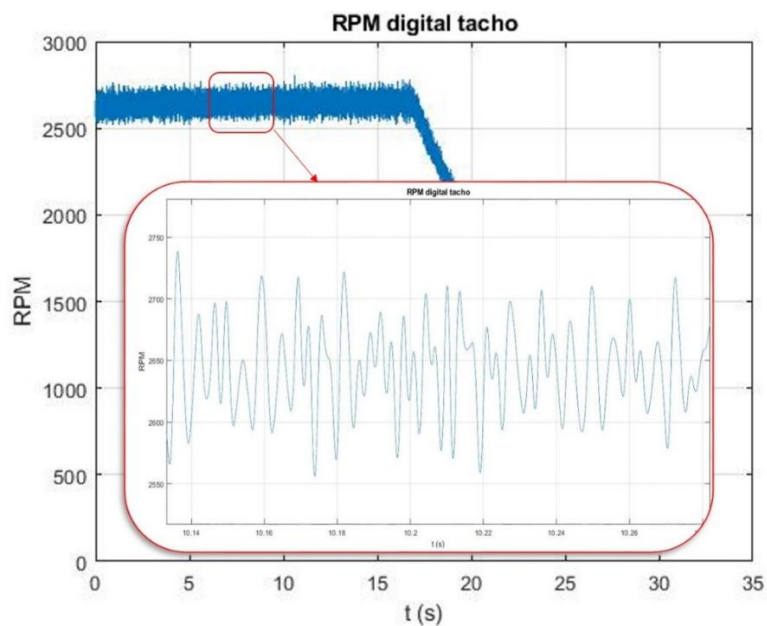


Figura 28. Particolare del segnale digitale di rpm

Di seguito vengono mostrate le rampe di rpm, ricavate dai segnali digitali, rispettivamente delle acquisizioni “15 ppr, 1 ostacolo, 2000 rpm” e “15 ppr, 2 ostacoli, 2000 rpm”.

Qui la fluttuazione massima attorno al valor medio (circa 2550 rpm) è pari a circa 150 rpm.

Gli spike presenti nei grafici sottostanti rappresentano i rallentamenti (spike bassi) e le accelerazioni (spike alti) istantanee indotti dagli urti della lamina flessibile sulle viti del disco di misura.

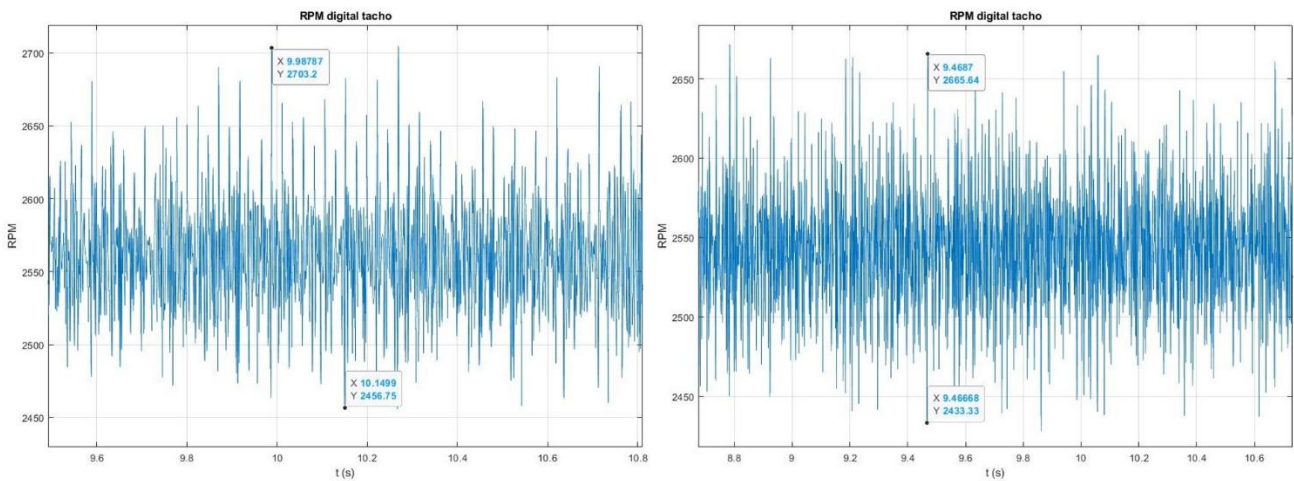


Figura 29. Particolare del segnale digitale di rpm in configurazione 1 ostacolo(sinistra) e 2 ostacoli(destra)

Per analizzare in modo più significativo le fluttuazioni di rpm si è passati dal dominio tempo al dominio angolo, prendendo in esame una finestra temporale compresa tra “t_inizio” e “t_fine”.

Il passaggio al dominio dell'angolo è stato fatto ricampionando il segnale rpm digitale 360 volte in un intervallo tra tacche di zero; è noto che ogni tacca di zero corrisponde ad un giro del disco di misura, quindi il segnale rpm ricampionato avrà 360 campioni per giro.

Di seguito viene mostrata la parte di codice relativa al ricampionamento.

```
voutf=rpm;
t_inizio=6*fs;
t_fine=6.5*fs;
```

```

finalsmp_staz=[];
for i=t_inizio:t_fine
    for k=1:length(final_smp2)
        if i==final_smp2(k)
            finalsmp_staz=[finalsmp_staz,i];
        end
    end
end

rpm_resamp=[];
asse_x=[];
media_wnd=mean(voutf(finalsmp_staz(1):finalsmp_staz(end)));
for i=2:length(finalsmp_staz)
    rpm_wnd=voutf(finalsmp_staz(i-1):finalsmp_staz(i));
    camp_a=360;
    incr_a=(finalsmp_staz(i)-finalsmp_staz(i-1))/camp_a;
    ang_a=finalsmp_staz(i-1):incr_a:finalsmp_staz(i)-incr_a;
    subl_a=finalsmp_staz(i-1):finalsmp_staz(i);
    rpm_s_a=interp1(subl_a,rpm_wnd,ang_a,'spline');
    rpm_resamp=[rpm_resamp,rpm_s_a];
    asse_x=[asse_x,ang_a];
    rpm_me(i,:)=rpm_s_a;
end

tacca_staz=media_wnd*ones(1,length((finalsmp_stazrpm_medi_wnd=media_w
nd*ones(1,length(finalsmp_staz)));

```

Le variabili principali del codice sono:

- *camp_a*: numero di campioni presi nell'intervallo tra una tacca di zero e la successiva;
- *rpm_resamp*: vettore contenente il segnale rpm ricampionato;
- *asse_x*: vettore contenente gli intervalli di ricampionamento;
- *media_wnd*: valore medio degli rpm nella finestra;
- *rpm_me*: matrice (n righe*360 colonne) contenente 360 valori di rpm per gli n intervalli della finestra ;
- *tacca_staz*: vettore creato per la rappresentazione della tacca di zero.

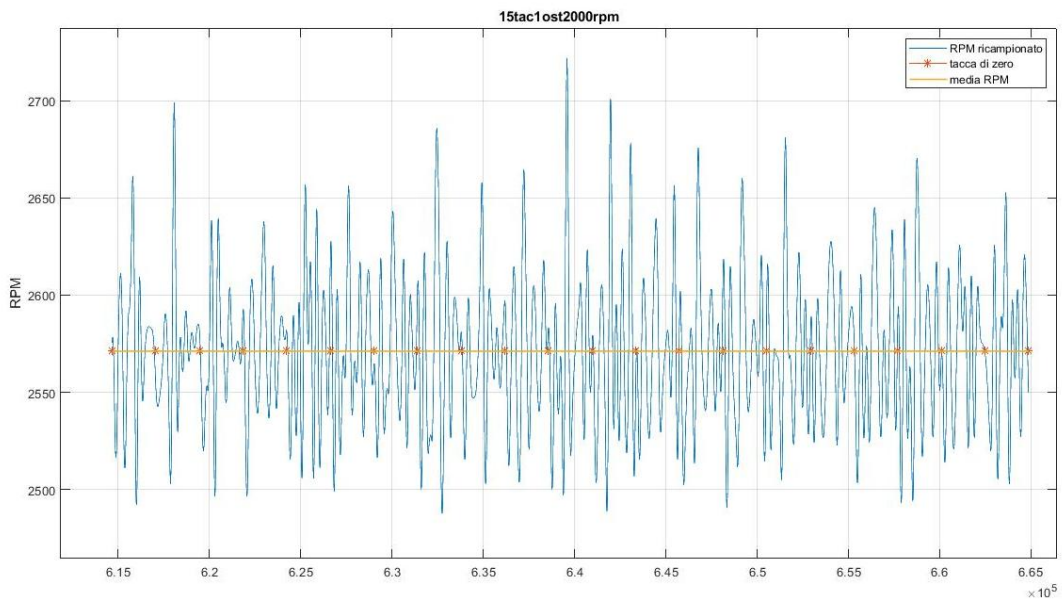


Figura 30. Segnale rpm finestrato, tacca di zero e valor medio del segnale

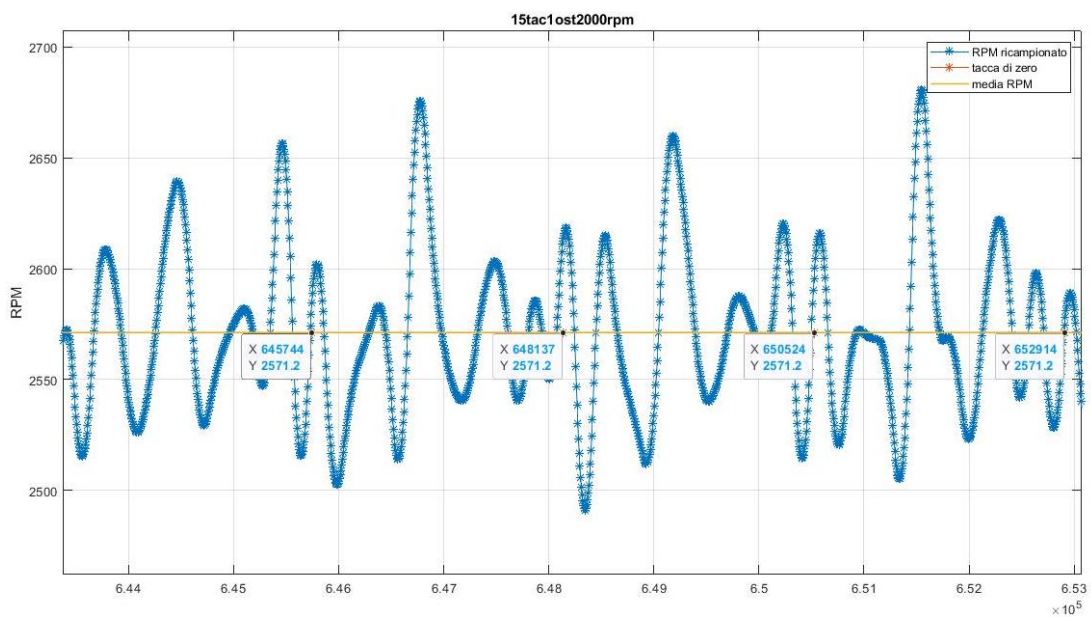


Figura 31. Particolare del segnale rpm ricampionato e delle tacche di zero

La matrice “rpm_me” ha dimensione [n righe*360 colonne] dove “n” è il numero degli intervalli tacche di zero presenti nella finestra.

Per avere una visualizzazione più chiara e significativa della variazione degli rpm, è stato creato il vettore “rpm_medie” contenente i valori di rpm mediati in ogni intervallo.

Questo vettore avrà dimensione [1 riga*360 colonne].


```
rpm_me=rpm_me(2:end,:);
rpm_medie=sum(rpm_me,1)/size(rpm_me,1);
rpm_normalizzati=rpm_medie/mean(rpm_medie);
```

La Figura 30 (in riferimento all' acquisizione "15 ppr, 1 ostacolo, 2000 rpm") rappresenta il plot della variabile "rpm_normalizzati", cioè la matrice "rpm_medie" divisa per il suo valor medio, andando così ad adimensionalizzare l'asse y, rappresentativo degli rpm.

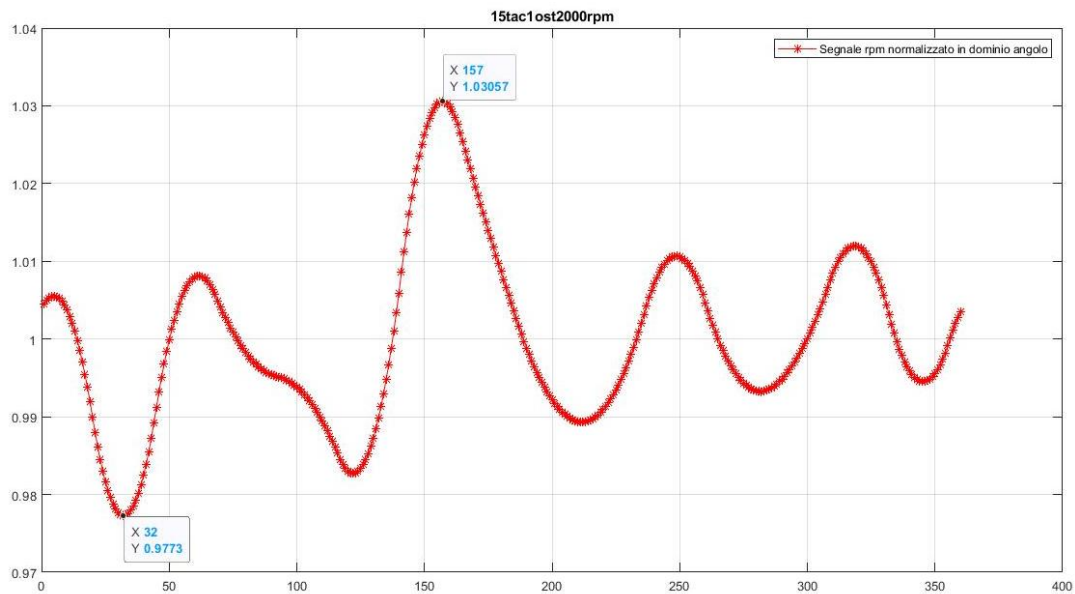


Figura 32. Valori rpm mediati sugli intervalli e normalizzati (fluttuazione rpm)

In Figura 33 (in riferimento all' acquisizione "15 ppr, 2 ostacoli, 2000 rpm") sono rappresentati il segnale rpm ricampionato e le relative tacche di zero (a sinistra), la fluttuazione degli rpm in base angolo (a destra). La presenza del secondo ostacolo, come evidenziato nel grafico, si manifesta come secondo picco all'interno dello stesso giro (intervalli tacche).

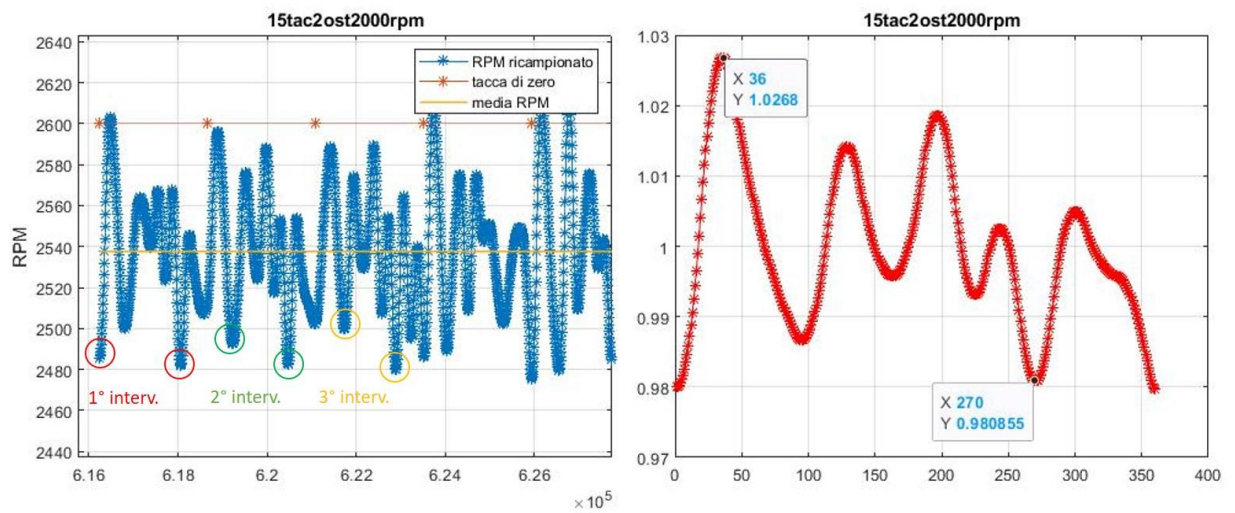


Figura 33. Particolare del segnale rpm ricampionato e delle tacche di zero (sinistra e) fluttuazione di rpm (destra)

Per poter realmente quantificare lo scostamento degli rpm rispetto al valor medio si è calcolata la fluttuazione con la seguente parte di codice.

```
fluttuazioni=abs(ppp-1);
fluttuazione_max=(max(fluttuazioni))*100;
fluttuazione_media=sum(fluttuazioni)/length(fluttuazioni)*100;
```

Nella Tabella 1 sono riportati i valori di fluttuazione massima e media calcolati durante tutte le 18 acquisizioni.

Acquisizione	Fluttuazione max (%)	Fluttuazione media (%)
15 ppr, 0 ostacoli, 2000 rpm	2.61	0.95
15 ppr, 1 ostacolo, 2000 rpm	3.06	0.88
15 ppr, 2 ostacoli, 2000 rpm	2.68	0.89
15 ppr, 0 ostacoli, 4000 rpm	2.66	0.90
15 ppr, 1 ostacolo, 4000 rpm	4.24	0.98
15 ppr, 2 ostacoli, 4000 rpm	2.69	0.88
30 ppr, 0 ostacoli, 2000 rpm	5.70	1.36
30 ppr, 1 ostacolo, 2000 rpm	4.73	1.37
30 ppr, 2 ostacoli, 2000 rpm	5.57	1.31
30 ppr, 0 ostacoli, 4000 rpm	6.59	1.49
30 ppr, 1 ostacolo, 4000 rpm	7.36	1.71
30 ppr, 2 ostacoli, 4000 rpm	4.94	1.36
60 ppr, 0 ostacoli, 2000 rpm	11.28	2.78
60 ppr, 1 ostacolo, 2000 rpm	10.94	2.87
60 ppr, 2 ostacoli, 2000 rpm	11.83	3.24
60 ppr, 0 ostacoli, 4000 rpm	13.84	3.42
60 ppr, 1 ostacolo, 4000 rpm	11.06	3.45
60 ppr, 2 ostacoli, 4000 rpm	16.24	3.95

Tabella 1. Riepilogo fluttuazioni rpm rilevate test effettuati sul banco prova secondario

Nelle figure 34 e 35 vengono riportati i grafici delle fluttuazioni rilevate nelle diverse acquisizioni; in Figura 34 si hanno pari ppr e rpm ma diverso n° di ostacoli, in Figura 35 pari rpm e n° di ostacoli ma diversi ppr.

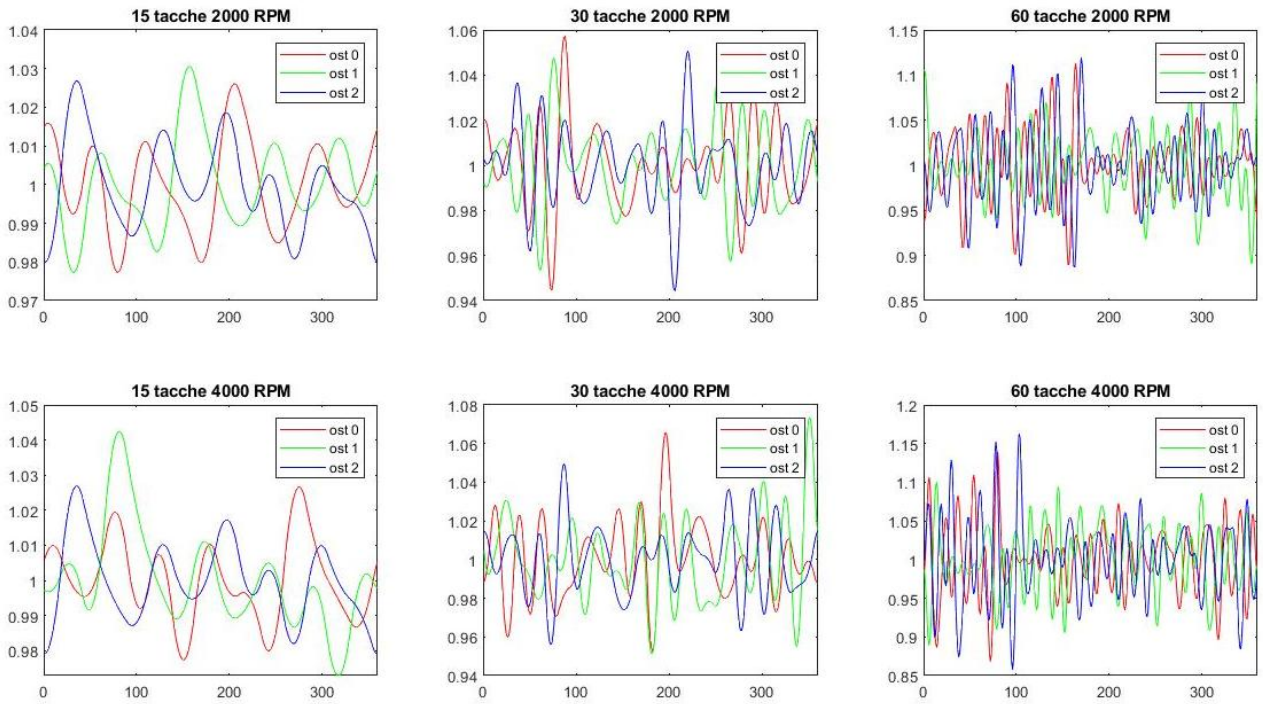


Figura 34. Confronto delle fluttuazioni rilevate nelle diverse acquisizioni a parità di ppr e rpm

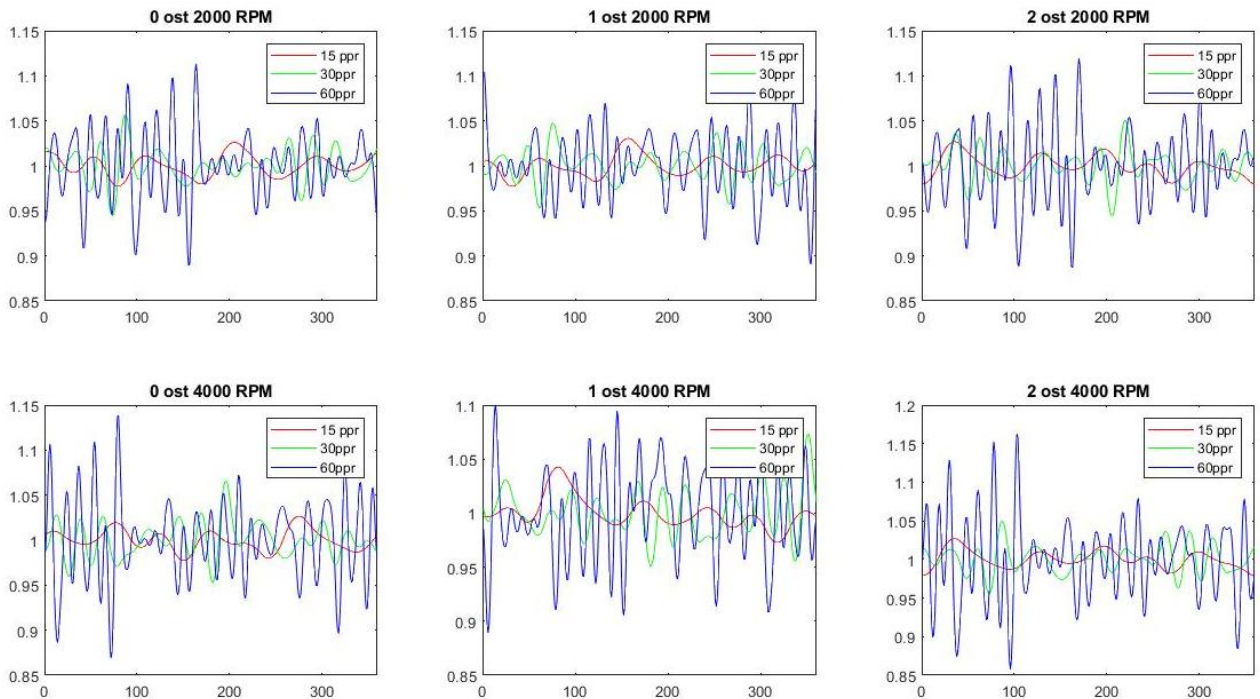


Figura 35. Confronto delle fluttuazioni rilevate nelle diverse acquisizioni a parità di numero di ostacoli e rpm

Inoltre si è voluta osservare la ripetibilità del segnale rpm all'interno dei singoli intervalli di tacche di zero.

```
rpm_me=rpm_me(2:end,:);  
rpm_medie=sum(rpm_me,1)/size(rpm_me,1);  
rpm_normalizzati=rpm_medie/mean(rpm_medie);  
plot(rpm_me');
```

La matrice "rpm_me" (di dimensione n*360) contiene i 360 campioni di rpm per tutti gli "n" intervalli di tacche di zero. È bastato plottare la sua trasposta (rpm_me') per visualizzare le curve rpm dei singoli intervalli in sovrapposizione.

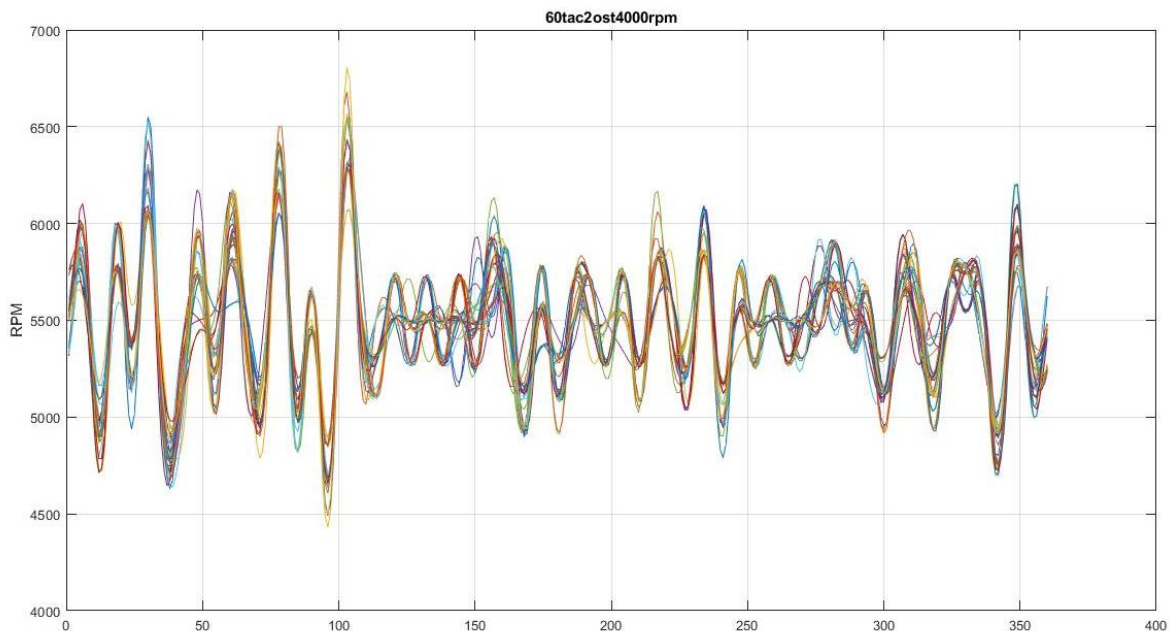


Figura 36. Sovrapposizione dei segnali rpm presi negli intervalli di tacche di zero, acquisizione "60 ppr, 2 ostacoli, 4000 rpm"

Si può notare una buona ripetibilità dei segnali, in particolare nelle zone in cui la variazione di rpm è più repentina.

Questo comportamento si verifica in tutte le 18 acquisizioni.

2.2.4 Problematiche riscontrate

Il principale limite di questo setup di misura è proprio il sensore ad effetto Hall. Esso infatti ha minor robustezza rispetto un encoder angolare. Il secondo limite, non meno importante del primo, è dato dal fatto che il banco prova secondario è installato in un laboratorio frequentato stabilmente dal personale universitario, e a stretto contatto con altre strumentazioni di misura. Ciò ha impedito di raggiungere valori di rpm paragonabili a quelli di reale funzionamento della testata *Desmosedici GP14* per motivi di sicurezza. Queste problematiche sono state superate installando un encoder angolare ad alte prestazioni sul banco principale, come esposto nel capitolo successivo.

Capitolo 3: Seconda acquisizione sul banco principale

3.1 Modifiche apportate al banco

La seconda acquisizione sul banco principale è stata eseguita con una nuova sensoristica. Per garantirne la corretta installazione si sono rese necessarie piccole modifiche del banco prova, in particolare della piastra in alluminio ricavata dal pieno sulla quale è stato fissato l'encoder.



Figura 37. Vecchia piastra



Figura 38. Piastra nella nuova configurazione

3.2 Terza acquisizione

3.2.1 Setup di misura

Durante questa campagna di misura è stato utilizzato un encoder angolare AVL 365X [2], fornito da DMH, accoppiato ad un marker disc con 360 fessure (360 ppr).



Figura 39. Encoder AVL 365X con marker disc dedicato

Il suo funzionamento si basa sul principio di trasmissione della luce. La luce infrarossa viene inviata, attraverso una fibra ottica, in una porta luminosa, passa attraverso un disco marcatore rotante, entra in una seconda fibra ottica e viene convertita in segnali digitali attraverso un convertitore di tensione luminosa.

La risoluzione dell'angolo rilevato è pari a $1 \text{ grado} \pm 0.5$.

L'encoder è stato installato sul supporto menzionato nel capitolo 3.1, mentre il marker disc su un'apposita flangia calettata sull'albero di trasmissione, seguendo le quote di montaggio presenti nel datasheet AVL [1].

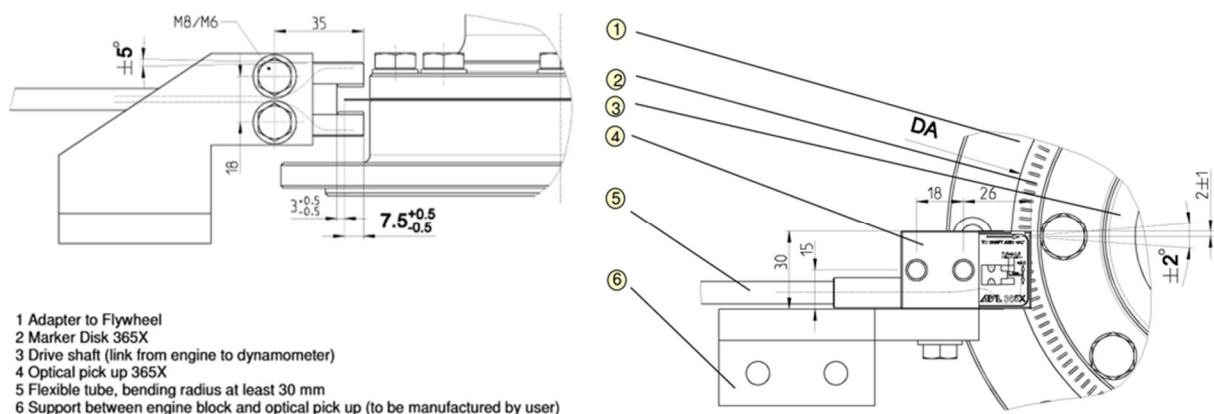


Figura 40. Quote di montaggio Encoder AVL 365X

È stato fondamentale rispettare la quota di 7,5mm di “immersione del disco nel pick-up” per garantire il corretto allineamento tra le fessure del marker disc e le fibre ottiche dell’encoder.

Insieme al sensore e al disco di misura sono stati forniti tutti gli accessori necessari per l’alimentazione del sensore e la trasmissione dei dati.



Figura 41. Connettori (sinistra) e convertitore di impulsi AVL (destra)

I componenti elettronici sono separati dal pick-up ottico tramite fibre ottiche di 2 metri di lunghezza per minimizzare l’influenza del motore, come forti vibrazioni, alta temperatura e interferenze elettriche.

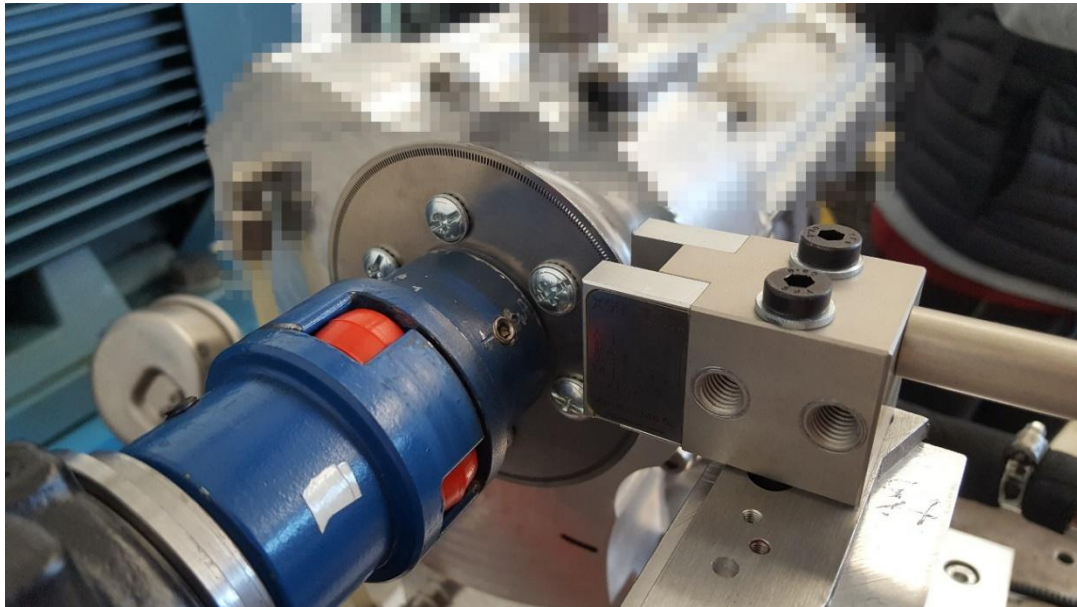


Figura 42. Setup di misura con encoder AVL 365X e marker disc dedicato

Inoltre è stato installato un accelerometro monoassiale PCB PIEZOTRONICS C352C33 sulla superficie del supporto ritto ad omega per monitorare la vibrazione sul banco durante il funzionamento.

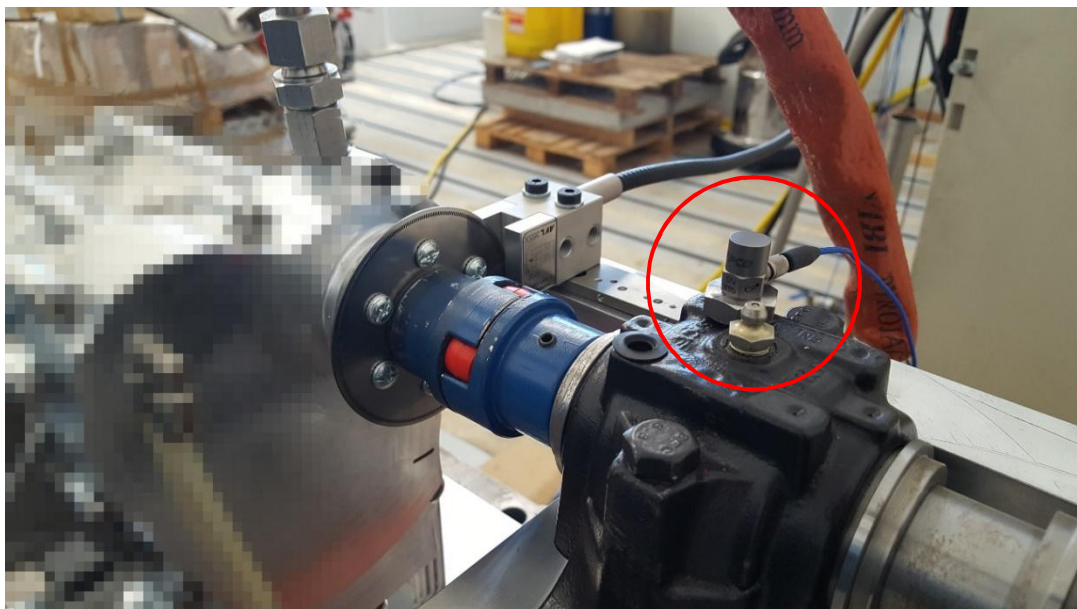


Figura 43. Accelerometro PCB C352C33 posto sul supporto ritto ad omega

3.2.2 Acquisizione

Come hardware di acquisizione è stato utilizzato un *SIEMENS SIMCENTER SCADAS MOBILE* accoppiato con il software *SIEMENS SIMCENTER TESTLAB*.

In questa terza campagna di misura sono state effettuate 5 acquisizioni ai seguenti rpm (riferiti all'albero a camme):

- “n” rpm costanti
- “n” rpm con rampa di salita
- “2n” rpm costanti
- “2,5n” rpm costanti
- “3n” rpm con rampa di salita e discesa

La frequenza di campionamento è pari a 102,4 kHz.

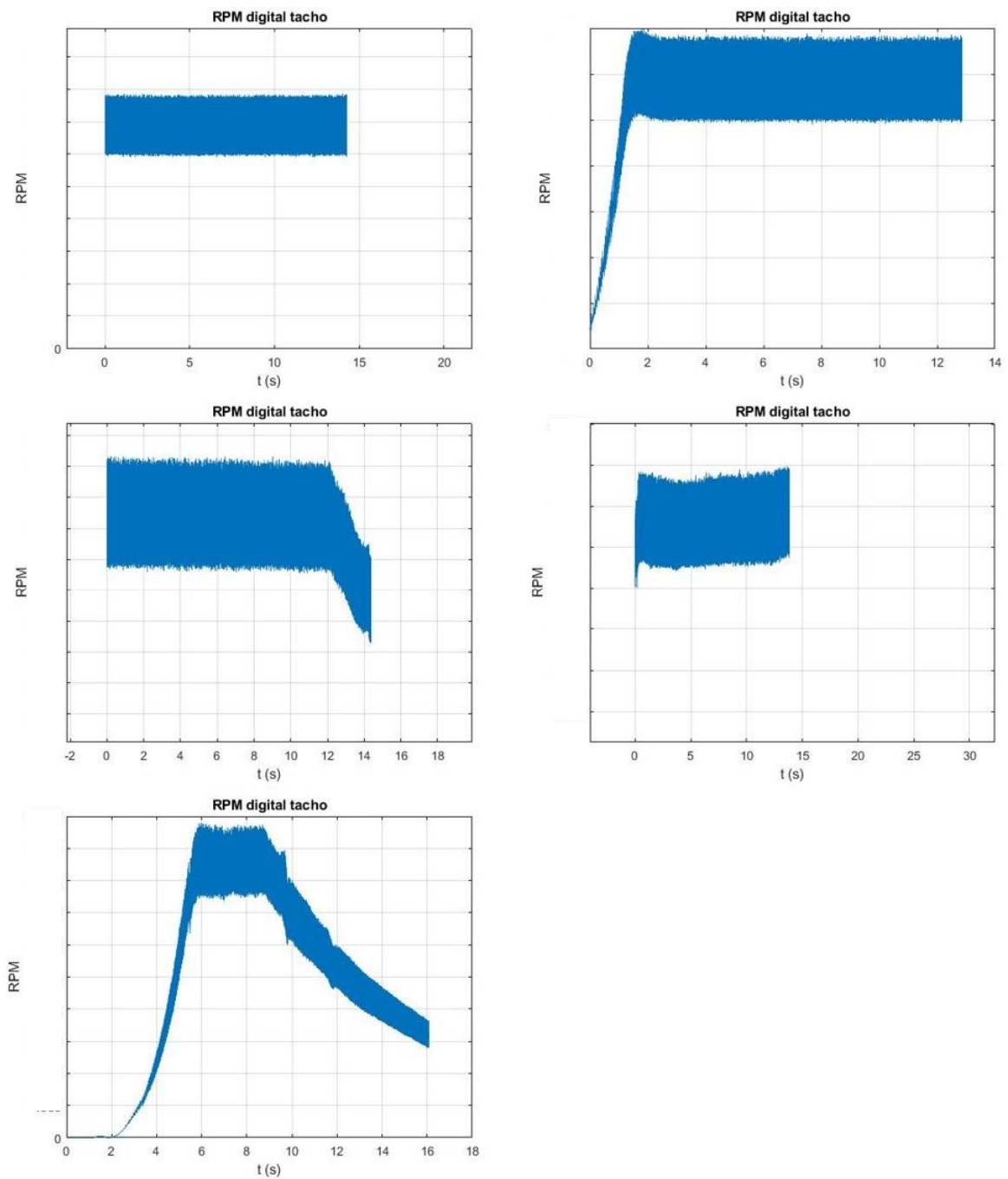


Figura 44. Rampe rpm delle cinque acquisizioni effettuate

3.2.3 Processamento dati

Il codice di elaborazione dati utilizzato in questa campagna di test è lo stesso implementato durante la seconda acquisizione (acquisizione sul banco secondario).

Si è partiti dal segnale TTL digitale degli rpm, opportunamente finestrato, sono stati individuati gli spike rappresentativi il rallentamento/accelerazione dell'albero a camme, e sono state individuate le tacche di zero in prossimità di questi picchi di velocità.

```
rpm_staz=voutf(t_inizio:t_fine);
t_digstaz=t_dig(t_inizio:t_fine);
figure;
plot(t_digstaz,rpm_staz);
bnd2=n;
tacca_int=[];
for i=1:length(rpm_staz)
    if rpm_staz(i)>bnd2
        a=t_digstaz(i);
        tacca_int=[tacca_int a];
    end
end

for i=2:length(tacca_int)
    a=tacca_int(i)-tacca_int(i-1);
    if a<0.0005
        tacca_int(i)=0;
    end
end
tacca_int(tacca_int==0)=[];
```

Il vettore "tacca_int" contiene gli istanti temporali delle tacche di zero i-esime.

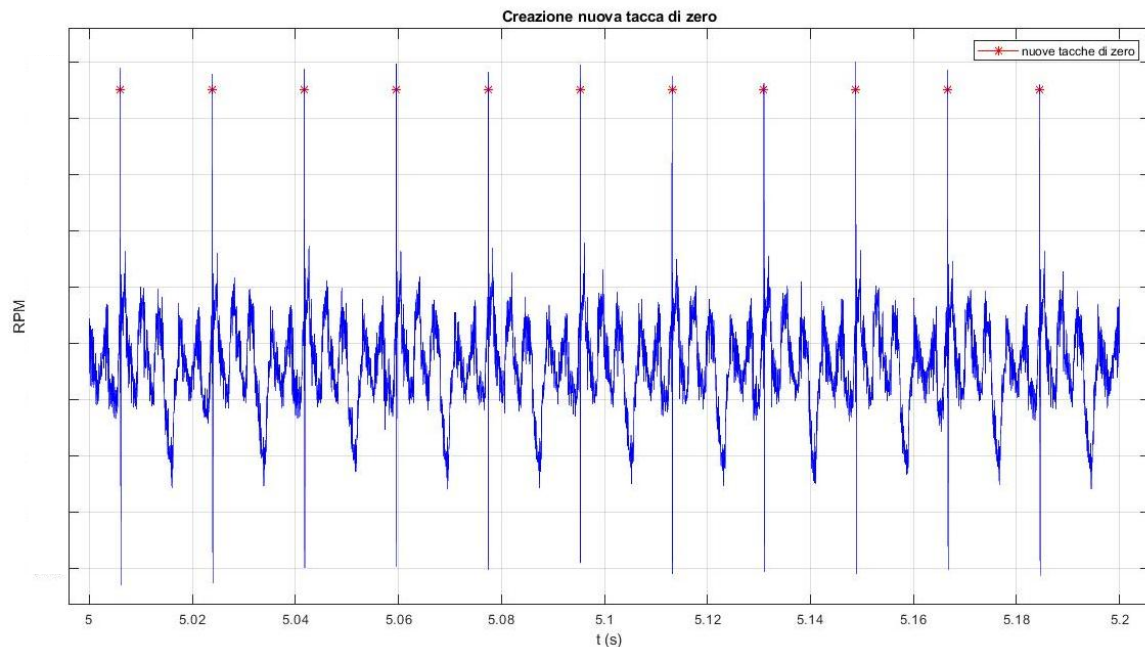


Figura 45. Individuazione della tacca di zero sul segnale rpm digitale

Come illustrato nel paragrafo 2.2.3, il segnale rpm è stato poi ricampionato in base angolo, e successivamente mediato sugli intervalli e normalizzato.

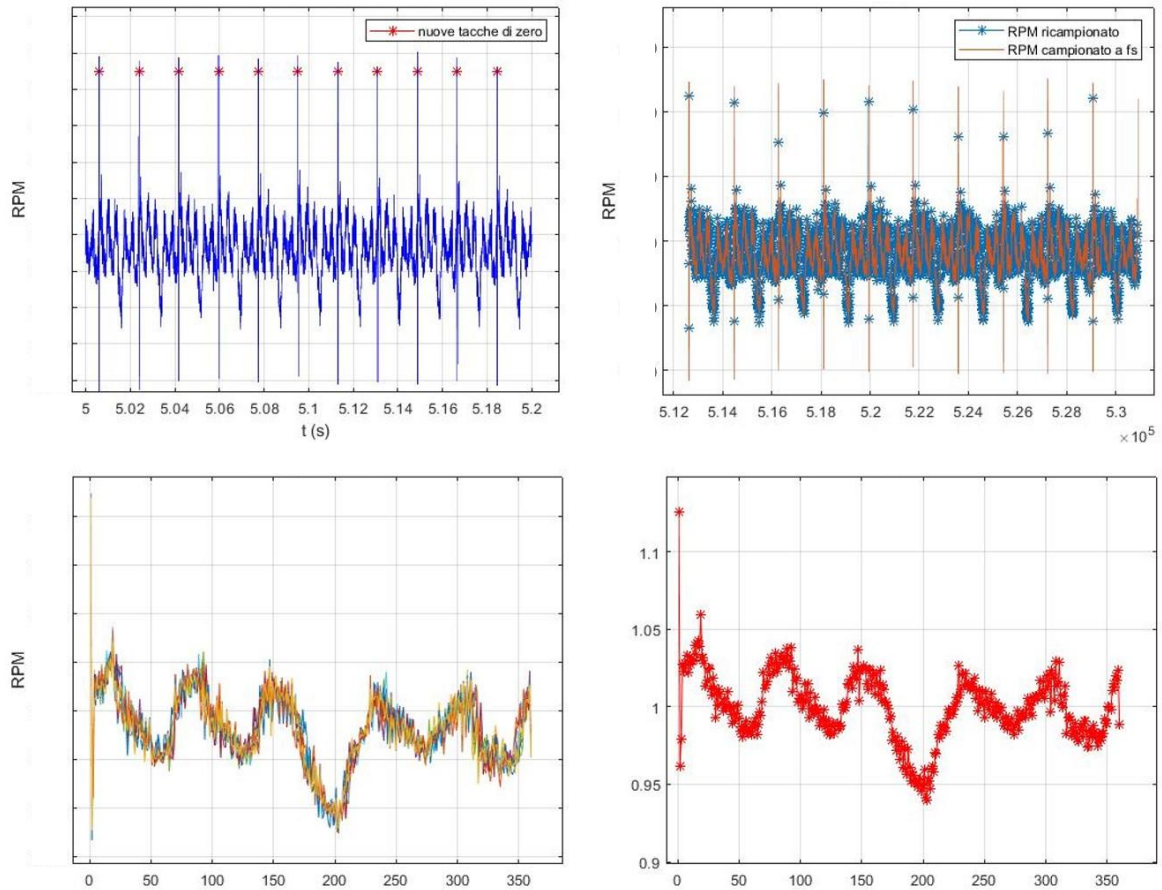


Figura 46. Individuazione della tacca di zero (in alto a sinistra), ricampionamento in base angolo (in alto a destra), sovrapposizione rpm (in basso a sinistra), fluttuazione rpm (in basso a destra) dell'acquisizione "n rpm costanti"

Sono state poi calcolate le fluttuazioni massime e medie per ogni test, riportate nella tabella 2.

Acquisizione	Fluttuazione max (%)	Fluttuazione media (%)
"n" rpm cost	12.53	1.66
"n" rpm runup	15.52	1.67
"2n" rpm cost	10.89	2.17
"2,5n" rpm cost	10.17	1.70
"3n" rpm cost	12.09	0.87

Tabella 2. Valori di fluttuazione rpm dei test effettuati sul banco prova principale

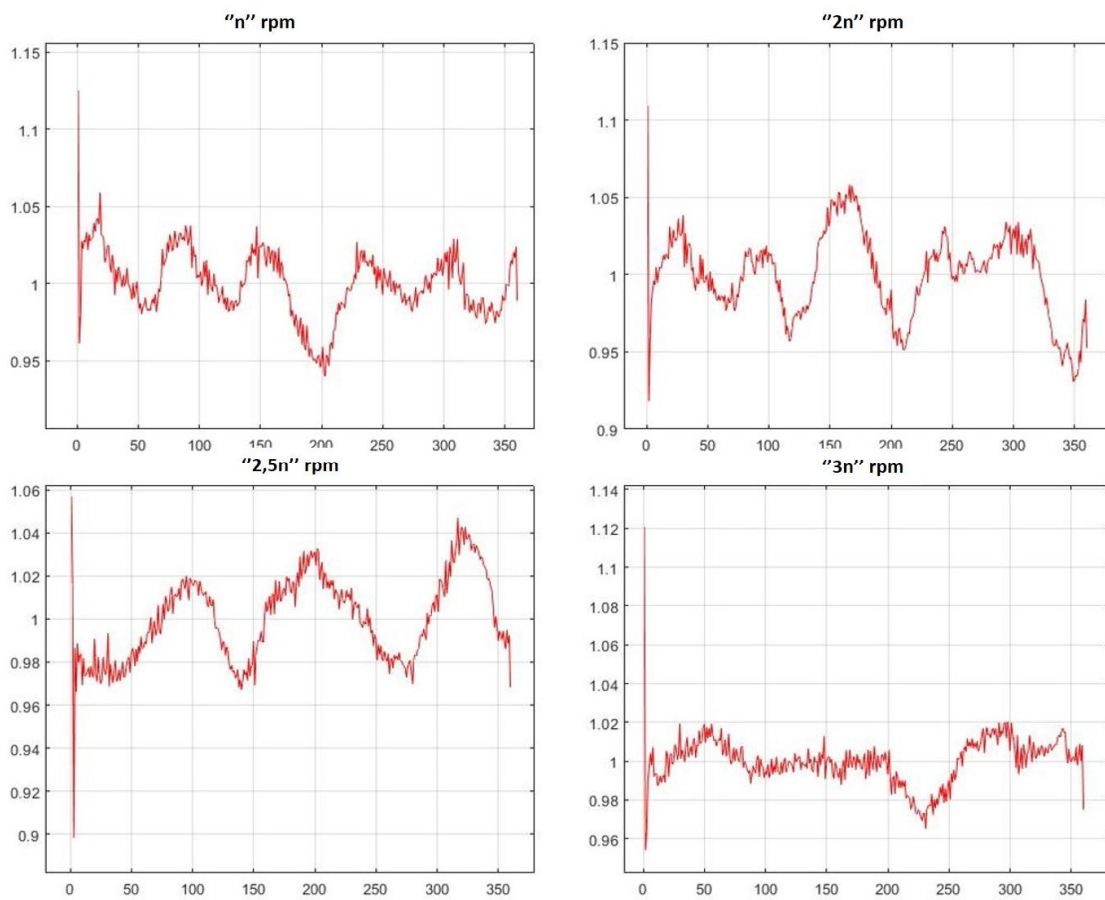


Figura 47. Fluttuazioni del segnale rpm

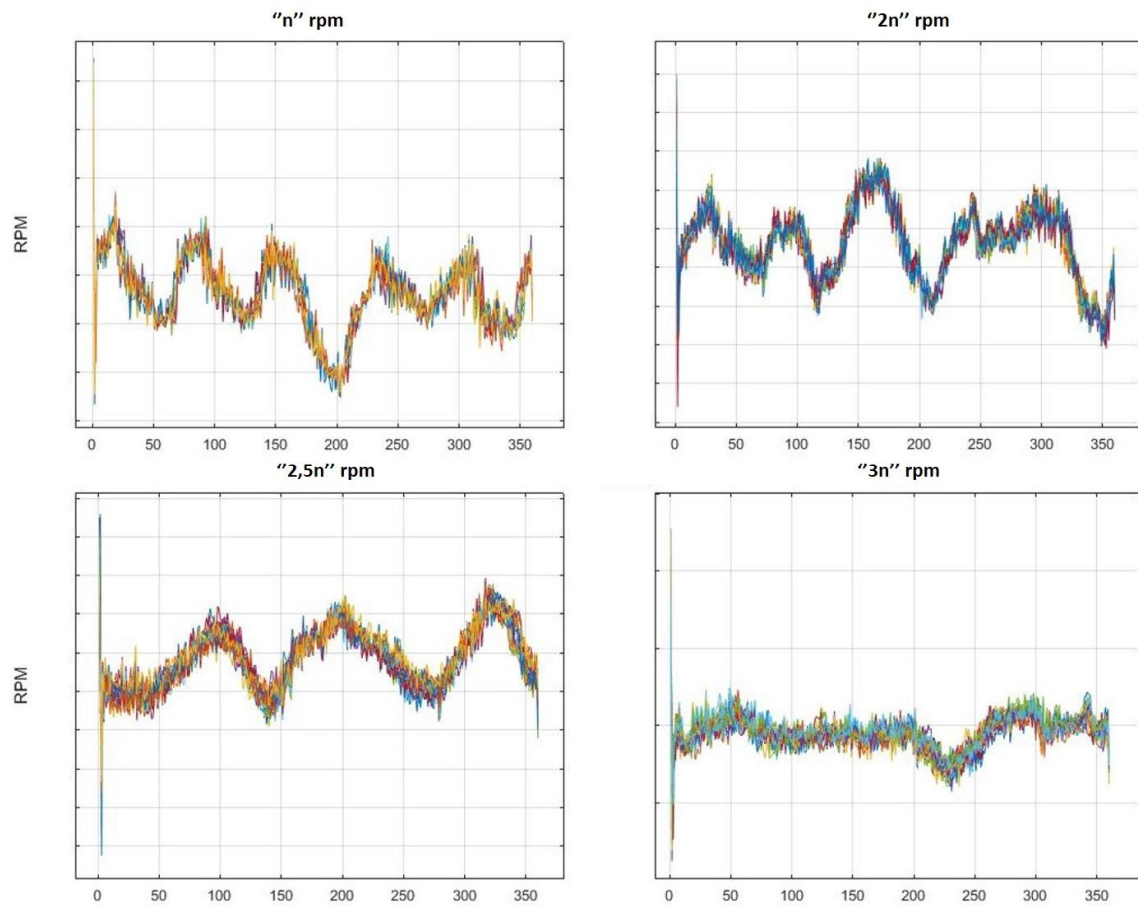


Figura 48. Ripetibilità del segnale rpm negli intervalli della finestra temporale

Anche in quest'ultima campagna di test si è riscontrata una buona ripetibilità del segnale rpm tra un giro e i successivi all'interno della finestra temporale.

Conclusioni e sviluppi futuri

La campagna di test esposta nel Capitolo 2 è stata utile per la scrittura del foglio di calcolo utilizzato nel processamento dei dati dell'encoder AVL. L'individuazione delle oscillazioni torsionali e il calcolo delle fluttuazioni medie e massime sono stati passaggi fondamentali per compiere nuove analisi più approfondite, anche in condizioni di firing. Il lavoro di tesi qui presentato sarà infatti oggetto di successivi studi 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, inoltre si potrebbero confrontare i dati dell'encoder processati nel Capitolo 3 con il modello cinematico dell'alzata valvole.

Bibliografia

- [1] <https://www.avl.com/documents/10138/885965/Mounting+instruction+in+brief+365X.pdf>
- [2] <https://www.avl.com/documents/10138/885965/365X-fact-sheet-english.pdf>
- [3] <http://www.elensrl.it/wp-content/uploads/2010/05/AA020202.pdf>
- [4] “Comparison of torsional vibration measurement techniques” – K.Janssens, L.Britte (LMS International)