Capitolo settimo

Descrizione delle prove condotte e analisi dei risultati ottenuti

7.1 L'analisi delle irregolarità cicliche del motore

Le prove sono state condotte per due regimi di velocità del motore, 3000 giri/minuto e 2000 giri/minuto, e in condizioni di carico massimo e un terzo del carico. Il titolo della miscela prodotta dal carburatore è stato variato attraverso la sostituzione dei getti calibrati del massimo, per le prove a pieno carico, e sia del massimo che del minimo per le prove ai carichi parziali. Di seguito si farà riferimento ai getti utilizzati indicando la misura del diametro espressa in centesimi di millimetro.

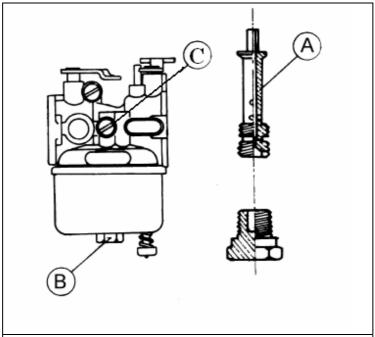


Figura 7.1 – Il carburatore FHC1 20-16G montato sul motore. Si possono vedere il getto del massimo (A), la sede del getto del massimo (B) e il getto del minmo (C).

Mediante la strumentazione "AVL 619 Indimeter" sono stati acquisiti i segnali derivanti dai seguenti sensori:

- Sensore ottico di posizione angolare dell'albero motore.
- Sensore UEGO, per la determinazione del titolo di miscela.
- Sensore di pressione.

Il campionamento dei segnali del sensore UEGO e del sensore di pressione è stato eseguito dall' "AVL 619 Indimeter" in corrispondenza degli impulsi inviati, ogni due decimi di grado di rotazione dell'albero motore, dall'encoder ottico.

Per ogni prova effettuata sono stati memorizzati cinquanta cicli consecutivi. L'analisi della dispersione ha riguardato tre parametri ricavabili dalla curva di pressione: la pressione massima, l'angolo di manovella relativo alla pressione massima e la pressione media indicata. I cicli acquisiti sono stati memorizzati in files in formato ASCII e analizzati mediante un'apposita funzione scritta nel linguaggio dell'editor del Software Matlab[®] e denominata *analisi dispersione*. Di seguito se ne illustrano le caratteristiche.

La funzione è in grado di ricevere i files in formato ASCII relativi ai 50 cicli di prova e fornisce in uscita le seguenti grandezze, calcolate per ognuno dei tre parametri analizzati:

- Valore massimo, minimo e medio del parametro nei cinquanta cicli analizzati;
- Valore dello scarto quadratico medio del parametro, definito come:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (X_i - \overline{X})^2}{N}} ,$$

dove X_i è il valore del parametro all'i-esima lettura, in questo caso l'i-esimo ciclo, \overline{X} è il valore medio del parametro negli N cicli ed N il numero di cicli esaminati;

- Coefficiente di variazione del parametro, definito nel seguente modo:

$$COV = \frac{\sigma}{X} * 100.$$

La funzione fornisce inoltre il valore medio del titolo di miscela nei cinquanta cicli acquisiti. Dal momento che il valore di lambda, per un dato regime di funzionamento di carico e velocità del motore e a parità di getto utilizzato, non subiva, nella durata dell'acquisizione, variazioni tali da influire sui risultati, non si è ritenuto necessario procedere ad una misura statistica delle sue oscillazioni.

Di seguito si descrive la sottofunzione *imep*, utilizzata dalla funzione principale *analisi dispersione* per il calcolo della pressione media indicata in un ciclo acquisito.

La sottofunzione riceve in ingresso dalla funzione principale due vettori colonna contenenti i valori della posizione angolare e della relativa pressione durante un ciclo. La sottofunzione, in base ai dati geometrici del motore, associa ad ogni valore angolare la relativa posizione del pistone mediante la quale calcola il volume del cilindro. Attraverso i valori di pressione e gli

incrementi di volume viene calcolato il lavoro indicato. La pressione media indicata viene poi ottenuta dividendo il lavoro indicato per la cilindrata del motore.

Durante le prove sono stati riscontrati due problemi, entrambi determinati dalla scarsa attitudine del motore a funzionare al di fuori delle condizioni stabilite dal Costruttore.

Il primo problema ha riguardato il sistema di accensione. Il motore, nel campo delle miscele povere, presentava un comportamento molto irregolare: le combustioni erano parecchio ritardate e si riscontravano frequenti misfire, a causa del sistema di accensione poco performante presente sul motore. E' stato quindi necessario sostituire quest'ultimo con un nuovo sistema, più efficiente e ad anticipo variabile, costituito da una centralina elettronica di comando e da un pick up sensibile al magnete presente sul volano, e alimentato tramite una batteria esterna. Si è poi provveduto a testare il funzionamento del motore con le quattro configurazioni di anticipo realizzate dalla centralina più due ulteriori, ottenute variando la posizione del pick up. Per quanto riguarda il funzionamento a pieno carico, è stato scelto un anticipo di 14°. Questo valore non era quello che forniva le potenze più elevate; in caso di accensioni più anticipate, però, l'esame dell'andamento della pressione mostrava la presenza di un'incipiente detonazione. Per i carichi parziali, non sussistendo problemi di detonazione, è stato scelto l'anticipo che garantiva la maggiore potenza, cioè 24°.

L'altro problema è stato riscontrato nelle prove a 2000 giri/minuto a pieno carico: l'elevato ritardo nella chiusura della valvola di aspirazione determinava il rigurgito di parte della miscela aspirata, con la conseguenza che l'aria veniva carburata più volte e pertanto era impossibile, con i getti a disposizione, ottenere miscele sufficientemente magre. Occorre ricordare che questo motore, realizzato per un funzionamento stazionario, era ottimizzato esclusivamente per il regime di 3000 giri/minuto. Per poter estendere le prove a 2000 giri/minuto e carico massimo al campo delle miscele magre si è reso pertanto necessario far realizzare appositamente dal Costruttore del carburatore dei getti con ugelli più piccoli di quelli di serie.

Nel paragrafo successivo si riportano i risultati dell'analisi statistica dei cicli.

7.1.1 Risultati dell'analisi statistica dei cicli acquisiti

7.1.1.1 Risultati a 3000 giri con carico massimo anticipo di accensione 14°

Prova con getto del massimo = 62

Il valore medio di lambda è pari a 1,442.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima [bar]	Sigma Pmax	COV Pmax
22,2350	17,5936	16,4100	1,5008	8,5303

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
5,4541	3,2431	1,4244	0,8767	27,0320

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
20,2	5,1360	-2	5,2947	103,0908

Prova con getto del massimo = 64

Il valore medio di lambda è pari a 1,2089

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
33,35	23,6777	18,7320	3,1726	13,3992

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
5,9674	5,3911	4,2786	0,3583	6,6462

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
23,8	17,86	10,4	2,6666	14,9306

Il valore medio di lambda è pari a 1,15.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
33,528	27,2161	21,2720	3,2294	11,8657

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
6,4526	6,0918	5,4516	0,263	4,37

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
26,2	19,044	15	1,9977	10,49

Prova con getto del massimo = 74

Il valore medio di lambda è pari a 1,07

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
42,321	32,3727	23,338	3,7792	11,6739

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
6,9235	6,5803	6,0354	0,1955	3,01

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
24,6	17,204	12,2	2,2942	13,3351

Il valore medio di lambda è pari a 0,95.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
46,041	35,3789	27,043	3,6237	10,2427

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
6,8576	6,6265	6,2601	0,1147	1,75

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
19,6	15,02	9	2,0954	13,9509

Prova con getto del massimo = 86

Il valore medio di lambda è pari a 0,88.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
45,583	38,4814	30,779	3,2056	8,3302

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
6,8677	6,6852	6,4744	0,0772	1,16

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
18,2	13,7	9	1,9222	14,0306

Il valore medio di lambda è pari a 0,84.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
46,554	37,6254	29,723	3,1497	8,3712

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
6,8618	6,7349	6,4836	0,0797	1,21

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
19	14,16	8,6	2,1942	15,4956

7.1.1.2 Risultati a 2000 giri con carico massimo anticipo di accensione 14°

Prova con getto del massimo = 62

Il valore medio di lambda è pari a 1,2618.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
29,87	22,8288	16,1070	3,5099	15,3748

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
6,4583	5,7283	4,2172	0,5286	9,2281

Angolo Pmax	Angolo Pmax	Angolo Pmax	Sigma	COV Angolo
massimo	medio	minimo	Angolo Pmax	Pmax
25	19,076	6,6	3,5929	18,8344

Prova con getto del massimo = 64

Il valore medio di lambda è pari a 1,1447

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
36,061	30,1878	24,6740	2,6595	8,8331

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
6,6297	6,2109	5,7293	0,1841	2,9648

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
21	17,848	14,2	1,6236	9,0969

Il valore medio di lambda è pari a 1,0837.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
41,8630	33,7811	28,511	3,235	9,5763

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
7,3044	6,9715	6,59	0,1562	2,2411

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
20,2	16,82	13	1,9184	11,4057

Prova con getto del massimo = 74

Il valore medio di lambda è pari a 0,9545

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
46,544	39,8027	34,709	2,9162	7,3267

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
7,9065	7,7009	7,5160	0,0866	1,1251

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
19,6	15,4040	10,2	2,1509	13,6933

Il valore medio di lambda è pari a 0,8799.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
47,105	41,2733	35,7420	2,8573	6,9228

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
7,2769	7,086	6,8956	0,0771	1,088

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
16,2	12,612	9	1,8742	14,8605

Prova con getto del massimo = 86

Il valore medio di lambda è pari a 0,7772.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
48,263	40,0746	33,862	3,5476	8,8524

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
7,2842	7,014	6,6715	0,1052	1,4996

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
17,4	13,152	7,2	2,4405	18,5562

7.1.1.3 Risultati a 3000 giri con carico minimo anticipo di accensione 24°

Prova con getto del massimo = 68

Il valore medio di lambda è pari a 1,3221.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
22,5610	12,3715	8,9920	3,3199	26,8348

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
3,3298	1,8483	-0,3717	0,9645	52,1831

Angolo Pi	nax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo			minimo	Pmax	Pmax
18		9,284	-3,4	6,0294	64,9441

Prova con getto del massimo = 72

Il valore medio di lambda è pari a 1,2311.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
17,948	11,2717	8,7130	1,8941	16,8040

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
3,0739	2,1086	-1,1410	0,7098	33,6624

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
20,6	12,1160	-4,4	6,2462	51,553

Il valore medio di lambda è pari a 1,1206

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
18,616	12,1091	8,8910	2,1706	17,9253

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
3,0256	2,3937	1,6551	0,2901	12,1184

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
22,8	16,236	6,4	3,5518	21,8763

Prova con getto del massimo = 76

Il valore medio di lambda è pari a 1,0455.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
19,276	14,4169	10,95	1,9445	13,488

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
2,9233	2,4868	1,9677	0,2068	8,3149

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
20,2	14,828	9,8	2,2659	15,2814

Il valore medio di lambda è pari a 0,9003.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
17,42	14,7472	12,317	1,2571	8,5245

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
2,5854	2,4776	2,361	0,0479	1,9334

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
20,4	15,868	12,8	1,7954	11,3144

Prova con getto del massimo = 86

Il valore medio di lambda è pari a 0,7876.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
19,99	16,0803	13,303	1,3043	8,1113

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
2,4753	2,4023	2,2813	0,0458	1,908

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
18,6	13,56	8,2	1,83	13,4954

Il valore medio di lambda è pari a 0,7833.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
21,218	17,4949	14,08	1,6677	9,5326

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
2,4166	2,3082	2,1233	0,0549	2,3764

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
16	11,7440	6,6	2,1656	18,4397

7.1.1.4 Risultati a 2000 giri con carico minimo anticipo di accensione 24°

Prova con getto del massimo = 62 minimo=35.

Il valore medio di lambda è pari a 1,3117.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
15,501	10,9962	9,42	1,2810	11,6492

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
3,0528	2,1949	1,1401	0,4581	20,8722

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
18,4	10,804	0,2	5,2805	48,8757

Prova con getto del massimo = 64 minimo=35.

Il valore medio di lambda è pari a 1,1743.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
17,124	12,5813	9,474	1,69	13,4326

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
3,2226	2,6423	1,8958	0,2481	9,3886

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
21,6	17,308	10,2	2,613	14,5326

Prova con getto del massimo = 68 minimo=35.

Il valore medio di lambda è pari a 1,1493

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
13,9870	11,5175	8,7520	1,2364	10,7326

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
2,5095	2,3271	2,0039	0,1333	5,7287

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
23	17,98	12	1,9148	10,2112

Prova con getto del massimo = 72 minimo=35.

Il valore medio di lambda è pari a 1,0715

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
15,649	12,65	9,583	1,4049	11,1062

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
2,7103	2,5322	2,2757	0,1020	5,0279

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
23,8	18,7520	14,8	2,3840	13,7741

Prova con getto del massimo = 76 minimo=35.

Il valore medio di lambda è pari a 0,8561

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
17,07	15,4841	12,107	1,0141	6,5499

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
2,4145	2,3244	2,2527	0,0339	1,4568

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
18,6	14,7920	11,4	1,4344	9,6972

Prova con getto del massimo = 80 minimo=40.

Il valore medio di lambda è pari a 0,7662.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
17,94	15,4607	13	0,9356	6,0512

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
2,5769	2,4974	2,3484	0,0503	2,0124

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
19,6	14,9520	11,4	1,5113	10,1078

Prova con getto del massimo = 86 minimo=48.

Il valore medio di lambda è pari a 0,679.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
18,305	13,8239	8,6350	1,7329	12,5357

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
2,6745	2,5204	2,0629	0,1018	4,0386

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
23,8	16,888	12	2,2525	13,338

Prova con getto del massimo = 90 minimo=48.

Il valore medio di lambda è pari a 0,6557.

Pmax massima [bar]	Pmax media [bar]	Pmax minima	Sigma Pmax	COV Pmax
		[bar]		
15,75	13,2414	10,1030	1,2689	9,5827

Imep massima [bar]	Imep media [bar]	Imep minima [bar]	Sigma Imep	COV Imep
2,803	2,5829	2,1722	0,1157	4,4785

Angolo Pmax	Angolo Pmax medio	Angolo Pmax	Sigma Angolo	COV Angolo
massimo		minimo	Pmax	Pmax
21,2	17,612	12,4	1,8188	10,9484

7.1.2 Analisi delle irregolarità nella pressione media indicata

La grandezza che ha mostrato la correlazione più interessante col titolo di miscela è stata la pressione media indicata.

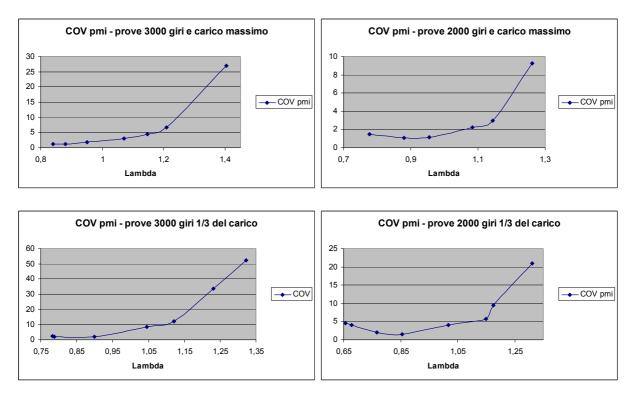


Figura 7.2- Andamento della dispersione ciclica nella pressione media indicata per le quattro condizioni di prova.

Come si può vedere (*figura 7.2*) le irregolarità cicliche nella *pmi* hanno un andamento monotono crescente con l'impoverimento della miscela, per valori di lambda superiori a 0,85 circa.

Dalla definizione di pressione media indicata (Paragrafo 1.1) è facile comprendere come questa grandezza sia una misura indiretta del lavoro prodotto dal gas. Eventuali irregolarità nel suo andamento si traducono quindi in una variazione dell'energia trasmessa dallo stantuffo all'albero a gomiti di ciclo in ciclo e, di conseguenza, in oscillazioni nella velocità angolare del motore.

Quando il motore si trova in condizioni di funzionamento stazionario l'equazione seguente esprime l'equilibrio dei lavori calcolato per il ciclo medio:

$$\underline{L}_{im} + \underline{L}_r + \underline{L}_{att} + \underline{L}_{aux} = 0 ;$$

dove L_{im} il lavoro indicato medio, Lr quello della coppia resistente, L_{att} il lavoro delle forze di attrito e L_{aux} quello dell'azionamento di organi ausiliari.

Per il ciclo generico vale la seguente:

$$L_i + L_r + L_{att} + L_{aux} = \Delta \frac{1}{2} J \overline{\omega}^2;$$

dove J rappresenta l'inerzia del motore ridotta all'albero, ω è la velocità angolare del motore mediata in un ciclo, L_i il lavoro indicato e dove i lavori resistenti e quello relativo agli attriti sono supposti costanti per piccole variazioni di velocità.

Se a quest'ultima equazione si sottrae membro a membro l'equazione precedente si ottiene la relazione cercata, cioè quella che lega le variazioni nel lavoro indicato alle oscillazioni di velocità:

$$L_i - L_{im} = \Delta (\frac{1}{2} J \omega^2)$$
.

Estendendo la relazione a più cicli consecutivi si ottiene:

$$\Delta L_i = \frac{1}{2} J(\overline{\omega}^2 - \overline{\omega}_m^2) ;$$

dove $\overline{\omega}_m$ è la velocità angolare del motore mediata in tutti i cicli considerati.

Dal momento che (*figura 3*) l'entità delle irregolarità, per un dato titolo di miscela, varia in funzione del carico e del numero di giri, una centralina che operi con una misura semplice delle irregolarità necessita di conoscere, oltre alla velocità di rotazione, la posizione della farfalla, per scegliere quali valori mappati debba confrontare i valori di irregolarità rilevati. Al fine di ridurre al massimo la quantità di sensori e di memoria necessari, è stata ricercata una relazione fra titolo ed irregolarità che valesse indipendentemente dalle condizioni di funzionamento del motore. Un risultato interessante è emerso dal confronto fra l'irregolarità per un dato titolo e quella minima allo stesso regime e carico.

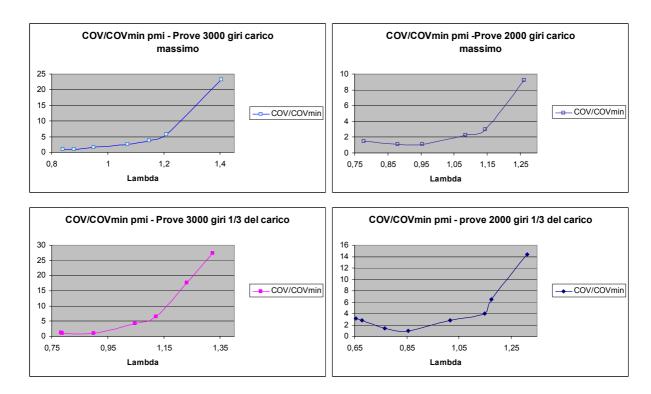


Figura 7.3 - Andamento del rapporto tra irregolarità in funzione del titolo e irregolarità minima per le quattro condizioni di prova.

Dalla figura 7.3 si può vedere come questo rapporto, con la parziale eccezione del funzionamento a 3000 giri e 1/3 del carico, sia più o meno lo stesso in ogni condizione di prova: ad esempio ad un'irregolarità 10 volte maggiore di quella minima corrisponde sempre un valore di lambda pari ad 1,25. Lo stesso criterio, applicato al caso di 3000 giri carico parziale, porta ad un titolo leggermente meno povero, ma comunque accettabile.

La logica di controllo prevede in questo caso che la centralina, ad intervalli regolari, agisca sul carburatore in modo da portare il motore nelle condizioni di minima irregolarità e, una volta memorizzata l'entità di quest'ultima, utilizzi questo valore come termine di confronto. E' interessante rilevare come questa strategia consenta anche di rendere l'ottimizzazione del titolo indipendente dall'invecchiamento del motore. L'anzianità del motore può infatti causare un aumento delle irregolarità (si pensi ad esempio all'usura della candela): questa logica di controllo, dal momento che non fa riferimento ad una mappatura, è in grado di adeguarsi alle mutate condizioni.

7.1.2.1 Stima dell'effetto delle irregolarità nella pressione media indicata sui tempi rilevati da una centralina di controllo

L'equazione che lega le variazioni nel lavoro indicato alle oscillazioni di velocità ottenuta precedente può essere espressa anche facendo riferimento alla frequenza di passaggio del segnale di un pick up, rilevato una volta ogni due giri:

$$\frac{1}{2}\overline{J}((2\pi f)^{2}-(2\pi f_{m})^{2})=\Delta L_{i},$$

oppure al tempo che intercorre tra i due passaggi¹:

$$2\pi^{2}\overline{J}(\frac{1}{T^{2}} - \frac{1}{T_{m}^{2}}) = \Delta L_{i}.$$
 (7.1)

L'equazione trovata è stata utilizzata per stimare l'effetto delle irregolarità nel lavoro indicato sulla durata dei cicli, ovvero la grandezza misurata dalla centralina.

Per poter procedere al calcolo è stato necessario misurare il momento d'inerzia medio del motore. Il motore è stato smontato e sono state misurate le masse dell'albero a gomito, della biella, del pistone e del volano. Il contributo della distribuzione, dal momento che l'albero a camme era in plastica e le aste e i bilancieri molto sottili, è stato trascurato.

Il volano, di 3,24 Kg, è stato approssimato ad un disco di diametro pari a 17 cm.

L'albero, di 1,317 Kg, è stato scomposto in tre elementi:

- Un elemento cilindrico non eccentrico di diametro 2 cm e lunghezza di 18 cm.
- Un elemento cilindrico eccentrico di diametro 2 cm e lunghezza 7 cm. Questo elemento rappresenta il perno di manovella, l'eccentricità è pari a 2,45 cm.
- Due dischi eccentrici (i contrappesi). L'eccentricità dei contrappesi è stata calcolata supponendo l'albero equilibrato staticamente. La massa dei contrappesi è stata calcolata come differenza fra quella totale dell'albero, risultante dalla misura diretta, e quella dei due elementi cilindrici, calcolata considerando la densità dell'acciaio pari a 7,8 Kg/dm³.

¹ Occorre precisare che per rilevare le oscillazioni dovute alle irregolarità nel lavoro indicato la misura deve essere riferita al ciclo. Eseguendo una confronto tra le velocità di giri successivi, infatti, la centralina, dal momento che si fa riferimento ad un motore a quattro tempi, rileverebbe anche le oscillazioni fra giro attivo e passivo.

La biella è stata schematizzata come un sistema di due masse m_a ed m_b, posizionate rispettivamente in corrispondenza dei centri della testa e del piede, cioè i punti le cui velocità sono facilmente determinabili, ed un momento d'inerzia puro J₀. Le masse del piede (47 g) e della testa di biella (60 g) sono state determinate sostenendo un'estremità della biella e appoggiando l'altra al piatto della bilancia avendo cura di mantenere orizzontale l'elemento. Il contributo inerziale della massa m_a è stato attribuito alla parte rotante del manovellismo, mentre quello della massa m_b è stato sommato a quello del pistone, ovvero la parte traslante. La massa del pistone è risultata 0,195 Kg.

L'equazione per il calcolo dell'inerzia della parte traslante è la seguente:

$$J_{t} = (m_{p} + m_{b} - \frac{J_{0}}{I^{2}})r^{2}sen^{2}\varphi;$$

dove l è la lunghezza della biella, r il raggio di manovella e ϕ l'angolo di manovella. Data la difficoltà di calcolare il momento d'inerzia puro J_0 , è stato calcolato il rapporto fra le masse della testa e della biella ed è stato inserito come termine di correzione nella formula relativa al caso della biella prismatica, dove $m_a = m_b$. Il valore medio dell'inerzia è stato ottenuto numericamente mediando i valori di J_t (ϕ) per ϕ = 1,2,3, ...,360°.

La tabella 7.1 riporta i contributi dei singoli elementi e l'inerzia totale del sistema.

Inerzia volano	0,0117045
Inerzia parte non eccentrica albero a gomiti	2,2054E-05
Inerzia perno di manovella + semibiella	7,71889E-05
Inerzia contrappesi	4,62986E-05
Inerzia parte traslante	6,88463E-05
Inerzia totale	0,011841699

Tabella 7.1 Valori delle inerzie espresse in Kgm²

Una volta conosciuta l'inerzia media del motore è stato possibile procedere alla stima dell'ampiezza delle oscillazioni nei tempi rilevati dalla centralina.

Dagli scarti quadratici medi sulla pressione media indicata, ottenuti dalle prove precedenti, sono stati ricavati quelli sul lavoro indicato. A questo punto, attraverso l'equazione 7.1 sono state calcolate le oscillazioni sui tempi. Di seguito si presentano i risultati ottenuti.

Prove a 3000 giri/minuto e carico massimo

Ad una velocità di 3000 giri/minuto corrisponde una durata media di ciclo pari a 0,04 secondi.

Lambda	Sigma Li [Nm]	Tempo [ms]	Δt [μs]	Δt [μs] - prove 3000 giri/'1 carico massimo
0,84	1,55415	39,978741	21,25949	250
0,88	1,5054	39,979407	20,59314	150
0,95	2,23665	39,969415	30,58482	100 Δt [μs]
1,07	3,81225	39,947912	52,08811	50
1,15	5,1285	39,929975	70,0253	0,8 1 1,2 1,4
1,2089	6,98685	39,904691	95,30886	Lambda
1,442	17,09565	39,767993	232,0067	

Tabella 7.2 – Ampiezza delle oscillazioni rispetto al tempo medio di ciclo relative alle prove a 3000 giri/minuto e carico massimo.

Prove a 2000 giri/minuto e carico massimo

Ad una velocità di 2000 giri/minuto corrisponde una durata media di ciclo pari a 0,06 secondi.

Lambda	Sigma Li [Nm]	Tempo [ms]	Δt [μs]	Δt [μs] - prove 2000 giri/'1 carico massimo
0,7772	2,0514	59,905441	94,55897	500 450 400
0,8799	1,50345	59,930655	69,34507	350
0,9545	1,6887	59,922127	77,8729	250 200 150 Δt [μs]
1,0837	3,0459	59,85976	140,2397	100 50 0
1,1477	3,58995	59,834814	165,1855	0,75 0,95 1,15 Lambda
1,2618	10,3077	59,529339	470,6609	

Tabella 7.3 – Ampiezza delle oscillazioni rispetto al tempo medio di ciclo relative alle prove a 2000 giri/minuto e carico massimo.

Lambda	Sigma Li [Nm]	Tempo [ms]	Δt [μs]	Δt [μs] - prove 3000 giri/'1 1/3 del carico
0,7833	1,07055	39,985352	14,64787	300
0,7876	0,8931	39,987779	12,22101	250 200
0,9003	0,93405	39,987219	12,7811	150 Δt [μs]
1,0455	4,0326	39,944907	55,09262	50
1,1206	5,65695	39,92278	77,21995	0,75 0,95 1,15 1,35
1,2311	13,8411	39,81185	188,15	Lambda
1,3221	18,80775	39,74498	255,02	

Tabella 7.4 – Ampiezza delle oscillazioni rispetto al tempo medio di ciclo relative alle prove a 3000 giri/minuto e carico parziale.

Prove a 2000 giri/minuto e 1/3 del carico

Lambda	Sigma Li	Tempo	A4 F 7	Δt [μs] - prove 2000 giri/'1 1/3 del
	[Nm]	[ms]	Δt [μs]	carico
0,7662	0,98085	59,954732	45,26796	450 400 350
0,8561	0,66105	59,96948	30,51988	300
1,0715	1,989	59,908311	91,68924	250 200 150
1,1493	2,59935	59,880259	119,7411	100 50
1,1743	4,83795	59,777709	222,2914	0,75 0,95 1,15 1,35 Lambda
1,3117	8,93295	59,591472	408,5278	Lambua

Tabella 7.5 – Ampiezza delle oscillazioni rispetto al tempo medio di ciclo relative alle prove a 2000 giri/minuto e carico massimo.

Analogamente al caso della pressione media indicata, è stato calcolato il rapporto fra l'irregolarità minima e quella relativa al titolo di miscela generico in termini di tempo. I risultati sono illustrati nella figura 7.4.

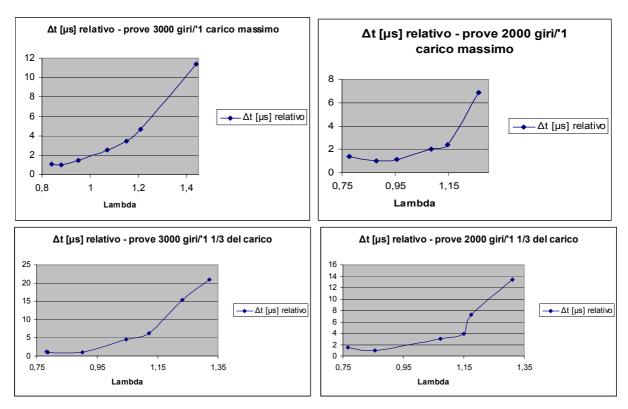


Figura 7.4 – Andamento del rapporto fra l'oscillazione minima e quella relativa al titolo generico

Anche in questo caso si riscontrano curve simili, con la parziale eccezione delle prove a 3000 giri/minuto e un terzo del carico: è possibile osservare come, ad un'irregolarità otto volte più grande di quella minima, corrisponda un valore di lambda vicino a 1,25.

7.1.3 Analisi delle irregolarità nel valore e nella collocazione angolare del picco massimo di pressione

Gli andamenti delle irregolarità nei valori del massimo di pressione e della sua collocazione angolare hanno mostrato risultati meno significativi.

L'andamento del coefficiente di variazione del valore della pressione massima per le quattro condizioni di prova è riportato in figura 7.5.

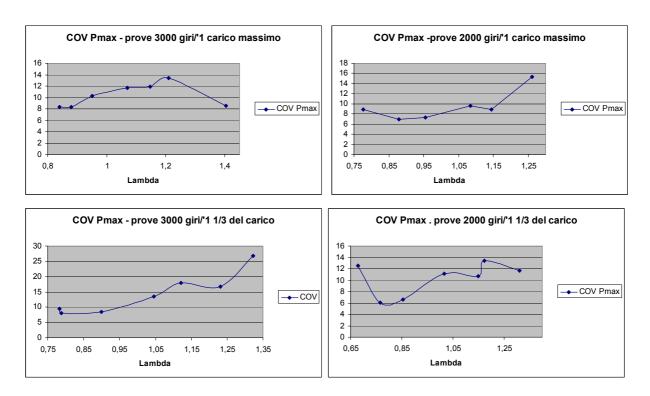


Figura 7.5 - Andamento della dispersione ciclica nella pressione massima per le quattro condizioni di prova.

Come si può vedere le irregolarità presentano, anche in questo caso, la minima intensità per valori ricchi del titolo. Contrariamente a quanto avviene per la pressione media indicata, però, le irregolarità non aumentano all'aumentare di lambda in tutto il campo delle miscele magre. Ciò è da attribuire all'influenza che, nel caso di combustioni troppo magre, e quindi prolungate, ha l'effetto dell'aumento di volume causato dalla discesa del pistone.

Per quanto riguarda le irregolarità nella collocazione angolare del picco massimo di pressione, è stata riscontrata un'anomalia. Nelle prove acquisite a pieno carico, il coefficiente di variazione relativo al θ_{Pmax} presenta un minimo in corrispondenza di miscele leggermente povere (figura 7.6). L'andamento del COV ai carichi parziali è invece quello atteso, anche se non si riscontra

una variazione molto decisa col titolo di miscela in un'ampia zona intorno al valore unitario di lambda.

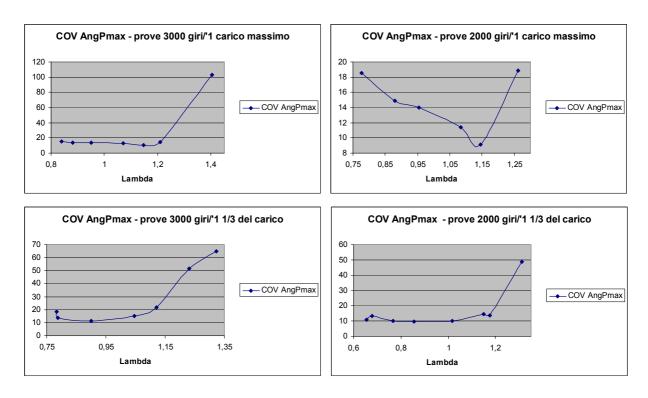


Figura 7.6 - Andamento della dispersione ciclica della collocazione angolare del massimo di pressione per le quattro condizioni di prova.

Per capire se l'andamento del COV dell'angolo corrispondente al picco di pressione, nel funzionamento a pieno carico del motore, fosse influenzato da una variazione elevata del valore medio, le irregolarità sono state espresse in termini di scarto quadratico medio puro il cui andamento è riportato in figura 7.6 bis.

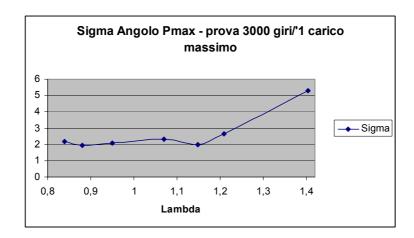


Figura 7.6 bis – Andamento della dispersione ciclica della collocazione angolare del picco massimo di pressione espressa in termini di scarto quadratico medio.

Anche in questo caso non vi è una correlazione fra irregolarità e titolo. Infatti lo scarto puro, tranne che per miscele estremamente magre, varia di poco e non presenta un andamento monotono.

Dalla letteratura [4] emerge che, mentre la pressione media indicata e la pressione massima risentono delle irregolarità che si originano sia nella fase di innesco che nella fase principale della combustione, la posizione angolare del picco di pressione risente solo debolmente dell'effetto di queste ultime. E' quindi possibile che, durante la fase d'innesco, siano presenti fonti di irregolarità tali da avere un effetto su questa grandezza più marcato di quello del titolo. Un'altra possibile causa sono le oscillazioni torsionali dell'albero: dal momento che il sensore ottico non è in grado di eliminare il loro effetto, è possibile che l'errore introdotto sulla misura angolare abbia falsato i risultati.

7.2.1 La relazione fra il titolo di miscela e la collocazione angolare del picco massimo di pressione

Al fine di valutare l'effetto della diminuzione della reattività del fronte di fiamma con l'impoverimento della miscela sull'andamento della curva di pressione, è stata ricavata sperimentalmente la relazione che lega il titolo all'angolo di manovella cui corrisponde il picco massimo di pressione. La grandezza è stata mediata su 50 cicli, dal momento che è soggetta ad irregolarità cicliche. I risultati ottenuti (*figura 7.7*) mostrano un legame molto valido: la relazione, nel campo di miscele magre, è pressoché lineare, perlomeno fino a quando l'impoverimento della miscela non è tale da causare delle mancate accensioni e, di conseguenza, una recessione dell'angolo relativo al massimo di pressione.

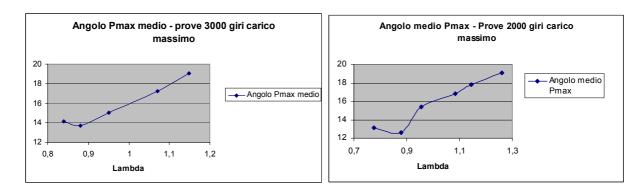


Figura 7.7 - Collocazione angolare del picco massimo di pressione in funzione del titolo di miscela.

Una volta constatata la validità di questa relazione, un sensore di detonazione è stato sistemato sulla testata del motore per valutare se, attraverso le vibrazioni prodotte dalla combustione, fosse possibile determinare la collocazione angolare del picco di pressione.

7.2.2 L'analisi del segnale del sensore di detonazione

Il segnale prodotto dal sensore di detonazione, opportunamente amplificato, è stato acquisito mediante la strumentazione utilizzata in precedenza per lo studio della dispersione ciclica, l'AVL "619 Indimeter", che ha provveduto ad effettuare un campionamento ogni due decimi di grado di angolo motore. La frequenza di campionamento scelta non era la massima realizzabile, dal momento che con il sensore di posizione angolare utilizzato era possibile spingersi fino ad una risoluzione doppia: questo comportava però una dimensione raddoppiata dei file di archiviazione dei dati, con un appesantimento della procedura di analisi. La frequenza di campionamento del segnale è un parametro molto importante, dal momento che determina il limite fino al quale può essere spinta l'analisi spettrale. Tale limite è detto frequenza di Nyquist e corrisponde alla metà della frequenza di campionamento. Considerando che ad una velocità del motore di 2000 giri/minuto, quella minima utilizzata nelle prove, corrispondeva, con la risoluzione scelta, una frequenza di campionamento di 60 kHz, quindi una frequenza di Nyquist di 30 kHz, è evidente come, anche nelle condizioni più sfavorevoli, quest'ultima fosse al disopra del range di funzionamento del sensore utilizzato, compreso fra i 5 e i 20 kHz.

I valori dei campionamenti effettuati dall'Indimeter durante le prove sono stati archiviati in files in formato ASCII e analizzati attraverso un algoritmo apposito, le cui caratteristiche sono descritte nel paragrafo successivo.

Le prove sono state effettuate per due velocità del motore, 3000 e 2000 giri/minuto, in condizioni di carico massimo, perché, almeno in una prima fase si preferiva avere a che fare con segnali più elevati, prodotti da una più elevata pressione nel cilindro.

I sensori di detonazione vengono posti sul basamento o sulla testata del motore. In questo studio, dovendo rilevare un fenomeno meno intenso della detonazione, il sensore è stato posto sulla testa, nella zona compresa fra la valvola di aspirazione e la candela, per avvicinarlo alla camera di combustione.

7.2.2.1 Descrizione dell'algoritmo utilizzato per l'analisi del segnale

L'analisi del segnale proveniente dal sensore di detonazione è stata effettuata utilizzando un algoritmo appositamente scritto nel linguaggio dell'editor proprio del software Matlab® e denominato "analisi_segnale". Il listato dell'algoritmo di calcolo è riportato nell'Allegato 4: di seguito si illustrano le principali caratteristiche del suo funzionamento.

Il programma riceve in ingresso un file in formato ASCII contenente tre vettori colonna corrispondenti ai valori dei campioni della posizione angolare dell'albero motore, del segnale

proveniente dal trasduttore di pressione e del segnale proveniente dal sensore di detonazione rilevati lungo un ciclo, più la velocità di rotazione del motore espressa in giri al minuto, utilizzata per determinare la frequenza di campionamento e quella di Nyquist. La velocità di rotazione del motore, inoltre, considerata costante per la durata del ciclo, consente di trasferire i campionamenti dal dominio angolare a quello del tempo per poi procedere all'analisi spettrale. Occorre rilevare che considerare costante la velocità di rotazione del motore lungo il ciclo costituisce un'approssimazione. Per valutare l'entità dell'errore commesso, il segnale prodotto da un generatore di forme d'onda è stato acquisito nell'Indimeter durante il funzionamento del motore. Dal momento che non è stato rilevato un'apprezzabile effetto di "modulazione di frequenza", si è ritenuto lecito trascurare le oscillazioni di velocità.

La prima funzione del programma è di visualizzare l'andamento dei segnali derivanti dal sensore di pressione e da quello di detonazione in funzione dell'angolo di manovella, per permettere un confronto visivo.

Per affinare l'analisi è possibile procedere ad un filtraggio sia in fase che in frequenza dei segnali acquisiti. Il filtraggio in fase viene realizzato semplicemente limitando l'analisi ad un sottoinsieme dei vettori in cui i valori dei campionamenti dei due segnali sono memorizzati: lo scopo di questo filtraggio è di escludere eventuali fenomeni di disturbo, ad esempio l'apertura o la chiusura delle valvole, nella successiva analisi spettrale. In questo modo è possibile operare anche un confronto fra gli spettri del segnale intero e di quello ristretto alla zona della combustione, molto utile per determinare se una frequenza è caratteristica del solo intervallo angolare della combustione o associato ad un fenomeno presente nell'intero ciclo.

Occorre notare che non è possibile restringere l'analisi del segnale ad un intervallo angolare eccessivamente ridotto dal momento che, pur restando inalterata la frequenza di campionamento (quindi quella di Nyquist), diminuirebbe troppo il numero di campioni, con ovvio impoverimento dello spettro.

Matlab® fornisce alcune funzioni predefinite per l'analisi dei segnali. Un filtro in frequenza del segnale può essere definito nel seguente modo:

```
wf=[limite_inferiore/freq_nyq,limite_superiore/freq_nyq];
[b,a] = butter(ordine_filtro,wf);
detonazione=filter(b,a,detonazione);
```

Questa espressione consente di riprodurre la funzione di trasferimento di un filtro di Butterworth, un esempio molto comune di filtro passa basso. Lo stesso tipo di filtro può comunque essere utilizzato anche come filtro passa alto semplicemente filtrando il segnale e ricavando la differenza fra il segnale non filtrato e quello filtrato.

Il filtro viene definito costruendo un vettore contenente i due estremi della banda di filtraggio, entrambi normalizzati per la frequenza di Nyquist. Va inoltre stabilito l'ordine, che determina la pendenza della risposta del filtro alla frequenza di taglio.

La funzione *analisi_segnale* consente, come già anticipato, la visualizzazione del contenuto in frequenza del segnale, utile per operare filtraggi passa banda mirati.

In Matlab®, lo strumento a disposizione per trasferire l'analisi dal dominio del tempo a quello della frequenza è la Fast Fourier Transform (FFT), un tipo di algoritmo molto efficiente, ideato appositamente per lo studio dei i segnali digitali. L'espressione matematica della trasformazione effettuata è la seguente:

$$X(k) = \sum_{j=1}^{N} x(j) \omega_{N}^{(j-1)(k-1)} ;$$

dove N è il numero di campioni e $\omega_N = e^{(-2\pi^*i)/N}$.

La funzione Matlab® "fft", applicata ad un vettore contenente N campioni, restituisce un vettore di N elementi, di cui il primo rappresenta la componente costante del segnale, gli N/2 elementi successivi sono numeri complessi che esprimono i coefficienti della trasformata per le frequenze 1/T, 2/T.... fino alla frequenza di Nyquist. Gli elementi restanti sono i complessi coniugati di quelli con indice da 2 a N/2-1, pertanto rappresentano dati ridondanti.

La funzione analisi_segnale visualizza l'andamento dello spettro in frequenza del segnale riportando in ascissa i valori delle frequenze da 0 alla frequenza di Nyquist e in ordinata i valori del modulo dei coefficienti della trasformata.

7.2.2.2 Stima delle frequenze proprie di risonanza della camera di combustione

Per consentire una valutazione critica dello spettro in frequenza del segnale fornito dal sensore di detonazione, è stata realizzata un'analisi preliminare delle frequenze proprie di risonanza della camera di combustione.

Le onde di pressione nella camera di combustione vengono suscitate sia dalla normale evoluzione del processo di combustione che da fenomeni di detonazione. L'energia si concentra sulle frequenze associate ai vari modi di risonanza della camera e viene poi trasmessa alla struttura del motore attraverso l'urto delle onde con le pareti del cilindro.

Data la particolare forma della camera di combustione e la complessità del fenomeno uno studio rigoroso richiederebbe l'utilizzo di una modellazione tridimensionale della camera eseguita agli elementi finiti. Lo stesso vale per la determinazione della pressione o della temperatura del gas, grandezze che influenzano la velocità con cui le onde si propagano all'interno del cilindro.

In prima approssimazione è comunque possibile procedere ad un'analisi dei modi propri di risonanza della camera riconducendosi ad un problema geometricamente più semplice, quale quello della cavità cilindrica, le cui soluzioni analitiche sono ben note e disponibili in letteratura.

L'errore commesso con questo tipo di studio può raggiungere anche il 10-15%, ma il risultato può essere sufficiente a discriminare le frequenze di interesse da altri picchi presenti nello spettro e associati a fenomeni di disturbo.

I primi sei modi di risonanza di una cavità a forma di cilindro retto sono riportati in figura 7.8. Le linee punteggiate rappresentano i nodi e i segni + e – indicano gli antinodi. Gli antinodi con segno concorde sono in fase tra loro, quelli con segno discorde sono in controfase.

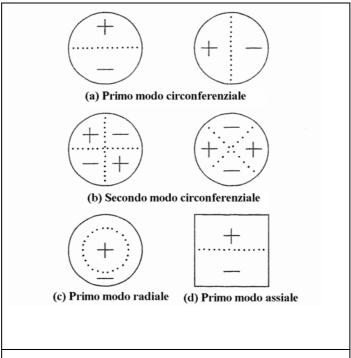


Figura 7.8 – Digramma schematico dei primi modi acustici di risonanza di una cavità a forma di cilindro retto

Le frequenze associate ai modi assiali, in teoria, dipendono dall'altezza della camera, quindi dall'angolo di manovella, al contrario di quelli radiali e circonferenziali che non hanno una dipendenza diretta da questa grandezza, ma sono influenzati solamente da eventuali variazioni della temperatura del gas. Occorre però osservare che i modi assiali, a causa della posizione ravvicinata del cielo del pistone con la parte superiore della camera nell'intervallo angolare interessato dalla combustione, sono generalmente associati a frequenze di ordine molto elevato, quindi presentano una intensità ridotta e sono spesso difficili da rilevare. Per questo motivo si è ritenuto lecito trascurarli.

Per calcolare le frequenze associate ai modi propri occorre procedere ad una determinazione della velocità del suono nella camera di combustione.

Le onde sonore si propagano con la velocità caratteristica del mezzo di trasmissione. Nel caso dei gas perfetti tale velocità c può essere calcolata con la relazione []:

$$c = \sqrt{\frac{k P_0}{\rho_0}} \qquad [\text{m/s}];$$

dove $k = \frac{C_p}{C_v}$, è l'indice dell'adiabatica, rapporto tra il calore specifico a pressione costante e

quello a volume costante, che nel caso in esame vale 1,31; P_0 [Pa] e ρ_0 [kg m⁻³] sono rispettivamente la pressione e la densità del fluido.

Considerando sempre un gas perfetto, vale l'equazione di stato:

$$p_{0}V_{0} = nR_{0}T_{0} = \frac{M}{M_{m}}R_{0}T_{0};$$

dove, con riferimento al gas considerato $V_0[\mathrm{m}^3]$ è il volume, n [kmol] la quantità di materia, $T_0[\mathrm{K}]$ la temperatura assoluta, $R_0 = 8314 [\mathrm{J \ kmol}^{-1} \ \mathrm{K}^{-1}]$ la costante universale dei gas perfetti, $M[\mathrm{Kg}]$ la massa, $M_m[\mathrm{kg \ mol}^{-1}]$ la massa molare.

Dall'equazione precedente è possibile ricavare la massa per unità di volume, $\rho_{_0}$:

$$\rho_0 = \frac{M}{V_0} = \frac{p_0}{T_0} \frac{M_m}{R_0}$$
 [kg/m³];

Sostituendo l'equazione trovata in quella che fornisce la velocità del suono si ottiene:

$$c = 91.2 \sqrt{\frac{kT_0}{M_{\text{m}}}}$$
 [m/s];

La velocità del suono in un gas perfetto, quindi, dipende solamente dalla sua temperatura assoluta.

Una volta determinata la velocità del suono è possibile calcolare le frequenze naturali di risonanza della cavità cilindrica mediante la formula:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_z}{l}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_{m,n}}{a}\right)^2};$$

dove $n_z = 0,1,2,\ldots$, è l'indice dei modi longitudinali, $n = 0,1,2,\ldots$, è l'indice dei modi radiali, $m = 0,1,2,\ldots$, è l'indice dei modi circolari, l l'altezza della camera, a il raggio e c la velocità del suono.

Il coefficiente $\alpha_{m,n}$ è dato dalla tabella 7.1 in funzione degli indici m ed n.

	m	0	1	2	3
n					
0		0	0,5861	0,9722	1,3373
1		1,2197	1,697	2,1346	2,5513

Tabella 7.4 - Il coefficiente $\alpha_{m,n}$ in funzione degli indici n ed m.

Per una temperatura del gas di 2400K (la massa molare della miscela è considerata pari a 27) la velocità del suono risulta 984 m/s. Con questa velocità del suono e trascurando i modi longitudinali si ottengono le frequenze di risonanza riportate nella tabella 7.2

m = 1, n = 0	8123,957
m = 2, n = 0	13475,7
m = 3 , n = 0	18536,37
m = 0 , n = 1	16906,31
m = 1 , n = 1	23522,19
m = 2 , n = 1	29587,78
m = 3 , n = 2	35363,68

Tabella 7.2 – Valori delle frequenze di risonanze [Hz]

7.2.2.3 Risultati delle prove a 3000 giri/minuto e carico massimo

La figura 7.9 mostra l'andamento dei segnali del sensore di pressione e del sensore di detonazione relativi ad un ciclo acquisito a 3000 giri/minuto e carico massimo.

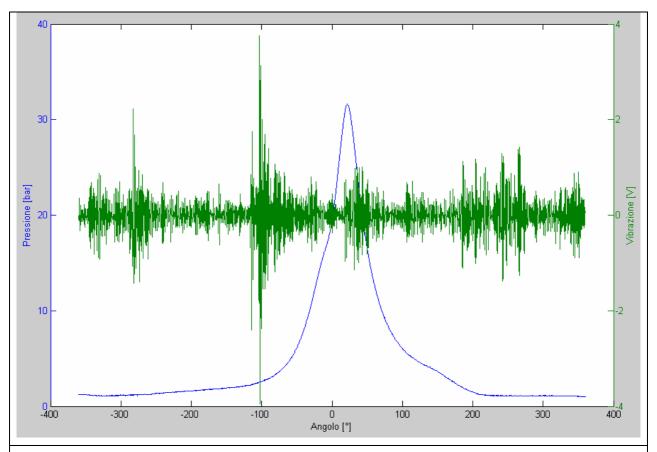


Figura 7.9 – Andamento della pressione (in blu) e del segnale del sensore di detonazione (in verde) in funzione dell'angolo di manovella. Il segnale del sensore di detonazione è misurato in Volt.

La curva di colore blu rappresenta la pressione, in verde è riportato il segnale del sensore di detonazione. E' possibile notare, dall'andamento del segnale del sensore di detonazione, la presenza di molti fenomeni vibratori anche al di fuori dell'intervallo della combustione. Particolarmente evidente è l'effetto della chiusura della valvola di aspirazione (intorno ai 100 gradi prima del PMS) dovuto alla vicinanza del sensore alla sede della stessa.

Di seguito (figura 7.10) si riportano gli spettri in frequenza del segnale filtrato fra i 5 e i 22 kHz e relativi sia all'intero ciclo che all'intervallo angolare compreso fra i 15° prima del PMS e i 30° dopo il PMS.

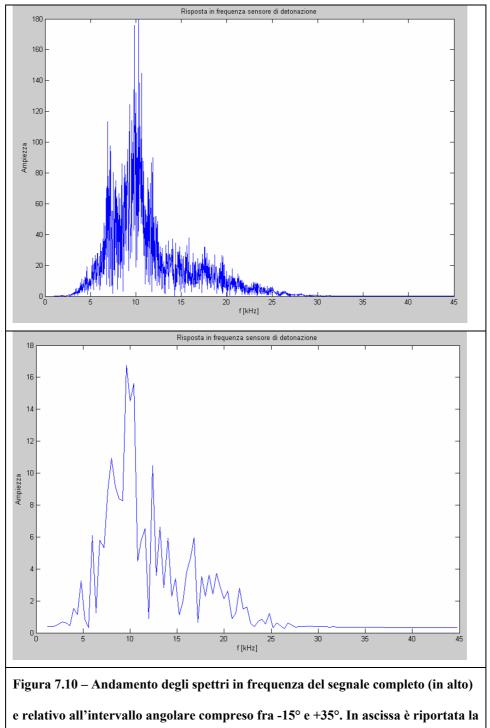


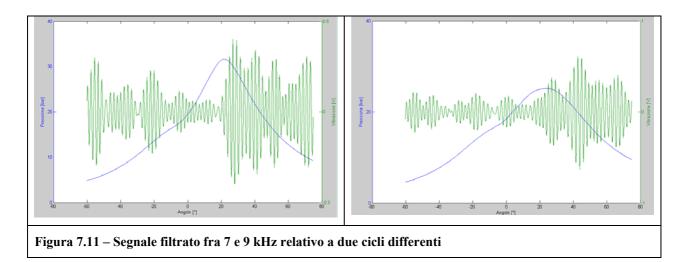
Figura 7.10 – Andamento degli spettri in frequenza del segnale completo (in alto) e relativo all'intervallo angolare compreso fra -15° e +35°. In ascissa è riportata la frequenza in kHz, mentre in ordinata è indicato il modulo dei coefficienti della trasformata.

L'analisi spettrale mette in evidenza, oltre alla bassa intensità del segnale nella zona della combustione, anche le molte analogie nell'andamento dei due spettri.

Si è deciso di procedere ugualmente al filtraggio dei segnali: l'ampiezza della banda di filtraggio è stata scelta di volta in volta in modo da isolare un singolo picco dello spettro. Durante l'analisi è stata posta l'attenzione sui seguenti aspetti:

- intensità del segnale filtrato, per rilevare la presenza di un fenomeno in grado di distinguersi dal rumore di fondo;
- correlazione fra segnale e curva di pressione, con lo scopo di rilevare aumenti di intensità del segnale in corrispondenza dell'incremento di pendenza della curva di pressione, o del picco massimo;
- confronto fra i segnali filtrati relativi a cicli diversi, per rilevare la presenza di comportamenti ripetitivi.

Di seguito si riportano gli andamenti del segnali filtrati relativi a due cicli differenti. Inizialmente sono stati analizzati i picchi contenuti fra 7 e 9 kHz e fra 12 e 14 kHz, perché vicini alle frequenze predette dall'analisi dei modi di risonanza della camera.



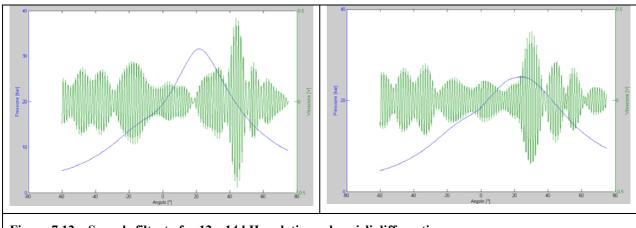
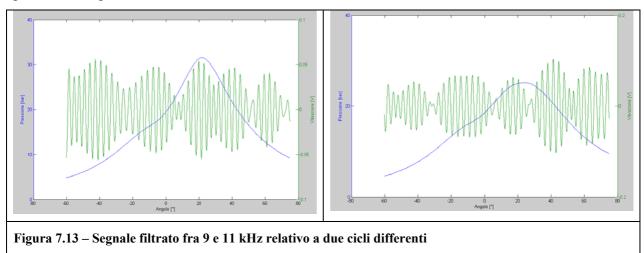
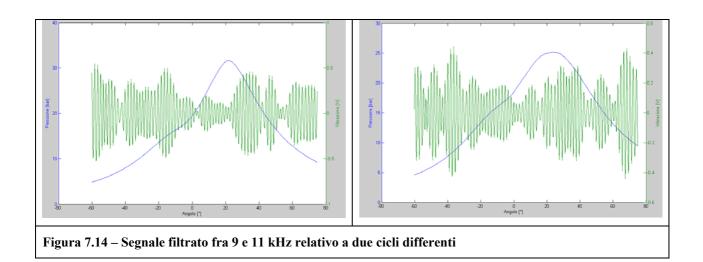
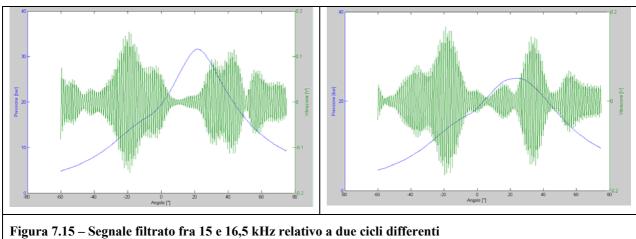


Figura 7.12 – Segnale filtrato fra 12 e 14 kHz relativo a due cicli differenti

Dal momento che non si sono ottenuti risultati significativi l'analisi è stata estesa anche agli altri picchi dello spettro.







I segnali filtrati non mostrano una correlazione evidente con la curva di pressione. L'intensità massima del segnale si riscontra spesso al di fuori della zona di combustione. I segnali relativi a cicli diversi appaiono spesso molto differenti, a dimostrazione della presenza di un disturbo casuale.

Per quanto riguarda il filtraggio fra i 15 e i 16,5 kHz il segnale è simile per i due cicli, ma non emerge nessuna correlazione con la curva di pressione.

7.2.2.4 Risultati delle prove a 2000 giri/minuto e carico massimo

I fenomeni vibratori che vengono eccitati durante il funzionamento del motore variano in base ai regimi di carico e velocità. Dal momento che le frequenze di risonanza della camera di combustione non dipendono in modo diretto dal numero di giri del motore, le prove sono state ripetute anche con il motore funzionante a 2000 giri/minuto, con lo scopo di rilevare se in queste condizioni fosse possibile escludere eventuali fenomeni eccitatori legati alla rotazione del motore e sovrapposti alla vibrazione cercata.

Anche in questo caso le prove sono state effettuate in condizioni di carico massimo, in modo da avere pressioni elevate all'interno del cilindro.

In figura 7.16 è possibile osservare l'andamento del segnale non filtrato.

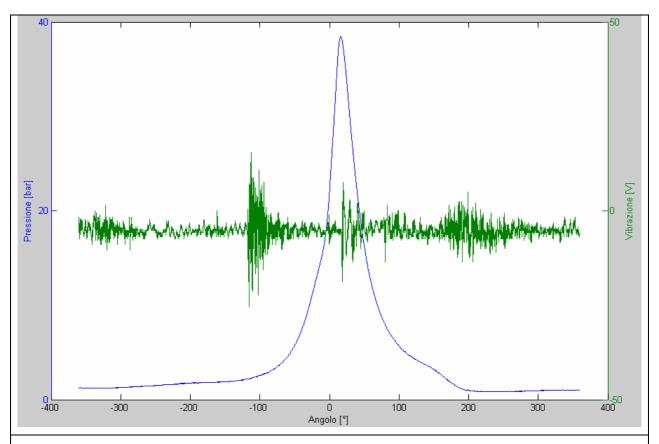
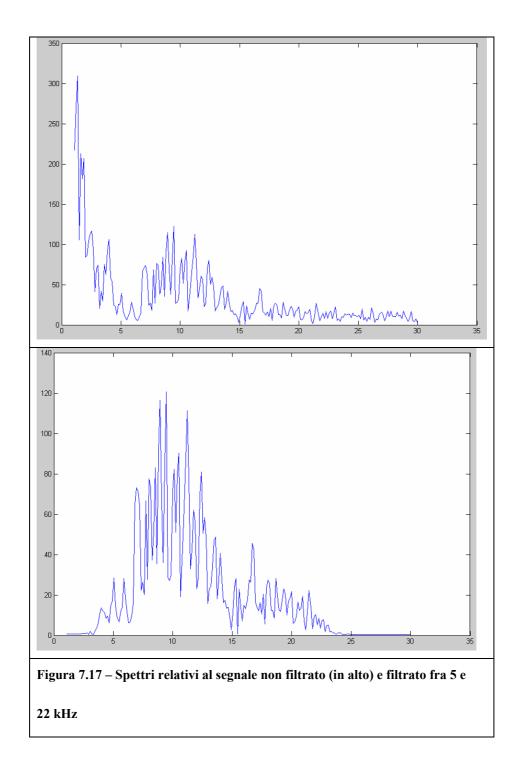


Figura 7.16 – Andamento della pressione e del segnale del sensore di detonazione con motore funzionante a 2000 giri/minuto e carico massimo.

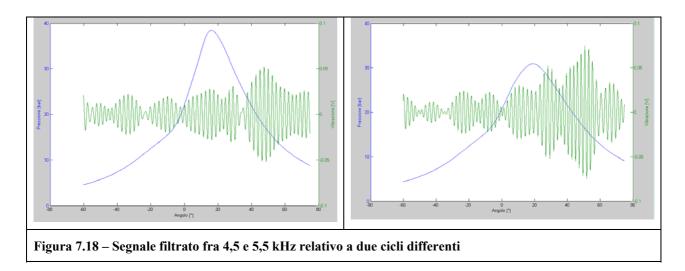
Di seguito si riportano gli spettri in frequenza, relativi al segnale non filtrato e a quello filtrato fra i 5 e i 22 kHz per eliminare il contenuto in bassa frequenza e visualizzare con una scala migliore lo spettro nella zona di interesse.

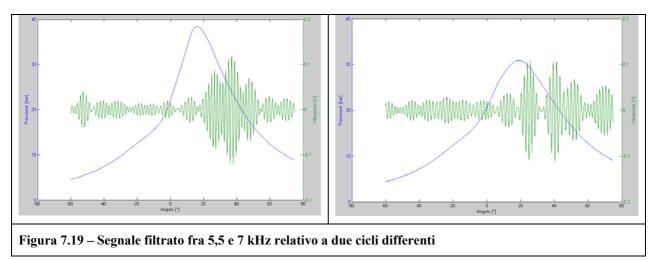


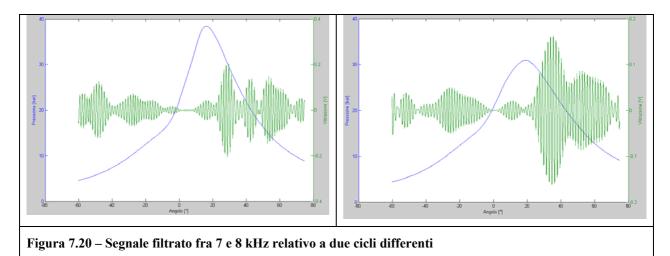
Dallo spettro del segnale filtrato è possibile osservare come quest'ultimo presenti, nella zona compresa fra i 7 e i 15 kHz, molti picchi vicini fra di loro. Poiché è lecito supporre che solo pochi di questi possano essere associati al rumore causato dalla combustione, l'andamento è indice della presenza di un elevato disturbo.

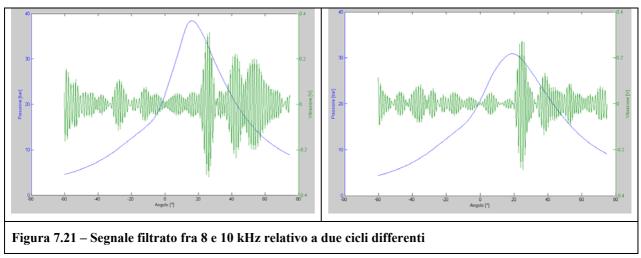
Di seguito si riportano gli andamento dei segnali filtrati relativi a due cicli diversi. Data la difficoltà di distinguere i vari picchi nella zona compresa fra i 7 kHz e i 15 kHz si è proceduto ad un filtraggio per bande di frequenza consecutive e ad un restringimento progressivo della banda.

Dal momento che i segnali, anche in questo caso, non hanno correlazioni significative con l'andamento della pressione se ne riportano solo alcuni esempi.



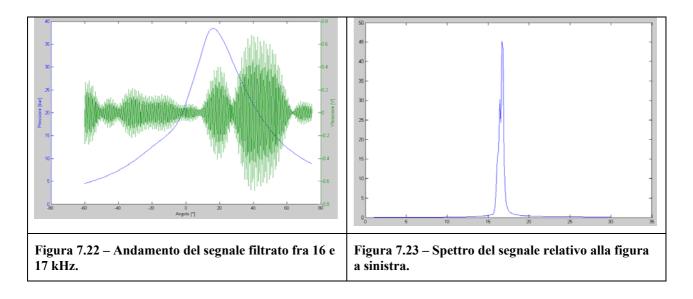






Più evidente appare il picco compreso fra i 16kHz e i 17kHz: in questo caso è stato possibile

procedere ad un filtraggio mirato.



Purtroppo, anche in questo caso, si vede chiaramente che il segnale, oltre ad avere un'intensità molto bassa rispetto al segnale non filtrato, non dimostra alcuna correlazione con l'andamento della curva di pressione.

7.2.2.5 Analisi del segnale con il motore in detonazione

Per chiarire i motivi alla base della mancanza di risultati è stato deciso di verificare il comportamento del sensore in presenza di detonazione. La detonazione è stata indotta aumentando l'anticipo di accensione realizzato dalla centralina e portando il motore nelle condizioni di carico massimo a 3000 giri/minuto.

In figura 7.24 è possibile osservare l'andamento dei segnali del sensore di pressione e di quello di detonazione in un ciclo detonante: la curva di pressione presenta il frastagliamento tipico che si riscontra in presenza di autoaccensioni.

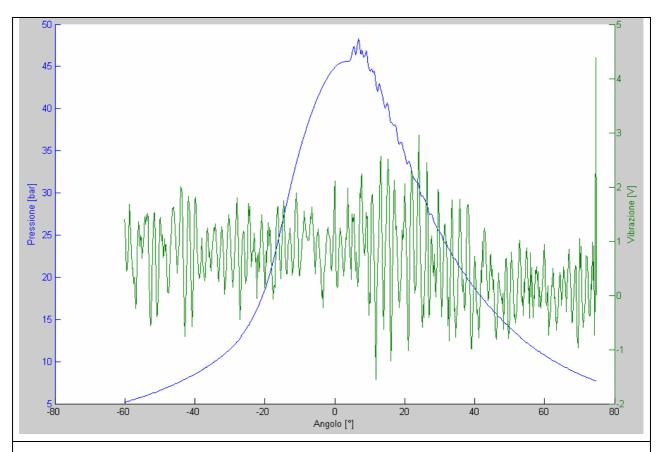


Figura 7.24 – Andamento dei segnali dei sensori di pressione (blu) e detonazione (verde) in un ciclo con detonazione rilevato a 3000 giri/minuto e pieno carico.

Nella figura successiva (figura 7.25) viene presentato un confronto fra gli spettri in frequenza dei due segnali, calcolati in un intervallo angolare di 45 gradi con inizio a partire da 15 gradi prima del punto morto superiore, indicativamente l'angolo in cui scocca la scintilla. Appare evidente una corrispondenza degli spettri nella banda compresa fra i 7 e i 10 kHz. Anche vicino ai 15 kHz gli spettri presentano un andamento simile.

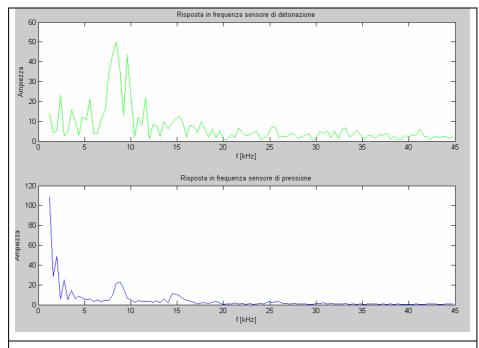


Figura 7.25 Spettri in frequenza dei segnali del sensore di detonazione (in alto) e del sensore di pressione (in basso).

A questo punto si è provveduto ad un filtraggio dei segnali, con l'obiettivo di isolare il contributo dei due picchi comuni ad entrambi gli spettri.

L'andamento dei due segnali, filtrati entrambi fra 7 e 10 kHz, è presentato in figura 7.26.

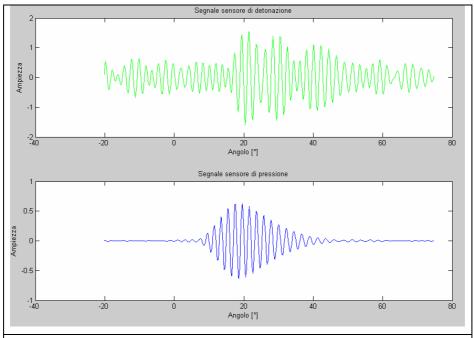
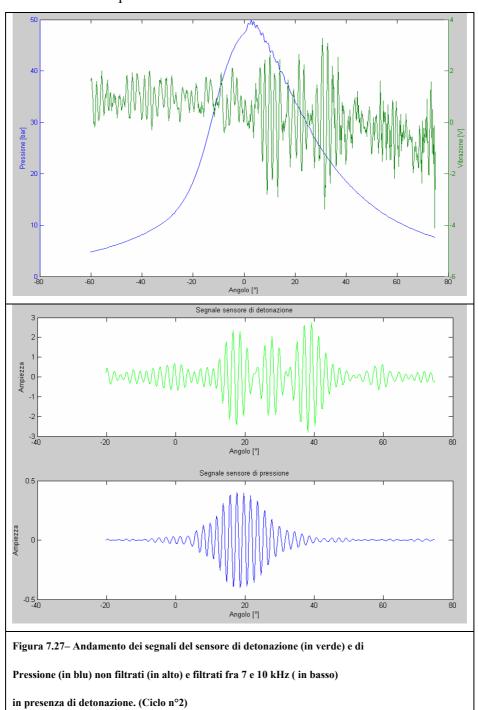


Figura 7.26 – Andamento dei segnali del sensore di detonazione (in verde) e di Pressione (in blu) filtrati fra 7 e 10 kHz in presenza di detonazione. (Ciclo n°1)

Ovviamente il segnale del sensore di pressione filtrato (curva blu) appare poco riconoscibile una volta eliminate le componenti a bassa frequenza. Le oscillazioni del segnale filtrato sono quelle corrispondenti ai frastagliamenti nella curva non filtrata. Il segnale del sensore di detonazione, pur non elevandosi in maniera molto decisa dal rumore di fondo, sembra presentare interessanti analogie con l'altro segnale. Questo comportamento è stato confermato dall'analisi di altri cicli detonanti, a conferma del corretto funzionamento del sensore nel suo utilizzo più specifico. Di seguito si riportano, a titolo di esempio, gli andamenti non filtrati e filtrati fra 7 e 10 kHz dei segnali relativi ai due sensori per due ulteriori cicli detonanti.



Nel ciclo mostrato in figura 7.28 l'intensità della detonazione è minore rispetto ai casi precedenti. Il sensore di detonazione sembra rilevare anche in questo caso il fenomeno: il segnale però, più confuso col rumore di fondo.

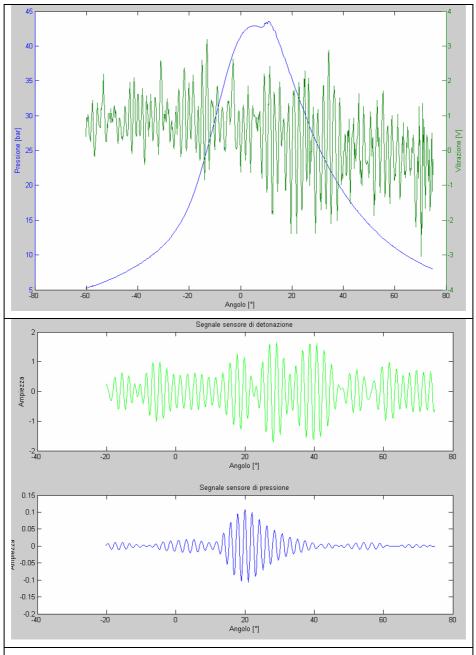


Figura 7.28 – Andamento dei segnali del sensore di detonazione (in verde) e di Pressione (in blu) non filtrati (in alto) e filtrati fra 7 e 10 kHz (in basso) in presenza di detonazione. (Ciclo n°3)

Lo stesso tipo di analisi è stato ripetuto filtrando i due segnali fra 14 e 16 kHz, in modo da isolare il secondo picco di risonanza comune ai due spettri. Di seguito si riporta il risultato dei filtraggi eseguiti sui tre cicli già analizzati precedentemente.

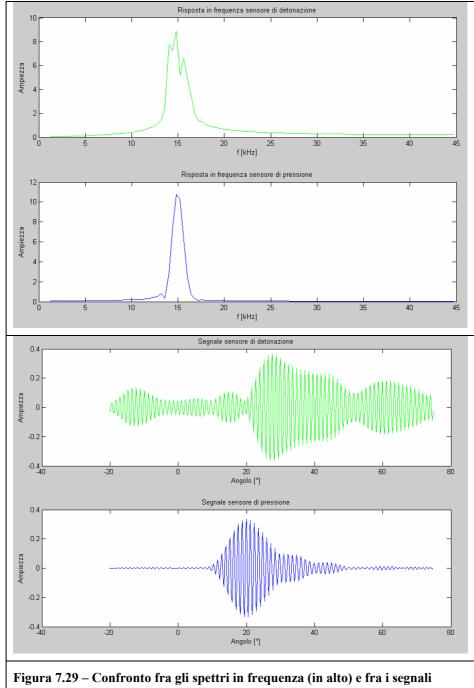


Figura 7.29 – Confronto fra gli spettri in frequenza (in alto) e fra i segnali (in basso) dei sensori di detonazione (in verde) e pressione (in blu) filtrati fra 14 e 16 kHz (Ciclo n°1).

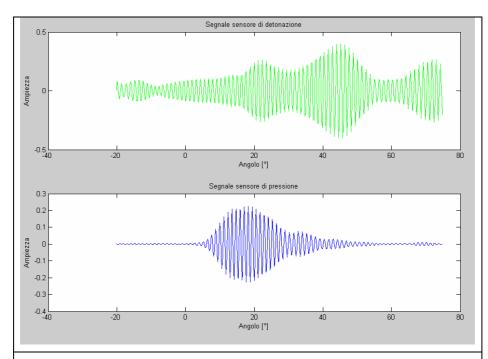


Figura 7.30 – Confronto fra i segnali dei sensori di detonazione (in verde) e pressione (in blu) filtrati fra 14 e 16 kHz (Ciclo n°2).

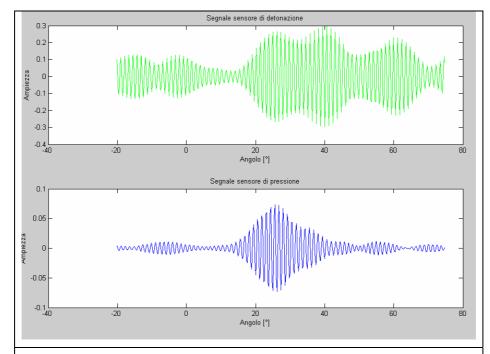


Figura 7.31 – Andamento dei segnali del sensore di detonazione (verde) e di quello di pressione (blu) filtrati fra 14 e 16 kHz per un ciclo con detonazione di bassa intensità (Ciclo n°3).

In questa banda di frequenze il segnale non sembra permettere di rilevare la presenza di detonazione. Solo nell'ultimo esempio, quello relativo al ciclo con una detonazione di intensità più ridotta (figura 7.31), i segnali dei sensori di pressione e di detonazione sembrano essere in fase tra di loro. Occorre però rilevare che l'intensità del segnale di pressione è molto bassa mentre quella del sensore di detonazione è simile a quella dei casi precedenti: questo induce a pensare che la correlazione sia casuale.

I risultati ottenuti dall'analisi dei segnali filtrati fra i 7 e i 10 kHz dimostrano comunque la capacità del sensore di rilevare la presenza di detonazione, a conferma del suo corretto funzionamento. La intervallo di frequenze è anche in accordo con i risultati ottenuti dall'analisi preliminare delle frequenze di risonanza della camera, che, si ricorda, attribuiva al primo modo una frequenza poco superiore agli 8 kHz. Tuttavia la bassa intensità del segnale, anche in caso di detonazione, induce a ritenere che l'effetto della vibrazione prodotta dalla normale evoluzione della combustione dia luogo ad un segnale difficilmente distinguibile dal rumore di fondo presente.

7.2.3 L'analisi del segnale del microfono piezoelettrico

Dal momento che le prove effettuate utilizzando il sensore di detonazione non hanno portato a risultati soddisfacenti, si è deciso di procedere alla sostituzione del sensore con un microfono piezoelettrico molto economico (figura 7.32). Il range di funzionamento del microfono si estende fino ai 10-12 kHz. Il microfono è stato posto nelle vicinanze del motore, sistemato su di un supporto di gomma per isolarlo dalle vibrazioni della struttura. L'acquisizione e l'analisi del segnale sono avvenute in maniera del tutto analoga a quelle del sensore di detonazione.



Figura 7.32 – Il microfono piezoelettrico utilizzato

7.2.3.1 Prove a 3000 giri/minuto e carico massimo

La Figura 7.33 presenta l'andamento del segnale in un ciclo in condizioni di carico massimo e alla velocità di rotazione di 3000 giri al minuto.

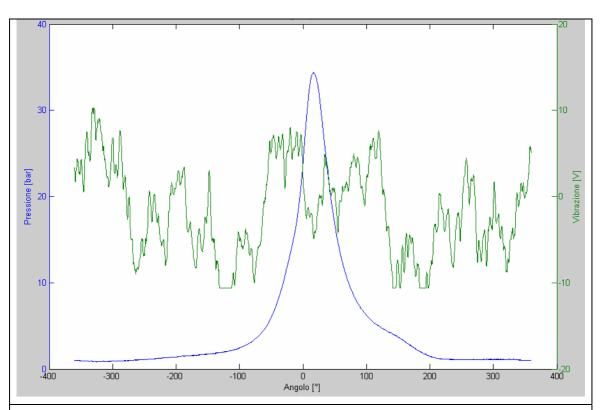
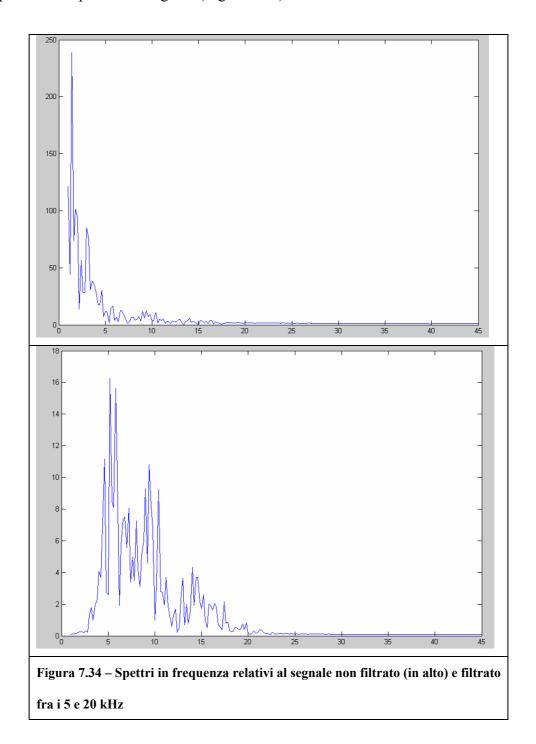


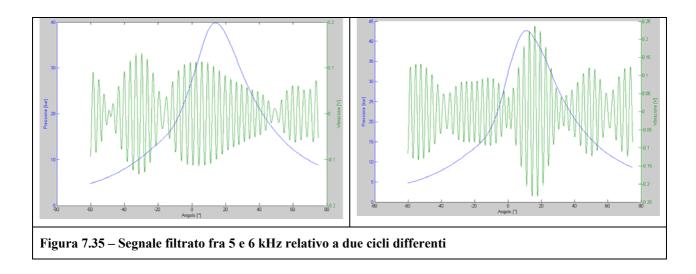
Figura 7.33 - Andamento del segnale del microfono piezoelettrico (in verde) in funzione dell'angolo di manovella con motore funzionante a 3000 giri/minuto e carico massimo.

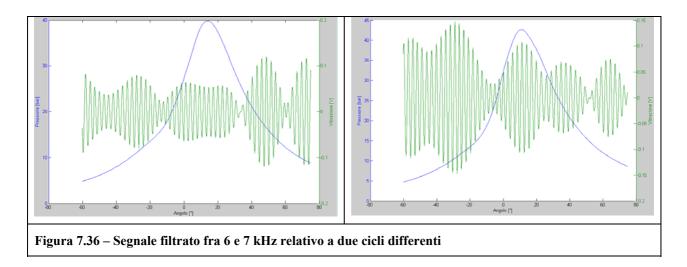
Già da un primo esame visivo del segnale non filtrato appare molto evidente la predominanza del rumore in bassa frequenza: si possono facilmente osservare oscillazioni di ampiezza elevata che si ripetono poche volte nella durata del ciclo. Questa impressione è confermata dall'andamento dello spettro in frequenza del segnale (Figura 7.34).

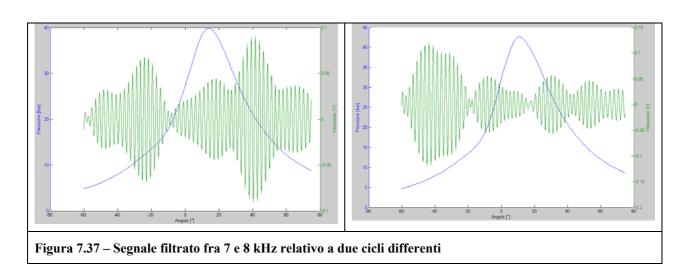


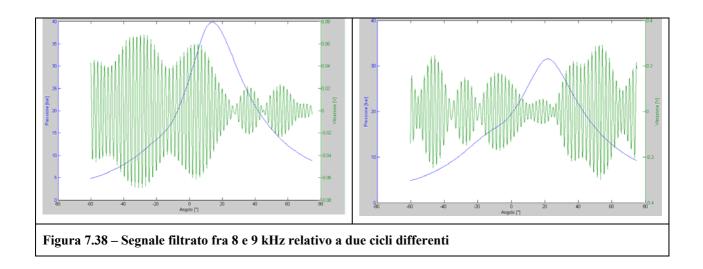
Per avere un'idea più precisa dell'andamento del contenuto in frequenza del segnale nella zona al di sopra dei 5 kHz il segnale è stato filtrato eliminando le componenti in bassa frequenza. La banda con il segnale più elevato è quella compresa fra i 5 e i 6 kHz: al di sopra dei 6 kHz è

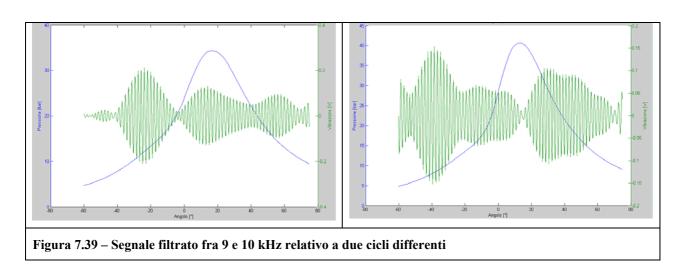
evidente come lo spettro presenti molti picchi vicini tra loro. Data la difficoltà di distinguere i singoli picchi il segnale è stato analizzato operando dei filtraggi consecutivi. Di seguito si mettono a confronto i segnali filtrati relativi a due cicli diversi.











Dai risultati dei filtraggi non emerge nessuna correlazione con la curva di pressione, inoltre i segnali relativi a due cicli differenti sono molto diversi tra di loro.

7.2.3.2 Prove a 2000 giri/minuto e carico massimo

Analogamente al caso del sensore di detonazione, il segnale del microfono piezoelettrico è stato analizzato anche al regime di rotazione di 2000 giri al minuto. L'andamento del segnale è riportato in figura 7.40.

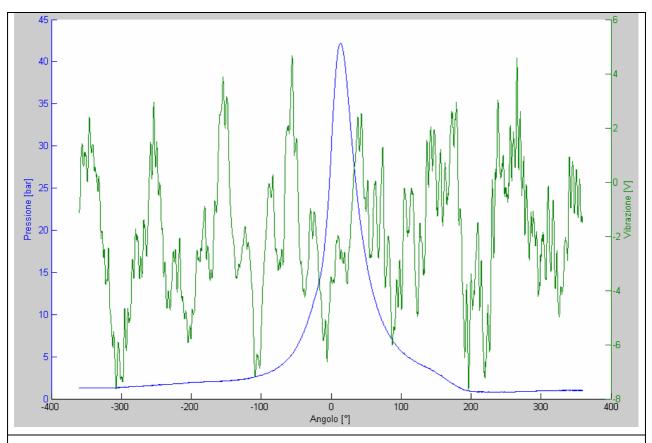
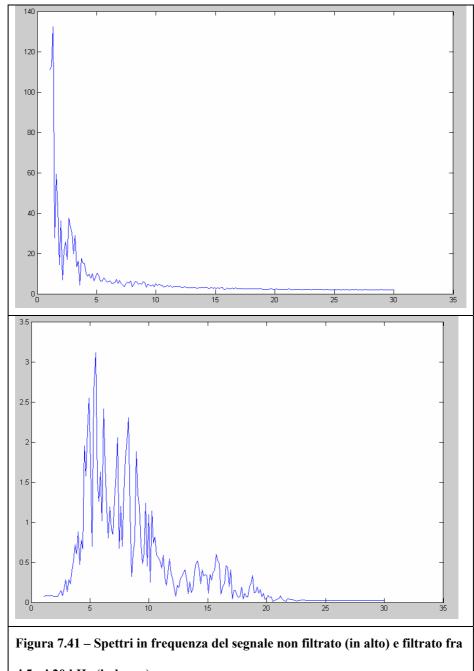


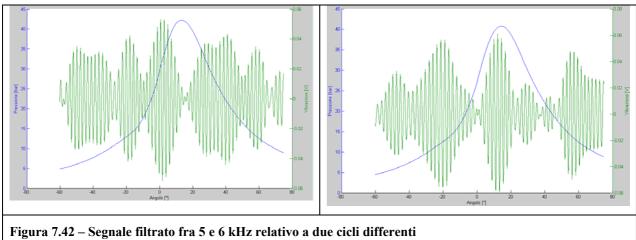
Figura 7.40 - Andamento del segnale del microfono piezoelettrico (in verde) in funzione dell'angolo di manovella con motore funzionante a 2000 giri/minuto e carico massimo.

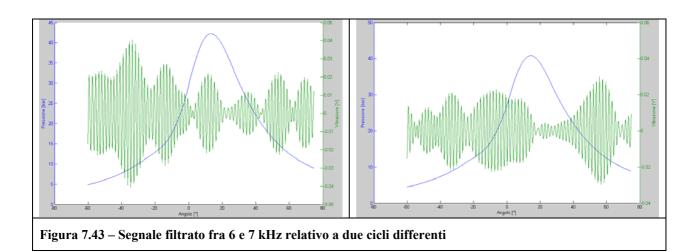
Anche in questo caso il microfono sembra rilevare principalmente rumori in bassa frequenza. Il segnale è stato comunque analizzato: di seguito si riportano gli spettri in frequenza del segnale non filtrato e del segnale filtrato fra 5 e 20 kHz (figura 7.41).

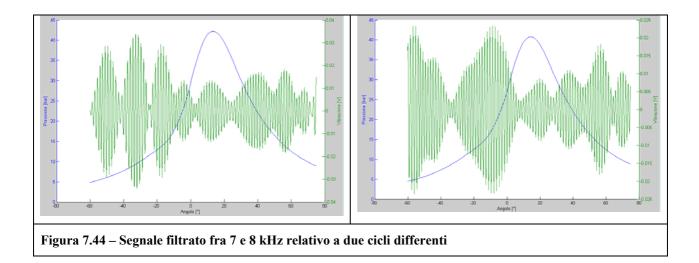


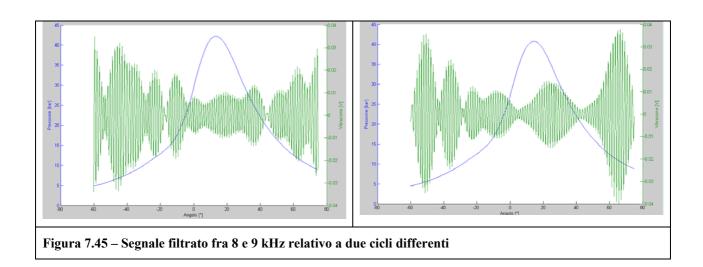
i 5 e i 20 kHz (in basso).

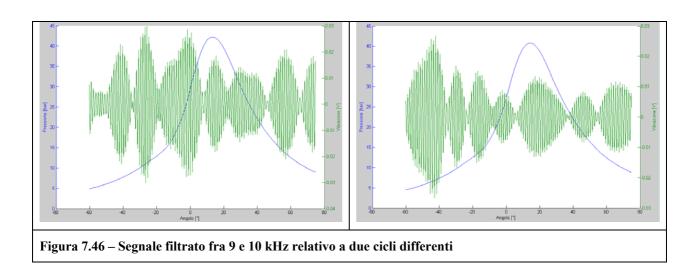
Lo spettro del segnale filtrato fra i 5 e i 20 kHz ha un andamento molto frastagliato e non emergono picchi definiti. Anche in questo caso il segnale è stato filtrato in tutto l'intervallo compreso fra i 5 e i 20 kHz: sono stati operati filtraggi con bande di ampiezza pari a 1 e 0,5 kHz. Dal momento che i segnali, anche in questo caso, non hanno mostrato correlazioni significative con l'andamento della pressione, se ne riportano solo alcuni esempi, sempre mettendo a confronto due cicli consecutivi.











In definitiva è emerso che il microfono utilizzato è sensibile soprattutto a frequenze più basse di quelle che caratterizzano il fenomeno studiato. Il segnale, nella banda di frequenze d'interesse, ha presentato un'intensità molto bassa, paragonabile al rumore di fondo.