

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

DIEM - Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni Meccaniche, Nucleari,
Aeronautiche e di Metallurgia

Laboratorio di sperimentazione sui motori a combustione interna L-S

**ANALISI DELL'EMISSIONE SONORA DI UN MOTORE A
COMBUSTIONE INTERNA: DIAGNOSI MISFIRE E
IDENTIFICAZIONE DELLE PRINCIPALI
CARATTERISTICHE DELLA COMBUSTIONE**

Tesi di Laurea di:
DELLA FORNACE ENRICO

Relatore:
Prof. Ing. NICOLÒ CAVINA

Correlatori:
Chiar.mo Prof. Ing. GIORGIO MINELLI
Chiar.mo Prof. Ing. DAVIDE MORO
Ing. STEFANO SGATTI
Ing. FILIPPO CAVANNA

Sessione I

Anno Accademico 2008-2009

5 PAROLE CHIAVE

MISFIRE

EMISSIONI ACUSTICHE

MICROFONO

DIAGNOSI

CONTROLLO

Indice

<u>Capitolo 1</u> - <i>Introduzione</i>	pag. 1
1.1 - Il motore ad accensione comandata	pag. 2
1.2 - La combustione	pag. 2
1.3 - Il misfire	pag. 3
1.3.1 - Normative	pag. 7
1.3.2 - Metodi per la diagnosi misfire	pag. 11
<u>Capitolo 2</u> - <i>Attività sperimentale preliminare</i>	pag. 13
2.1 - Descrizione layout sperimentale	pag. 14
2.2 - Grandezze acquisite	pag. 17
2.3 - Punti motore analizzati	pag. 18
2.4 - Analisi del segnale di pressione in camera di combustione	pag. 20
2.4.1 - Analisi temporale	pag. 20
2.4.2 - Analisi in frequenza	pag. 23
2.4.3 - Analisi ciclo-ciclo	pag. 27
2.5 - Analisi del segnale microfonico	pag. 29
2.5.1 - Analisi temporale	pag. 29
2.5.2 - Analisi in frequenza	pag. 30
2.5.3 - Analisi ciclo-ciclo	pag. 34
2.5.4 - Filtraggio digitale del segnale	pag. 39
2.5.5 - Finestratura del segnale	pag. 40
2.6 - Performance indicative dell'algoritmo di diagnosi misfire	pag. 56
2.6.1 - Influenza della lunghezza della finestra	pag. 62
2.6.2 - Influenza della forma della finestra	pag. 66
2.7 - Prime conclusioni	pag. 71
<u>Capitolo 3</u> - <i>Nuova campagna sperimentale</i>	pag. 72
3.1 - Descrizione layout sperimentale	pag. 72
3.1.1 - Caratteristiche dei microfoni	pag. 74
3.1.2 - Osservazioni sui microfoni utilizzati	pag. 80

3.1.3 - Caratteristiche dei sensori di pressione in camera	pag. 82
3.1.4 - Caratteristiche dell'accelerometro	pag. 83
3.1.5 - Allestimento del banco prova	pag. 85
3.2 - Definizione set di prove	pag. 90
3.3 - Segnali acquisiti	pag. 94
<u>Capitolo 4</u> - <i>Analisi dei dati acquisiti</i>	pag. 97
4.1 - Misfire continuo su un singolo cilindro	pag. 99
4.1.1 - Saturazione dei segnali	pag. 99
4.1.2 - Analisi temporale	pag. 101
4.1.3 - Analisi in frequenza	pag. 104
4.1.4 - Ampiezza e fase del valor medio	pag. 151
4.2 - Misfire multiplo su due cilindri	pag. 153
4.3 - Schema per la diagnosi dei misfire continui	pag. 161
4.4 - Misfire random su un singolo cilindro	pag. 164
4.4.1 - Transitorio di misfire	pag. 178
4.4.2 - Analisi dei cicli vicini al ciclo di misfire	pag. 185
<u>Capitolo 5</u> - <i>Conclusioni e sviluppi futuri</i>	pag. 189
<u>Bibliografia</u>	pag. 192

Capitolo 1

Introduzione

La presente attività di tesi si pone come obiettivo lo sviluppo preliminare di un sistema real-time di controllo della combustione nei motori ad accensione comandata, basato sulla misura diretta dell'emissione acustica tramite l'utilizzo di capsule microfoniche low cost, nell'ottica di una futura applicazione on-board.

L'emissione acustica contiene infatti numerose informazioni sui processi che hanno luogo all'interno del motore, sia per quanto riguarda il *rumore di combustione* dovuto all'incremento di pressione nel cilindro, il *rumore meccanico* generato dagli urti che si producono nei principali accoppiamenti cinematici del motore e il *rumore gasdinamico* causato dal ciclico processo di sostituzione del fluido di lavoro.

L'idea originaria di questa attività di ricerca, svolta dal DIEM dell'Università di Bologna in collaborazione con **Magneti Marelli S.p.a**, consiste proprio nell'identificazione del contenuto informativo presente nel segnale audio rilevato da un motore montato al banco prova. Interessanti risultati sono stati finora ottenuti per quanto riguarda la ricostruzione della velocità istantanea del turbocompressore [13], la diagnosi della detonazione [18] e il controllo della fasatura delle valvole [19].

In questo lavoro ci si concentrerà in particolare sul fenomeno del **misfire**, con l'obiettivo finale di realizzare un algoritmo di diagnosi di tale malfunzionamento da affiancare agli attuali algoritmi già presenti in centralina.

1.1 - Il motore ad accensione comandata

Per *motore ad accensione comandata* (in inglese *Spark Ignition*, S.I.) si intende un motore alternativo a combustione interna in cui la miscela di aria e vapori di benzina viene accesa tramite una scintilla fatta scoccare tra gli elettrodi di una candela, generando così una combustione molto rapida, idealmente a volume costante. Tali motori sono anche chiamati motori a ciclo Otto, motori ad accensione per scintilla o motori benzina [1].

1.2 - La combustione

La combustione è un complesso processo di natura fisica e chimica, attraverso il quale il combustibile si ossida liberando calore, costituendo così la fase principale del ciclo di lavoro del motore. Essa ne influenza infatti le prestazioni (potenza sviluppata e consumo di combustibile) e l'impatto esercitato sull'ambiente (composizione dei gas di scarico).

In genere si distinguono due fasi principali di tale processo: una di preparazione o *precombustione* e una di *combustione* vera e propria. Durante la fase di preparazione la scintilla fornita dalla candela genera una reazione locale che dà luogo alla formazione di alcuni reagenti intermedi. Questi a loro volta creano le condizioni per l'inizio e il progredire della combustione.

Quando scocca la scintilla, il combustibile proveniente dall'iniettore è già vaporizzato, perché sottoposto al calore della compressione e intimamente mescolato con l'aria richiesta per la combustione. Intorno alla scintilla si forma il focolaio iniziale o nucleo di fiamma; da questo la combustione si propaga gradualmente a tutta la carica attraverso un *fronte di fiamma* rappresentato dalla superficie più o meno irregolare di separazione fra la parte di miscela già accesa e quella che ancora non lo è.

Man mano che la combustione procede e si completa, la pressione e la temperatura all'interno del cilindro aumentano rapidamente.

Un processo di combustione che si sviluppi nel modo descritto è definito *combustione normale*. L'accensione avviene all'istante voluto come conseguenza della scintilla e le singole particelle cominciano a bruciare quando sono raggiunte dal fronte di fiamma e non prima. Non si hanno altri inneschi di accensione causati da depositi carboniosi o parti surriscaldate della candela o della camera di combustione; la combustione si sviluppa in modo graduale, per cui lo sviluppo di energia da parte della miscela che brucia è progressivo e regolare [4].

Tale condizione ottimale non sempre si verifica, in quanto le condizioni per l'accensione e la velocità di propagazione del fronte di fiamma dipendono da vari fattori, tra cui i principali sono: turbolenza, rapporto aria/combustibile, stratificazione della miscela, temperatura e pressione in camera di combustione, umidità, quantità di gas residui.

Quando la combustione non si sviluppa correttamente si è in presenza di cosiddette *combustioni anormali*, tra cui le più dannose ai fini del funzionamento del motore sono: detonazione e misfire.

In questa trattazione si analizzerà il fenomeno del misfire o mancata accensione della miscela.

1.3 - Il misfire

Con il termine "*misfire*" si intende in generale la mancanza di combustione nel cilindro di un motore ad accensione comandata, dovuta all'assenza di scintilla, ad una errata dosatura del combustibile, ad una scarsa compressione, a problemi nei sistemi di accensione e iniezione o a qualsiasi altra causa.

È una condizione di malfunzionamento altamente indesiderata in quanto produce una coppia nulla o ridotta durante il ciclo e soprattutto perché il combustibile permane nei gas di scarico andando a costituire un potenziale danno per il convertitore catalitico. La miscela fresca non combusta, infatti, raggiunge il catalizzatore dove trova le condizioni necessarie per l'ossidazione, provocando un innalzamento eccessivo della temperatura con conseguenti danni irreversibili se il malfunzionamento permane per vari cicli. Inoltre, il misfire contribuisce ad innalzare il livello di emissioni inquinanti anche quando il grado di tale malfunzionamento e le condizioni operative non influiscono seriamente sulle prestazioni del catalizzatore.

Il danneggiamento del catalizzatore e l'aumento delle emissioni costituiscono quindi il motivo principale per cui è necessaria l'implementazione di un sistema di diagnosi misfire in centralina.

Non c'è piena concordanza su cosa costituisca un ciclo di misfire. Una possibile classificazione è quella proposta da Heywood [2], che classifica i cicli di combustione anormale in tre gruppi:

- Cicli con combustione lenta (*slow-burn cycles*): con IMEP compresa tra 85% e 46% del valore medio e dove la combustione è completa ma finisce 80° ATDC.
- Cicli con combustione parziale (*partial-burn cycles*): con IMEP minore del 46% del valor medio.
- Cicli con misfire (*misfiring cycles*): con IMEP uguale o inferiore a zero.

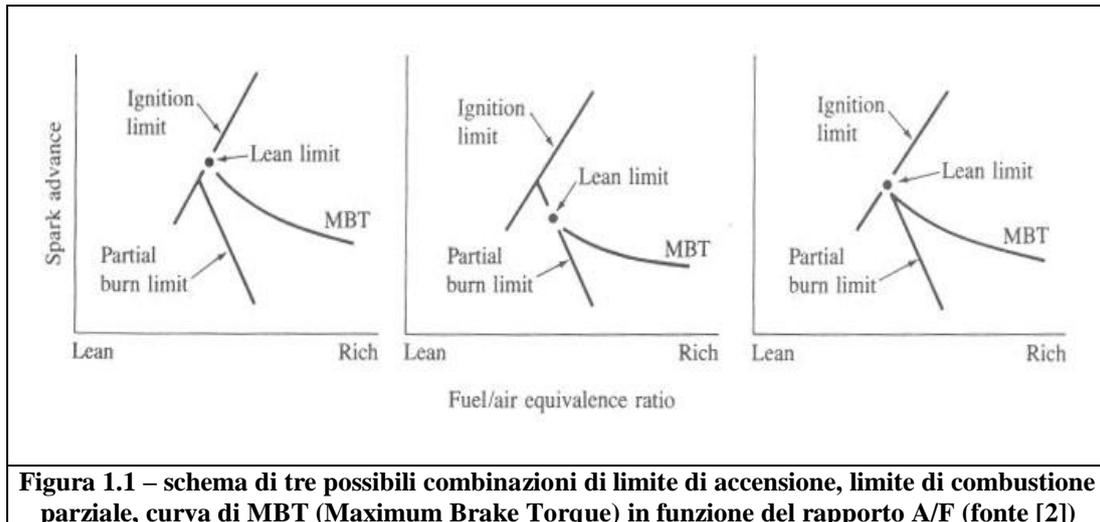


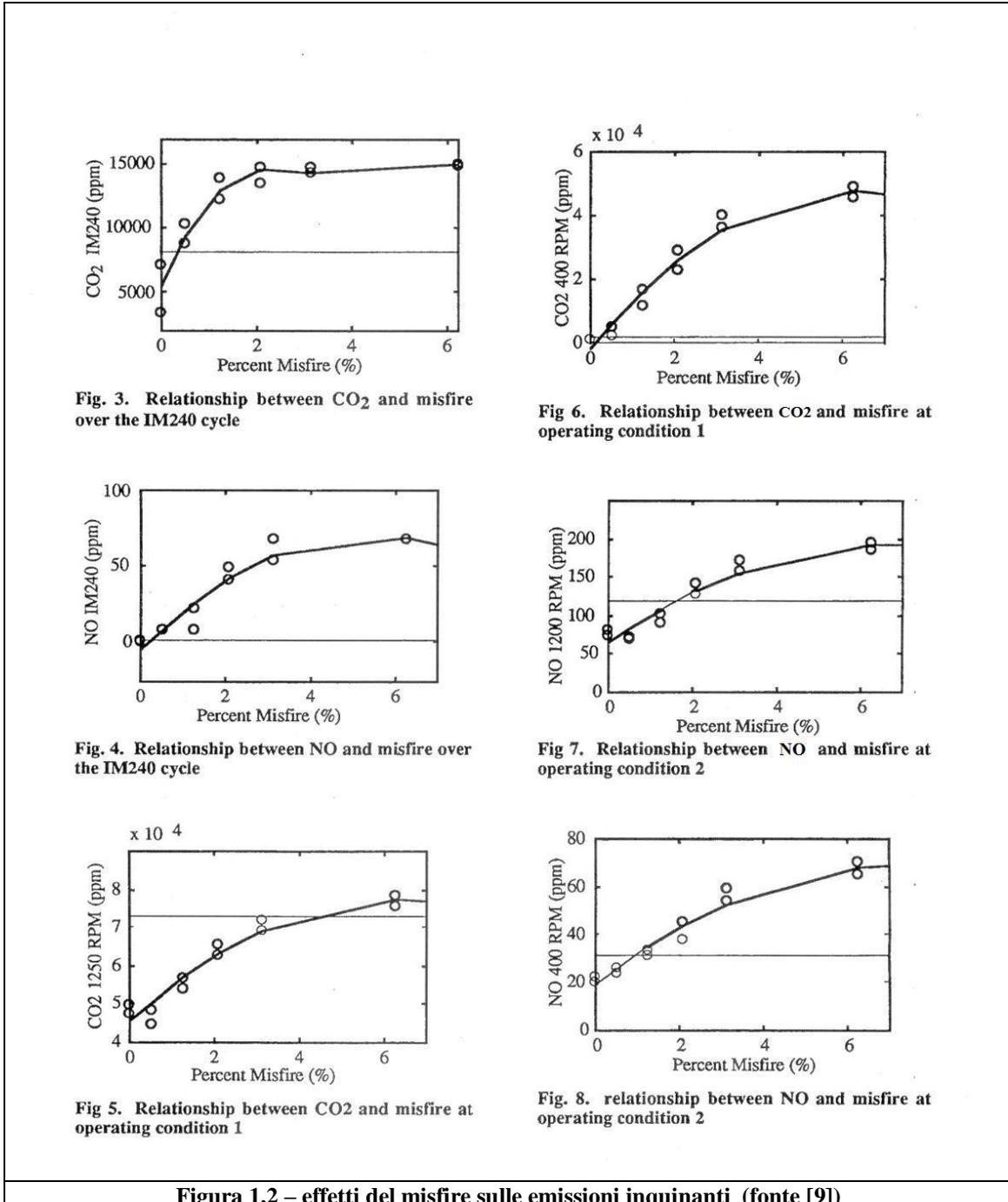
Figura 1.1 – schema di tre possibili combinazioni di limite di accensione, limite di combustione parziale, curva di MBT (Maximum Brake Torque) in funzione del rapporto A/F (fonte [2])

Come si può vedere in fig. 1.1, sono stati effettuati esperimenti per definire la posizione del limite di accensione e del limite di combustione parziale. Tali curve non presentano però un comportamento sempre uguale, ma dipendono dalle caratteristiche del motore, del sistema di accensione e dalle condizioni operative. Muovendoci sulla curva di MBT, per esempio, si può notare come, smagrendo la miscela, il limite di combustione parziale può venire o meno raggiunto prima dell'insorgere del misfire.

Lo scopo della diagnostica on-board (OBD) è quello di identificare la presenza di tale malfunzionamento, in modo da allertare il conducente prima che il livello di emissioni inquinanti superi una certa soglia stabilita dalle normative (ed ovviamente in modo da poter interrompere determinate attuazioni – ad esempio l'iniezione – e/o determinate strategie – ad esempio il controllo in closed loop di lambda).

L'effetto del misfire sulle emissioni inquinanti è piuttosto complicato. Il livello di emissioni varia, infatti, sia in base alla percentuale di mancate combustioni che alle condizioni operative del motore, oltre che, ovviamente, in base ai sistemi di abbattimento degli inquinanti installati. Un'analisi di tipo statistico [9] mostra come le emissioni di NO siano molto più sensibili al misfire rispetto a quelle di CO₂ e che è sufficiente una bassa

percentuale di misfire per superare il limite consentito (in questo caso 1.5 volte gli standard, evidenziato in figura 1.2 con una linea orizzontale).



1.3.1 - Normative

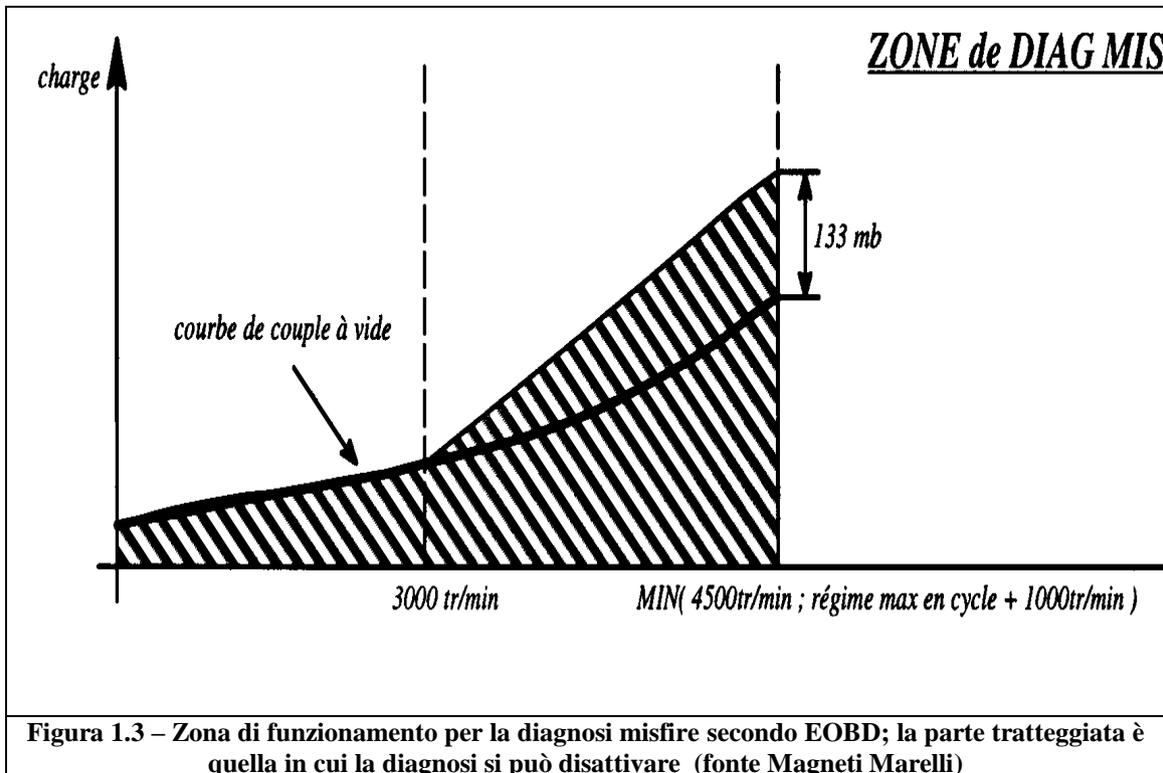
La norma *EOBD* (European On-Board Diagnostic) [30] impone l'individuazione di un eventuale difetto di un sistema antinquinamento quando il cattivo funzionamento del sistema stesso provoca un aumento delle emissioni oltre i livelli previsti dalla legge, indicati di seguito:

		Massa di riferimento	Massa di Monossido di carbonio		Massa di idrocarburi totali		Massa di ossidi di azoto		Massa del particolato ⁽¹⁾
		(RW) (kg)	(CO) L1 (g/km)		(HC) L2 (g/km)		(NOx) L3 (g/km)		(PM) L4 (g/km)
Cat.	Classe		Benzina	Gasolio	Benzina	Gasolio	Benzina	Gasolio	Diesel
M ⁽²⁾⁽⁴⁾	---	totale	3, 20	3, 20	0, 40	0, 40	0, 60	1, 20	0, 18
N1 ⁽³⁾⁽⁴⁾	I	$RW \leq 1305$	3, 20	3, 20	0, 40	0, 40	0, 60	1, 20	0, 18
	II	$1305 < RW \leq 1760$	5, 80	4, 00	0, 50	0, 50	0, 70	1, 60	0, 23
	III	$1760 < RW$	7, 30	4, 80	0, 60	0, 60	0, 80	1, 90	0, 28
(1) Per i motori ad accensione spontanea (2) Con l'eccezione dei veicoli la cui massa massima supera 2500 kg (3) Compresi i veicoli di categoria M di cui alla nota (2) (4) La proposta della Commissione di cui all'articolo 3, par, 1, della presente direttiva indicherà i valori limite per il 2005/2006 per i veicoli M1 e N1									
Tabella 1.1 – limiti di emissioni inquinanti per la diagnosi misfire secondo le norme EOBD (fonte [30])									

Nel caso del misfire, la norma impone la diagnosi dei casi di mancata accensione in fase di combustione quando il motore funziona ad un regime delimitato dalle seguenti curve:

- a) Velocità massima di 4500 rpm o di 1000 rpm superiore alla velocità più elevata registrata durante un ciclo ECE+EUDC, prendendo in considerazione il più basso tra i due valori.
- b) Linea di coppia positiva, cioè il carico del motore con trasmissione in folle.

- c) Una linea che colleghi i seguenti punti operativi del motore: la linea di coppia positiva a 3000 rpm e un punto sulla linea della velocità massima definita al precedente punto a) con la pressione di aspirazione del motore di 13,33 kPa superiore a quella registrata alla linea di coppia positiva.



Nel caso di veicoli muniti di motore ad accensione comandata, non è necessario che i cilindri responsabili dell'accensione irregolare siano identificati singolarmente, se è stato identificato un distinto codice di guasto che indica l'accensione irregolare di uno o più cilindri. Inoltre il sistema di diagnosi può essere disattivato in presenza di condizioni che impediscano di distinguere il misfire da altri effetti (ad esempio, strada in cattive condizioni, variazioni nella trasmissione, situazione successiva all'accensione del motore, sistemi di controllo della coppia, ecc.).

La normativa americana *OBD II* (On-Board Diagnostic II) [31] è più stringente per quanto riguarda la diagnosi misfire. I sistemi OBD-II devono essere in grado di diagnosticare un malfunzionamento per entrambi questi casi:

- 1) *Misfire che causa un danneggiamento del catalizzatore*: i costruttori devono essere in grado di determinare, per ogni condizione di regime e carico, la percentuale di mancate accensioni valutata su 200 giri motore che causerebbe un aumento di temperatura tale da danneggiare il catalizzatore.

- 2) *Misfire che causa un aumento delle emissioni pari a 1.5 volte gli standard FTP* (Federal Test Procedure): i costruttori devono essere in grado di determinare la percentuale di mancate accensioni valutata su 1000 giri motore che causerebbe un aumento delle emissioni, durante un ciclo di durata, pari a 1.5 volte gli standard FTP se la percentuale di misfire fosse presente dall'inizio della prova. Per stabilire questa percentuale, il costruttore deve generare misfire su un cilindro selezionato di volta in volta in maniera random ad intervalli equidistanti di cicli motore.

Una volta individuate queste soglie, il sistema di diagnosi deve essere in grado di accendere una spia luminosa MIL (Malfunction Indication Light) sul pannello di strumentazione del veicolo non appena quest'ultime vengano superate, in modo da avvisare tempestivamente il conducente del malfunzionamento. In particolare, la spia deve essere fissa quando si supera la soglia nel caso 1) e intermittente quando si supera la soglia per il caso 2). Nel caso di *misfire singolo*, il sistema OBD II deve inoltre essere in grado di identificare lo specifico cilindro in cui questo avviene, mentre nel caso di

misfire multiplo è sufficiente che il sistema diagnostichi la presenza di mancate accensioni su più cilindri, senza identificare quali questi siano.

Per quanto riguarda il monitoraggio, il sistema OBD II deve essere attivo in continuazione sotto le seguenti condizioni:

- A partire da non più tardi del secondo giro dell'albero motore dopo l'avviamento.
- Sotto tutte le condizioni di carico e velocità che generano coppia positiva, eccetto la zona sottostante la linea di coppia positiva (cioè il carico del motore con la trasmissione in folle) e una linea che collega i due seguenti punti di funzionamento del motore: il punto sulla curva di coppia positiva a 3000 rpm e un punto sulla "redline engine speed" (cioè il massimo regime motore raccomandato come evidenziato nei tachimetri) ad una pressione di aspirazione superiore di 4 pollici di mercurio (circa 13,5 kPa) rispetto a quella in corrispondenza della linea di coppia positiva.

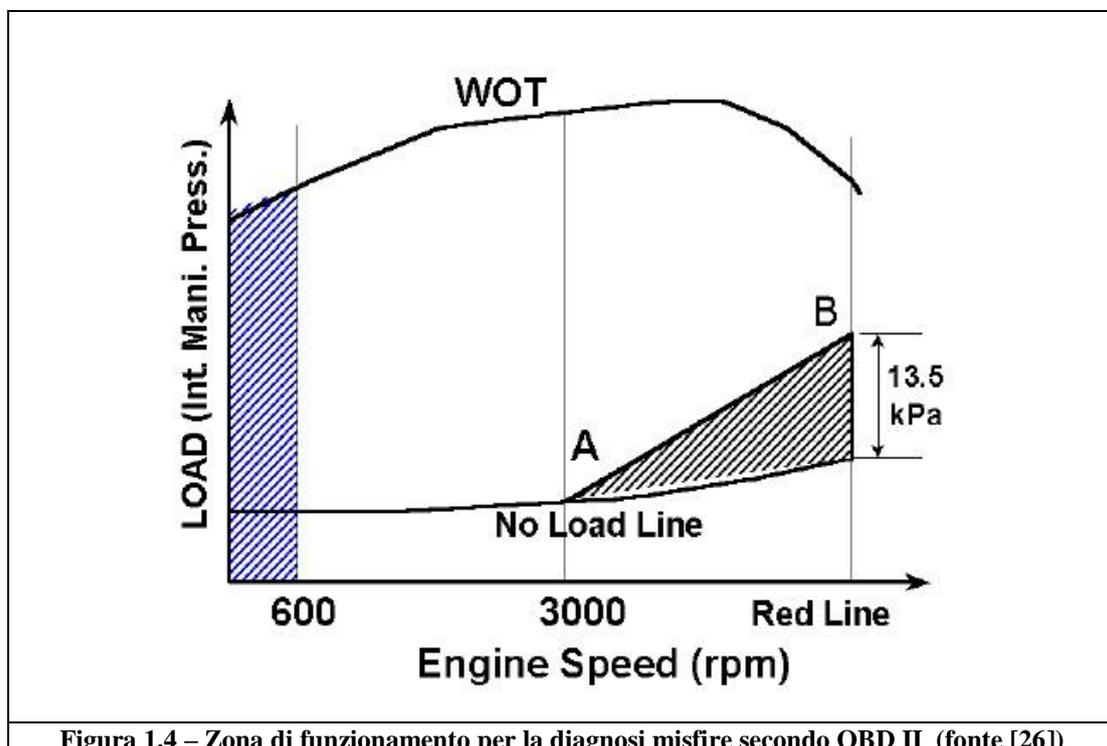


Figura 1.4 – Zona di funzionamento per la diagnosi misfire secondo OBD II (fonte [26])

La differenza fondamentale tra le due normative consiste quindi nel fatto che la OBD II richiede l'attivazione della diagnosi misfire su quasi tutto il campo di funzionamento del motore (fino alla zona rossa di massimo regime, esclusa la parte tratteggiata in figura 1.4), mentre la normativa europea permette di fermarsi a regimi inferiori.

Inoltre la normativa americana è più intransigente per quanto riguarda la possibilità di disattivare tale diagnosi in presenza di condizioni per le quali potrebbe generare errori o falsi allarmi (per esempio: strada dissestata, transitori motore, presenza di sistemi di controllo della coppia, ecc.). L'elencazione di tali condizioni viene tralasciata per non appesantire troppo la trattazione.

1.3.2 - Metodi per la diagnosi misfire

La necessità di soddisfare tali normative ha spinto le case automobilistiche all'implementazione in centralina di algoritmi per la diagnosi misfire sempre più efficienti.

Varie soluzioni sono state sperimentate. Attualmente i sistemi maggiormente impiegati si basano sull'elaborazione del segnale proveniente dalla ruota fonica ([7],[8],[12],[22],[23],[28]). Una mancata accensione, infatti, provoca una diminuzione della coppia all'albero che, a sua volta, genera un rallentamento della velocità di rotazione del motore che può essere utilizzato per ricavare un indice di diagnosi misfire. Questi sistemi non richiedono la presenza di nessun hardware aggiuntivo e si rivelano adeguati per motori con bassa frazionatura, mentre presentano dei problemi per motori con un elevato numero di cilindri, soprattutto in condizioni di funzionamento ad alti regimi e bassi carichi dove la variazione di velocità causata dal misfire è più difficilmente percepibile. Inoltre, algoritmi basati su tale segnale entrano in difficoltà ogniqualvolta

siano presenti eventi che vadano a modificare la coppia motrice e quindi la velocità di rotazione della ruota fonica, come, per esempio, la marcia su strada dissestata, i cambi marcia, l'intervento di sistemi di controllo della trazione, ecc..

Un altro sistema utilizzato si basa sulla corrente di ionizzazione circolante tra gli elettrodi della candela durante l'istante di accensione della miscela ([10],[24]). Monitorando l'andamento di tale corrente è possibile stabilire se l'accensione è avvenuta correttamente o meno. Tale metodo ha il vantaggio di non essere legato al segnale di ruota fonica, ma richiede la presenza di componenti hardware aggiuntivi sul circuito di accensione.

Ulteriori sperimentazioni sono state effettuate utilizzando come segnale di ingresso la pressione nei condotti di scarico ([25],[27],[35]), la vibrazione del blocco motore ([29],[32],[34]) e il contenuto di ossigeno nei gas di scarico ([33]).

Attualmente non sono stati riscontrati in bibliografia sistemi per la diagnosi misfire basati sull'analisi di un segnale audio registrato direttamente dal motore tramite l'utilizzo di capsule microfoniche commerciali low-cost.

Capitolo 2

Attività sperimentale preliminare

La presente attività di ricerca si colloca nell'ambito dei precedenti lavori svolti dall'Ing. Bisanti [18] e dall'Ing. Cesaroni [19] sull'analisi del contenuto informativo di *segnali audio* rilevati tramite capsule microfoniche installate sul motore.

Il motore utilizzato è un *Volkswagen 1400cc 4 cilindri S.I.*, del quale si riportano le specifiche geometriche nella tabella sottostante:

CILINDRATA	1390 cm ³
NUMERO DI CILINDRI	4, in linea
NUMERO DI VALVOLE	16
SISTEMA DI INIEZIONE	SPEED-DENSITY MULTI-POINT, PFI
RAPPORTO DI COMPRESSIONE	10.5:1
CORSA	75.6mm
ALESAGGIO	76.5mm
E.C.U	Magneti Marelli
ALIMENTAZIONE	BENZINA

Tabella 2.1- Caratteristiche Motore VW 1400cc (fonte [18])

Tali lavori si sono concentrati in particolare sul fenomeno della detonazione e sul controllo della fasatura delle valvole.

In questo caso si è cercato di utilizzare il segnale audio rilevato per ricavare informazioni sul *misfire*, cercando, attraverso un'analisi preliminare effettuata sul database a disposizione, di individuare caratteristiche utili al

fine dello sviluppo di un algoritmo per la diagnosi di tale malfunzionamento.

2.1 - Descrizione layout sperimentale

Il database a cui si farà riferimento è stato ricavato tramite una campagna di prove sperimentali svolta presso le sale prova della Magneti Marelli Powertrain di Bologna. Bisogna sottolineare che tale campagna era stata pensata inizialmente in sola ottica diagnosi detonazione, quindi le acquisizioni utili per il controllo valvole e la diagnosi misfire risultano limitate dal punto di vista quantitativo.

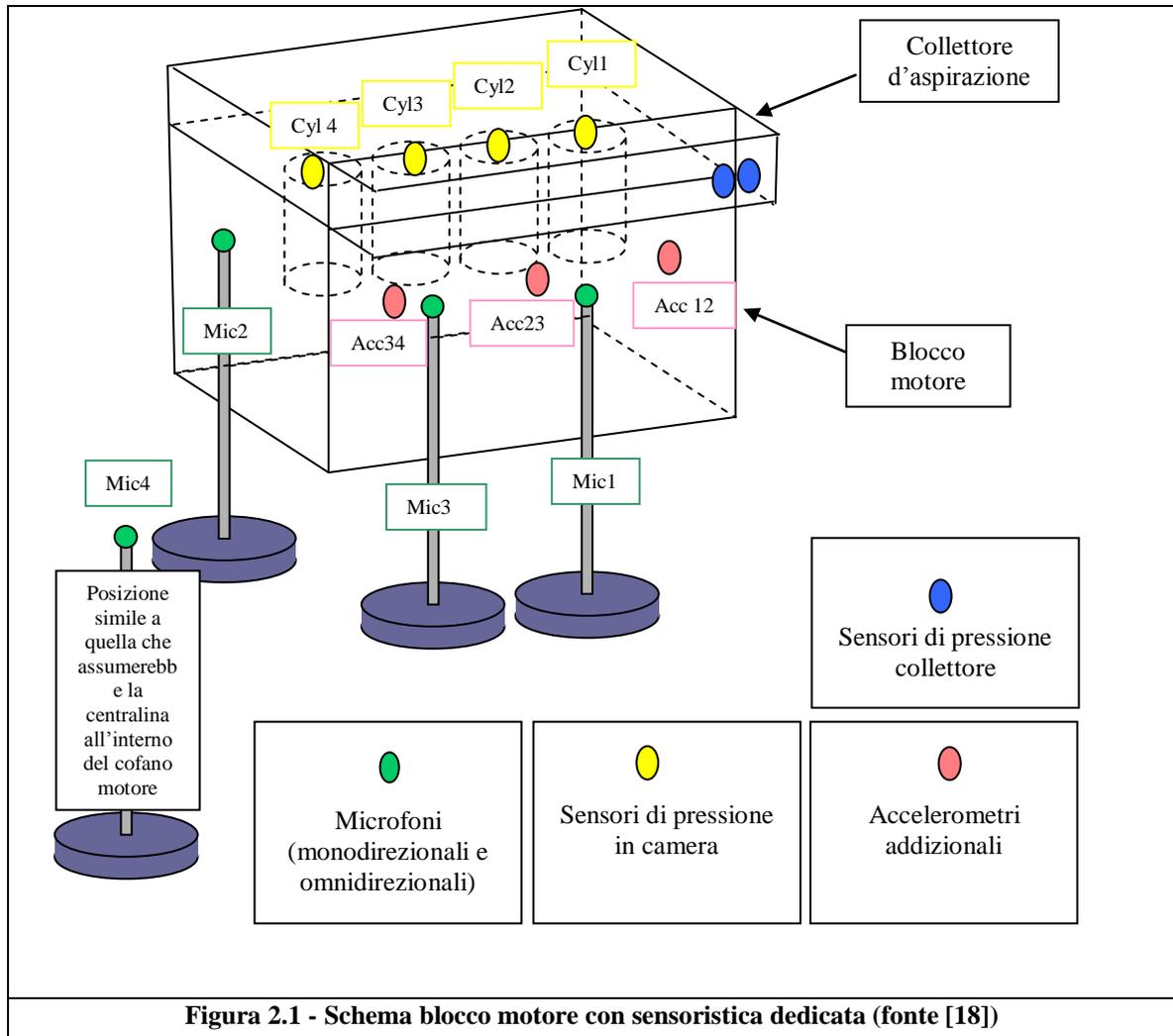
Per svolgere tale attività, il motore sopra menzionato è stato strumentato con una sensoristica dedicata non presente di serie, riassunta di seguito e descritta nel dettaglio in [18]:

- *2 microfoni capacitivi monodirezionali*
- *2 microfoni capacitivi omnidirezionali*
- *3 accelerometri*
- *4 sensori di pressione in camera di combustione*
- *1 sensore di pressione nel collettore di aspirazione*

Nella figura seguente si può avere un'idea di massima sulla posizione di tali sensori:

- *Microfono omnidirezionale 1*: posizionato trasversalmente all'albero motore ad una distanza di circa 50 mm dal motore in corrispondenza delle camere di combustione fra i cilindri 2 e 3

- Microfono monodirezionale 2: posizionato trasversalmente all'albero in corrispondenza dell'interfaccia testata-basamento del cilindro 4 ad una distanza di circa 50mm dal lato aspirazione
- Microfono monodirezionale 3: posizionato in corrispondenza dell'interfaccia testata-basamento del cilindro 4 ad una distanza di circa 10 mm in direzione longitudinale all'albero motore
- Microfono omnidirezionale 4: posizionato, rispetto al motore al banco, nella posizione che la centralina assumerebbe se si trovasse nel cofano motore



Una foto dell'allestimento cella può essere visualizzato nella figura seguente:

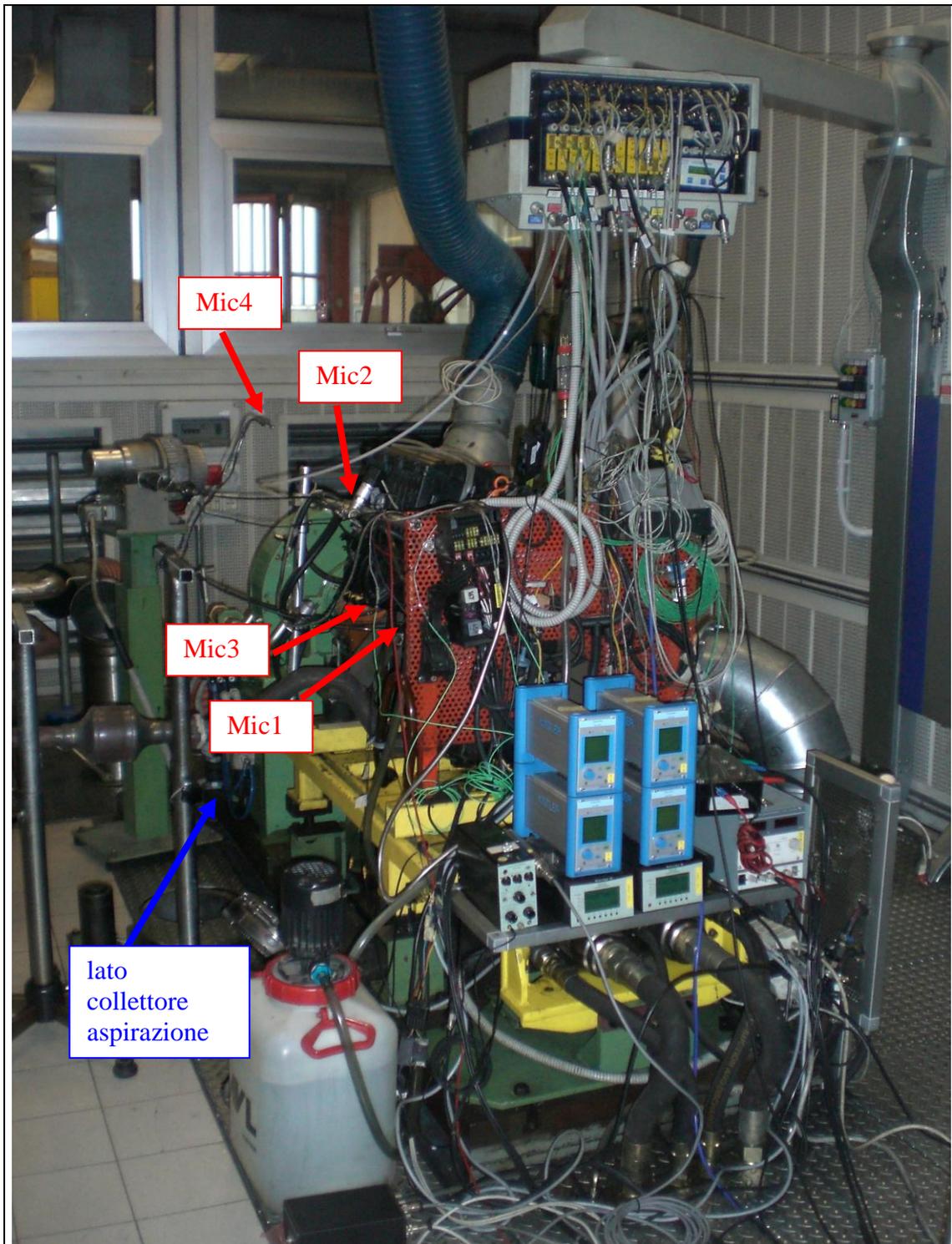


Figura 2.2 - Foto cella (fonte [18])

2.2 - Grandezze acquisite

Oltre alle grandezze provenienti dai sensori fin qui analizzati sono stati acquisiti anche i segnali di ruota fonica tramite un sensore effetto Hall (di serie) e quello proveniente dal sensore di fase montato sull'asse a camme.

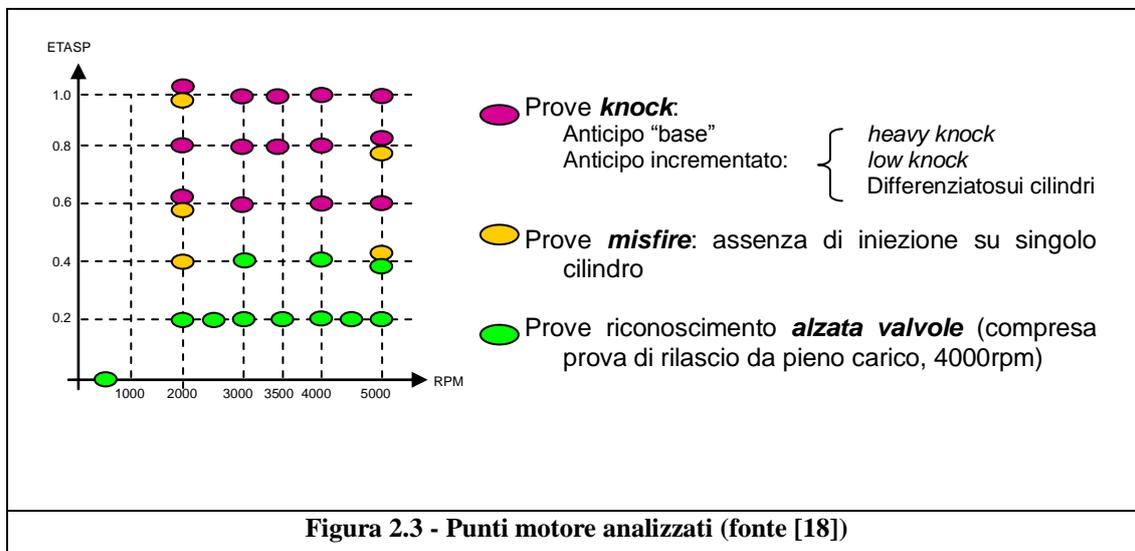
Tutte le grandezze fin qui citate sono state acquisite con un *oscilloscopio Yokogawa 716 a 16 canali* ad una frequenza di campionamento di **50 kHz**. Tale frequenza è stata ritenuta idonea date le frequenze di interesse massime pari a 20 kHz nel caso della detonazione , ma potrebbe non essere adeguata in caso si vogliano esplorare altre caratteristiche del processo di combustione. Per ulteriori dettagli e per la consultazione dei nomi delle variabili al quale si farà riferimento nei capitoli successivi si può consultare la tabella 2.2.

Canale	Variabile	Nome
1	Pressione cilindro 1	PCYL1
2	Pressione cilindro 2	PCYL2
3	Pressione cilindro 3	PCYL3
4	Pressione cilindro 4	PCYL4
5	Accelerometro addizionale montato sopra quello di serie	ACC_23
6	Accelerometro addizionale tra cilindro 1 e 2	ACC_12
7	Accelerometro addizionale tra cilindro 3 e 4	ACC_34
8	Microfono Omnidirezionale a 20mm	DATO_M1
9	Microfono Omnidirezionale vicino alla centralina	DATO_M4
10	Microfono Monodirezionale Trasversale	DATO_M3
11	Microfono Monodirezionale Longitudinale	DATO_M2
12	Pressione collettore di serie	PRES_COLL_S
13	Pressione collettore addizionale	PRES_COLL_A
14	Segnale di posizione dell'asse a camme	FASE
15	Segnale di fonica	FONICA
16	Segnale carica bobina cilindro 1	C_BOB

Tabella 2.2 - Variabili acquisite tramite oscilloscopio (fonte [18])

2.3 – Punti motore analizzati

Si riporta di seguito la tabella con indicate le prove effettuate durante la prima campagna sperimentale:



NUMERO PROVA	RPM	ETASP	ANTICIPO-RISPETTO AL VALORE BASE	NOME PROVA
1	2000	0.9	7	R20_E10_DET
2	2000	0.7	11	R20_E07_DET
3	4000	1.0	5.5	R40_E10_DET
4	5000	0.9	-	R50_E10_BAS
5	5000	0.9	4.5	R50_E10_DET
6	4000	1	-	R40_E10_BAS
7	2000	0.9	-	R20_E10_BAS
8	2000	0.2	-	R20_E02_BAS
9	2000	0.5	-	R20_E05_BAS
10	2000	0.5	16	R20_E05_DET
11	2000	0.7	-	R20_E07_BAS
12	2000	1	-, misfire cyl1	R20_E10_MM1
13	2000	1	-, misfire cyl3	R20_E10_MM3
14	2000	1	-, misfire cyl4	R20_E10_MM4
15	680	0	-	R08_E00_BAS
16	1000	0.2	-	R10_E02_BAS
17	1500	0.2	-	R15_E02_BAS
18	2500	0.2	-	R25_E02_BAS
19	3000	0.2	-	R30_E02_BAS
20	3500	0.2	-	R35_E02_BAS
21	4000	0.2	-	R40_E02_BAS
22	4500	0.2	-	R45_E02_BAS
23	5000	0.2	-	R50_E02_BAS
24	4000	0.6	-	R40_E06_BAS

25	4000	0.6	11	R40_E06_DET
26	4000	0.8	-	R40_E08_BAS
27	4000	0.8	7	R40_E08_DET
28	3000	1	-	R30_E10_BAS
29	3000	1	5	R30_E10_DET
30	2000	0.4	-, misfire cyl3	R20_E04_MM3
31	2000	0.6	-, misfire cyl3	R20_E06_MM3
32	5000	0.4	-, misfire cyl3	R50_E04_MM3
33	5000	0.8	-, misfire cyl3	R50_E08_MM3
34	5000	0.7	-	R50_E07_BAS
35	5000	0.7	5	R50_E07_DET
36	5000	0.5	-	R50_E05_BAS
37	5000	0.5	8	R50_E05_DET
38	5000	0.7	3	R50_E07_LWK
39	3000	0.7	8.5	R30_E07_DET
40	2000	0.9	8.5 su cyl 1, 0 su cyl 2-3-4	R20_E10_KM1
41	2000	0.9	7 su cyl 3, 0 su 1-2-4	R20_E10_KM3
42	2000	0.9	7 su cyl 4, 0 su 1-2-3	R20_E10_KM4
43	2000	0.9	3.5	R20_E10_LWK
44	2000	0.9	+1 OGNI 6 SEC.	R20_E10_ANT
45	4000->600	0.15->0	-	RXX_EXX_VAL
46	4000	0.8	8.5 cyl 1-4,7 su cyl 2-3	R40_E08_D2
47	2000	0.9	8.5 su cyl 1, 7 su cyl 2-3-4	R20_E10_D2
48	4000	1	7 su cyl 1-4, 5.5 su cyl 2-3	R40_E10_D2
49	5000	1	5.5	R50_E10_D2
50	3000	0.4	-	R_30_E04_BAS
51	4000	0.4	-	R40_E04_BAS
52	5000	0.4	-	R50_E04_BAS
53	3000	0.7	-	R30_E07_BAS
54	3500	1	6	R35_E10_DET
55	3500	0.8	7.5	R35_E08_DET

Tabella 2.3 - Prove effettuate (fonte [18])

Come si può notare, le prove in ottica diagnosi misfire sono molto limitate, in particolare sono:

- *R20_E10_MM1* – 2000 rpm, ETASP¹ = 1, misfire continuo su cilindro 1
- *R20_E10_MM3* – 2000 rpm, ETASP = 1, misfire continuo su cilindro 3

¹ ETASP = variabile utilizzata in centralina Magneti Marelli legata al rendimento di aspirazione del motore, quindi proporzionale al carico.

- *R20_E10_MM4* – 2000 rpm, ETASP = 1, misfire continuo su cilindro 4
- *R20_E04_MM3* – 2000 rpm, ETASP = 0.4, misfire continuo su cilindro 3
- *R20_E06_MM3* – 2000 rpm, ETASP = 0.6, misfire continuo su cilindro 3
- *R20_E04_MM3* – 5000 rpm, ETASP = 0.4, misfire continuo su cilindro 3
- *R20_E08_MM3* – 5000 rpm, ETASP = 0.8, misfire continuo su cilindro 3

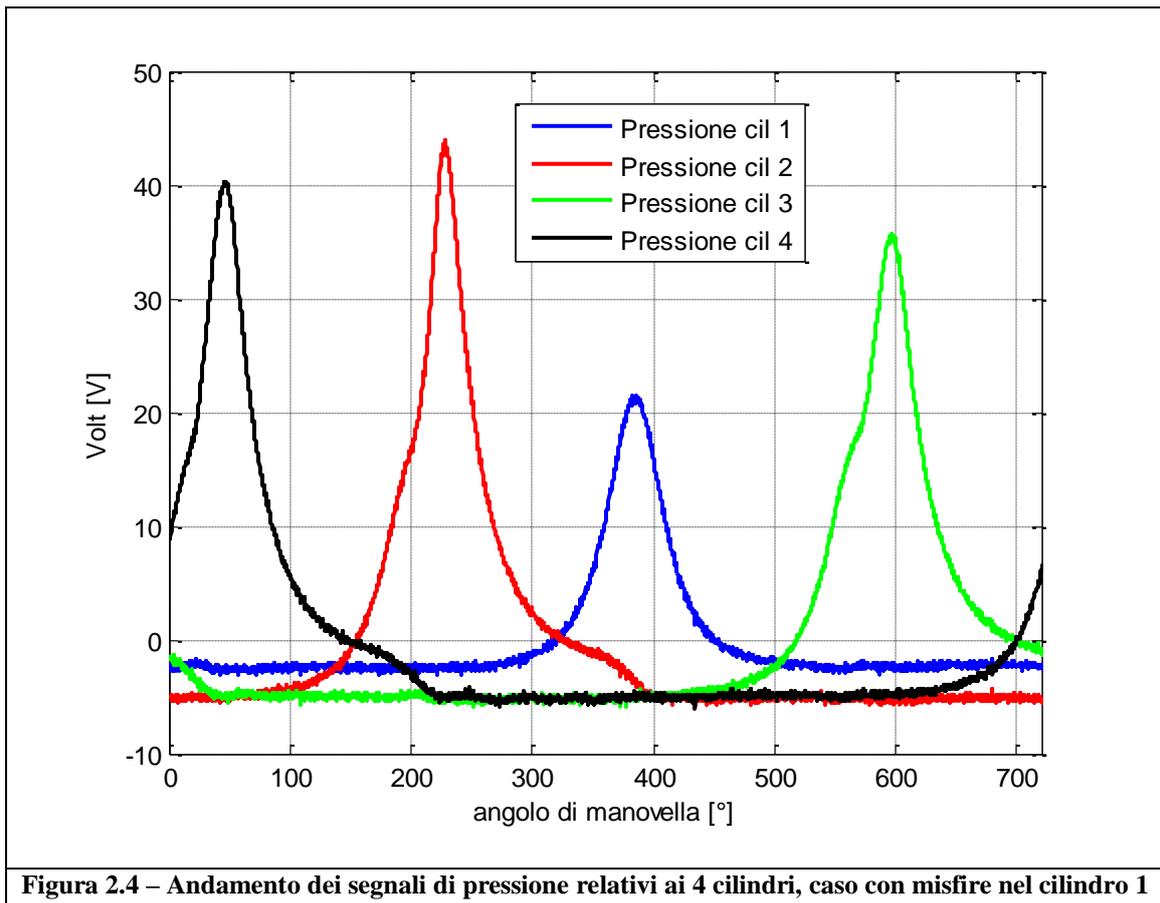
D'ora in avanti si farà sempre riferimento a queste prove per le analisi che verranno svolte.

2.4 – Analisi del segnale di pressione in camera di combustione

Il segnale di pressione in camera rappresenta il termine di riferimento per qualsiasi analisi relativa al processo di combustione, in quanto è il segnale più direttamente legato all'evolversi delle condizioni termodinamiche all'interno del cilindro. Tale segnale, però, non è disponibile in ambito automotive a causa degli elevati costi di tali sensori, la cui applicazione è finora relegata alla sola attività di ricerca.

2.4.1 – Analisi temporale

In figura 2.4 si riporta l'andamento dei segnali di pressione “grezzi” nel caso con misfire sul cilindro 1, plottati per un intervallo angolare pari ad un ciclo motore (720° di angolo di manovella).



Con il termine “grezzo” si intende il segnale così come viene rilevato dalla catena di misura, senza nessuna operazione di postprocessing. L’output è perciò rappresentato in Volt e si nota anche come il segnale relativo al cilindro in misfire presenti un valore durante la fase di aspirazione superiore rispetto agli altri cilindri. Ciò è dovuto al fatto che il sensore di misura genera, per le sue caratteristiche costruttive, un output a valor medio nullo, che andrebbe recuperato attraverso tecniche di referenziazione della pressione. In questa trattazione si preferisce non applicare queste tecniche in quanto tale offset non è influente al fine delle analisi che si andranno ad effettuare.

Ciò che interessa notare è che, in caso di mancata combustione, la pressione nel relativo cilindro presenta un valore di picco nettamente inferiore rispetto ai casi con combustione normale. Inoltre si ricorda che tali segnali contengono informazioni relative soltanto al singolo cilindro nel

quale i sensori sono installati, sono quindi segnali “locali”, mentre il segnale microfonico è un segnale “globale”, in quanto registra il rumore proveniente da tutti i cilindri.

Se si vuole confrontare questi due tipi di segnale è perciò necessario costruirsi un segnale “artificiale”, cioè senza una correlazione diretta con il fenomeno fisico, che contenga informazioni sulla combustione in tutti i 4 cilindri. Tale segnale, chiamato *pressione totale*, è stato ottenuto sommando i contributi dei 4 segnali di pressione rilevati su ogni singolo cilindro, cioè:

$$P_{tot} = P_{cyl1} + P_{cyl2} + P_{cyl3} + P_{cyl4}$$

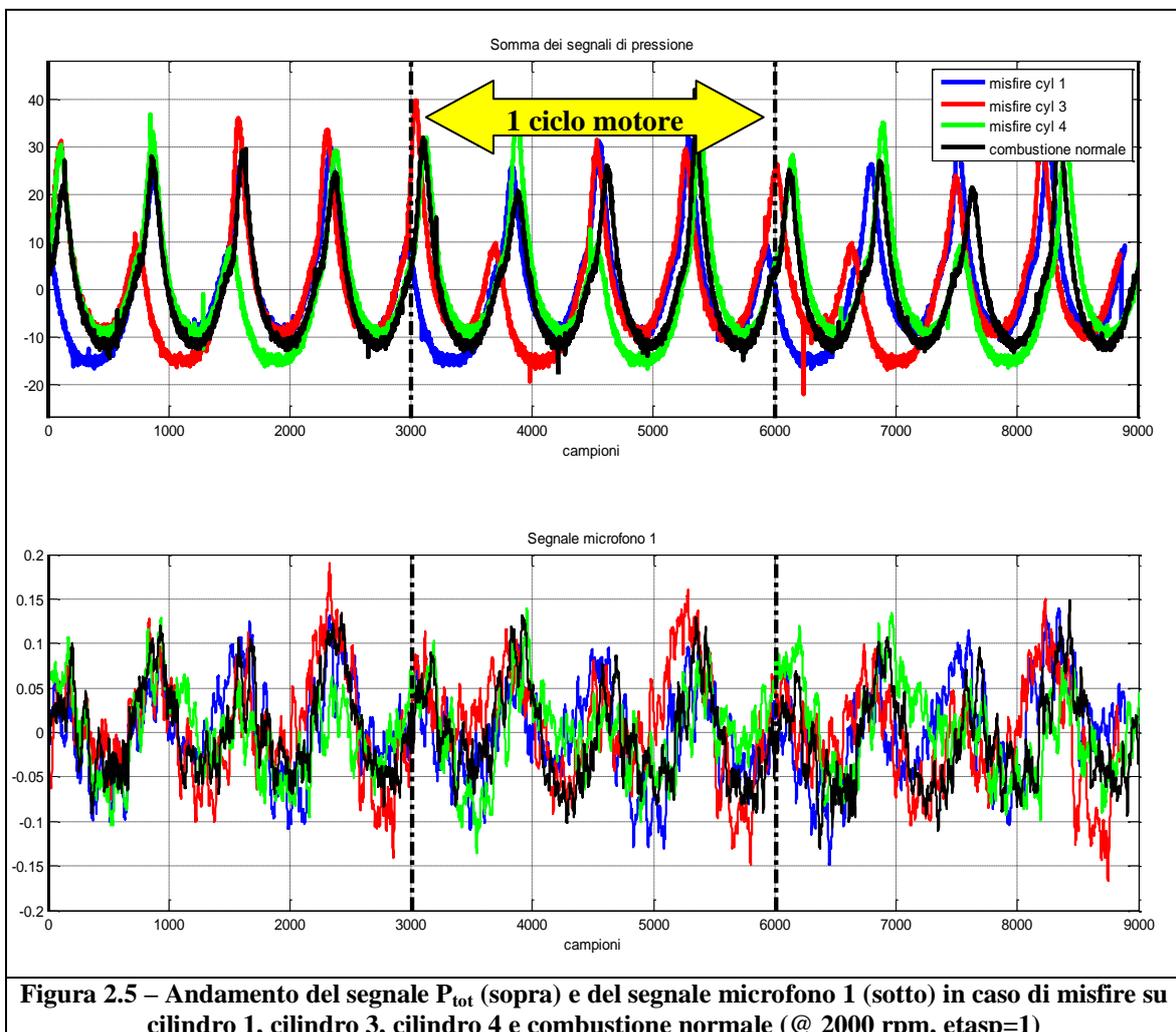


Figura 2.5 – Andamento del segnale P_{tot} (sopra) e del segnale microfono 1 (sotto) in caso di misfire su cilindro 1, cilindro 3, cilindro 4 e combustione normale (@ 2000 rpm, etasp=1)

Nella figura precedente, è stato plottato su base campioni (quindi tempo; essendo le prove fatte a velocità costante non è necessario passare su base angolo) l'andamento di P_{tot} per le prove a 2000 rpm, ETASP=1 e misfire continuo sui cilindri 1,3,4, confrontando tale andamento con quello nel caso di combustione normale su tutti i cilindri.

In quest'ultimo caso, si nota chiaramente come il segnale presenti 4 picchi di pressione di ampiezza paragonabile per ogni ciclo, il che, essendo il motore in esame un 4 cilindri, corrisponde proprio alla *frequenza di combustione*

$f_{comb} = \frac{n_{[rpm]}}{120} \cdot z$, dove si è indicato con n la velocità di rotazione

del motore e con z il numero dei cilindri.

In presenza di una mancata accensione, invece, si evidenzia la presenza di un picco di ampiezza nettamente inferiore, che si ripete una volta per ciclo,

cioè alla *frequenza di ciclo* $f_{ciclo} = \frac{n_{[rpm]}}{120}$, con una posizione diversa a

seconda di quale sia il cilindro in misfire, teoricamente quindi sfasati di $\frac{720^\circ}{z} = 180^\circ$ per il motore in esame.

Tali osservazioni hanno portato a ritenere che fosse più opportuno effettuare un'analisi in frequenza del segnale, in modo da evidenziarne meglio le componenti spettrali alle frequenze di interesse (f_{ciclo} , $f_{combustione}$).

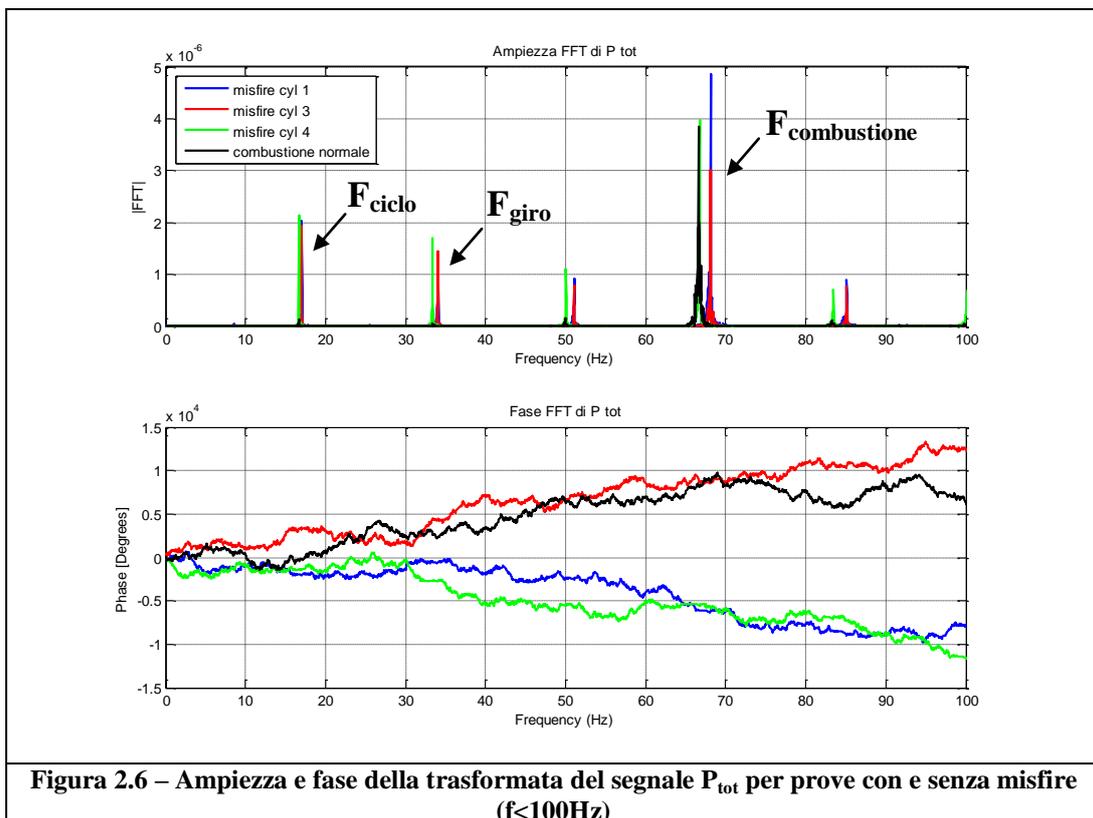
2.4.2 – Analisi in frequenza

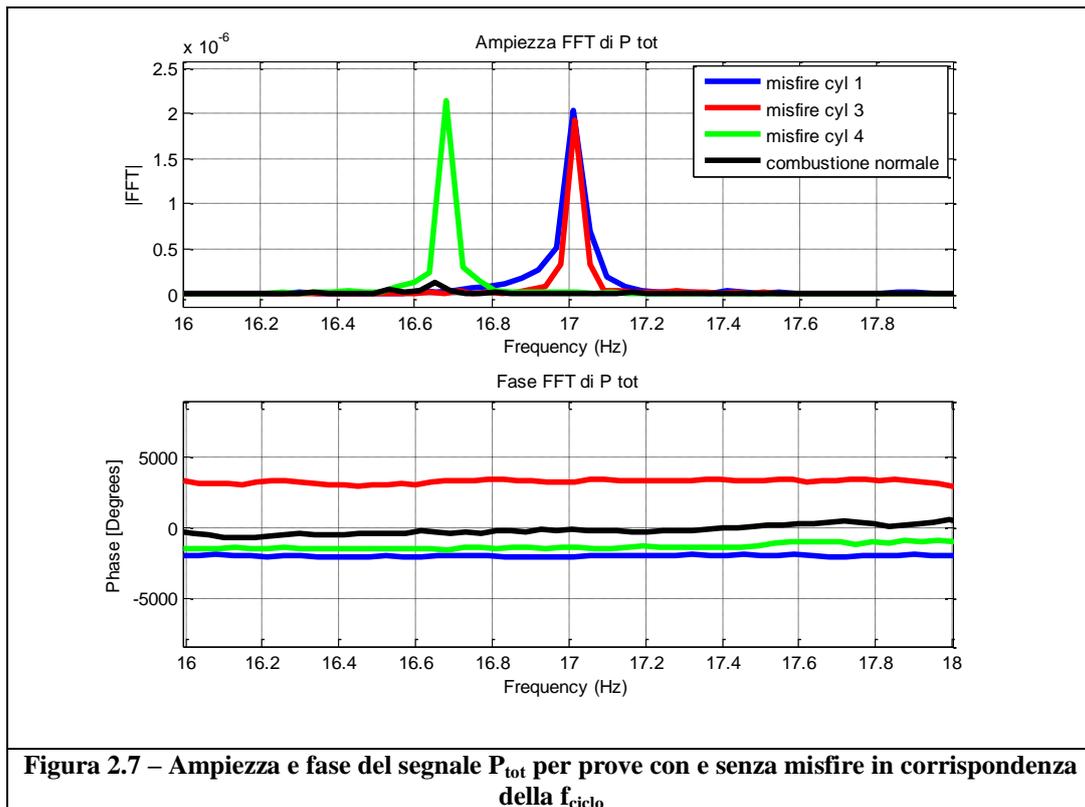
Tale analisi è stata effettuata applicando l'algoritmo *FFT* (*Fast Fourier Transform*) in ambiente MatLab®. Questo algoritmo, di cui non entriamo nel dettaglio, consente di calcolare rapidamente la trasformata di Fourier discreta di un insieme N di campioni del segnale. La trasformata di Fourier per punti sarà dunque un nuovo vettore $X_i(f)$ nel dominio delle frequenze, con $i = 1, 2, \dots, N$. Ricordiamo che la trasformata di Fourier di un

segnale reale è un segnale complesso con modulo e fase rispettivamente simmetrico e antisimmetrica rispetto all'origine dell'asse delle frequenze. Lo stesso vale per le componenti del vettore $X_i(f)$.

Dallo spettro del segnale P_{tot} riportato in figura 2.6 si nota chiaramente come, in assenza di misfire, sia presente un solo picco di ampiezza rilevante in corrispondenza della $f_{combustione}$ (pari a circa 66,66 Hz per questa prova a 2000 rpm). In presenza di una mancata accensione si generano, invece, componenti ad ampiezza elevata anche alla $f_{ciclo} = 16,66$ Hz (vedi fig. 2.7) e a multipli di quest'ultima (2° e 3° armonica di ciclo). Inoltre anche la fase, a tale frequenza, risulta differente in funzione di quale cilindro sia in misfire. Tale comportamento conferma quanto osservato nell'analisi temporale svolta in precedenza.

C'è da sottolineare che la posizione leggermente diversa dei picchi di pressione in fig. 2.6 è dovuta al fatto che la velocità di rotazione effettiva alle varie prove non è esattamente uguale a 2000 rpm, ma questo non influisce sulla diagnosi misfire che verrà svolta.

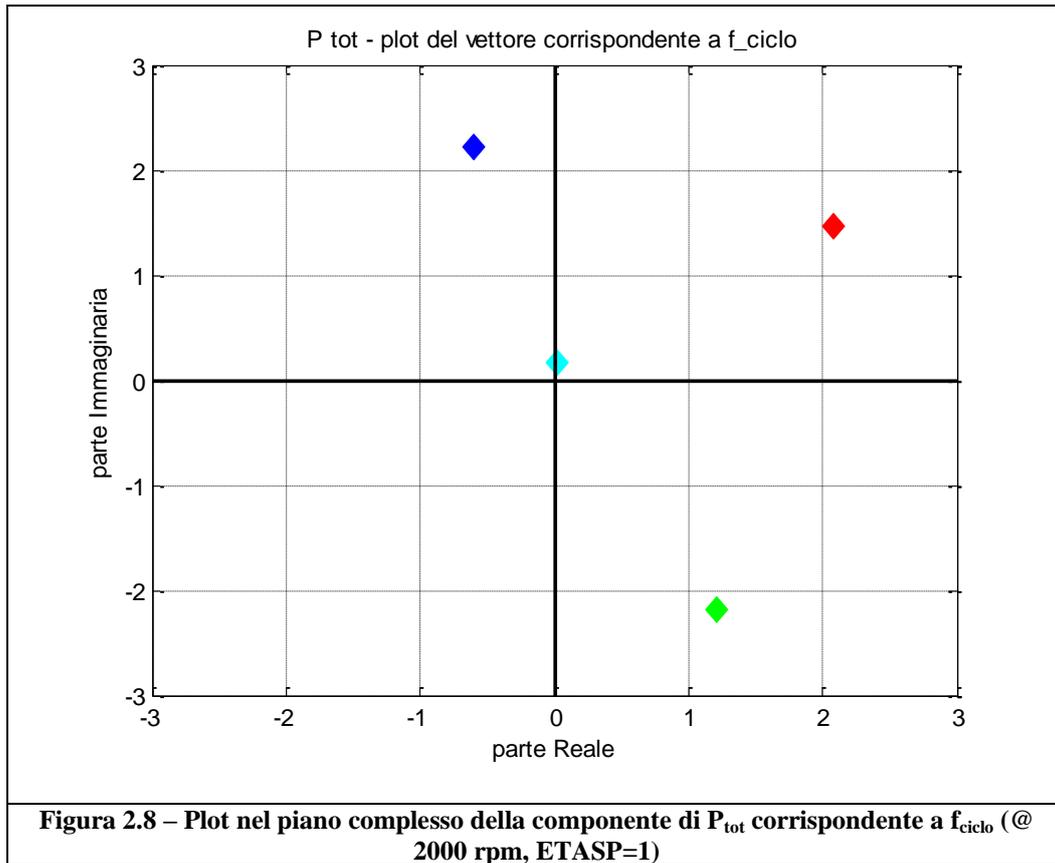




Basandosi su queste osservazioni, si è cercato di realizzare un primo algoritmo per la diagnosi misfire basato sull'analisi della componente del segnale alla sola f_{ciclo} . In particolare, si è plottato nel piano complesso il vettore della FFT corrispondente a tale frequenza, in modo da vedere se effettivamente si riscontrasse una differenza in termini di ampiezza tra i casi con e senza misfire e di fase tra i casi con misfire su cilindri diversi.

In seguito si riporta il risultato relativo alla prova a 2000 rpm, ETASP=1 (fig. 2.8). D'ora in poi si utilizzerà sempre la seguente legenda per interpretare i grafici:

- *Misfire cilindro 1*
- *Misfire cilindro 3*
- *Misfire cilindro 4*
- *Comb. normale*



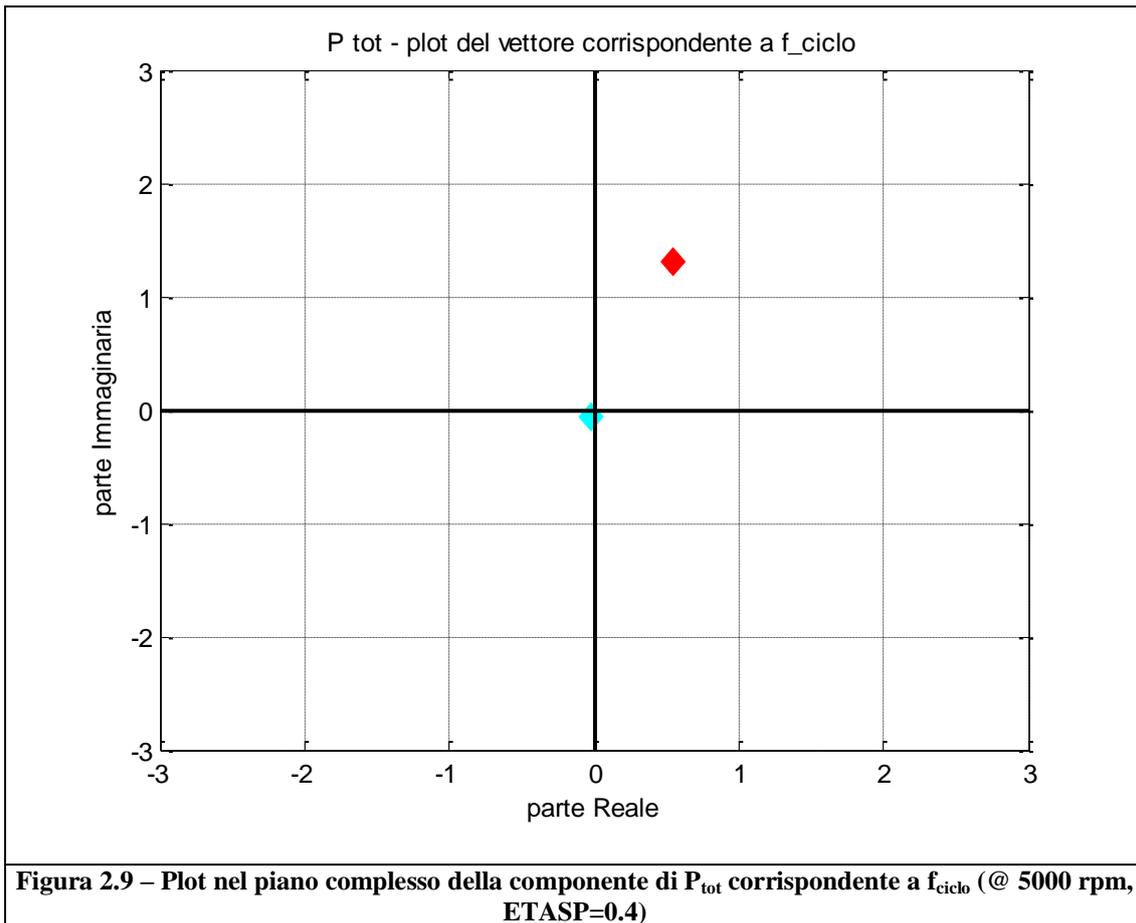
Si nota come l'ampiezza del vettore in presenza di misfire sia nettamente superiore rispetto al caso con combustione corretta, in cui l'ampiezza è prossima a zero.

È inoltre possibile individuare in maniera chiara il cilindro in cui sta avvenendo il misfire tramite l'evidente differenza di fase tra i vari punti.

Ricordiamo che ampiezza e fase di un vettore complesso sono definiti come:

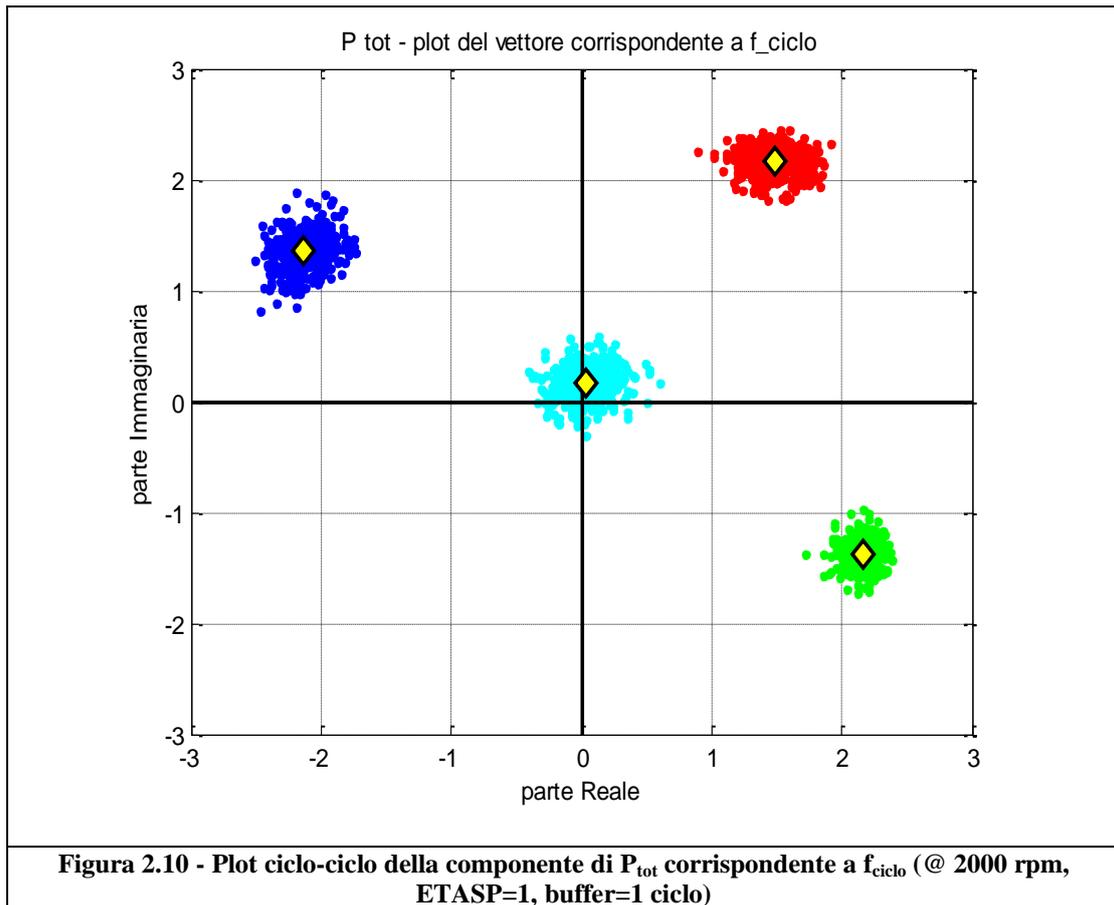
$$A = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} \qquad \varphi = \text{arctg}\left(\frac{\text{Im}}{\text{Re}}\right)$$

Si è ripetuta la stessa analisi per la prova a 5000 rpm, ETASP=0.4 (in queste condizioni disponiamo solo di una prova con misfire nel cilindro 3) ritrovando una chiara differenza tra il caso con misfire e quello senza.



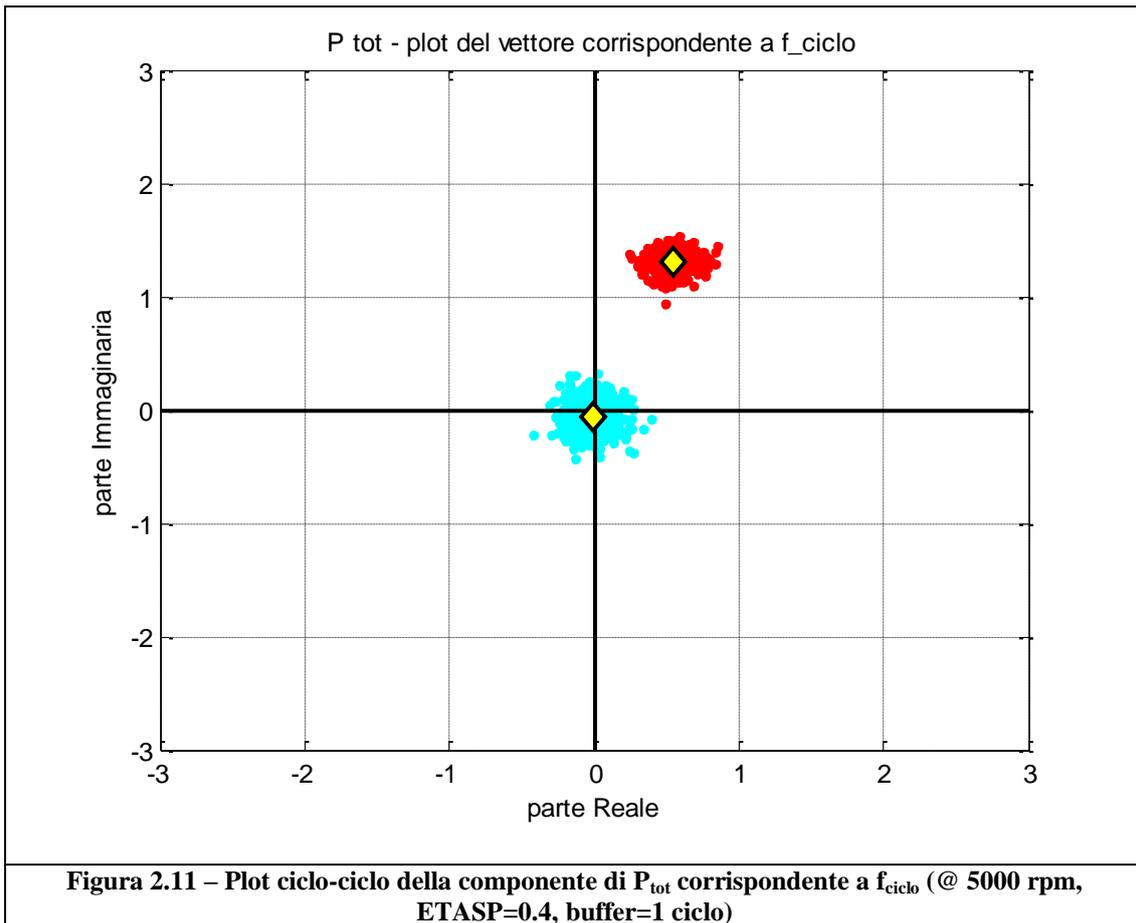
2.4.3 – Analisi ciclo-ciclo

L'analisi fin qui svolta è stata fatta considerando il segnale per tutta la sua durata temporale (pari a circa 20 secondi per le prove in esame), quindi non permette di individuare il misfire ad ogni ciclo motore, come auspicabile per un'efficiente sistema di diagnosi. Per superare tale limite si è ripetuta la stessa procedura calcolando la FFT di *buffer* del segnale di lunghezza pari ad un ciclo motore, in modo da ottenere un output ogni 720° di angolo di manovella (vedi fig. 2.10).



Si può notare come, nonostante una inevitabile dispersione dovuta alla variabilità ciclica nei motori a combustione interna, le nuvole di punti risultino ben concentrate attorno al loro valor medio (rappresentato in fig. 2.10 con un simbolo giallo) e presentano un comportamento in ampiezza e fase analogo a quanto visto per l'analisi del segnale globale, che consentirebbe di individuare semplici e precise soglie per una diagnosi misfire.

Anche a 5000 rpm i risultati sono analoghi (vedi fig. 2.11), con la sola differenza che in questo caso i valor medi delle nuvole di punti, come è lecito attendersi, presentano lo stesso valore ottenuto nell'analisi del segnale globale, mentre nel caso a 2000 rpm si presenta una rotazione della fase che non si è ancora riusciti a spiegare (cfr. fig. 2.8 e 2.10).



2.5 – Analisi del segnale microfonico

Si è cercato ora di applicare lo stesso tipo di analisi sui segnali microfonici, per vedere se i risultati ottenuti sul segnale di pressione fossero riscontrabili anche per questo tipo di segnale.

2.5.1 – Analisi temporale

Come si può vedere dalla fig. 2.12, anche il segnale sonoro presenta una certa periodicità legata alla $f_{\text{combustione}}$. È infatti possibile individuare chiaramente la presenza di quattro picchi per ogni ciclo motore. A differenza del segnale di pressione, però, in questo caso il rapporto segnale-

rumore è decisamente inferiore e risulta difficile individuare la presenza di una mancata combustione dalla sola analisi temporale. Va inoltre sottolineato che i microfoni, essendo posti ad una certa distanza dalla fonte del segnale sonoro (in prima approssimazione considerata coincidente con la camera di combustione), registreranno un segnale che avrà, rispetto al segnale di pressione, un ritardo temporale costante (cioè non dipendente dal regime di rotazione) funzione della velocità del suono e della distanza del microfono da ogni cilindro. Tale ritardo, a parità di regime di rotazione del motore, provocherà negli output una certa variazione di fase tra i vari microfoni e tra i microfoni e il segnale di pressione.

2.5.2 – Analisi in frequenza

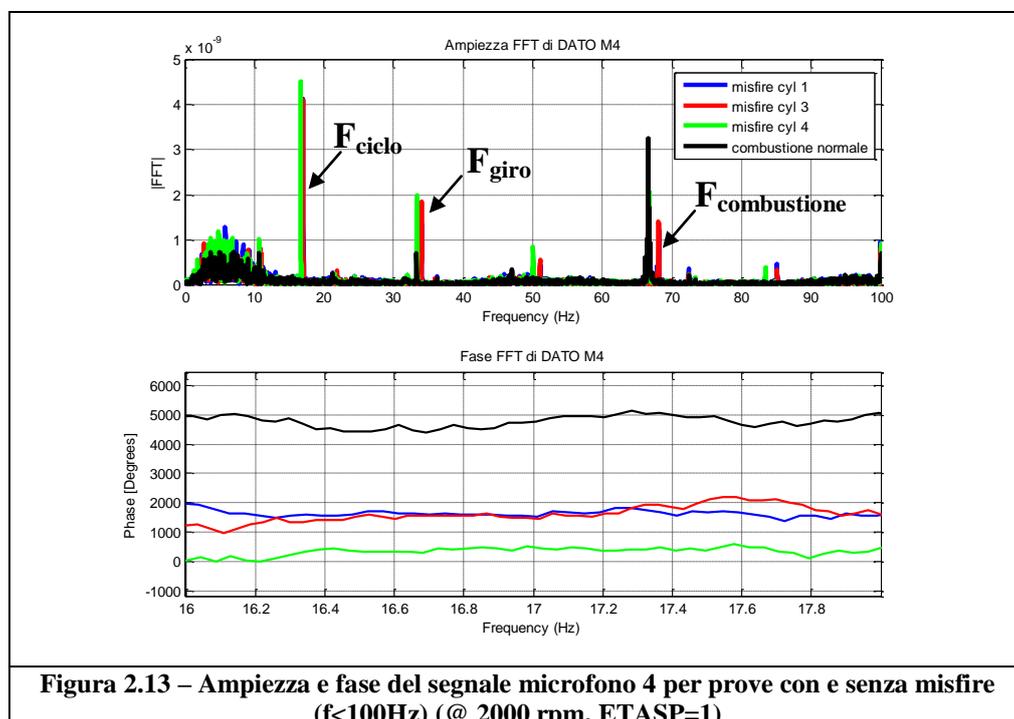
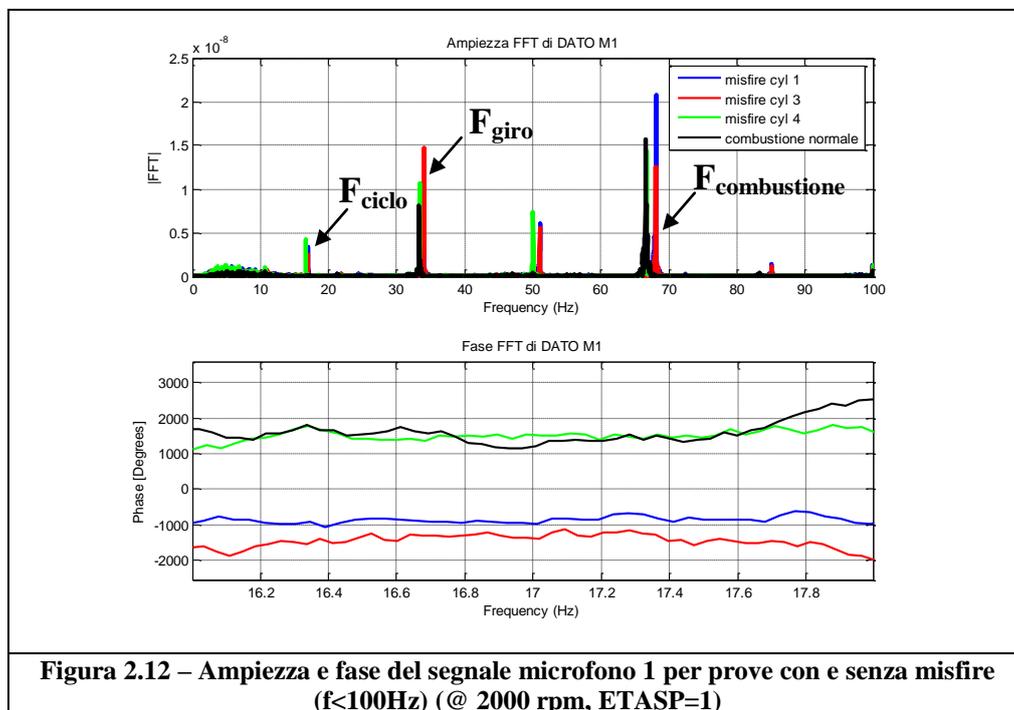
Ci si è soffermati soltanto sull'analisi dei microfoni omnidirezionali (1 e 4) in quanto si sono rivelati i più idonei per questo genere di applicazione:

- *Microfono 1*: vicino al motore, lato aspirazione, tra i cilindri 2 e 3
- *Microfono 4*: in posizione di centralina

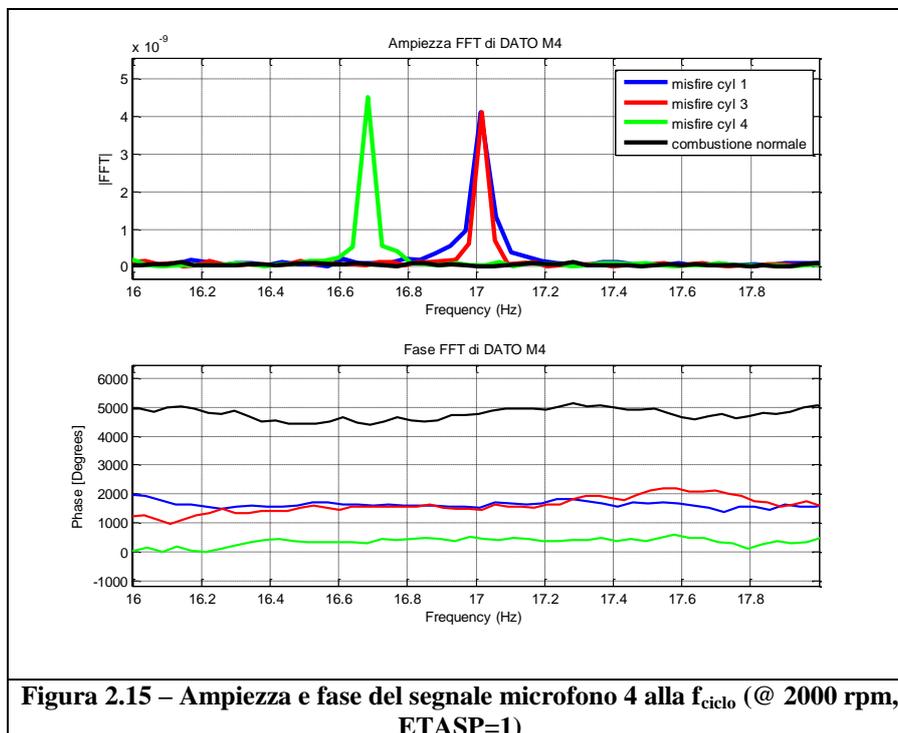
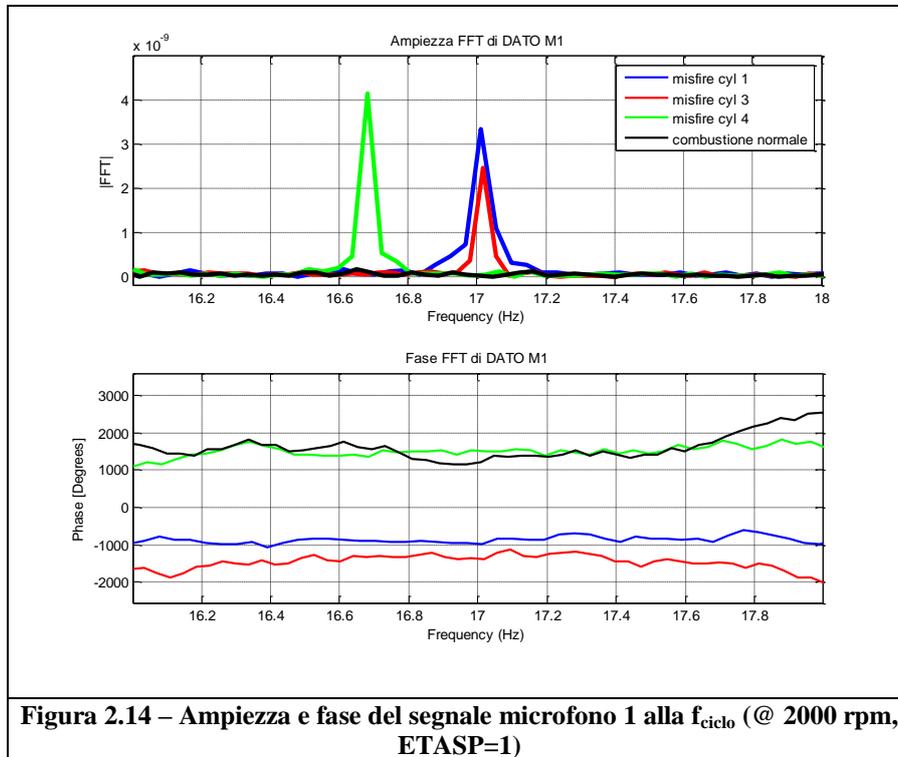
Riportiamo nelle figure seguenti gli spettri relativi all'analisi di tali segnali considerati per tutta la loro durata temporale, relativi alla prova a 2000 rpm, ETASP=1.

In analogia a quanto visto durante l'analisi del segnale di pressione totale, anche il segnale audio presenta componenti spettrali ad energia elevata a frequenze multiple della frequenza di ciclo. In particolare, in presenza di misfire si verifica un aumento di ampiezza in corrispondenza della f_{ciclo} e della sua terza armonica, mentre in corrispondenza della f_{giro} il comportamento si differenzia rispetto alla P_{tot} , essendo presente in questo

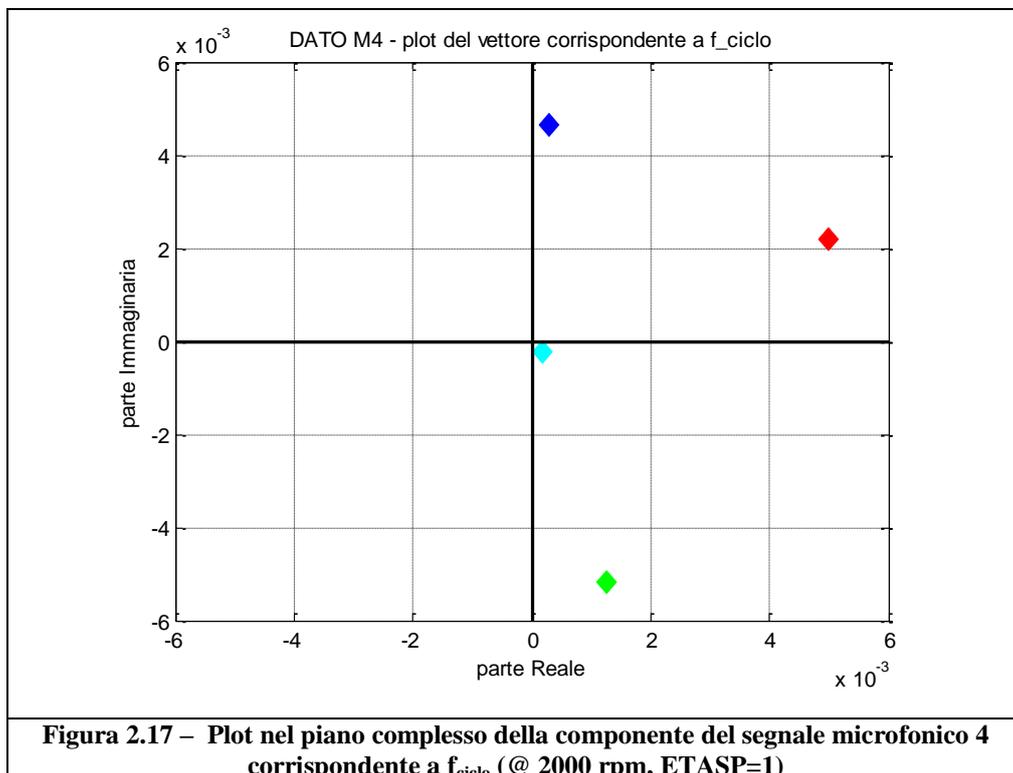
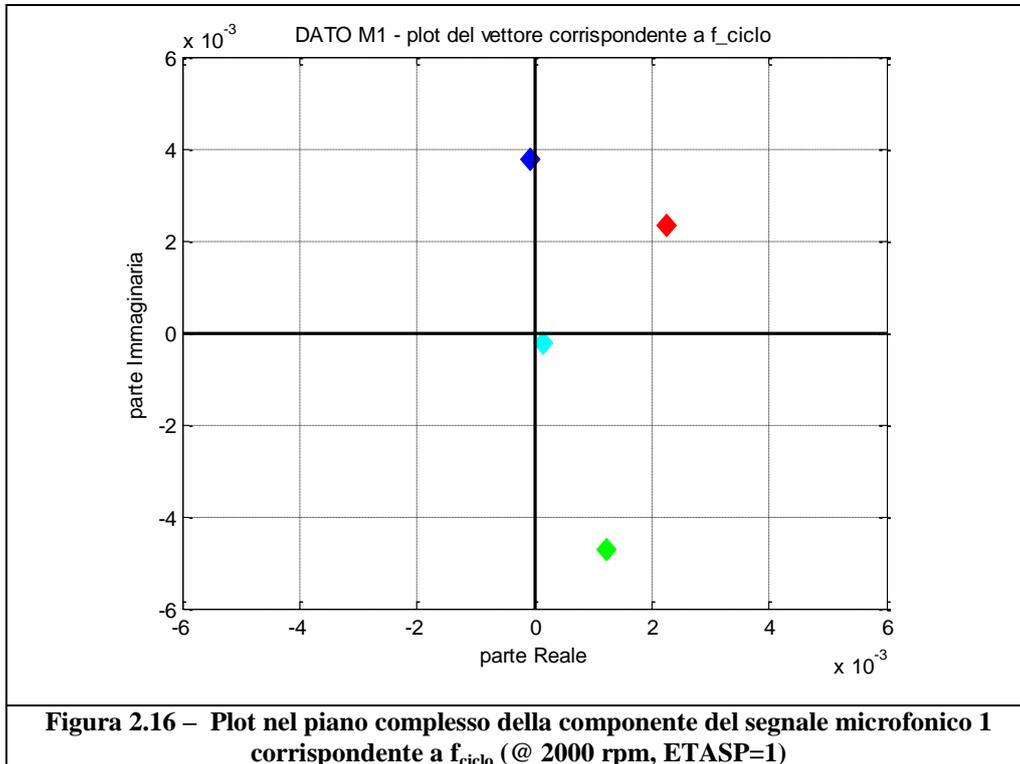
caso un picco di ampiezza elevata anche in caso di combustione normale. Tale differenza è legata al fatto che il microfono, a differenza del sensore di pressione in camera, registra il rumore generato da tutto il motore e quindi, in qualsiasi condizione operativa, sarà sempre presente un contributo energetico legato alla velocità di rotazione del manovellismo.



Soffermandoci solamente sulla f_{ciclo} , si nota che il segnale microfonico presenta un contenuto energetico nettamente diverso in caso di mancata combustione, il che porta a pensare che anche in questo tipo di segnale siano contenute informazioni utili per impostare una diagnosi di tale malfunzionamento.



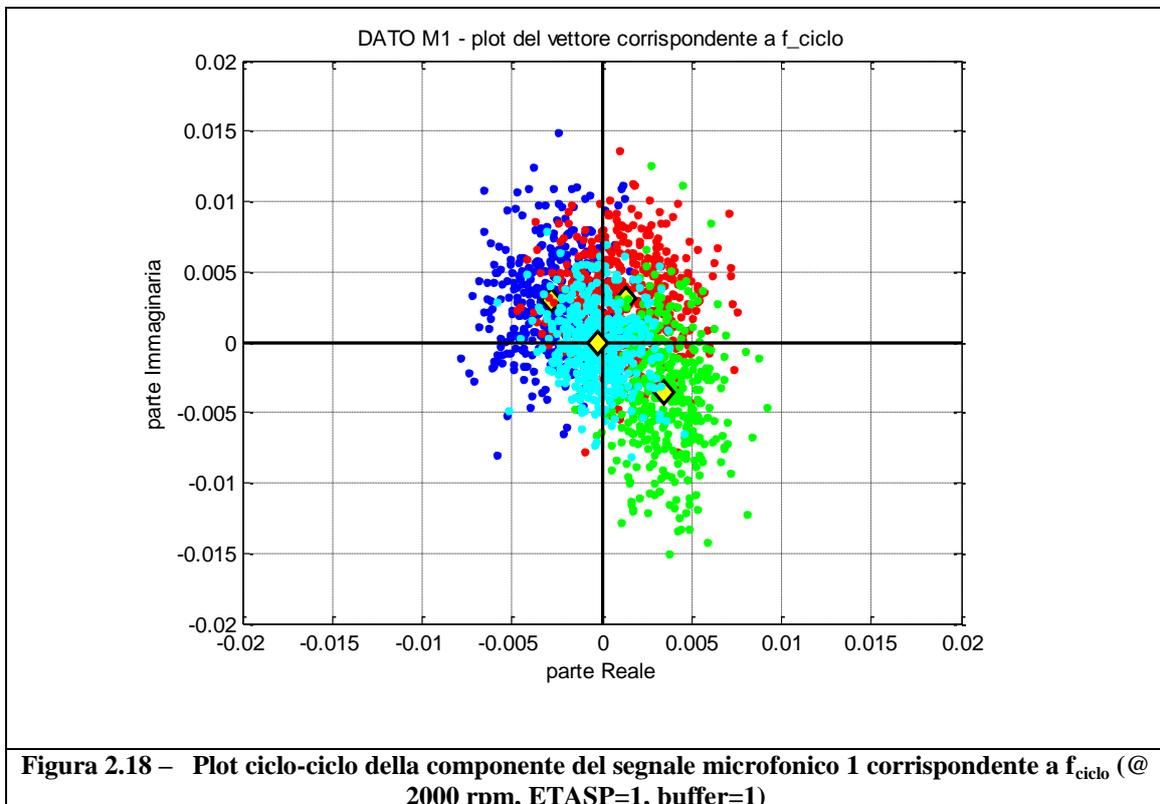
Si è ripetuto quindi anche sul segnale microfonico lo stesso tipo di analisi in ampiezza e fase svolta in precedenza sul segnale P_{tot} , di cui si riportano in seguito i risultati relativi ai due microfoni.

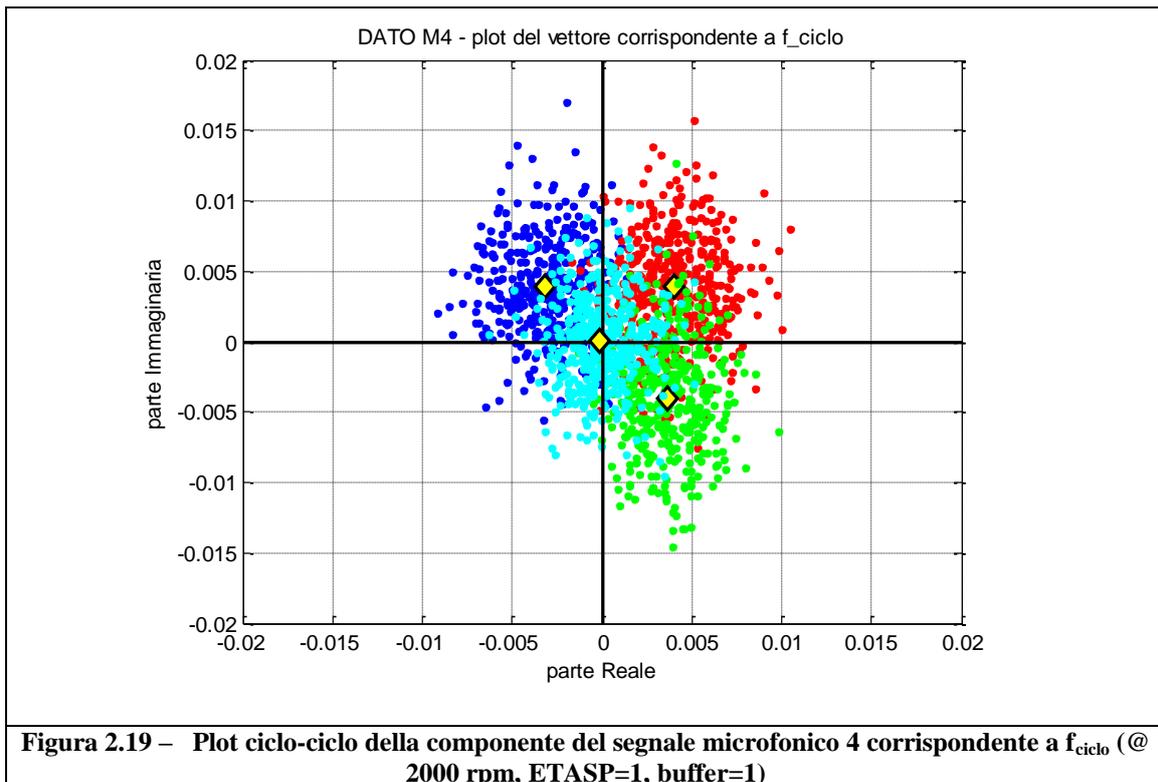


Si nota che, anche in questo caso, il vettore complesso in corrispondenza della f_{ciclo} presenta un valore di ampiezza nettamente superiore in caso di misfire rispetto al caso con combustione normale, ed anche per quanto riguarda l'individuazione del cilindro in misfire si ritrova un netto sfasamento angolare.

2.5.3 – Analisi ciclo-ciclo

Al fine di verificare l'applicabilità di questo algoritmo per una diagnosi motore, si è effettuata anche in questo caso la stessa analisi precedente su *buffer* del segnale della durata di un ciclo motore.





Si nota come sia presente ancora una certa distribuzione della fase, ma l'eccessiva dispersione delle nuvole di punti rende difficile l'identificazione di robuste soglie per la diagnosi misfire, specialmente per quanto riguarda l'ampiezza.

Tale dispersione potrebbe essere dovuta al fenomeno del *leakage* (o *dispersione spettrale*). Ricordiamo, infatti, che per effettuare l'analisi armonica tramite FFT, occorre considerare una sequenza finita di N campioni del segnale, contenuta nel periodo di osservazione desiderato; essa può essere pensata come il prodotto della successione infinita dei campioni del segnale per una “finestra rettangolare” di durata T_w , che presenta valori unitari w_i per $i = 0, 1, \dots, N-1$ e nulla altrove. L'algoritmo FFT opera considerando tale porzione di segnale ripetuta nel tempo e restituisce un “pettine di frequenze”, cioè uno spettro discreto di risoluzione Δf , inversamente proporzionale al tempo di acquisizione T_w .

Se tutte le frequenze costituenti il segnale sono dei multipli interi del parametro Δf , allora lo spettro rileva tutte le componenti armoniche presenti e quindi risulta essere uno “spettro esatto”. Tale condizione corrisponde ad affermare che la durata di acquisizione T_w è un multiplo intero di tutti i periodi delle componenti armoniche del segnale.

In generale, si realizzano difficilmente condizioni di sincronia così perfette poiché molto spesso si deve analizzare un segnale multifrequenziale costituito da componenti di frequenze interarmoniche, cioè che non sono multiple della Δf .

In tal caso T_w , a sua volta, non è un multiplo intero di tutti i periodi delle componenti del segnale. Conseguentemente, le componenti con tali frequenze non si ritrovano nello spettro discreto, ma si disperdono nelle frequenze limitrofe multiple di Δf , e la loro energia coincide con quella totale delle nuove componenti indicate nello spettro stesso. Tale fenomeno è appunto conosciuto come *spectral leakage* [19].

Riportando lo zoom dello spettro dei segnali microfonicici (fig. 2.20), si nota che alle bassissime frequenze (< 10 Hz) è presente del rumore che, durante l’analisi ciclo-ciclo, potrebbe generare degli errori sul valore dell’ampiezza alla f_{ciclo} . Utilizzando buffer di lunghezza pari ad un ciclo motore, abbiamo infatti una risoluzione in frequenza uguale a f_{ciclo} , perciò tutte le componenti con frequenza compresa tra $[0 f_{ciclo}]$ si ridistribuiranno tra la componente media del segnale e quella di interesse a f_{ciclo} , generando il suddetto fenomeno del leakage.

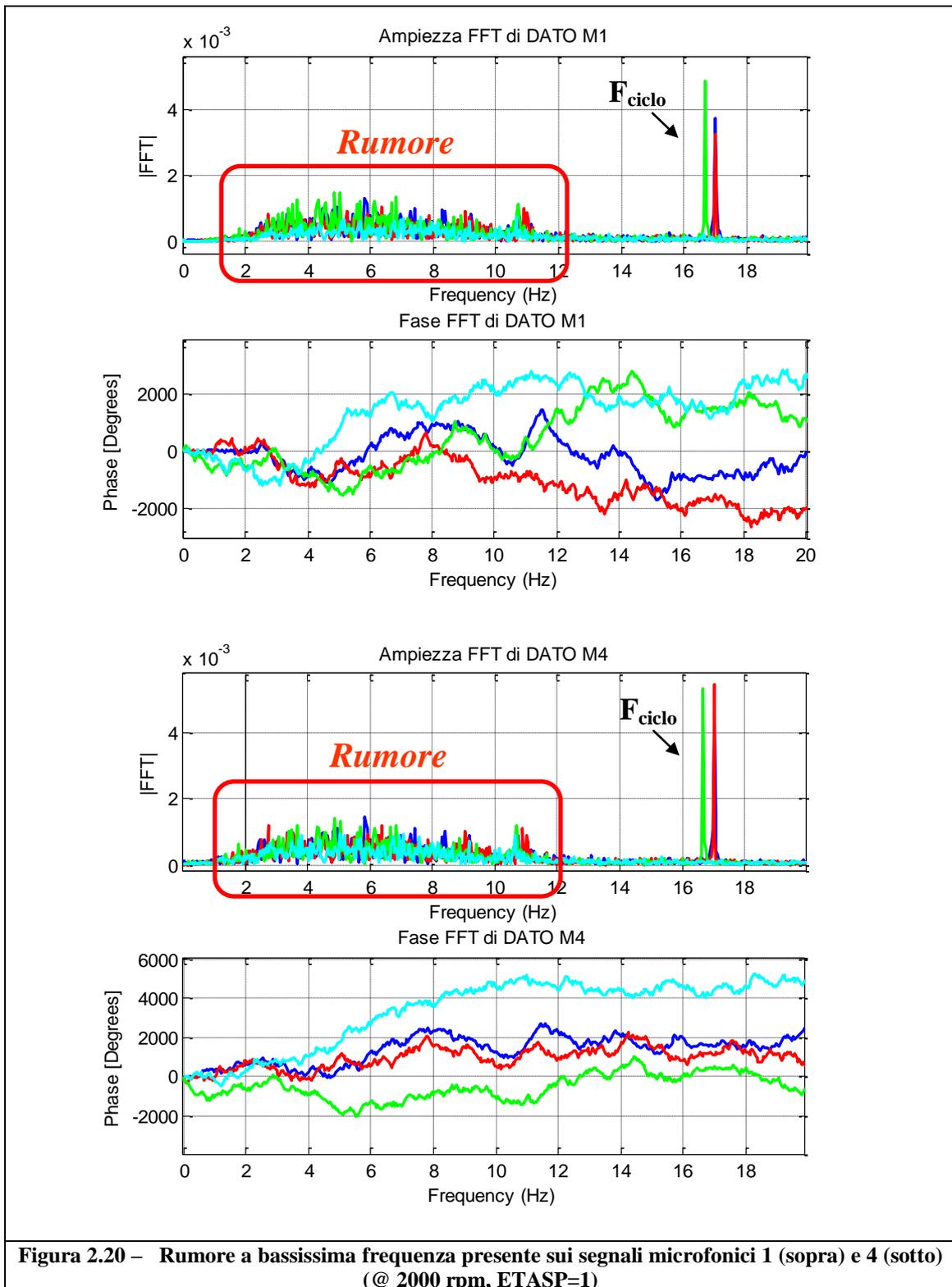
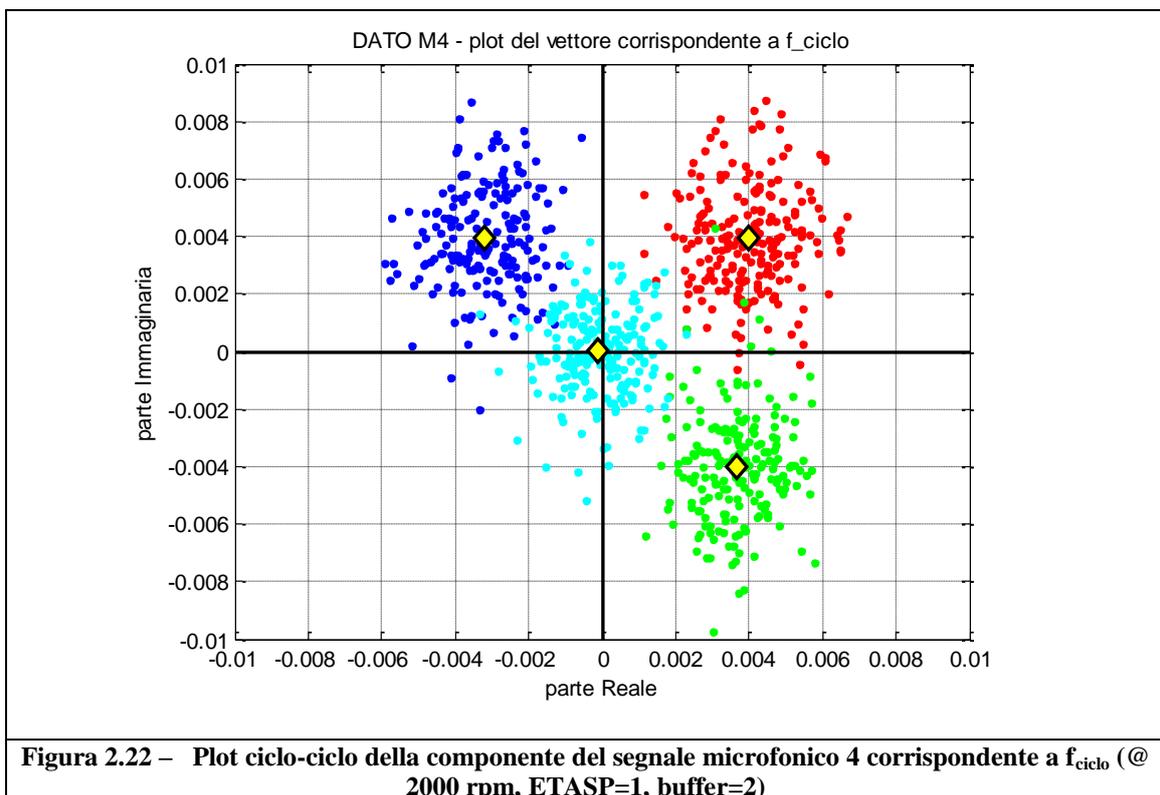
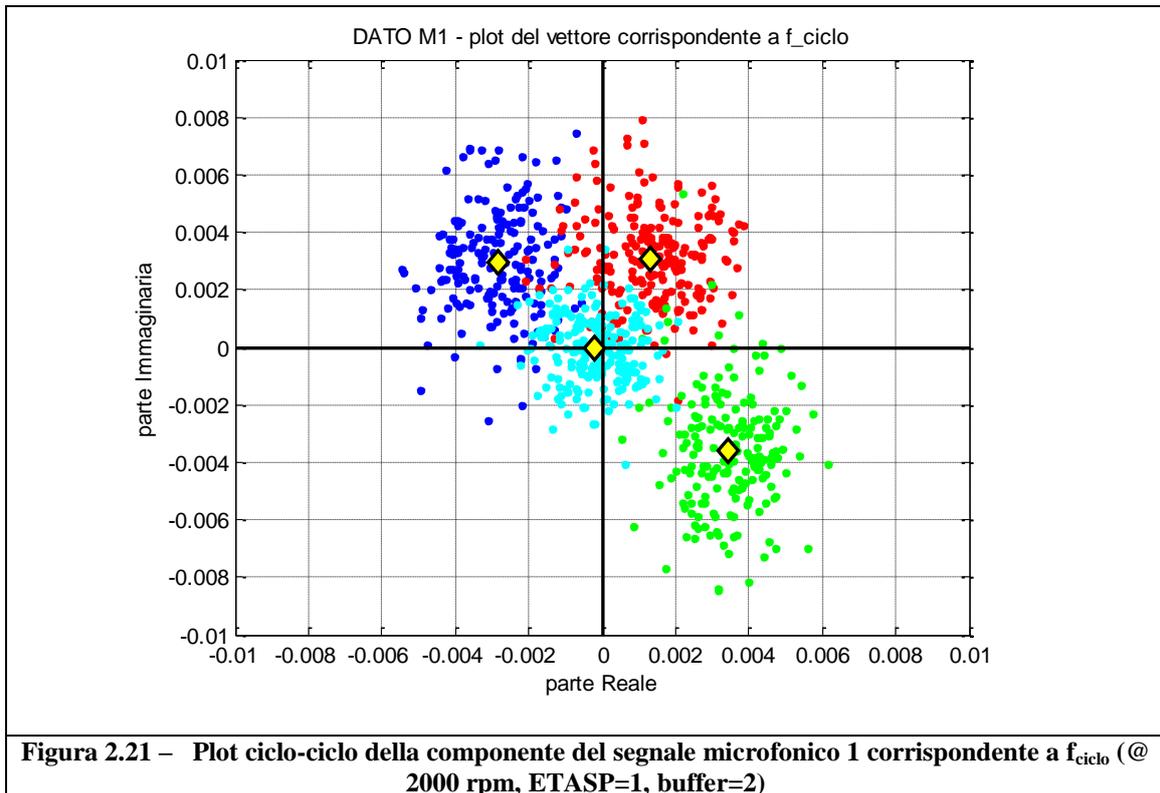


Figura 2.20 – Rumore a bassissima frequenza presente sui segnali microfonici 1 (sopra) e 4 (sotto) (@ 2000 rpm, ETASP=1)

Per cercare di risolvere questo problema, si è provato ad applicare lo stesso algoritmo utilizzando *buffer* del segnale di lunghezza doppia (due

cicli motore), in modo da studiare l'influenza della risoluzione in frequenza e cercare di distribuire il leakage su più frequenze discrete.



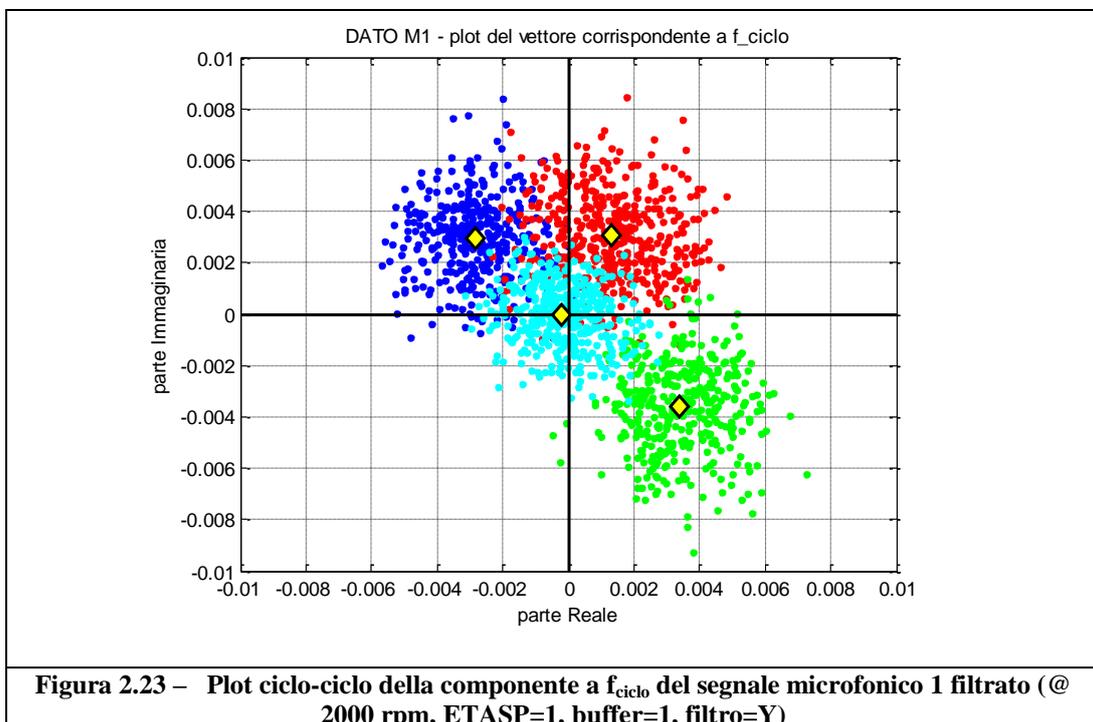
Si ottiene in questo modo una maggiore chiarezza nei risultati, con le nuvole di punti più concentrate attorno ai relativi valori medi che, come è ovvio che sia, non modificano la loro posizione sul piano complesso, a conferma della correttezza dell' algoritmo.

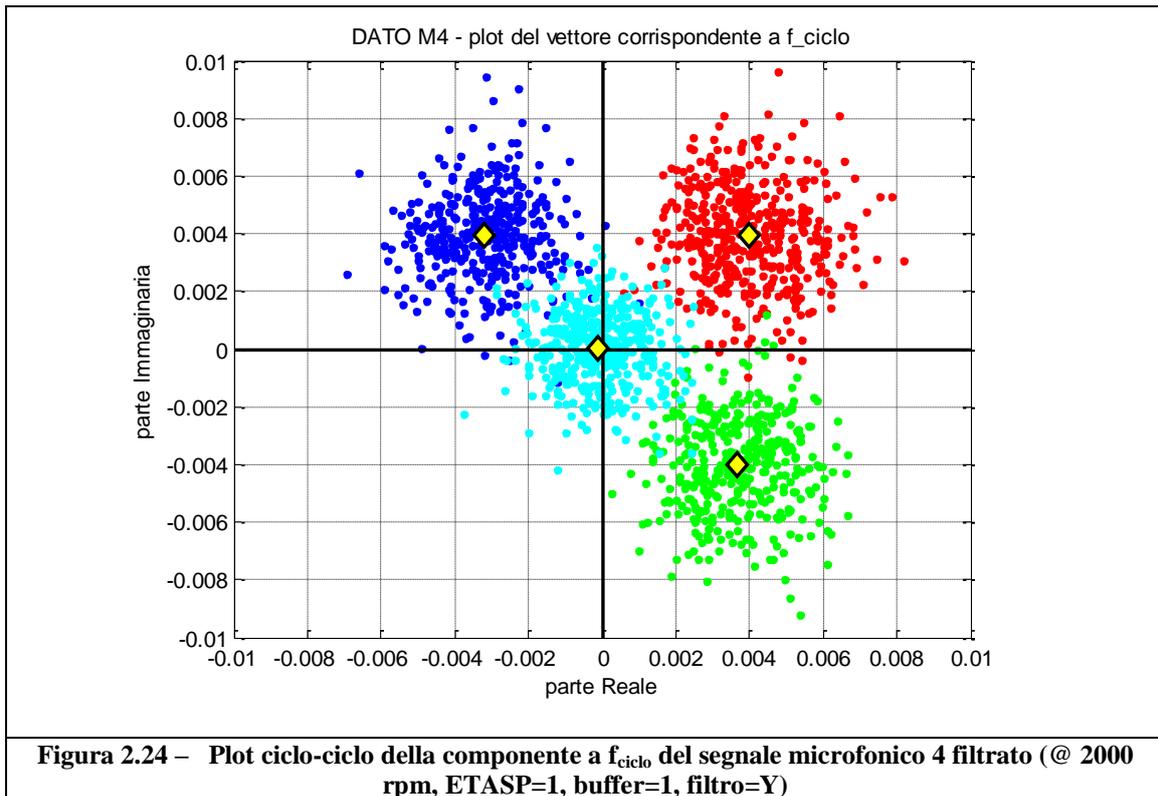
Queste osservazioni portano a ritenere che l'informazione sul misfire sia effettivamente contenuta nell'armonica di ciclo e che il problema fondamentale consista nel miglioramento del rapporto segnale-rumore.

2.5.4 – Filtraggio digitale del segnale

Per cercare di ridurre il rumore mantenendo comunque buffer ciclici che ci consentano di monitorare ogni singola combustione, si è provato quindi ad applicare sul segnale un *filtro digitale ideale passa-banda* centrato a ± 6 Hz rispetto a f_{ciclo} .

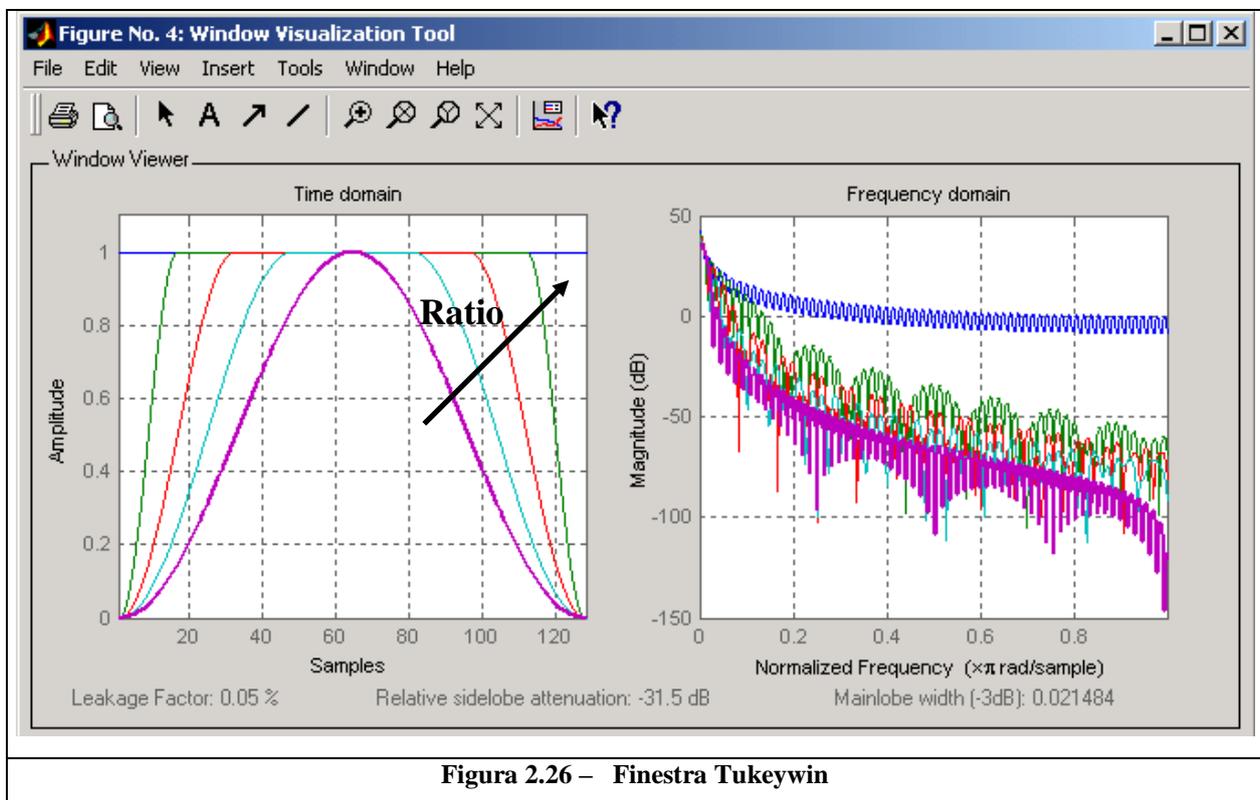
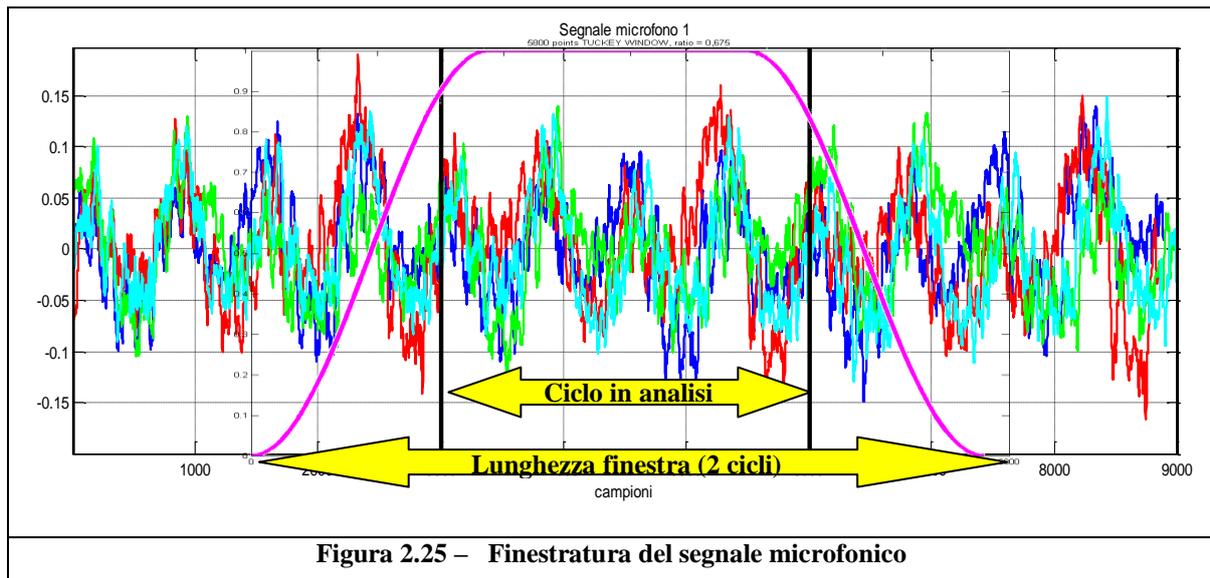
I risultati ottenuti si presentano decisamente migliori rispetto al caso senza filtraggio (cfr. fig. 2.18, 2.19, 2.23, 2.24), specialmente per quanto riguarda il microfono 4.





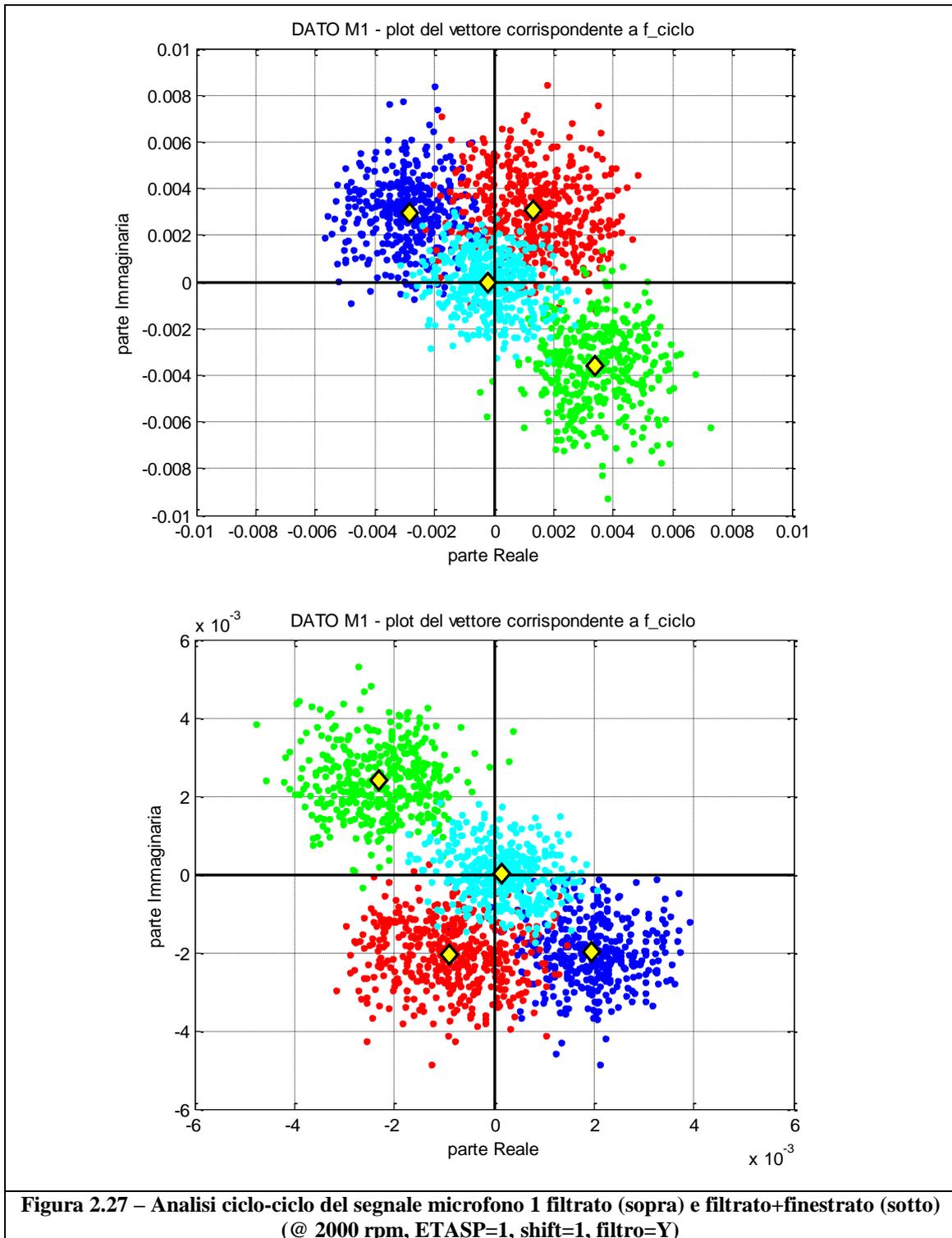
2.5.5 – Finestratura del segnale

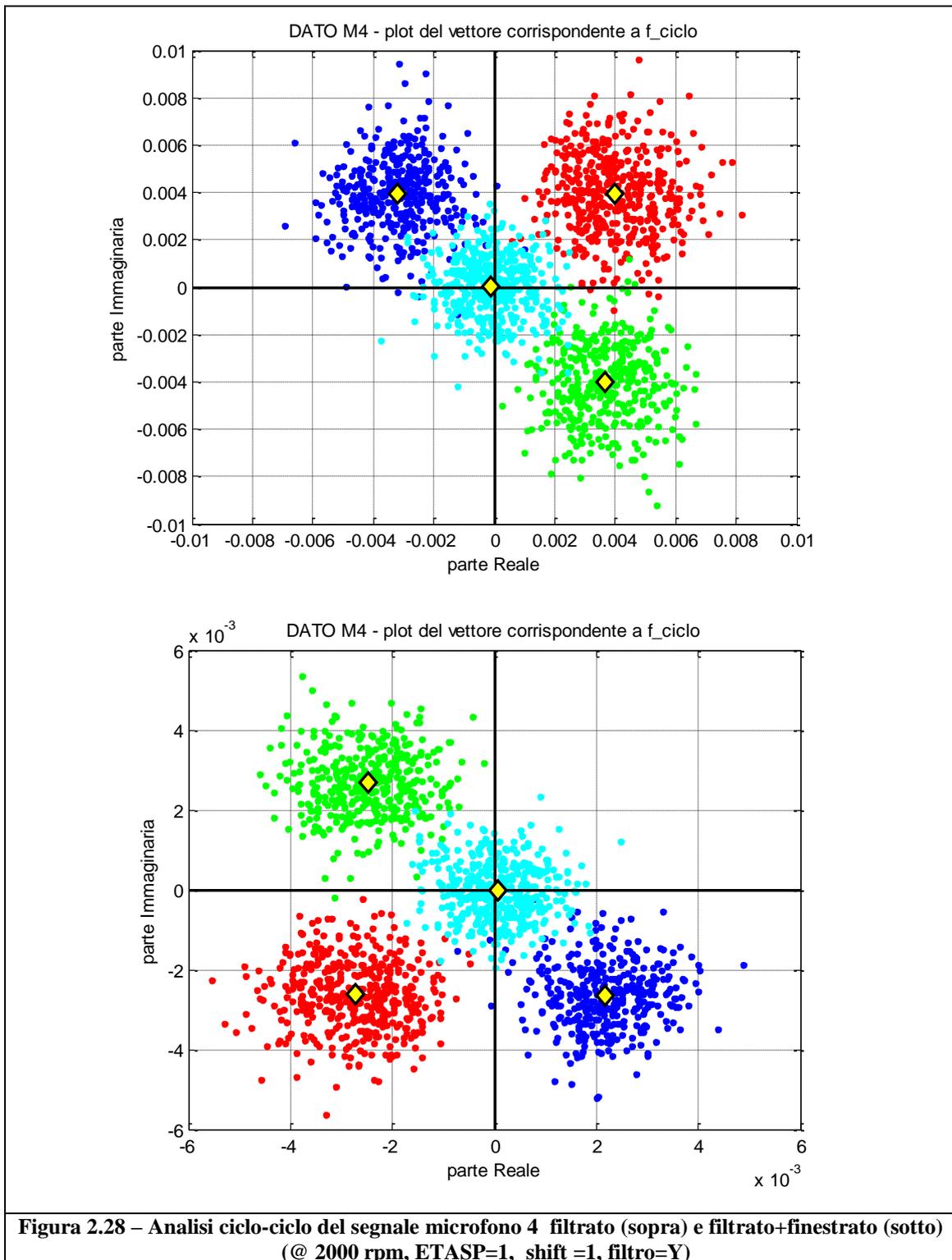
Sempre nell'intento di migliorare il rapporto segnale-rumore, risolvendo almeno in parte il problema della ridotta risoluzione in frequenza nell'analisi ciclo-ciclo, si è considerata l'applicazione di una finestra della durata di due cicli motore centrata sul ciclo di interesse e fatta shiftare in avanti di un ciclo alla volta (vedi fig. 2.25). Tale finestratura è stata effettuata sempre in ambiente MatLab[®] utilizzando il tipo di *finestra Tukey*, con valore iniziale del parametro *ratio* impostato a 0,65. Tale parametro, compreso tra [0 1], determina la forma della finestra (vedi fig. 2.26).



Si riportano di seguito le immagini relative ai risultati ottenuti per le varie prove a disposizione, in cui si è utilizzato sempre il segnale microfonico filtrato come input per l'analisi ciclo-ciclo. Per evidenziare gli effetti della

finestratura, si riportano sia gli output ottenuti applicando la finestra che quelli ottenuti solamente con il filtraggio digitale del segnale.





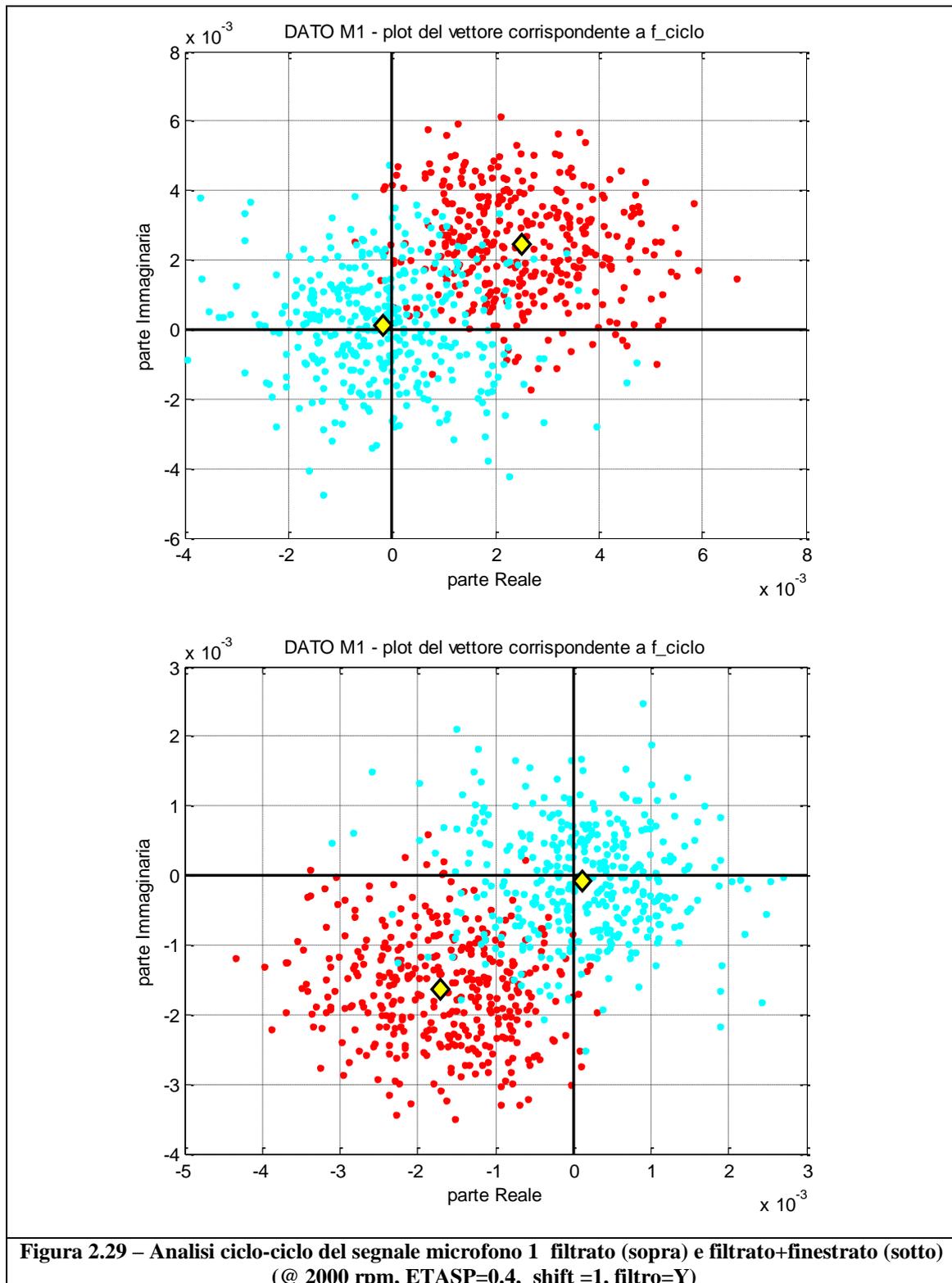


Figura 2.29 – Analisi ciclo-ciclo del segnale microfono 1 filtrato (sopra) e filtrato+finestrato (sotto) (@ 2000 rpm, ETASP=0.4, shift =1, filtro=Y)

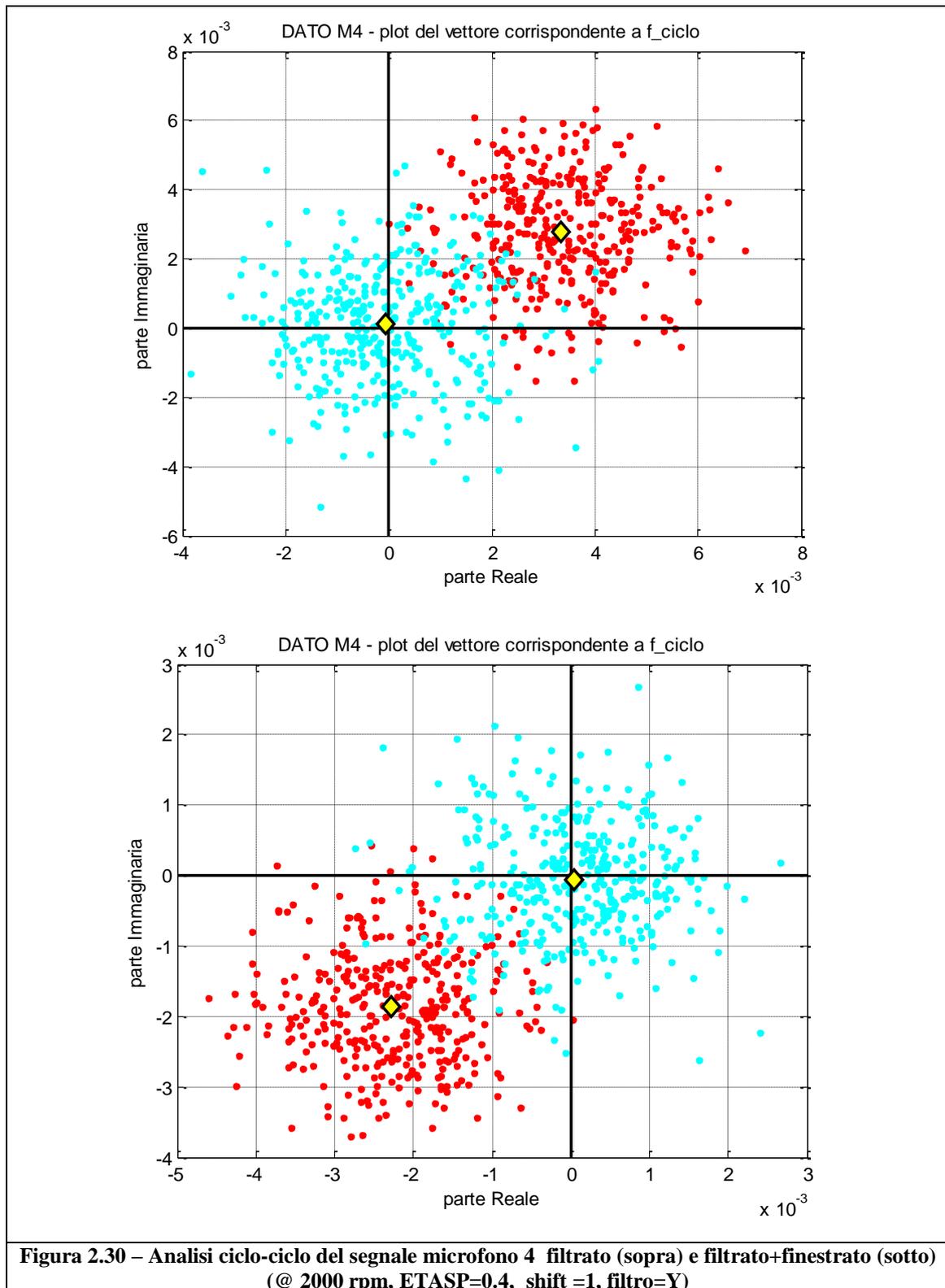


Figura 2.30 – Analisi ciclo-ciclo del segnale microfono 4 filtrato (sopra) e filtrato+finestrato (sotto) (@ 2000 rpm, ETASP=0.4, shift =1, filtro=Y)

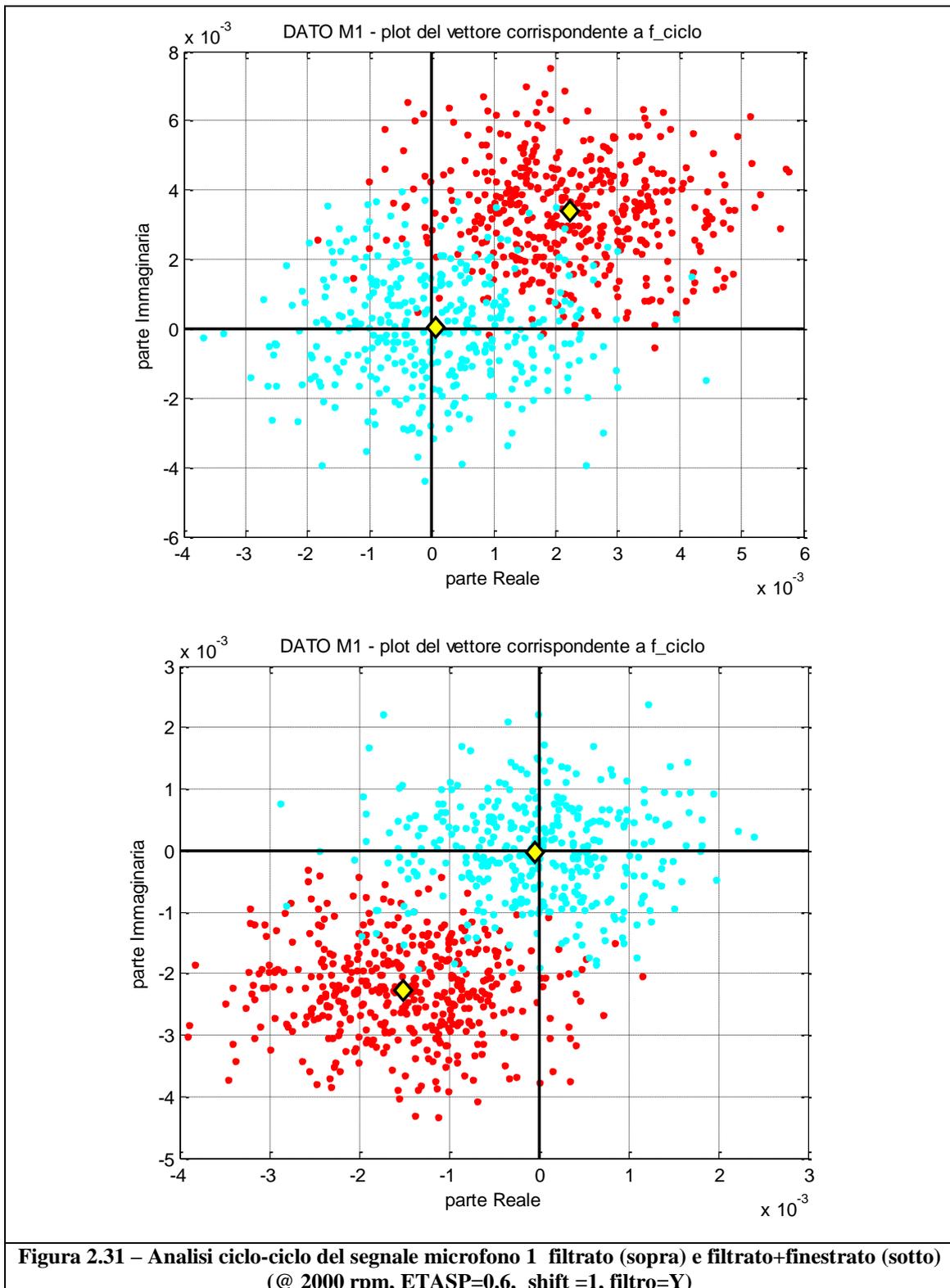


Figura 2.31 – Analisi ciclo-ciclo del segnale microfono 1 filtrato (sopra) e filtrato+finestrato (sotto) (@ 2000 rpm, ETASP=0.6, shift =1, filtro=Y)

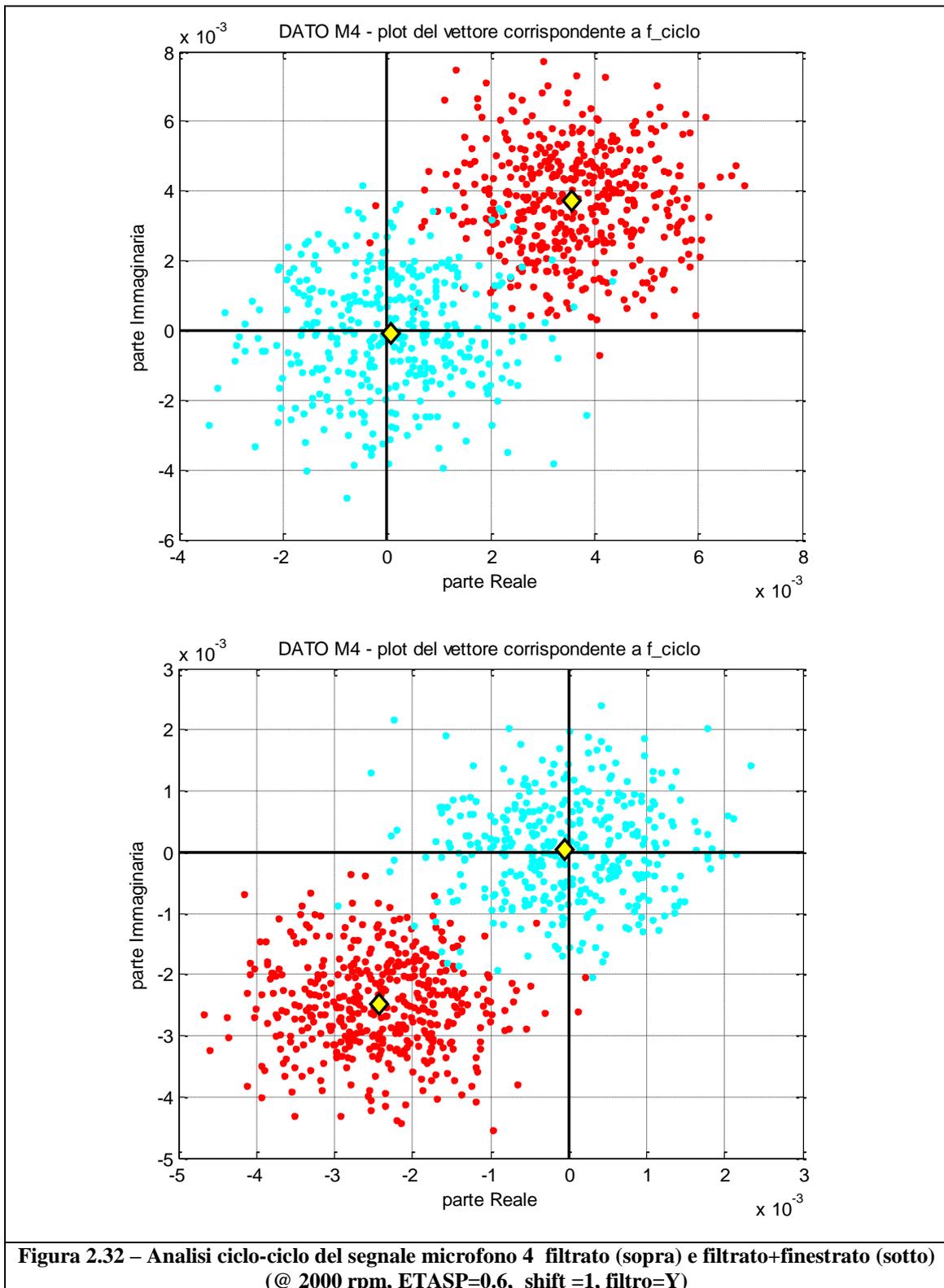


Figura 2.32 – Analisi ciclo-ciclo del segnale microfono 4 filtrato (sopra) e filtrato+finestrato (sotto) (@ 2000 rpm, ETASP=0.6, shift =1, filtro=Y)

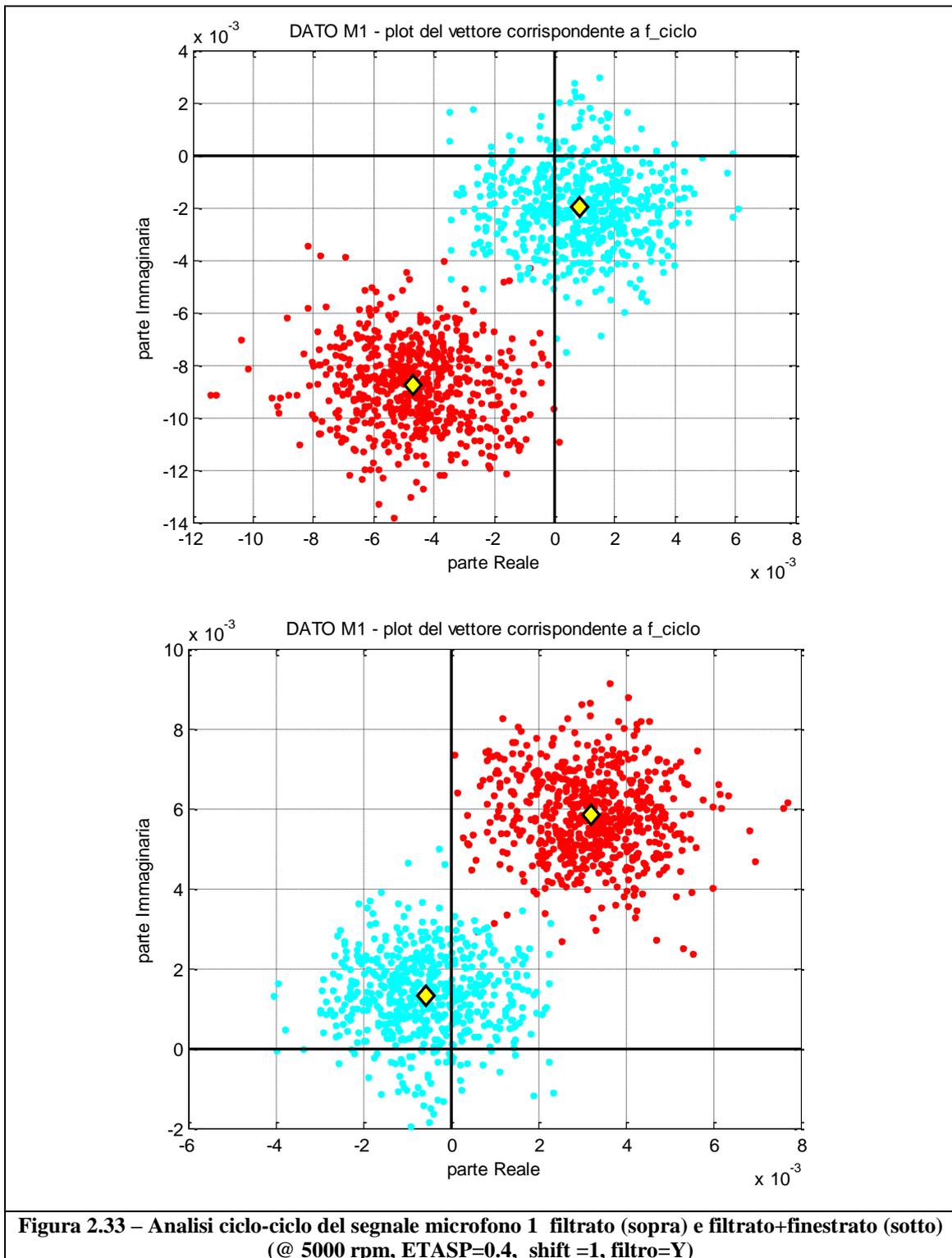


Figura 2.33 – Analisi ciclo-ciclo del segnale microfono 1 filtrato (sopra) e filtrato+finestrato (sotto) (@ 5000 rpm, ETASP=0.4, shift =1, filtro=Y)

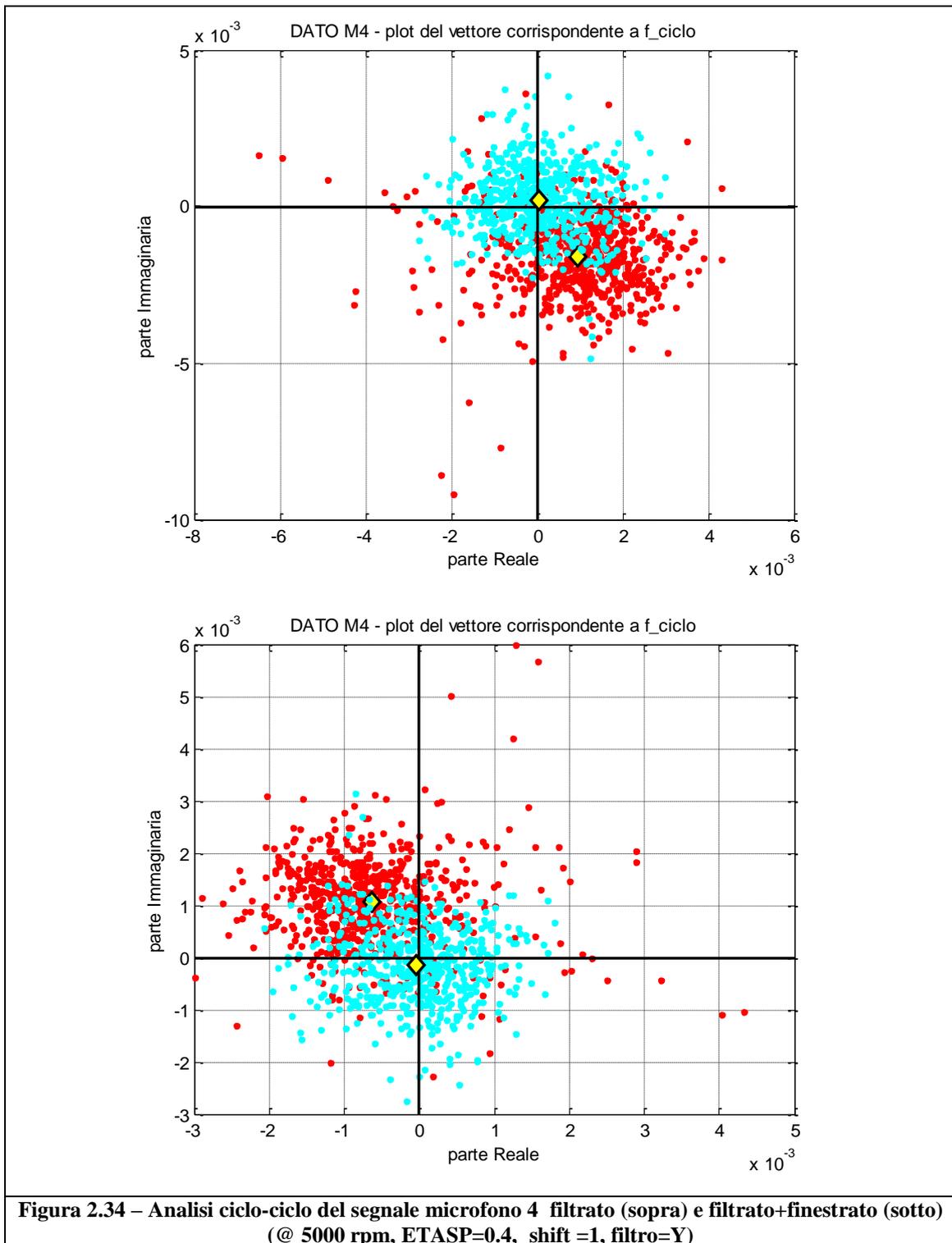


Figura 2.34 – Analisi ciclo-ciclo del segnale microfono 4 filtrato (sopra) e filtrato+finestrato (sotto) (@ 5000 rpm, ETASP=0.4, shift =1, filtro=Y)

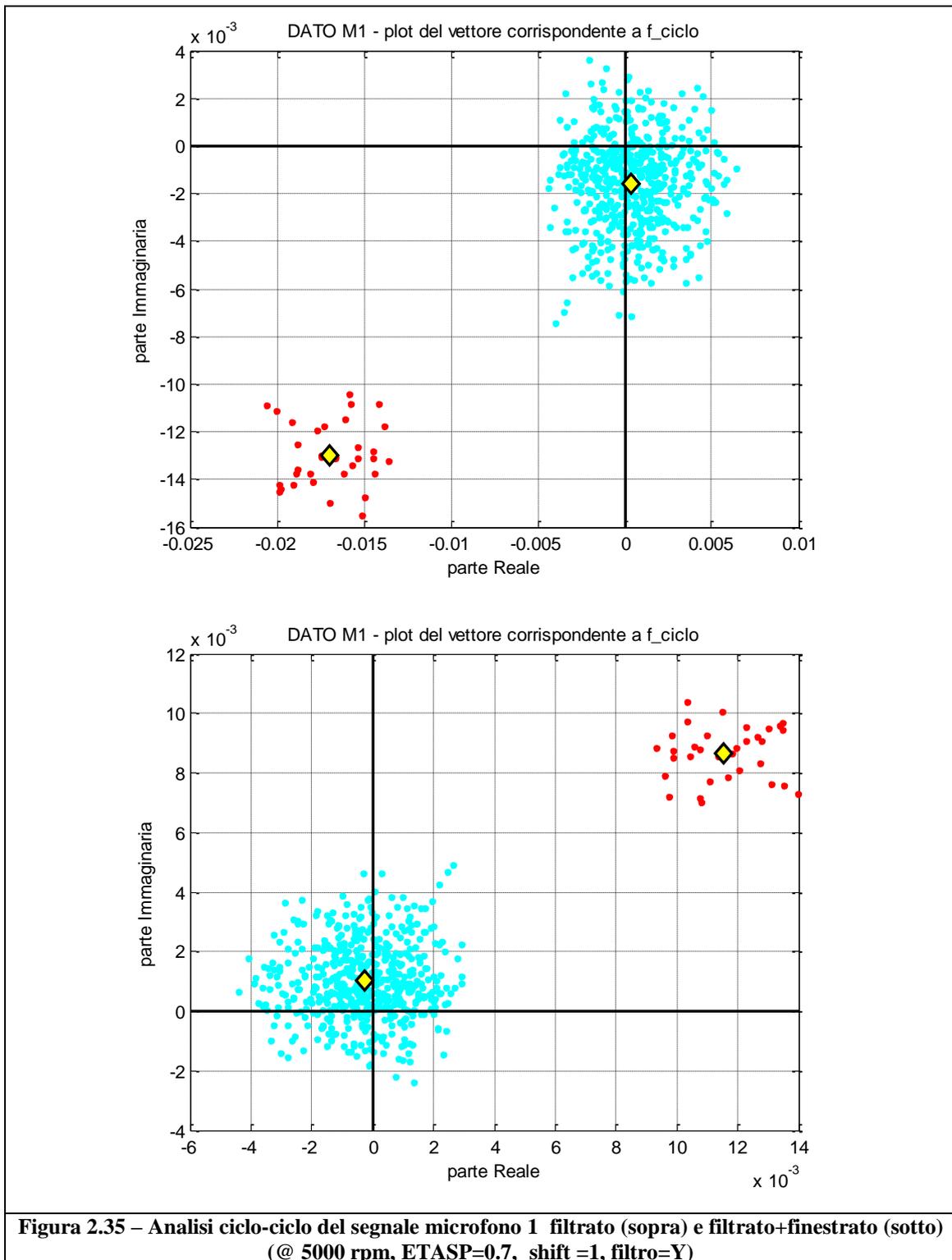


Figura 2.35 – Analisi ciclo-ciclo del segnale microfono 1 filtrato (sopra) e filtrato+finestrato (sotto) (@ 5000 rpm, ETASP=0.7, shift =1, filtro=Y)

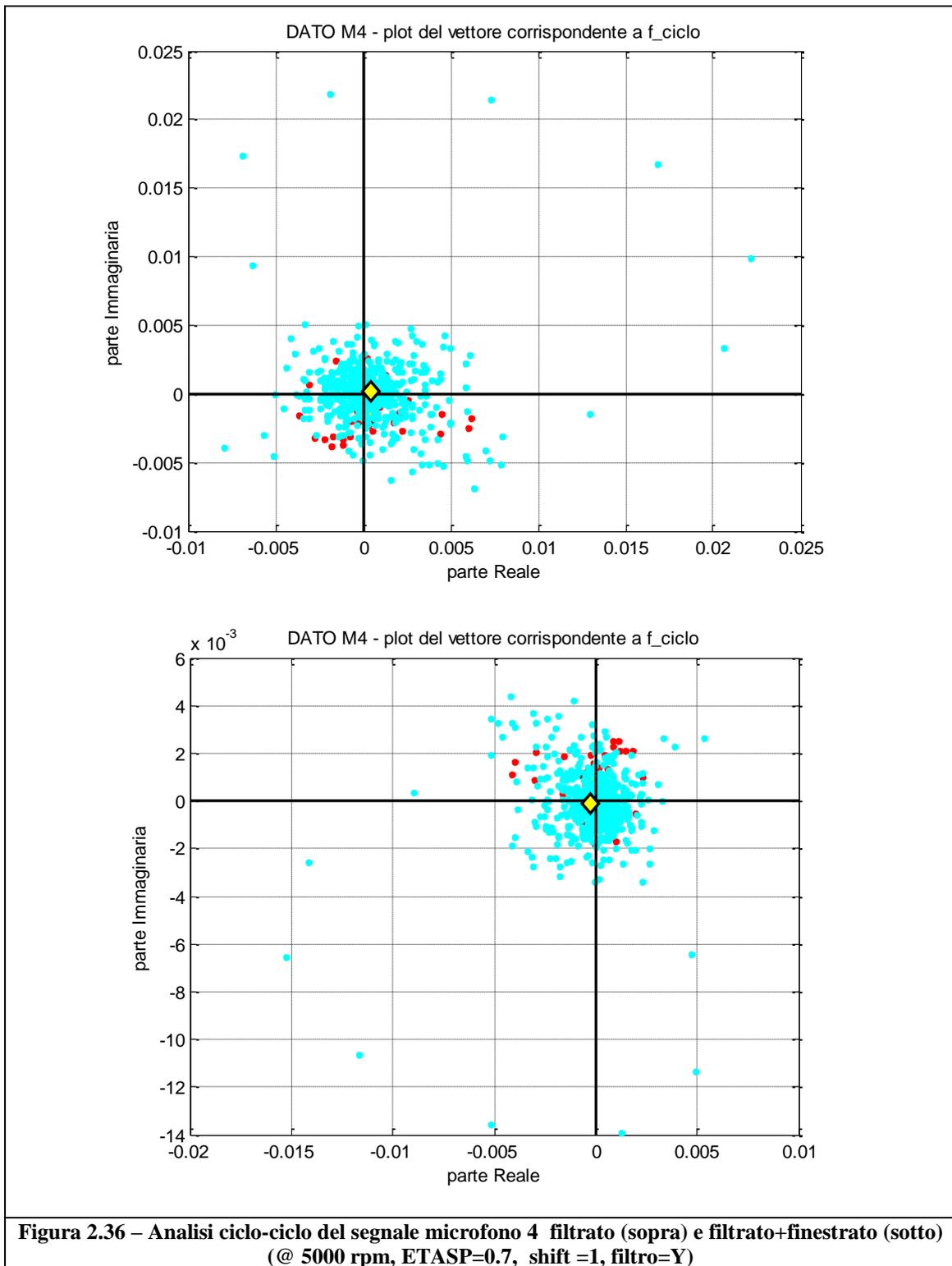


Figura 2.36 – Analisi ciclo-ciclo del segnale microfono 4 filtrato (sopra) e filtrato+finestrato (sotto) (@ 5000 rpm, ETASP=0.7, shift =1, filtro=Y)

L'applicazione della finestrazione ai dati filtrati non aumenta in maniera significativa il SNR (*Signal to Noise Ratio*), ma riduce comunque la dispersione e potrebbe essere utile per evitare un filtraggio.

Lo sfasamento di 180° tra i risultati ottenuti con e senza finestra è dovuto al fatto che, essendo la finestra centrata sul ciclo in analisi ma di durata doppia, il buffer su cui viene applicata deve iniziare mezzo ciclo prima e finire mezzo ciclo dopo (360° su base angolo, vedi fig. 2.25), il che corrisponde sul piano complesso ad uno sfasamento di 180° .

Analizzando le prove a vari carichi e girature, si nota inoltre che a 2000 rpm il microfono 4 si rivela più performante del microfono 1, mentre a 5000 rpm le prestazioni dei due microfoni si invertono e i risultati del microfono in centralina diventano totalmente inaffidabili. Tale comportamento non è stato ancora ben compreso, potrebbe essere imputabile al fatto che a 5000 rpm il segnale del microfono 4 presenta un'ampiezza dell'armonica di ciclo dello stesso ordine di grandezza del rumore, cosa che non si verifica per il microfono 1 o ai bassi regimi (vedi fig. 2.37).

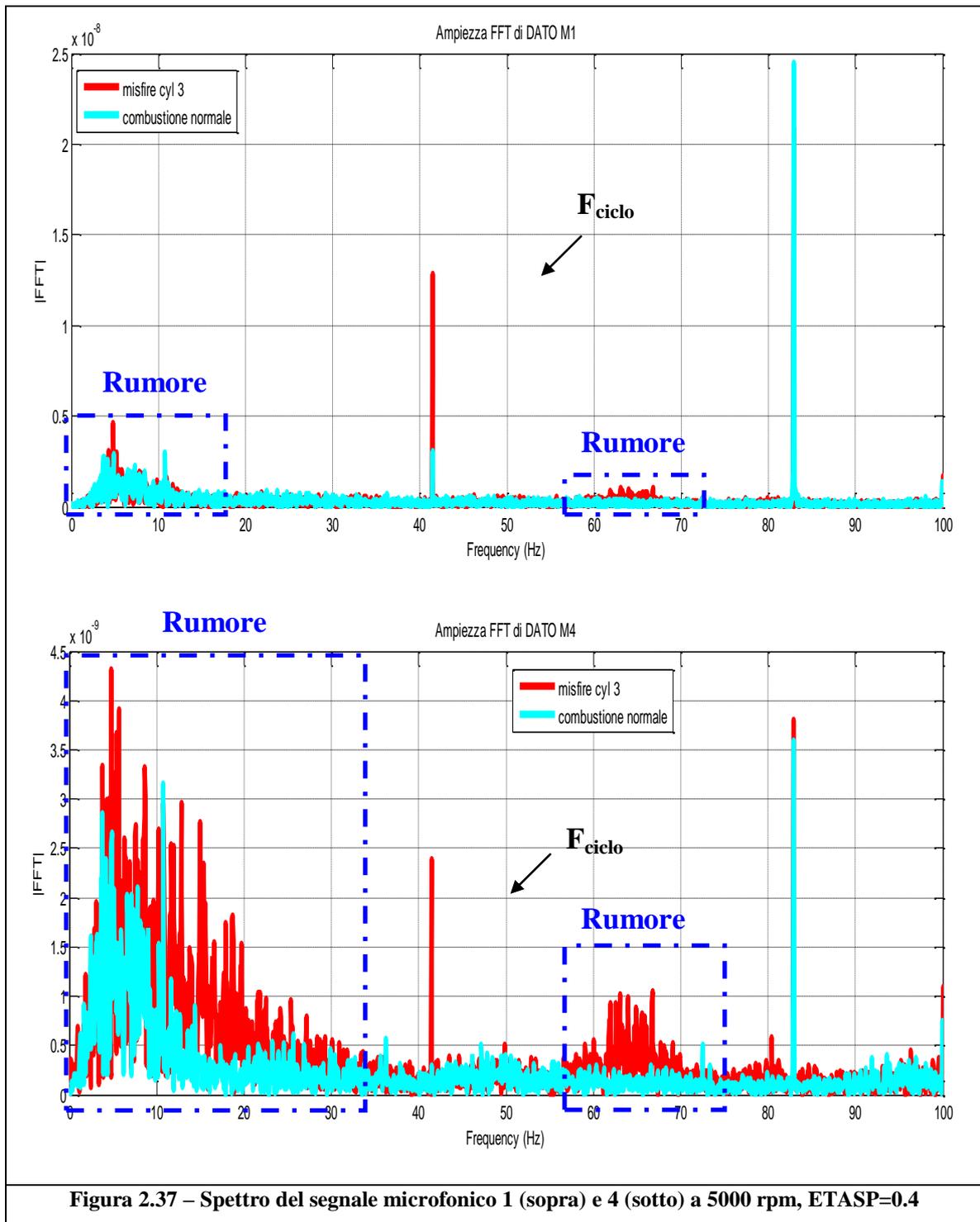
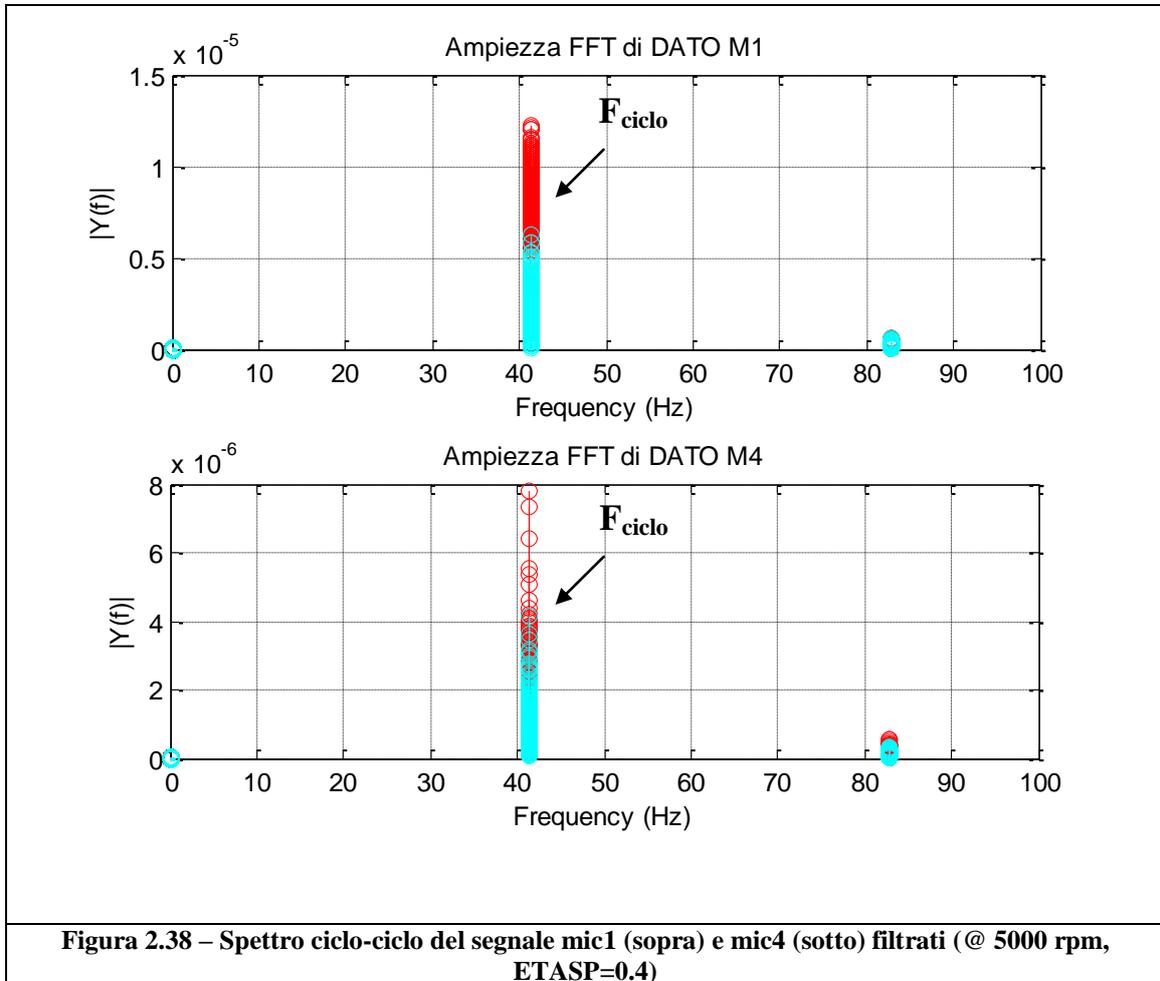


Figura 2.37 – Spettro del segnale microfonico 1 (sopra) e 4 (sotto) a 5000 rpm, ETASP=0.4

Tali rumori, però, dovrebbero venire eliminati tramite l'operazione di filtraggio che si effettua sul segnale, eppure, andando a visualizzare lo spettro che si ottiene nell'analisi ciclo-ciclo, si vede che, nel caso del microfono 4, l'ampiezza alla f_{ciclo} in caso di misfire non ha un valor medio

ben distinguibile da quello in caso di combustione normale, come invece accade per il microfono 1 (vedi fig. 2.38).

Le ragioni di ciò sono ancora da individuare.



Confrontando le figure da 2.27 a 2.36, si possono effettuare le seguenti osservazioni:

- a parità di regime di rotazione del motore, la posizione angolare nel piano complesso del valor medio delle nuvole di punti non varia in maniera significativa al variare del carico, mentre varia la posizione radiale, cioè c'è una variazione di ampiezza ma non di fase.

- variando il regime del motore, la posizione angolare delle nuvole di punti relative ai vari cilindri in misfire varia; ciò dovrebbe essere dovuto al fatto che la lunghezza temporale del buffer è funzione del numero di giri, mentre il tempo impiegato dall'onda sonora per raggiungere la capsula microfonica è costante, essendo funzione soltanto della velocità del suono e della distanza del microfono.

Tali legami tra le variazioni di ampiezza e fase e il punto di funzionamento del motore necessitano però di essere ulteriormente studiati tramite una campagna sperimentale più dettagliata ed un'analisi specifica del procedimento di propagazione delle onde acustiche nello spazio.

2.6 – Performance indicative dell’algoritmo di diagnosi misfire

Al fine di avere un’informazione indicativa sulle capacità diagnostiche dell’algoritmo in fase di sviluppo, si sono individuate delle soglie di primo tentativo con le quali impostare una diagnosi misfire.

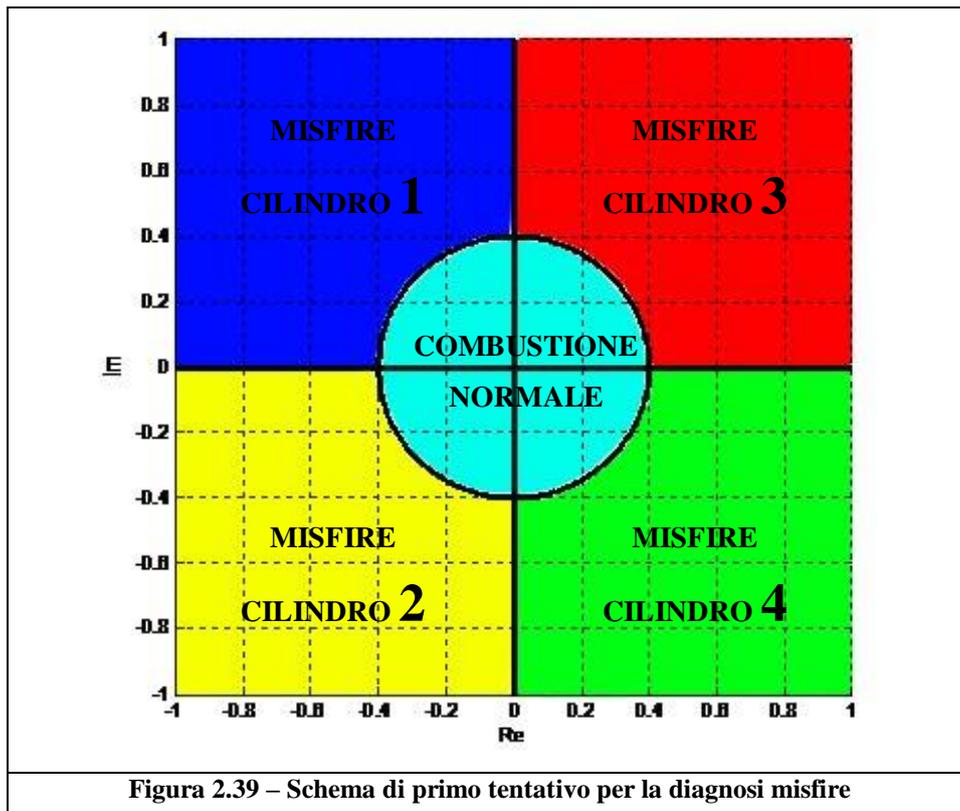
Le performance sono state valutate considerando i risultati migliori ottenuti in precedenza, cioè quelli in cui si è applicato sia il filtraggio che la finestrazione del segnale.

La soglia in ampiezza necessaria per distinguere una mancata accensione da una combustione corretta è stata impostata manualmente tramite un valore di primo tentativo scelto sulla base di osservazioni visive degli output.

Per diagnosticare il cilindro in misfire, invece, si è diviso il piano complesso nei quattro quadranti standard, associando ogni quadrante ad un cilindro diverso (essendo il motore in esame un 4 cilindri), sempre in base ad osservazioni visive sulle singole prove.

Si ricorda che queste *soglie* non sono fisse, ma variano con il regime, il carico, la posizione del microfono, il filtraggio e la finestrazione.

Necessitano inoltre di essere assolutamente meglio definite tramite una mappatura specifica ottimizzata sulla base di prove sperimentali e tramite l’implementazione di algoritmi di autoapprendimento dei microfoni.



Si riportano in seguito i risultati ottenuti per le varie prove. Per le prove a 5000 rpm si è considerato solo il microfono 1, data la scarsa accuratezza del microfono 4.

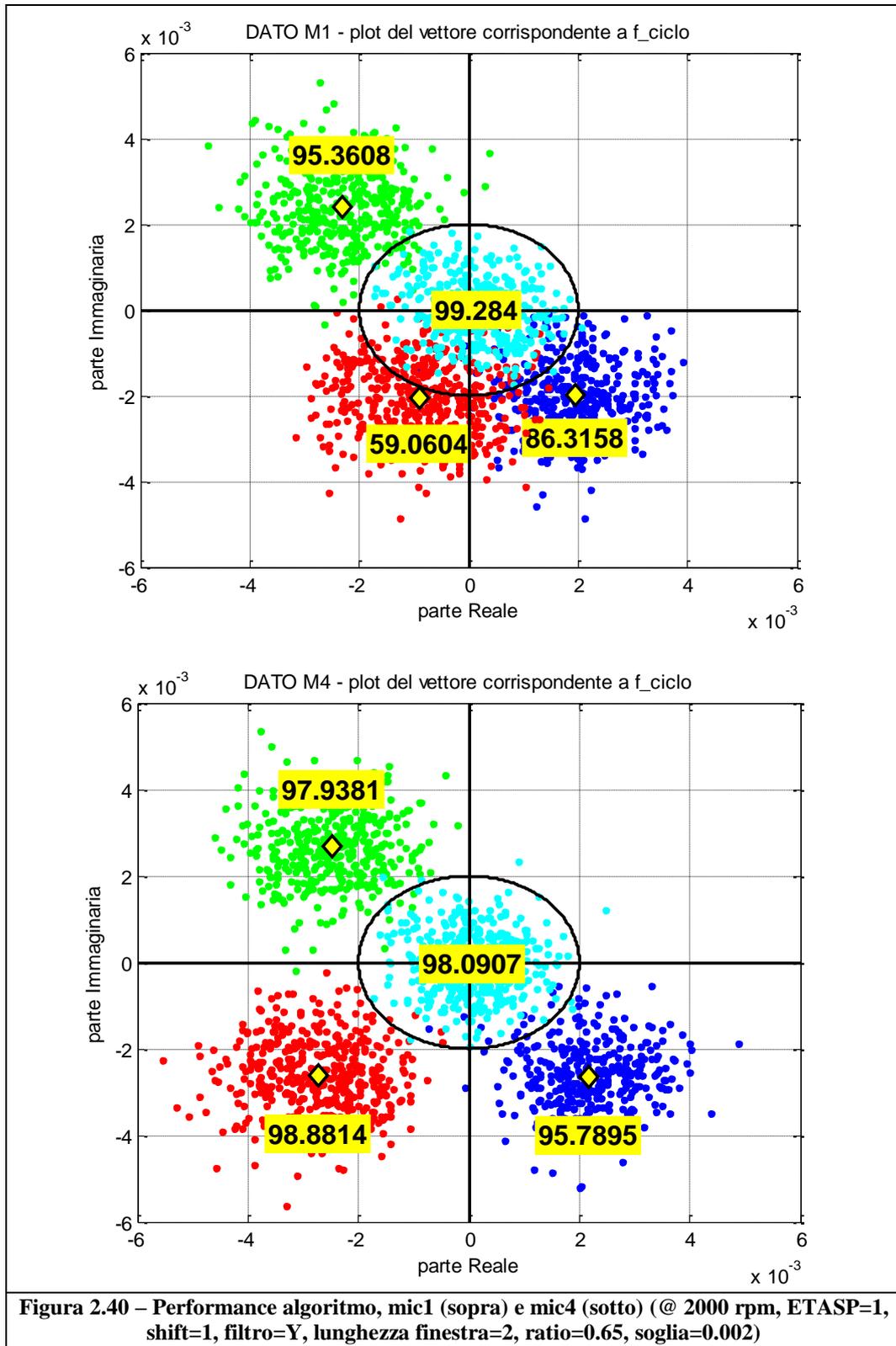
Il valore indicato in giallo rappresenta la percentuale di diagnosi corrette realizzate dall’algoritmo, definita come:

$$indice_di_performance = \frac{numero_diagnosi_corrette}{numero_cicli_totale} \cdot 100$$

Per una analisi statistica più dettagliata occorrerebbe distinguere anche tra:

- *falsi allarmi*: quando una combustione normale viene diagnosticata come misfire (errore sulla soglia di ampiezza)
- *mancate diagnosi*: quando un misfire viene diagnosticato come combustione normale (errore sulla soglia di ampiezza)

- *errore nell'individuazione del cilindro*: quando il misfire viene diagnosticato ma nel cilindro sbagliato (errore sulle soglie di fase)



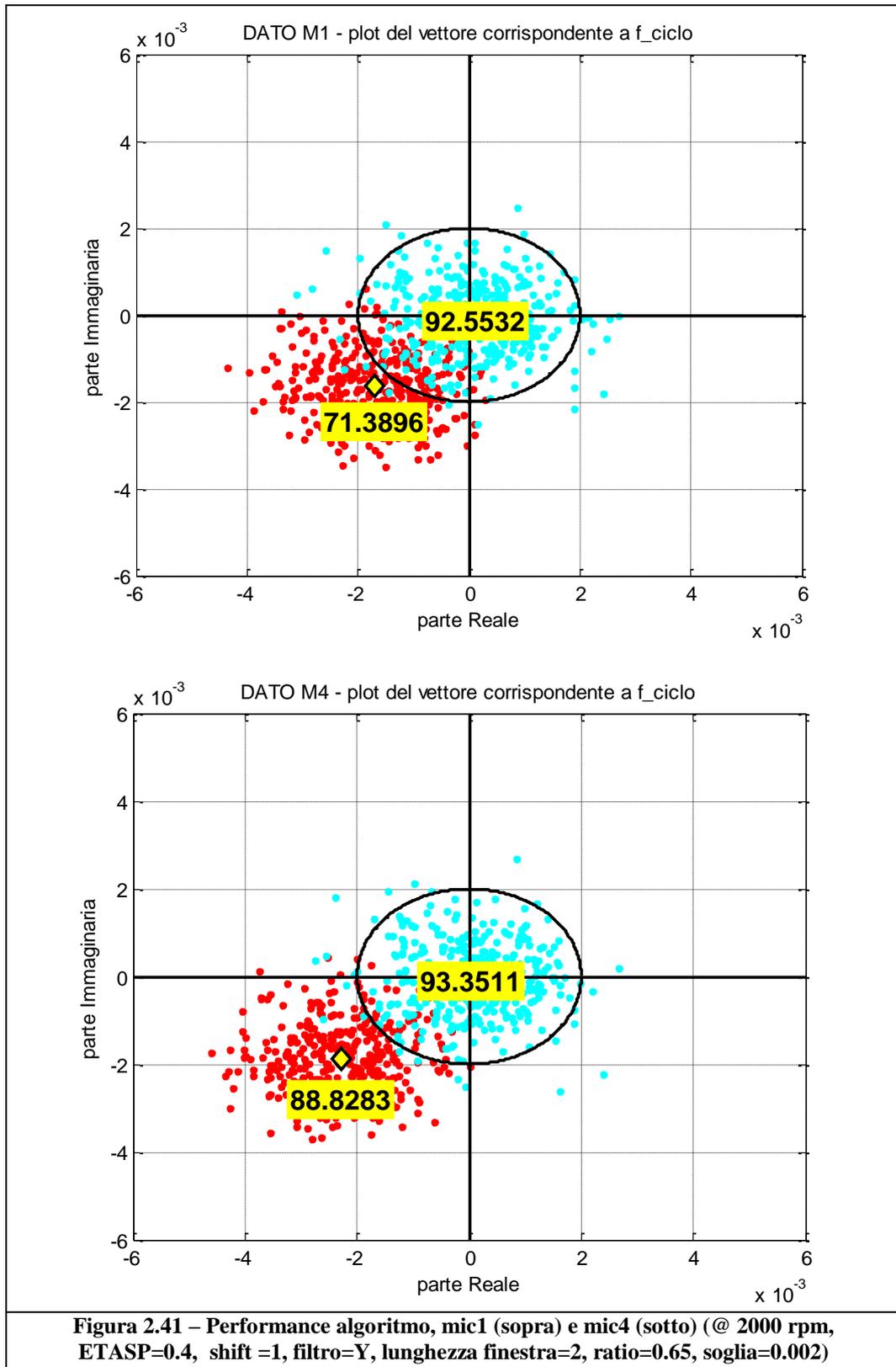


Figura 2.41 – Performance algoritmo, mic1 (sopra) e mic4 (sotto) (@ 2000 rpm, ETASP=0.4, shift =1, filtro=Y, lunghezza finestra=2, ratio=0.65, soglia=0.002)

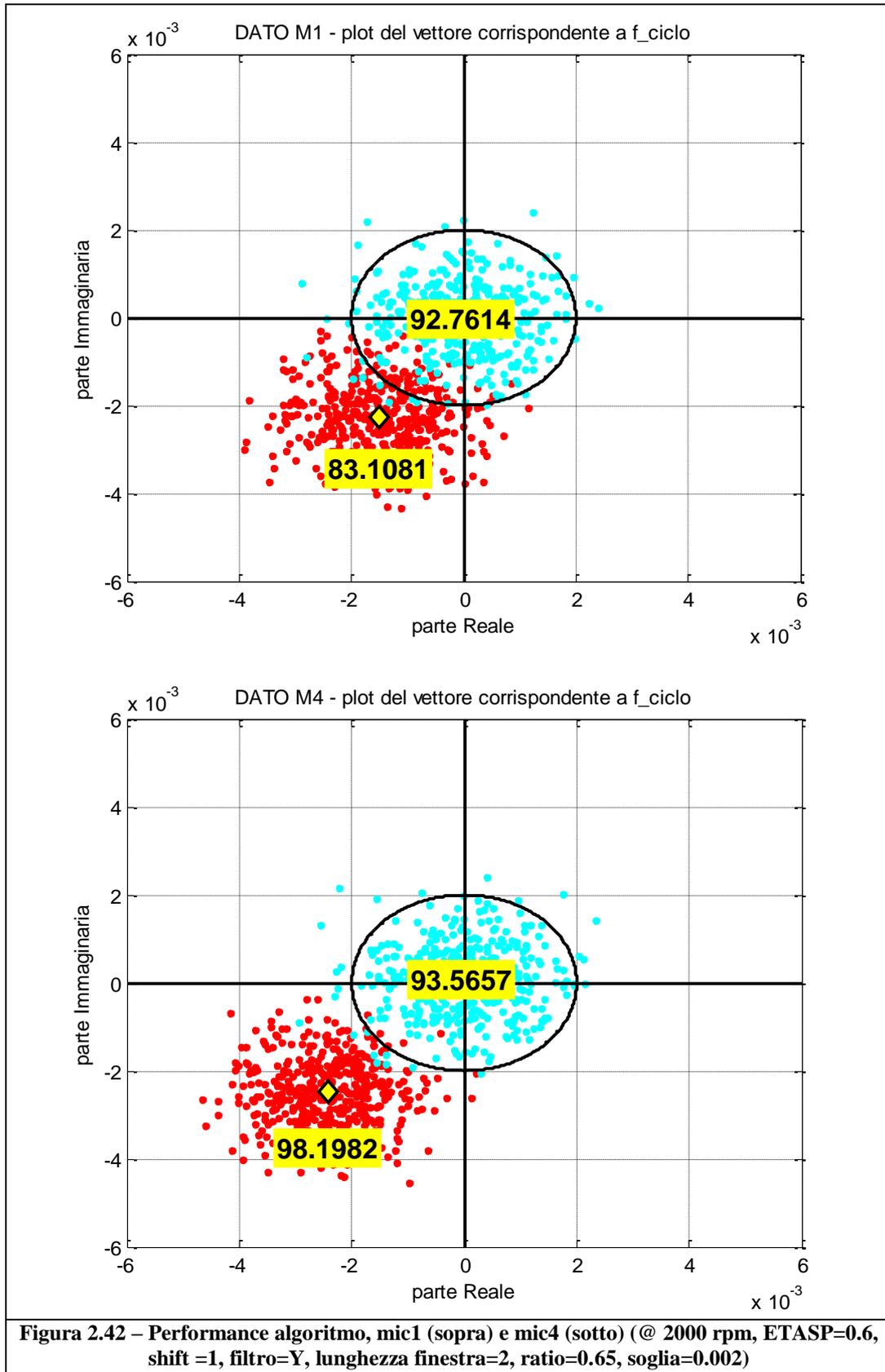
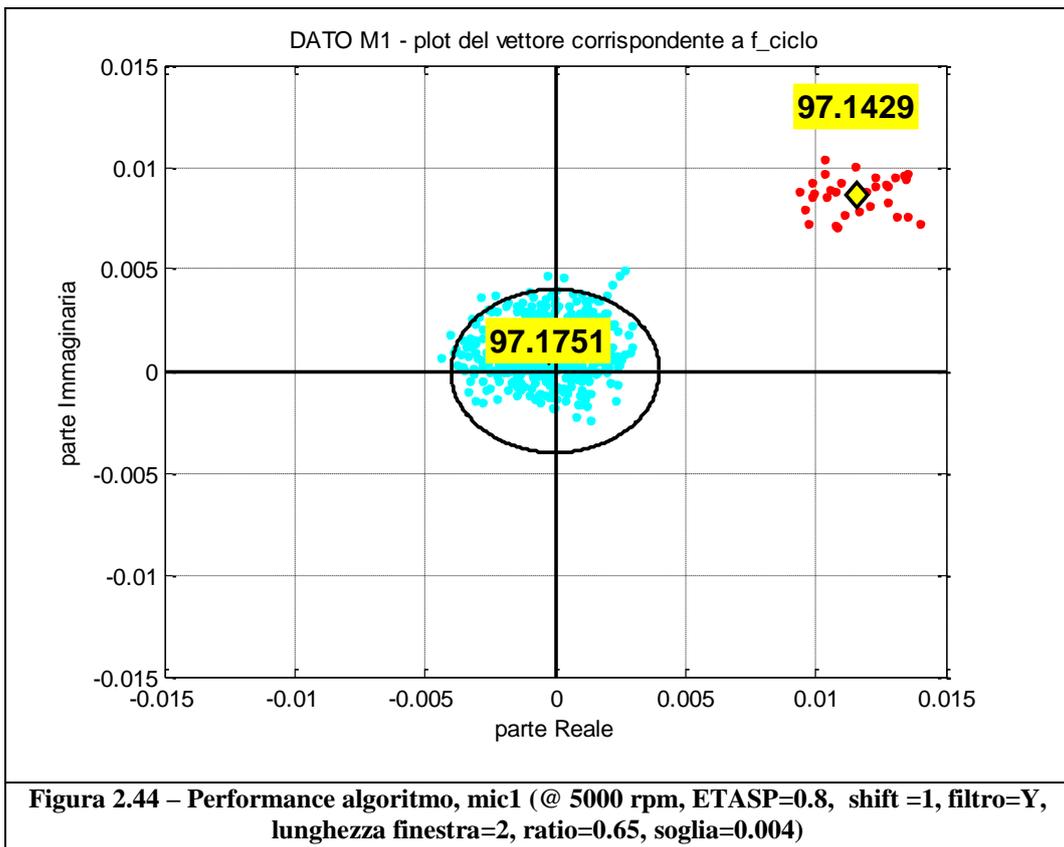
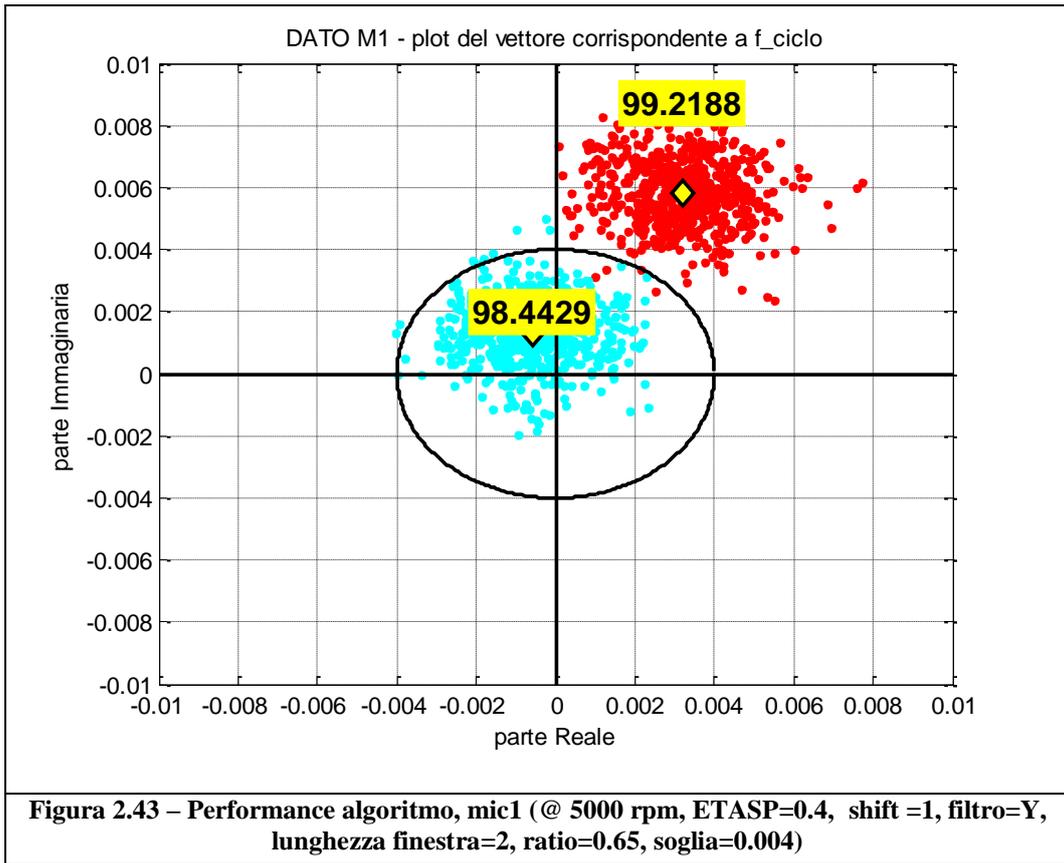


Figura 2.42 – Performance algoritmo, mic1 (sopra) e mic4 (sotto) (@ 2000 rpm, ETASP=0.6, shift =1, filtro=Y, lunghezza finestra=2, ratio=0.65, soglia=0.002)



Si nota come, specialmente a bassi giri ed alti carichi, dove il rumore generato dalla combustione è predominante rispetto a quello generato dagli urti meccanici, l'algoritmo fornisce un'ottima capacità diagnostica, mentre per le altre condizioni di funzionamento le performance diminuiscono.

2.6.1 – Influenza della lunghezza della finestra

Al fine di migliorare ulteriormente il SNR, si è provato a modificare la lunghezza della finestra di Tukey, in modo da aumentare ulteriormente la risoluzione in frequenza durante l'analisi ciclo-ciclo.

Si riportano in seguito i risultati ottenuti utilizzando una finestra di lunghezza pari a 3 cicli motore, con un valore del parametro *ratio* sempre impostato a 0.65.

In tutte le prove si nota un miglioramento della capacità diagnostica dell'algoritmo.

Si sottolinea che lo shift di 180° della fase rispetto al caso con finestra di lunghezza uguale a 2 è corretto ed è dovuto al fatto che, essendo la durata della finestra pari ad un numero dispari di cicli, il buffer inizia in corrispondenza dell'inizio del ciclo precedente a quello in analisi e non a metà come nel caso precedente (la fase ritorna cioè uguale a quella che si aveva senza utilizzare la finestra).

Anche questo tipo di analisi va comunque ulteriormente approfondita in un'ottica di ottimizzazione dell'algoritmo.

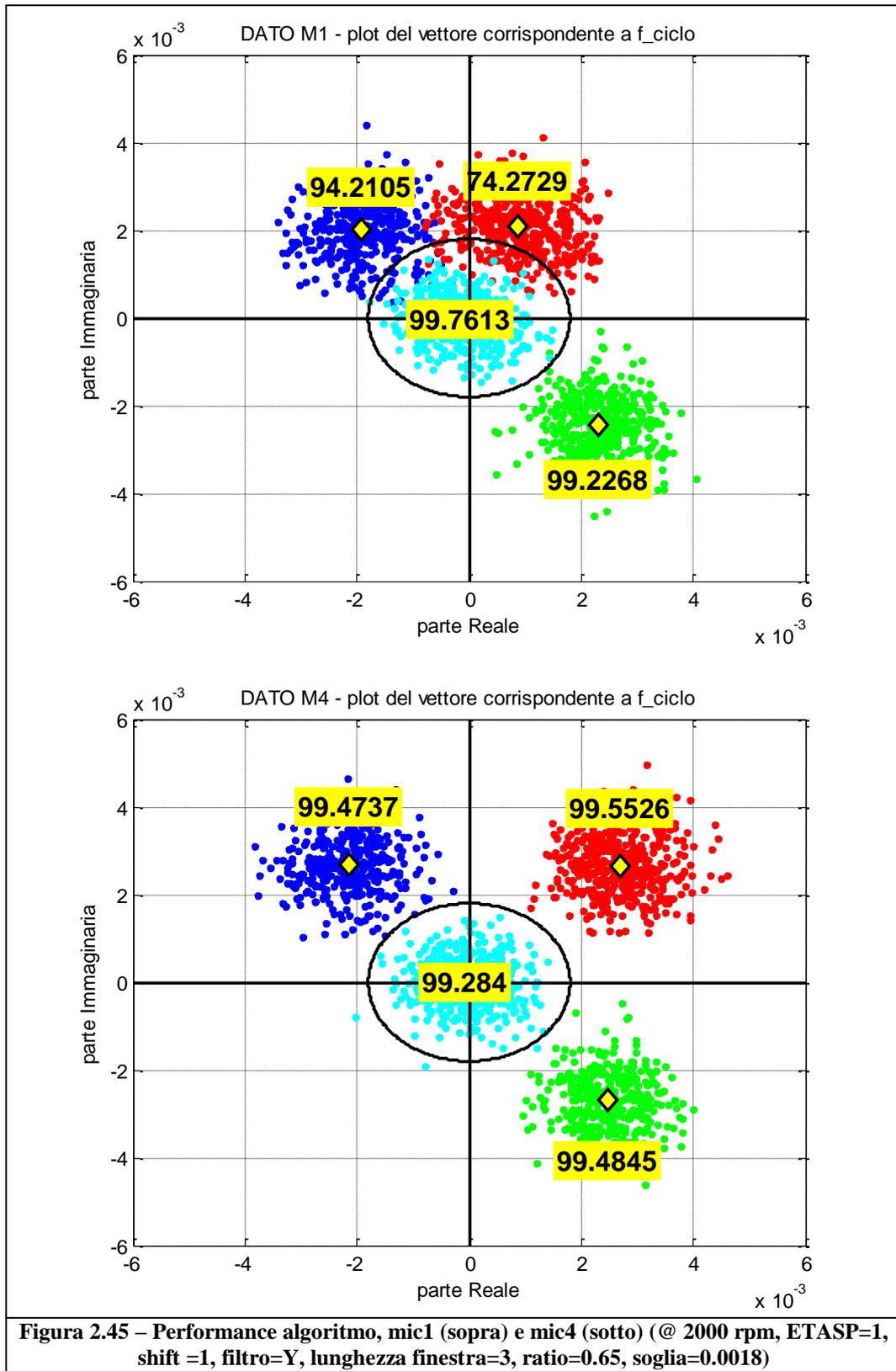
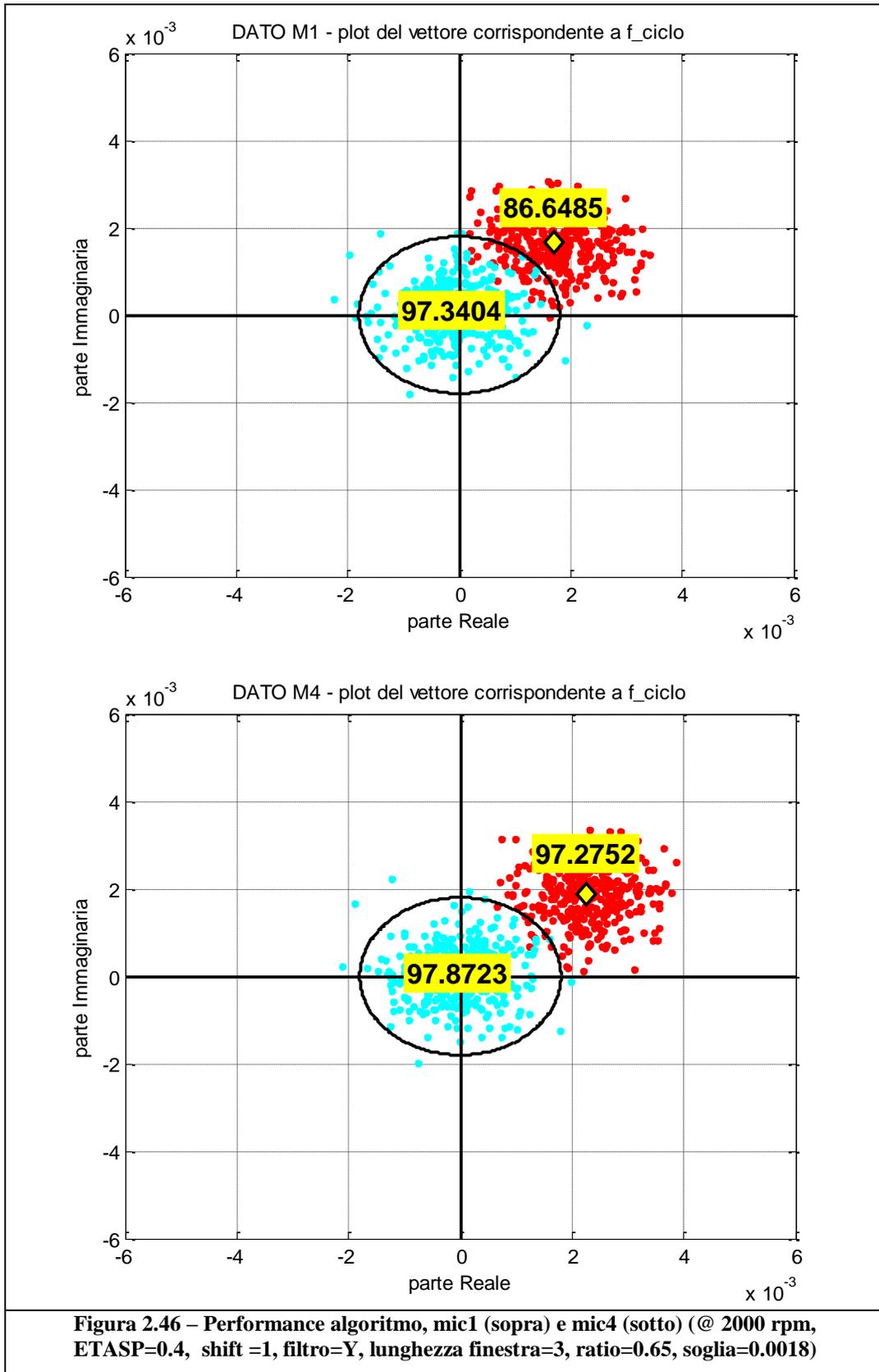
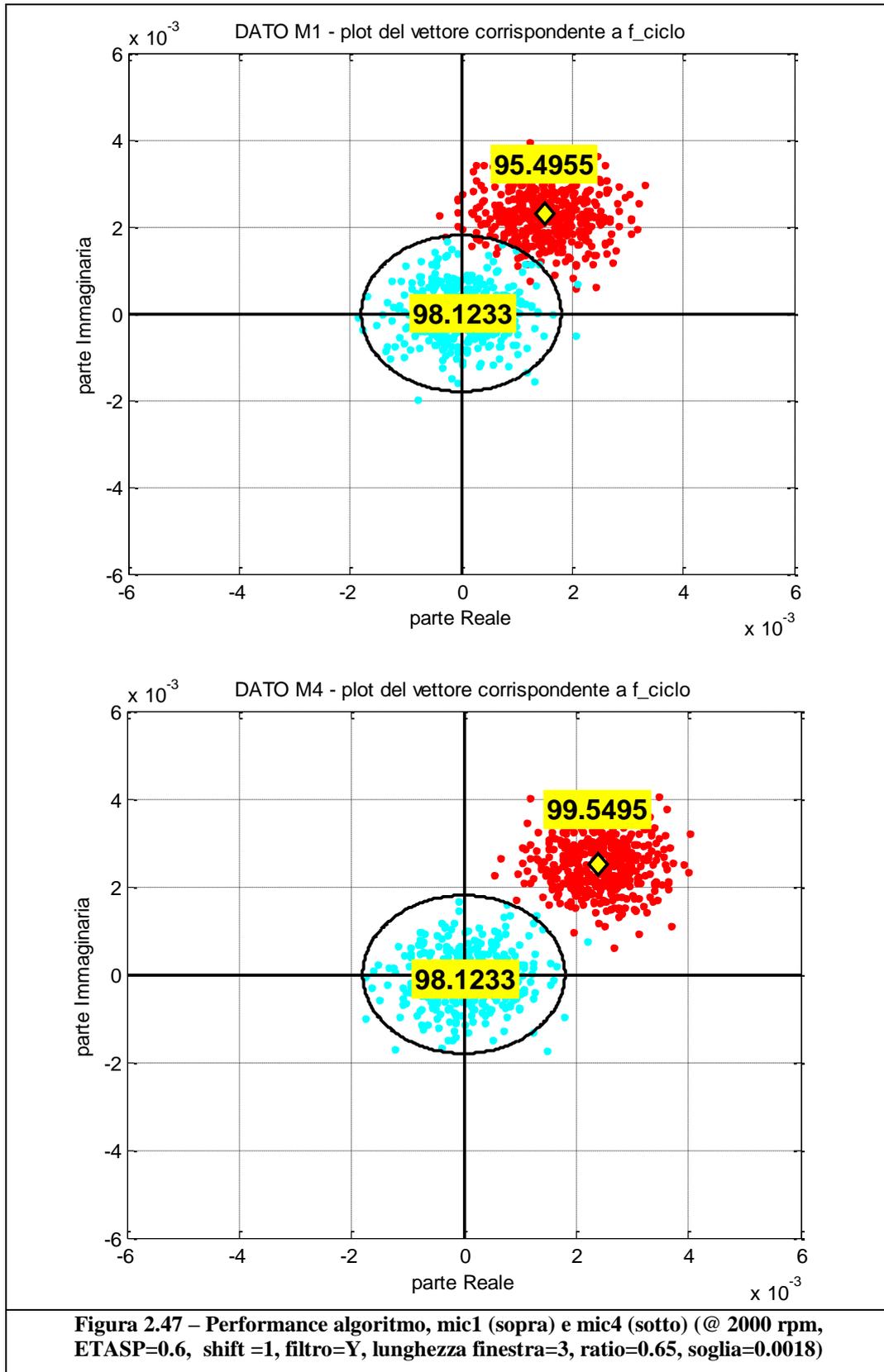


Figura 2.45 – Performance algoritmo, mic1 (sopra) e mic4 (sotto) (@ 2000 rpm, ETASP=1, shift =1, filtro=Y, lunghezza finestra=3, ratio=0.65, soglia=0.0018)



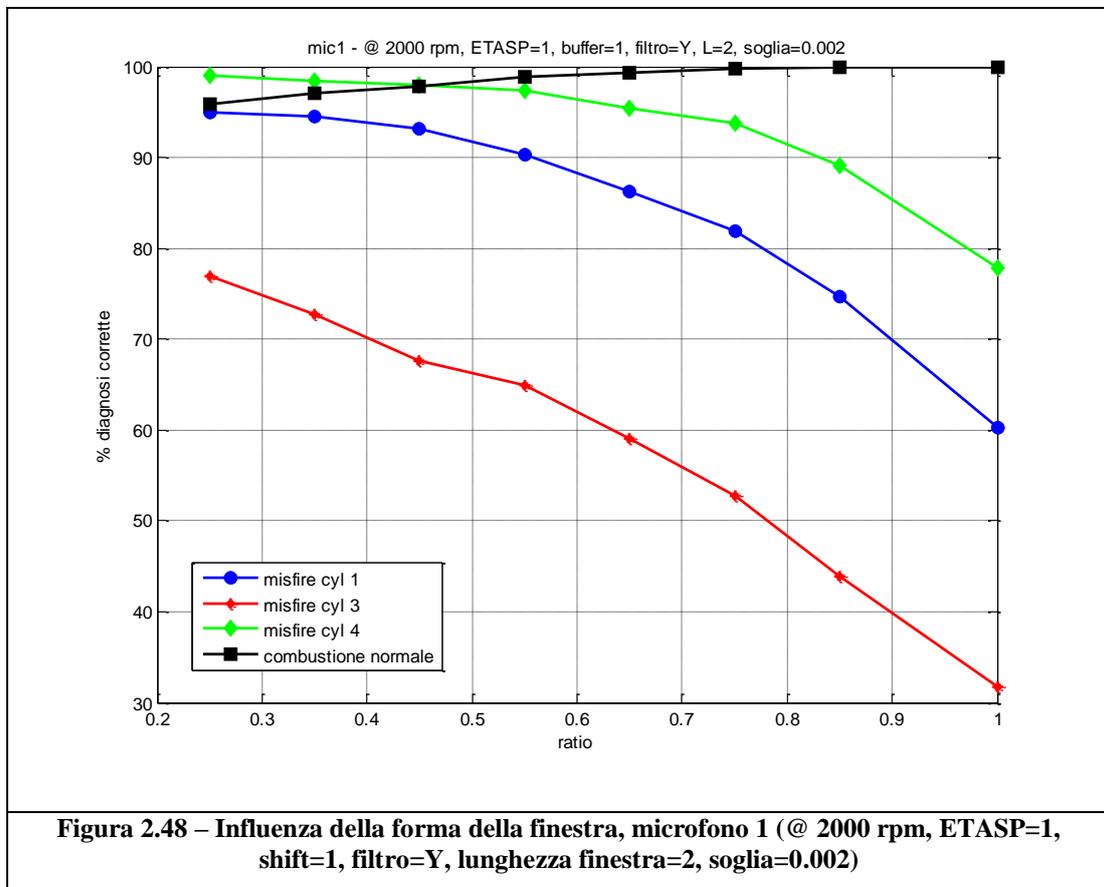


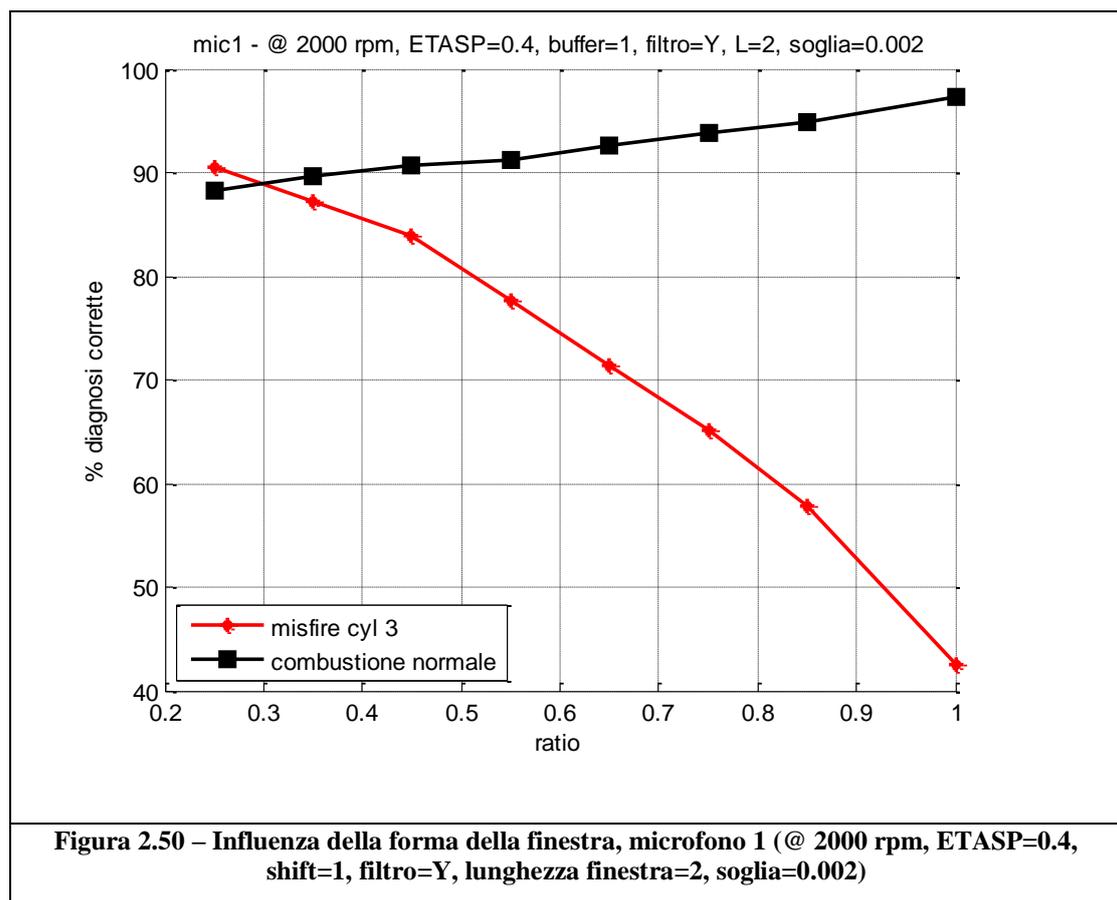
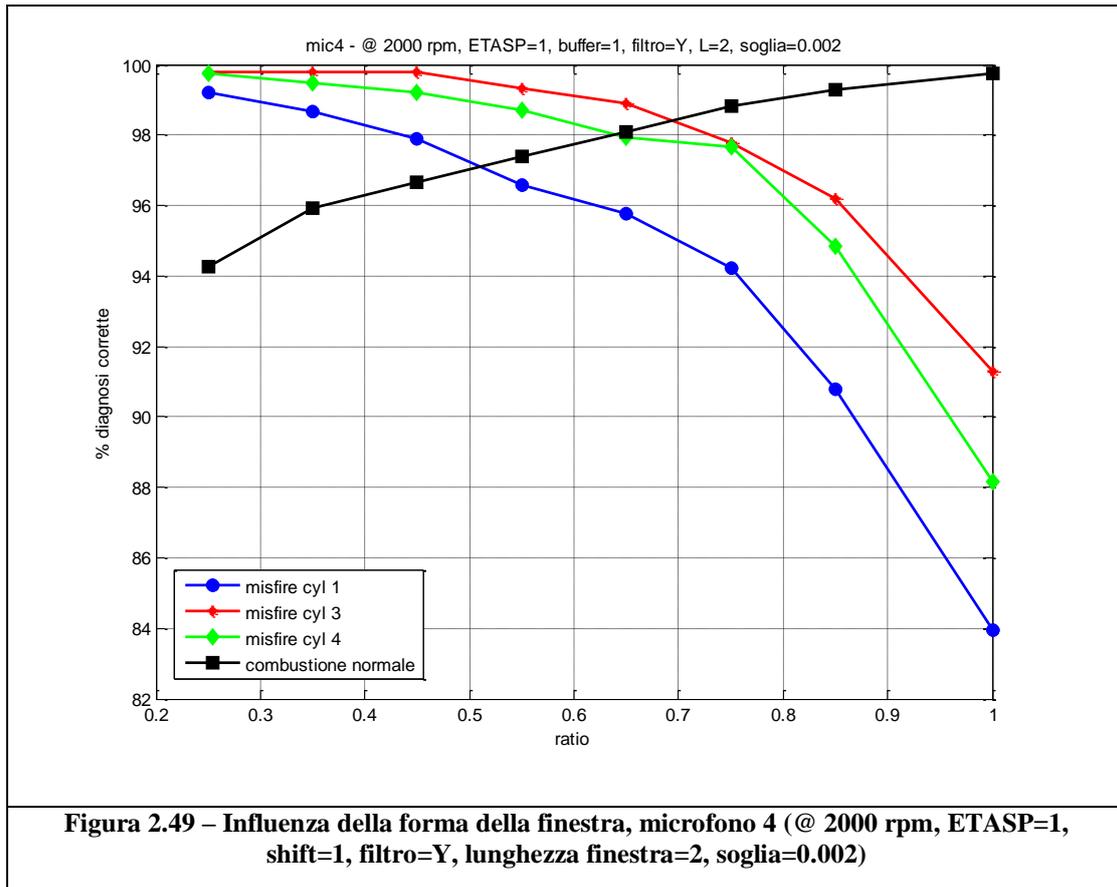
2.6.2 – Influenza della forma della finestra

Si è provato anche a studiare l'influenza della forma della finestra sul SNR, effettuando prove con diversi valori del parametro *ratio*, mantenendo la lunghezza della finestra pari a 2 e il valore della soglia sull'ampiezza costante.

Si ricorda che tale parametro può assumere valori compresi tra [0 1], dove il valore 1 rappresenta la finestra rettangolare.

Si riportano nei grafici seguenti gli andamenti della percentuale di diagnosi corrette in funzione del parametro *ratio*, per le varie prove a disposizione.





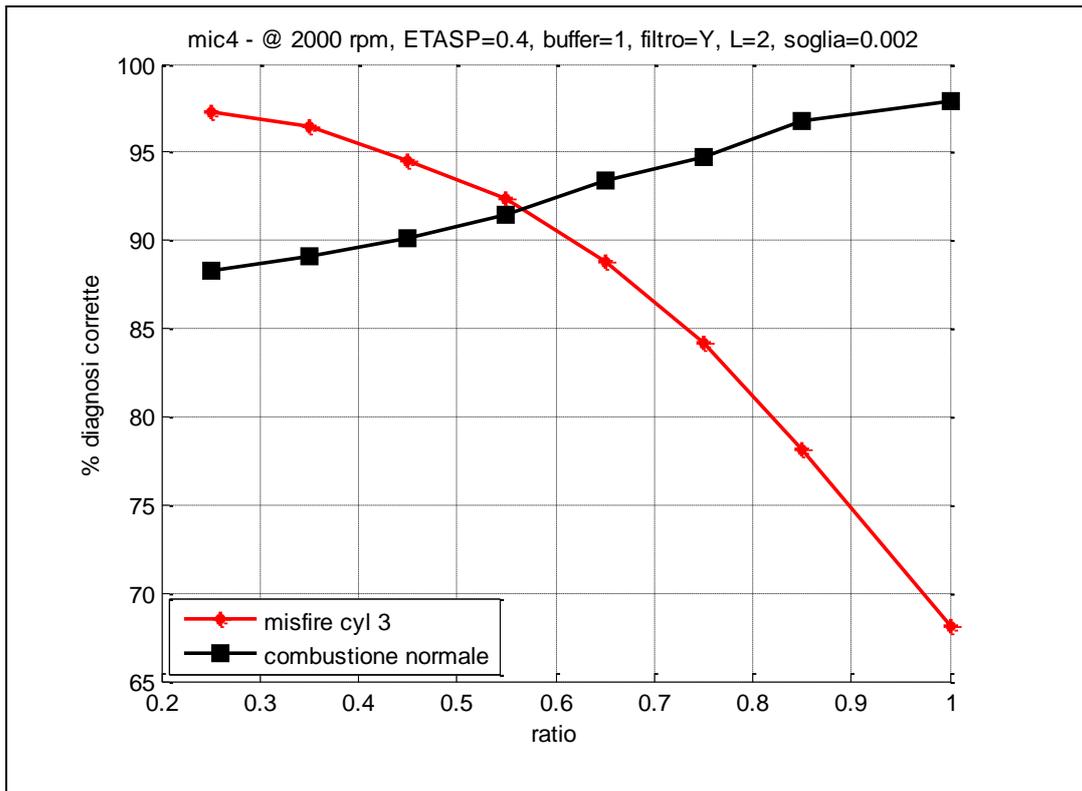


Figura 2.51 – Influenza della forma della finestra, microfono 4 (@ 2000 rpm, ETASP=0.4, buffer=1, filtro=Y, lunghezza finestra=2, soglia=0.002)

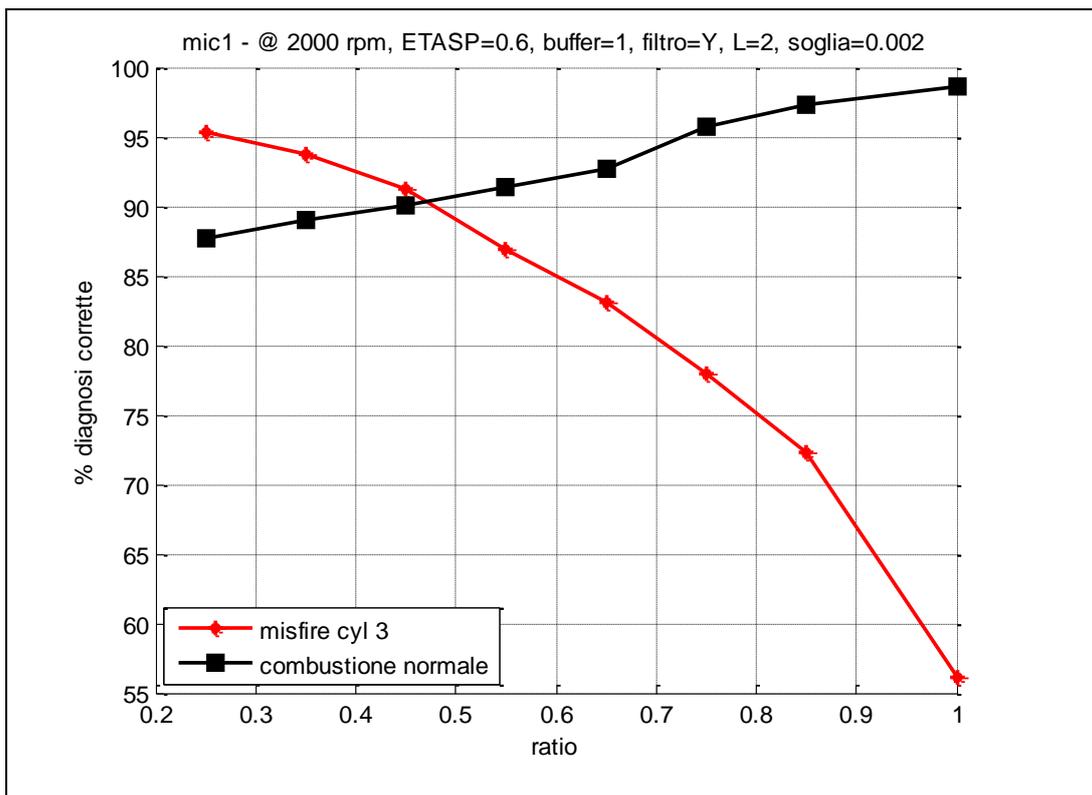
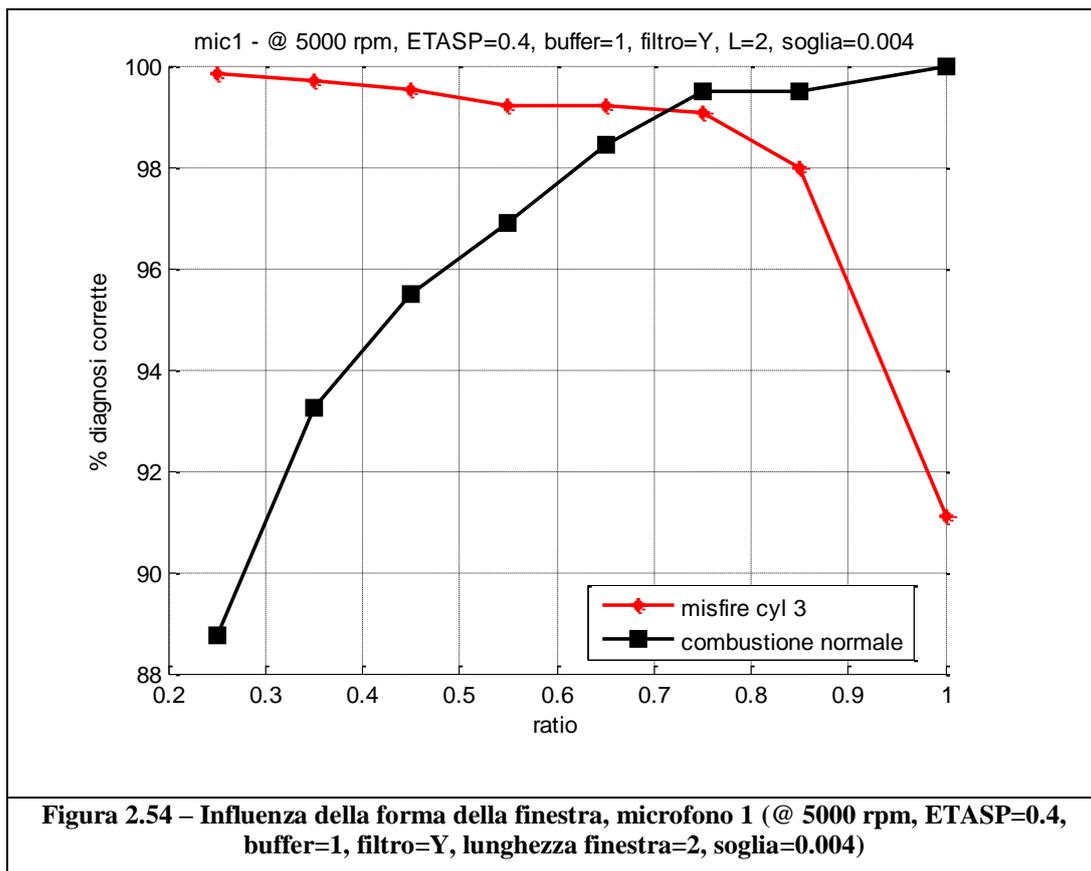
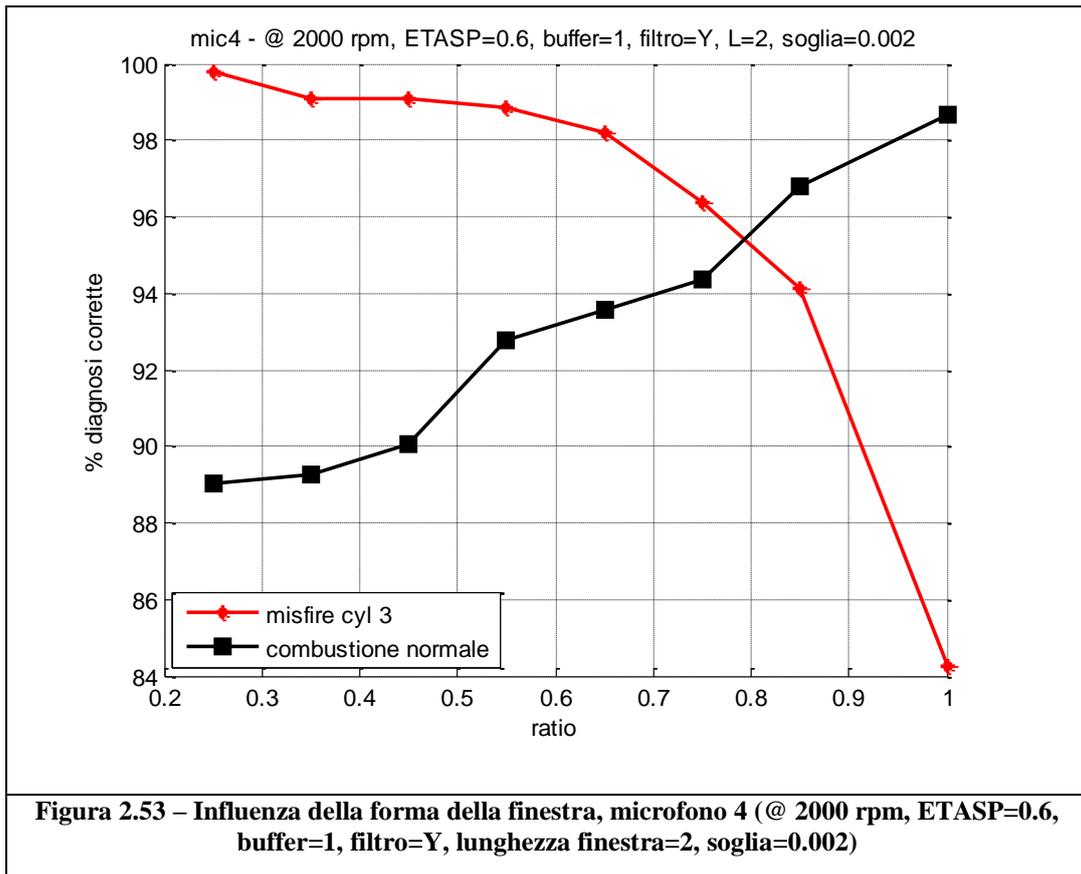
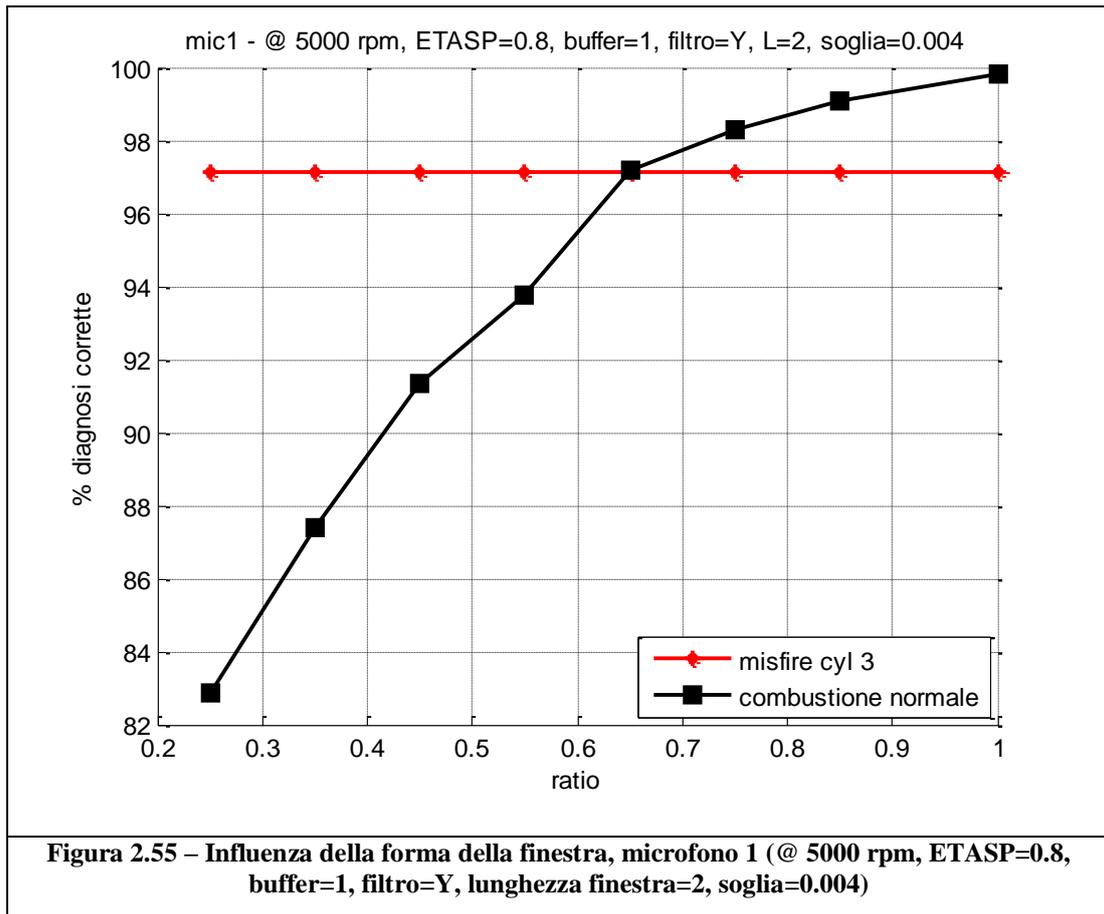


Figura 2.52 – Influenza della forma della finestra, microfono 1 (@ 2000 rpm, ETASP=0.6, buffer=1, filtro=Y, lunghezza finestra=2, soglia=0.002)





Al diminuire del parametro *ratio* si nota una tendenza generale al miglioramento per quanto riguarda la diagnosi in caso di cilindro in misfire, ma aumenta anche la percentuale di falsi allarmi.

È necessario quindi approfondire ulteriormente tale analisi, modificando contemporaneamente anche i valori delle soglie di ampiezza e fase, in modo da determinare la combinazione ideale di tali parametri che permetta un'ottimizzazione della diagnosi.

2.7 – Prime conclusioni

Dall'analisi preliminare svolta sul limitato database a disposizione si può concludere che il segnale microfonico sembra contenere al suo interno informazioni utili per impostare un algoritmo di diagnosi misfire da affiancare o al limite sostituire a quelli già presenti in centralina.

Il problema principale riscontrato consiste nel miglioramento del rapporto segnale-rumore, in modo da far sì che la capacità diagnostica dell'algoritmo soddisfi le specifiche richieste dalle normative internazionali.

Si è pensato a tal punto di definire una nuova campagna di prove sperimentali più specifica in ottica misfire, in modo da generare un database sufficientemente ampio su cui testare la validità dell'algoritmo utilizzato e individuarne eventuali criticità.

Capitolo 3

Nuova campagna sperimentale

La nuova campagna sperimentale è stata svolta presso la sala prove del laboratorio del DIEM.

Obiettivo principale di tale attività è la generazione di un database specifico in ottica diagnosi misfire, al fine di testare la validità dell'algoritmo impostato durante le analisi precedenti su un set di prove sufficientemente ampio per poter trarre delle indicazioni significative sull'effettiva applicabilità dei segnali microfoni in una diagnosi motore.

3.1 - Descrizione layout sperimentale

Il motore utilizzato durante questa nuova campagna di prove è un *Fiat Fire 1200 8 valvole S.I.*, di cui si riportano le specifiche tecniche nella tabella seguente:

CILINDRATA	1242 cm³
NUMERO CILINDRI	4
NUMERO VALVOLE	8
SISTEMA DI INIEZIONE	SPEED-DENSITY MULTI-POINT SEQUENZIALE FASATO
RAPPORTO DI COMPRESSIONE	9,8 +/- 0,2
CORSA	78,86 mm
ALESAGGIO	70,80 mm
INTERASSE BIELLA	129,00 mm

POTENZA MAX	54 kW @ 6000 rpm
COPPIA MAX	106 Nm @ 4000 rpm
FASATURA VALVOLA DI ASPIRAZIONE	A.A.A.=7° R.C.A.=41°
FASATURA VALVOLA DI SCARICO	A.A.S.=43° R.C.S.=5°
SEQUENZA ACCENSIONE CILINDRI	1 3 4 2

Tabella 3.1 - Caratteristiche motore Fiat 1200

Tale motore è collegato ad un freno dinamometrico a correnti parassite ed è controllato in tempo reale tramite una centralina virtuale (VECU) interamente progettata dal DIEM di Bologna. Attraverso tale sistema è possibile effettuare o disabilitare determinate attuazioni in maniera rapida e semplice attraverso l'utilizzo di un'interfaccia grafica PC, monitorando contemporaneamente il valore delle principali grandezze di interesse del motore.

Sul motore sono presenti vari sensori da laboratorio, in questa trattazione ci soffermeremo soltanto sulla descrizione della sensoristica utilizzata ai fini delle nostre rilevazioni, consistente in:

- 4 microfoni omnidirezionali
- 2 sensori di pressione in camera di combustione
- 1 accelerometro
- 1 sensore di pressione nel collettore di aspirazione

Il segnale di pressione nel collettore di aspirazione ed il segnale accelerometrico non verranno utilizzati durante le analisi a seguire, ma sono stati ugualmente rilevati in previsione di ulteriori studi futuri.

3.1.1 – Caratteristiche dei microfoni

Per l'applicazione in esame, si è scelto di utilizzare 4 microfoni capacitivi omnidirezionali di marche differenti, in particolare:

- 3 microfoni *Panasonic WM-61A*
- 1 microfono *Horn EM-6050*

La scelta di tali microfoni è derivata dal fatto che, durante la precedente campagna sperimentale, si sono rilevati i più performanti al fine delle analisi svolte.

Il microfono a condensatore (electret) sfrutta le variazioni di capacità del condensatore, realizzato con una lamina metallica o di plastica metallizzata costituente l'armatura fissa del condensatore, ed una seconda mobile, la membrana.

A seconda della direzionalità si classificano in:

- *Omnidirezionali*: quando forniscono, a parità di emissione sonora, lo stesso segnale indipendentemente dalla direzione di provenienza del suono.
- *Monodirezionali*: quando hanno una sensibilità che varia a seconda della direzione di provenienza del suono.

Il microfono a condensatore, il cui principio di funzionamento si basa sulla variazione di un campo elettrico, per funzionare ha bisogno di una alimentazione che viene utilizzata per generare il campo elettrico necessario. Per maggiori dettagli si rimanda al lavoro [18] cap. 4.

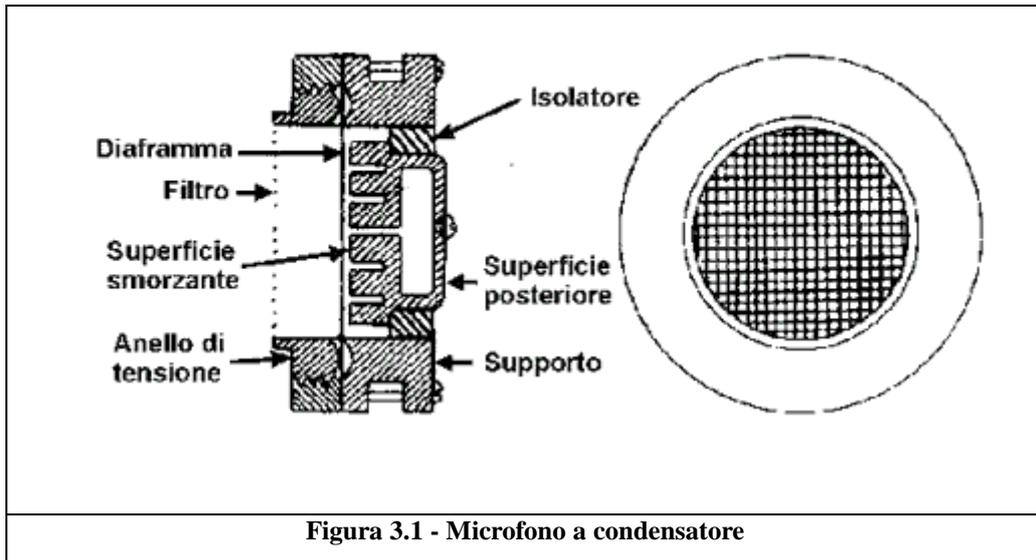


Figura 3.1 - Microfono a condensatore

Si riportano in seguito le caratteristiche tecniche dei microfoni utilizzati:

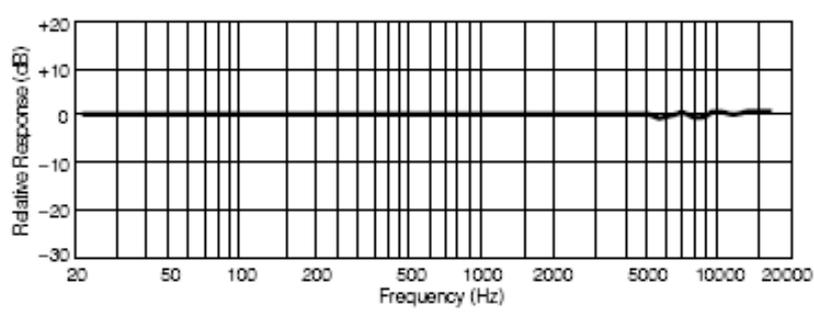
		<h1 style="color: blue;">Panasonic</h1> <h2 style="color: blue;">WM-61A</h2>	
TIPO		Microfono a condensatore, omnidirezionale, preamplificato	
SENSIBILITA'		1 V/Pa ad 1 KHz	
IMPEDENZA		2200 Ω	
FREQUENZA		20-20000 Hz	
TENSIONE DI ALIMENTAZIONE		Nominale: 2.0V	
CAPSULA		Max: 10V	
<p>Risposta in frequenza</p> 			
COSTO		1.29 €	

Tabella 3.2 – Caratteristiche microfono Panasonic WM-61A

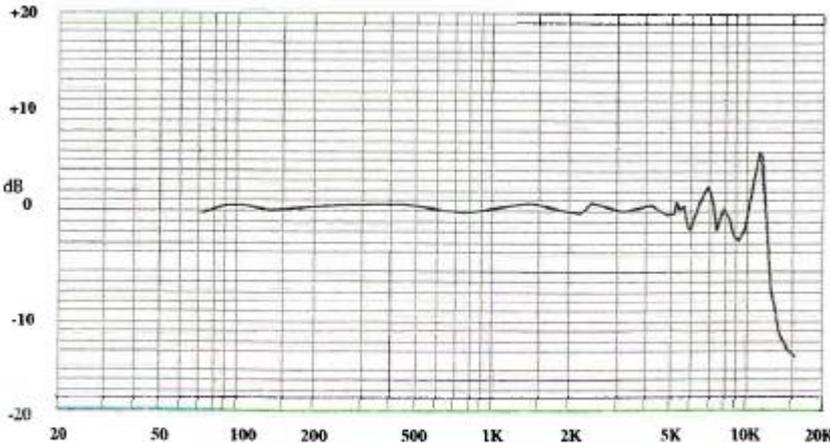
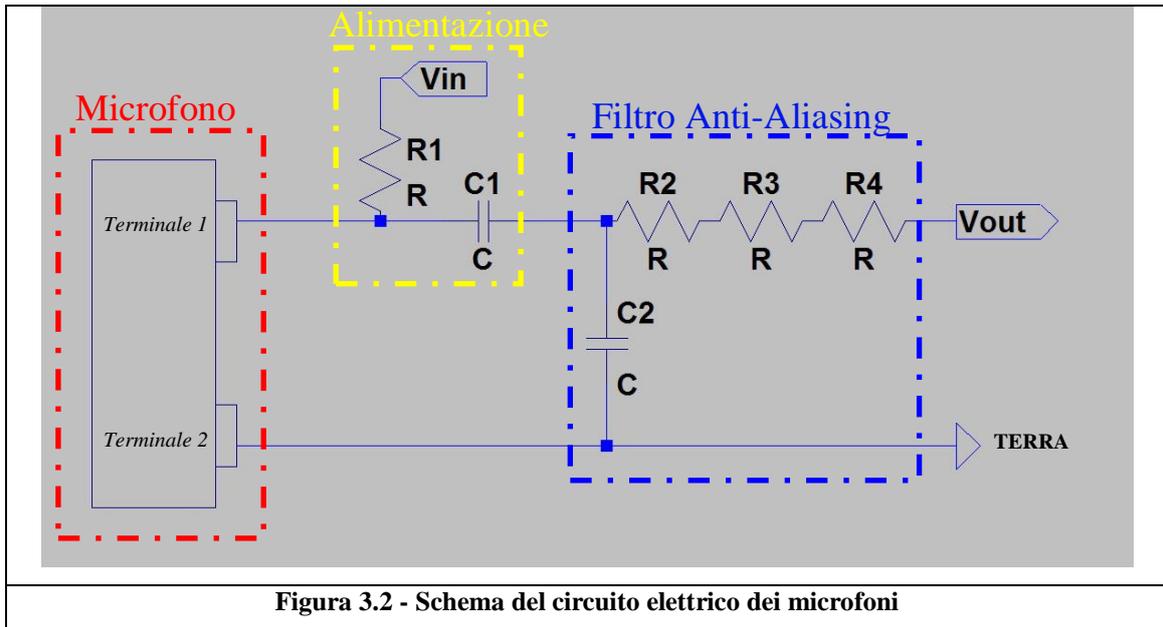
		<p>HORN 深圳市豪恩实业有限公司 SHENZHEN HORN INDUSTRIAL CO., LTD.</p> <p>EM6050</p>	
TIPO		Microfono a condensatore, omnidirezionale, preamplificato	
SENSIBILITA'		1 V/Pa ad 1 KHz	
IMPEDENZA		2200 Ω	
FREQUENZA		100-10000 Hz	
TENSIONE DI ALIMENTAZIONE		4.5V	
CAPSULA			
<p>Risposta in frequenza</p>  <p style="text-align: center;">Frequency(Hz)</p>			
COSTO		0.30 €	

Tabella 3.3 – Caratteristiche microfono Horn EM-6050

Tutti i sensori microfonicici illustrati presentano nella parte posteriore due riporti in stagno. Al terminale 1 sono stati collegati sia l'alimentazione sia il cavo da cui prelevare il segnale in uscita tramite un circuito RC come indicato nello schema in fig. 3.3. Sulla linea di output si è poi previsto un ulteriore filtro *anti-aliasing* RC passa basso con frequenza di taglio di 50 kHz, idonea per il campionamento del segnale a 100 kHz.



L'alimentazione è stata effettuata in corrente continua a 3V attraverso due pile alcaline da 1.5V.

Si riportano in seguito i valori delle resistenze e dei condensatori utilizzati e l'andamento della risposta in frequenza del circuito (fig. 3.3).

Tale risposta è stata determinata misurando sperimentalmente la tensione in uscita dai filtri applicandovi all'ingresso una tensione sinusoidale di ampiezza costante, modificandone di volta in volta la frequenza in manualmente:

$$R1 = 2.2 \text{ k}\Omega$$

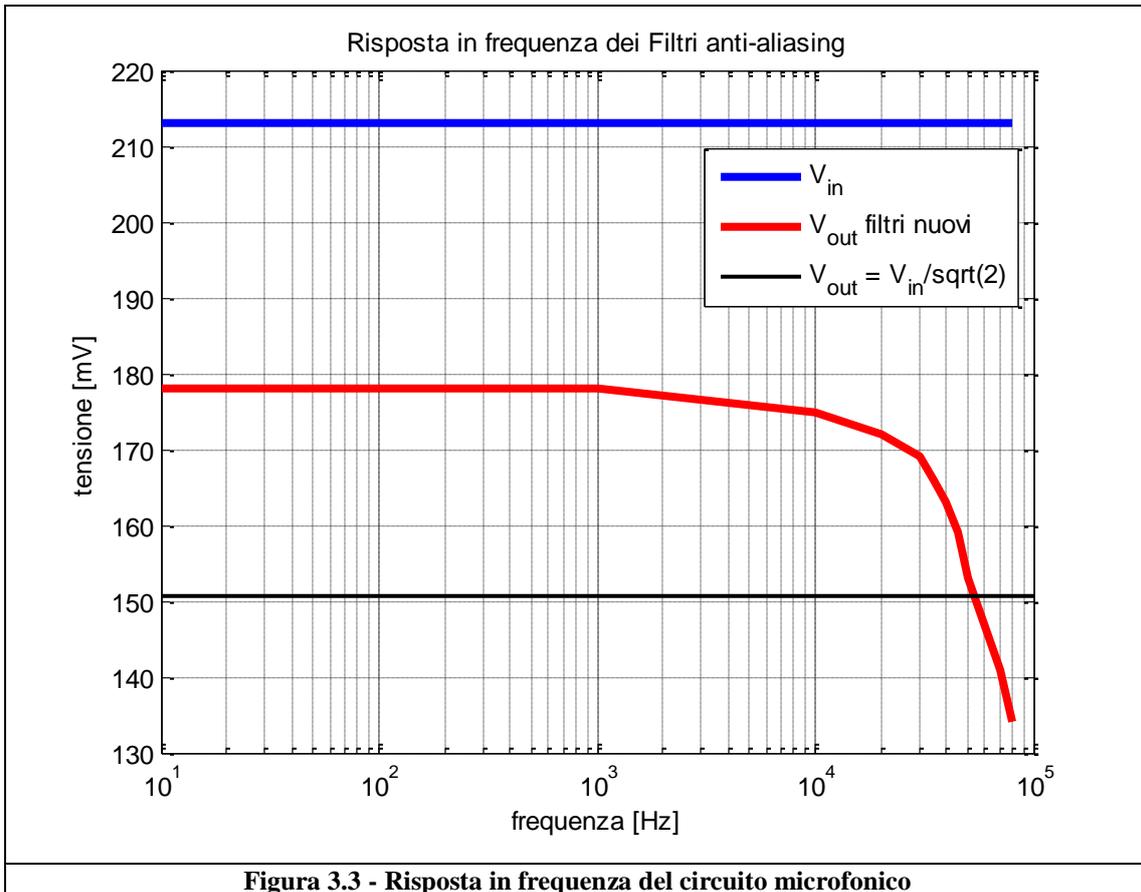
$$C1 = 100 \text{ nF}$$

$$R2 = 5.6 \text{ k}\Omega$$

$$R3 = 1.8 \text{ k}\Omega$$

$$R4 = 5.6 \text{ k}\Omega$$

$$C2 = 1 \text{ nF}$$



La realizzazione di tali circuiti è stata effettuata su piastre “millefori” (fig. 3.4).



Tali schede sono state integrate in una scatola (fig. 3.6) recante 4 ingressi jack 3.5 per i microfoni (fig. 3.5) e 4 uscite BNC per prelevare il segnale acquisito.

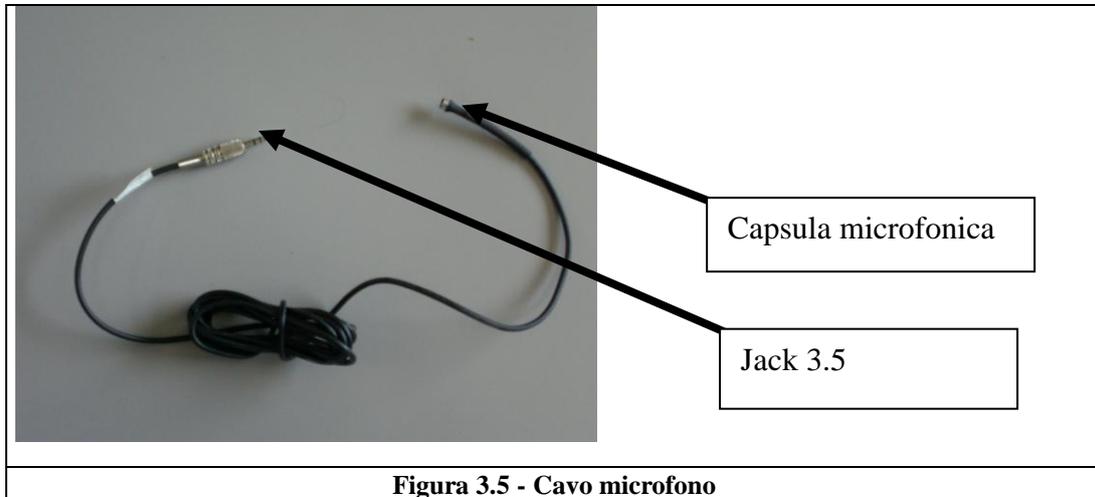


Figura 3.5 - Cavo microfono

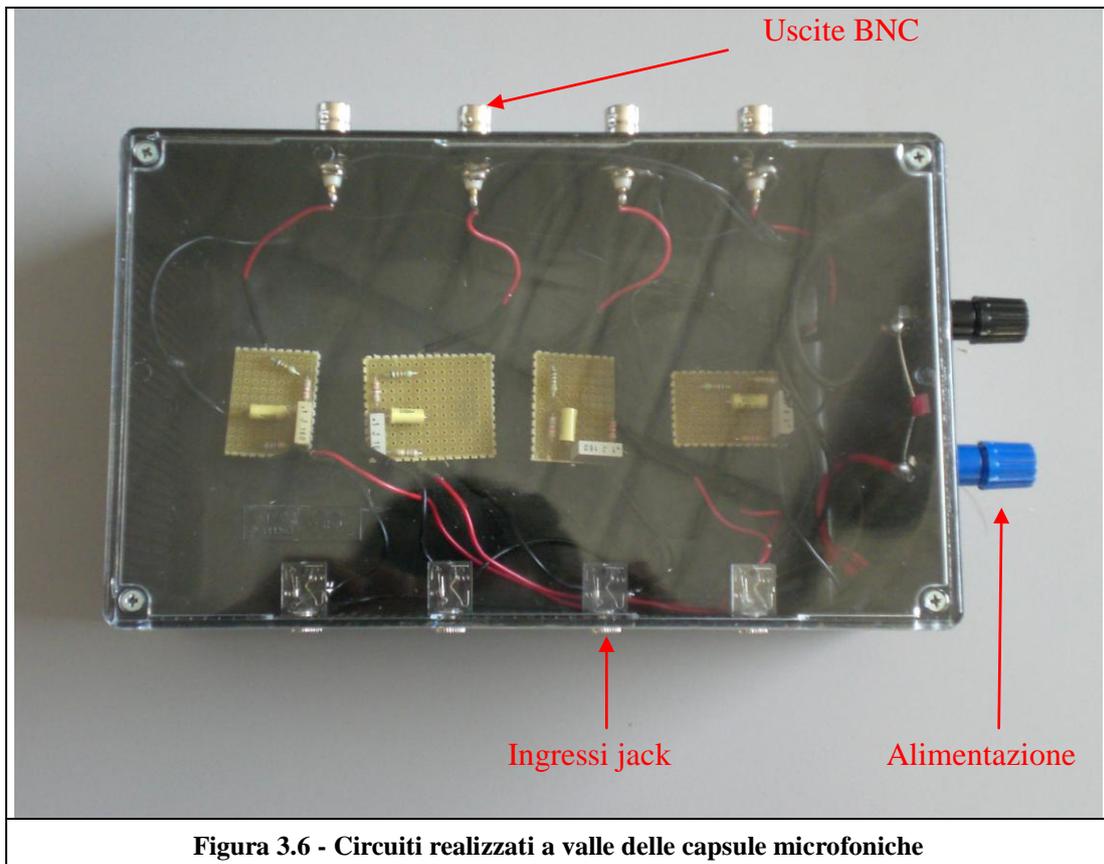


Figura 3.6 - Circuiti realizzati a valle delle capsule microfoniche

3.1.2 – Osservazioni sui microfoni utilizzati

L'analisi del segnale microfonico in ottica diagnosi misfire è stata finora svolta considerandone il contenuto informativo alla frequenza di ciclo. C'è da sottolineare che tale frequenza, essendo funzione della velocità di rotazione del motore ($f_{ciclo} = \frac{n_{rpm}}{120}$), ai bassi regimi presenterà valori che rientreranno nel campo degli infrasuoni, cioè al di sotto del range uditivo umano compreso tra 20 Hz e 20 kHz. Per la prova a 2000 rpm, per esempio, $f_{ciclo}=16.66$ Hz, il che significa che le analisi svolte sul segnale sono state fatte andando a lavorare al di fuori del campo di utilizzo consigliato per i microfoni utilizzati (vedi tabella 3.2). Tali microfoni, infatti, erano stati scelti in sola ottica diagnosi detonazione, quindi presentano una risposta in frequenza limitata al solo campo dell'uditivo. Si è svolta perciò un'analisi di mercato con lo scopo di individuare microfoni più specifici per l'applicazione in esame. In particolare, si è cercato di vedere se fossero presenti in commercio microfoni con queste specifiche:

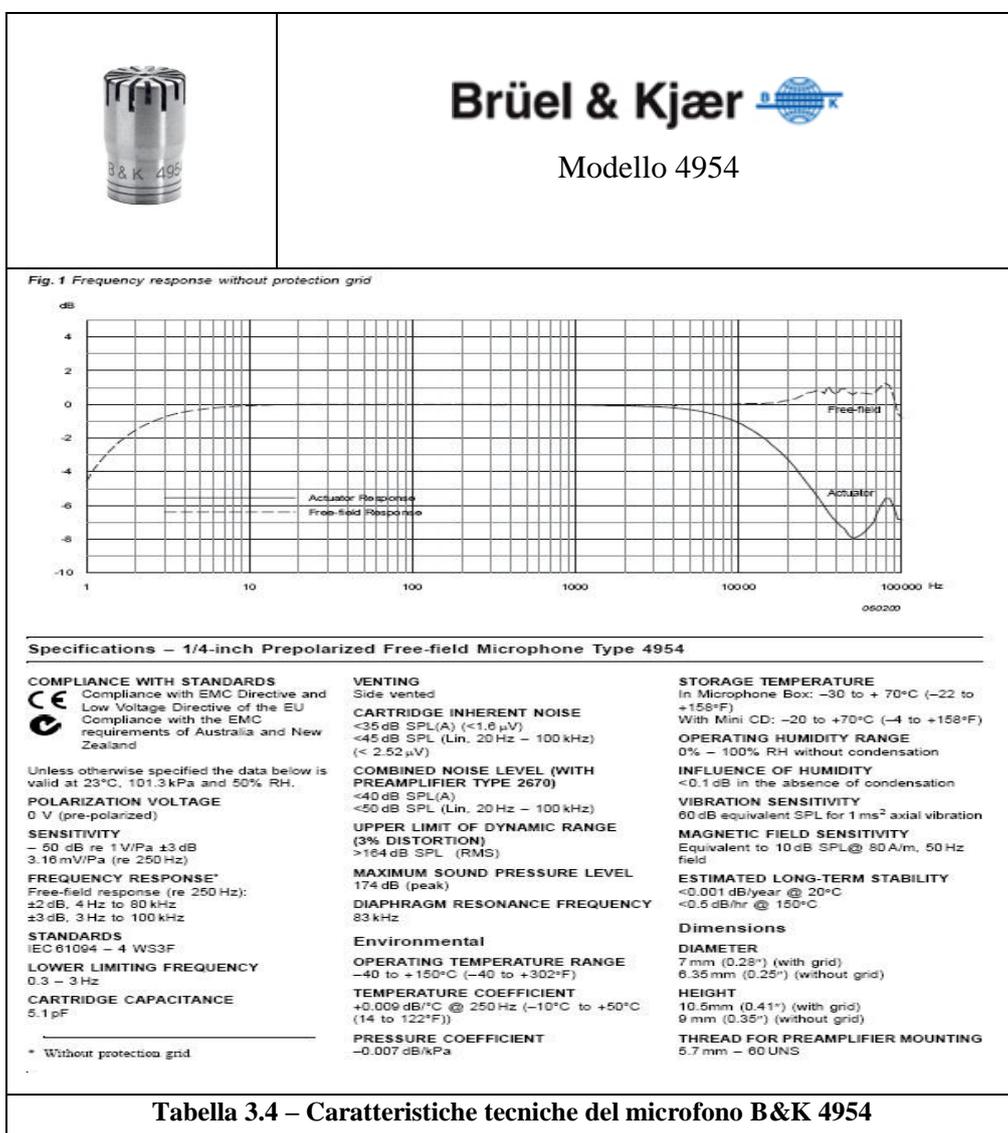
- risposta in frequenza più ampia, estesa sia nel campo degli infrasuoni che in quello degli ultrasuoni
- costi contenuti tali da rientrare in un'ottica automotive

L'analisi effettuata non ha dato esiti positivi, in quanto sono stati individuati microfoni con una risposta in frequenza adeguata (per esempio quello in tabella 3.4), ma i costi di tale strumentazione vanno ben al di fuori di quello che è uno degli obiettivi ultimi di questa attività di ricerca, cioè l'utilizzo on-board di microfoni al fine di affiancare e al limite sostituire

sensori più costosi già presenti per il controllo motore, in un'ottica finale di riduzione dei costi.

Uscendo al di fuori del range dell'uditivo, infatti, la tecnologia microfonica diventa molto più specifica, richiedendo materiali e tecniche costruttive diverse rispetto alle classiche capsule microfoniche di utilizzo commerciale, come quelle di cui disponiamo.

Si è optato, quindi, per mantenere la stessa strumentazione anche durante la nuova campagna sperimentale, alla luce anche dei risultati positivi ottenuti nell'utilizzo di microfoni analoghi al di fuori della loro banda di utilizzo [13].



3.1.3 - Caratteristiche dei sensori di pressione in camera

L'andamento della pressione in camera di combustione è stato rilevato tramite due candele strumentate *Kistler 6115A M12x1.25* installate sulla testata dei cilindri 1 e 2, di cui si riportano le caratteristiche nella tabella seguente:

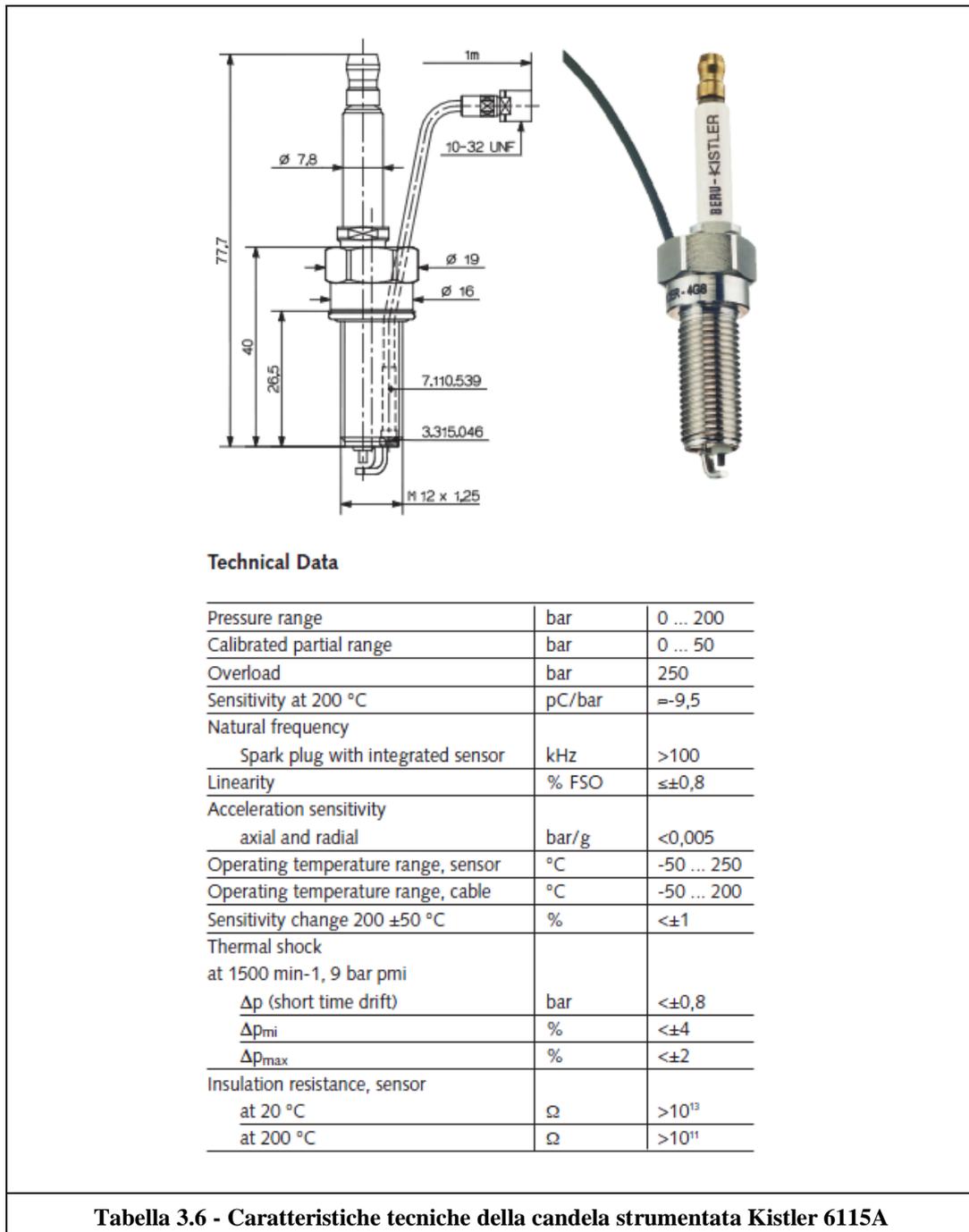


Tabella 3.6 - Caratteristiche tecniche della candela strumentata Kistler 6115A

3.1.4 - Caratteristiche dell'accelerometro

Il segnale accelerometrico è stato acquisito utilizzando un sensore da laboratorio *Bruel & Kjaer 4393* le cui caratteristiche sono consultabili in tabella 3.7. Tale segnale è stato rilevato in quanto una delle finalità di questa campagna di prove era anche quella di utilizzare il database generato per verificare la validità di un algoritmo sul controllo della fasatura delle valvole basato proprio su questo tipo di segnale, sviluppato durante un precedente lavoro di tesi [19].

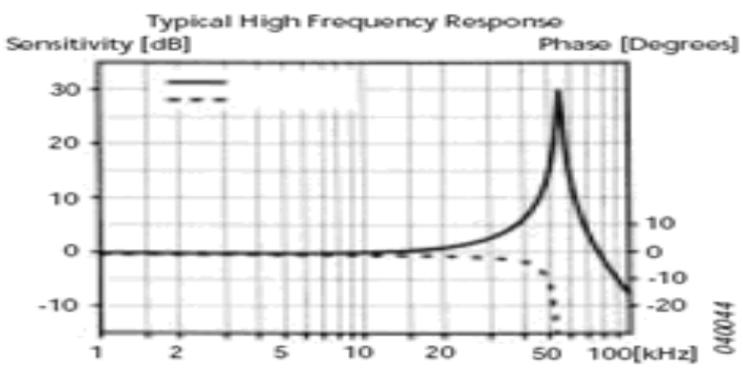
	Brüel & Kjær  Modello 4393	
TIPO	Accelerometro	
SENSIBILITA'	$3.1 \pm 2\%$ pC/g @ 159.2Hz	
TEMPERATURA DI UTILIZZO	Da -72 a 250 °C	
FREQUENZA PROPRIA DI RISONANZA	55kHz	
MASSIMA AMPIEZZA DI PICCO (VIBRAZIONE SINUSOIDALE)	5000g	
Risposta in frequenza 		

Tabella 3.7 - Caratteristiche tecniche accelerometro B&K 4393

L'accelerazione provoca un accumulo di carica nell'accelerometro che è convertito da un amplificatore *Brüel & Kjær 2635* in un segnale in tensione di valore compreso tra 0 ed 8 V (sensibilità compresa tra 0.01 mV/pC a 10 V/pC) a seconda dei settaggi di amplificazione.

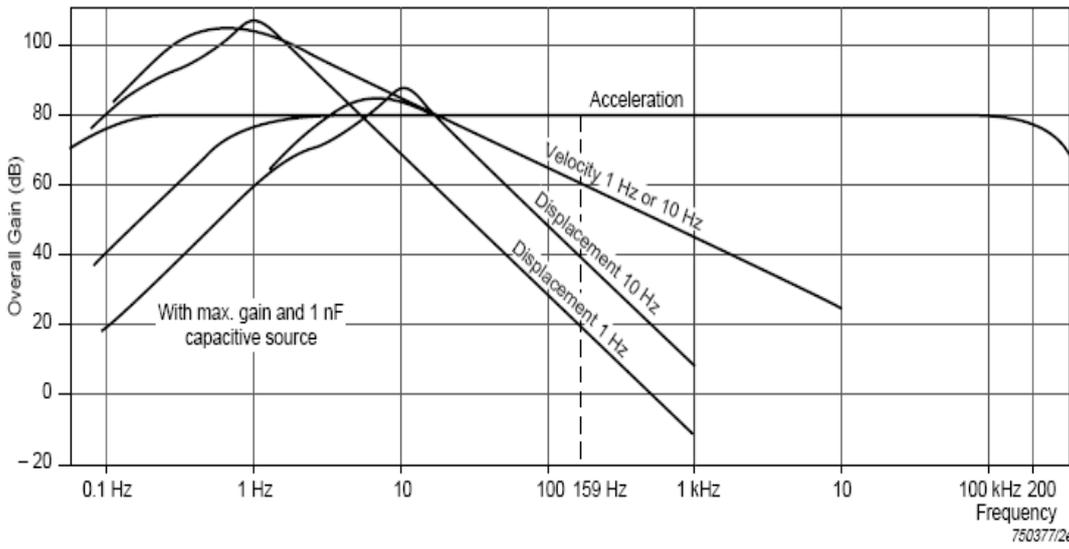
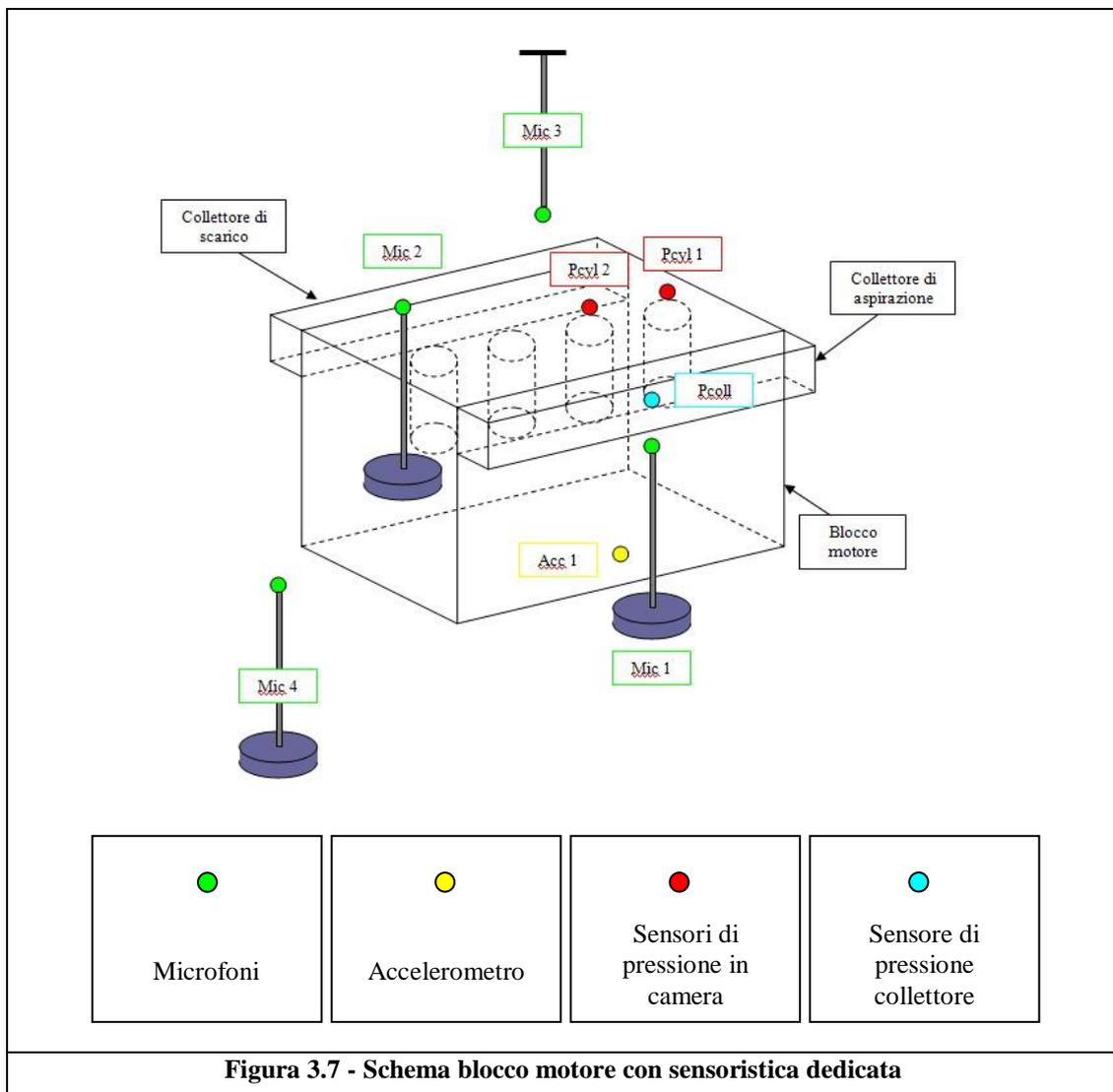
	 Modello 2635
TIPO	Amplificatore di carica
MAX INPUT	10^5 pC
SENSIBILITA'	Da 0.01 mV/pC a 10 V/pC
TEMPERATURA DI UTILIZZO	Da -10 a 55 °C
OUTPUT	Da 0.1 mV/ms ⁻¹ a 1 mV/ms ⁻¹
MAX OUTPUT	8 V
Risposta in frequenza	
	

Tabella 3.8 - Caratteristiche tecniche amplificatore di carica B&K 2635

Durante le acquisizioni, il filtro passa-basso dell'amplificatore di carica è stato impostato ad una frequenza di taglio di 30 kHz, poiché nella precedente attività di tesi [19] si era riscontrata la necessità di effettuare tale operazione sul segnale.

3.1.5 - Allestimento del banco prova

Uno schema del banco prova può essere visualizzato nelle figure seguenti, dove si può avere un'idea di massima sulla posizione dei vari sensori.



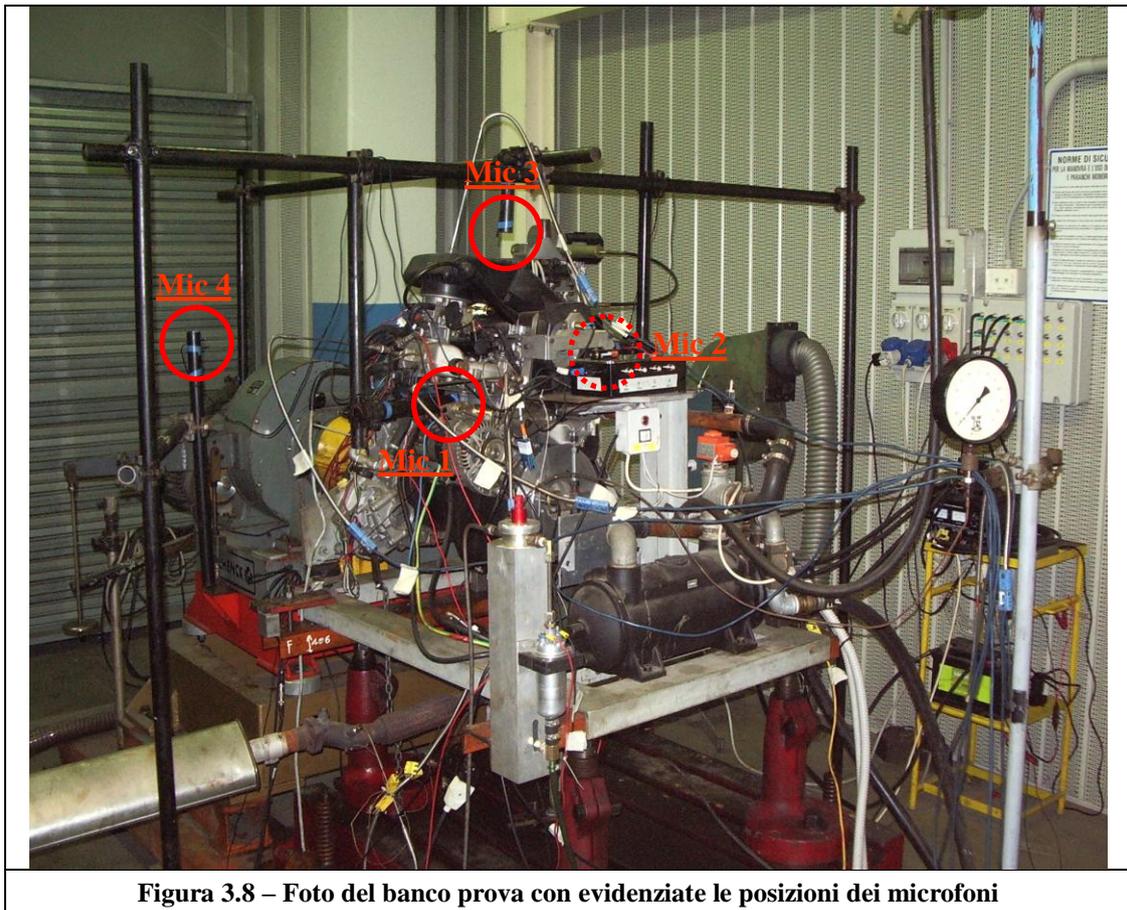


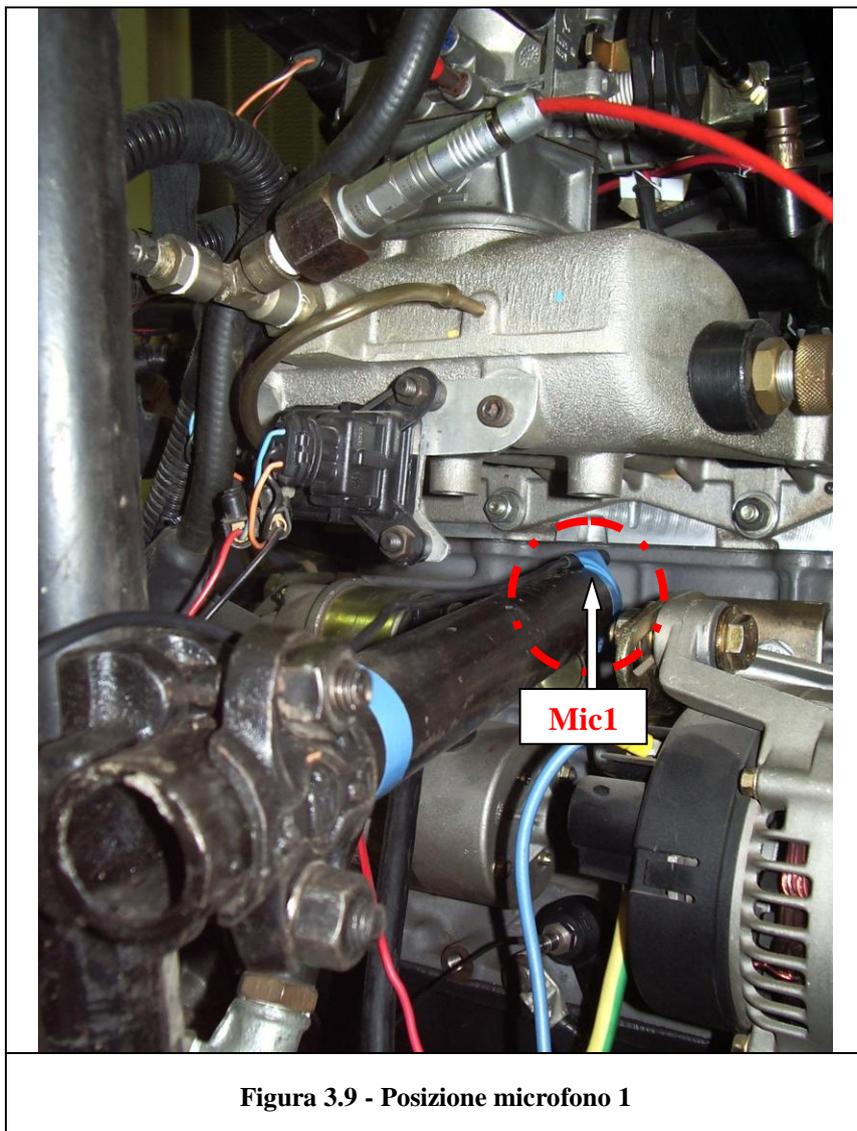
Figura 3.8 – Foto del banco prova con evidenziate le posizioni dei microfoni

Posizione dei microfoni

Al fine di isolare i microfoni dalle vibrazioni del blocco motore, è stata realizzata una staffa rigida con dei supporti sui quali sono stati installate le capsule microfoniche (vedi fig. 3.8):

- microfono 1: Panasonic WM-61A, posizionato lato aspirazione, in corrispondenza dell'interfaccia testata-basamento in posizione il più possibile centrale, tra il cilindro 2 e 3, ad una distanza di circa 50 mm (fig. 3.9).
- microfono 2: Panasonic WM-61A, posizionato lato scarico, in posizione centrale, tra il cilindro 2 e 3, il più vicino possibile al collettore di scarico (fig. 3.10).

- *microfono 3*: Horn EM-6050, posizionato sopra il motore, in posizione centrale (fig. 3.10).
- *microfono 4*: Panasonic WM-61A, posizionato nella posizione che assumerebbe la centralina all'interno del cofano motore (fig. 3.8).



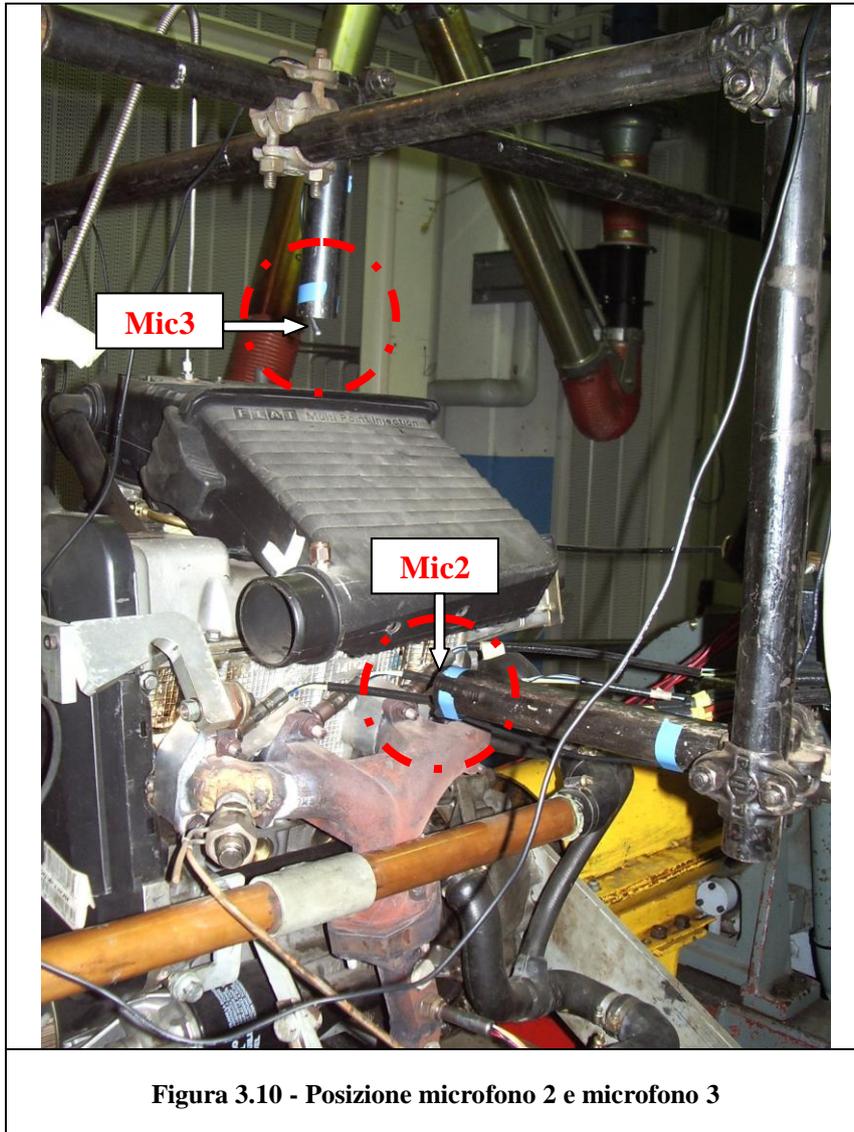


Figura 3.10 - Posizione microfono 2 e microfono 3

Riportiamo in tabella le distanze dei microfoni dai vari cilindri espresse in cm:

	<i>Cyl1</i>	<i>Cyl2</i>	<i>Cyl3</i>	<i>Cyl4</i>
<i>Mic1</i>	13	7	7	13
<i>Mic2</i>	21	18	18	21
<i>Mic3</i>	38.5	35.9	35.9	38.5
<i>Mic4</i>	77	72	68	63

Tabella 3.9 – Distanza tra i microfoni e i vari cilindri

Posizione dell'accelerometro

L'accelerometro è stato fissato sul basamento motore, in posizione approssimativamente centrale tra il cilindro 2 e 3, tramite un collegamento filettato preesistente su una nervatura del basamento stesso. Tale posizione è stata ritenuta idonea in quanto simile alla posizione che assumerebbe il sensore di serie in un allestimento standard.

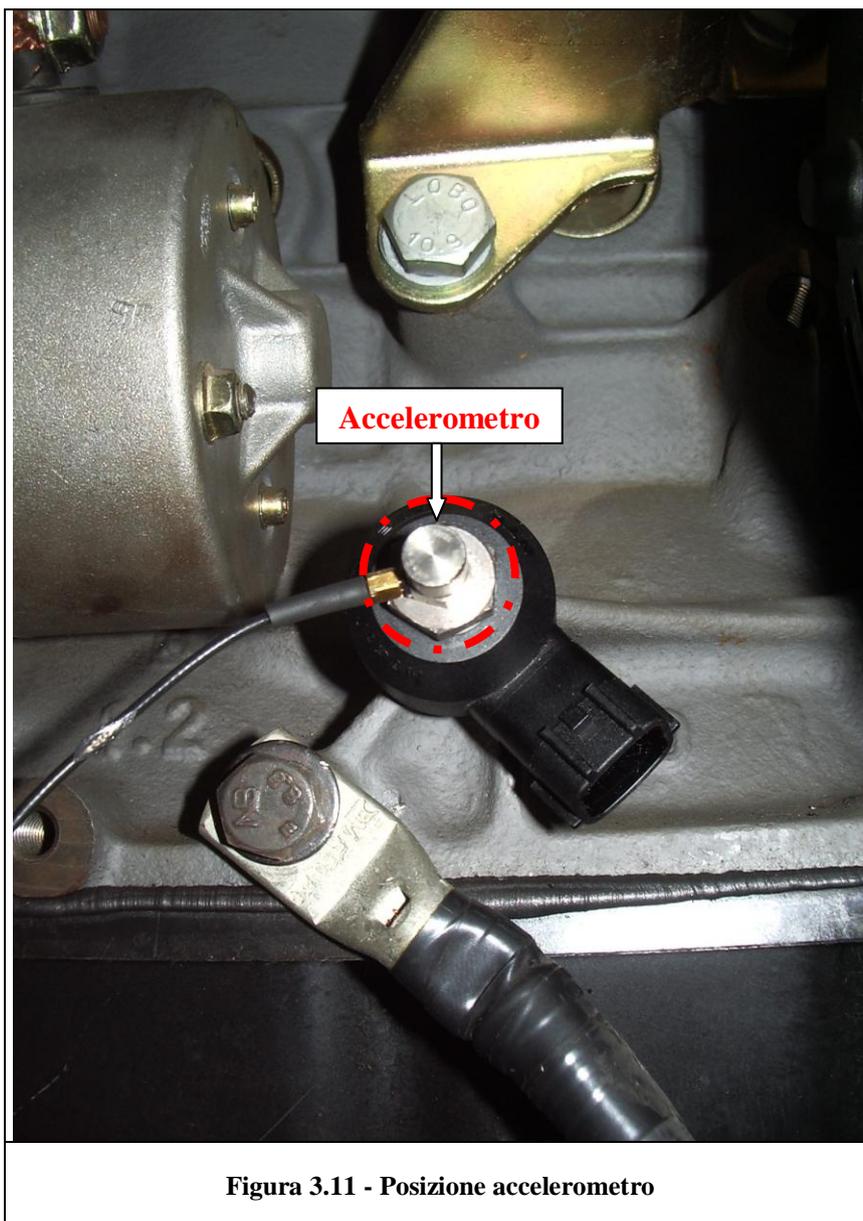


Figura 3.11 - Posizione accelerometro

3.2 – Definizione set di prove

Come sottolineato in precedenza, l'obiettivo principale di questa campagna sperimentale è la definizione di un nuovo set di prove specifiche per quanto riguarda lo studio del fenomeno del misfire.

Si è cercato, a tal fine, di realizzare prove con diverse condizioni di malfunzionamento, in particolare:

- Prove in stazionario con *misfire continuo* su un solo cilindro alla volta, più relative prove con combustione normale.
- Prove in stazionario con *misfire periodico* a rotazione su un cilindro alla volta.
- Prove in stazionario con *misfire multiplo* continuo su due cilindri alla volta.
- Prove con misfire continuo su un cilindro in fase di *avviamento*.
- Prove con misfire durante un *transitorio* di regime.

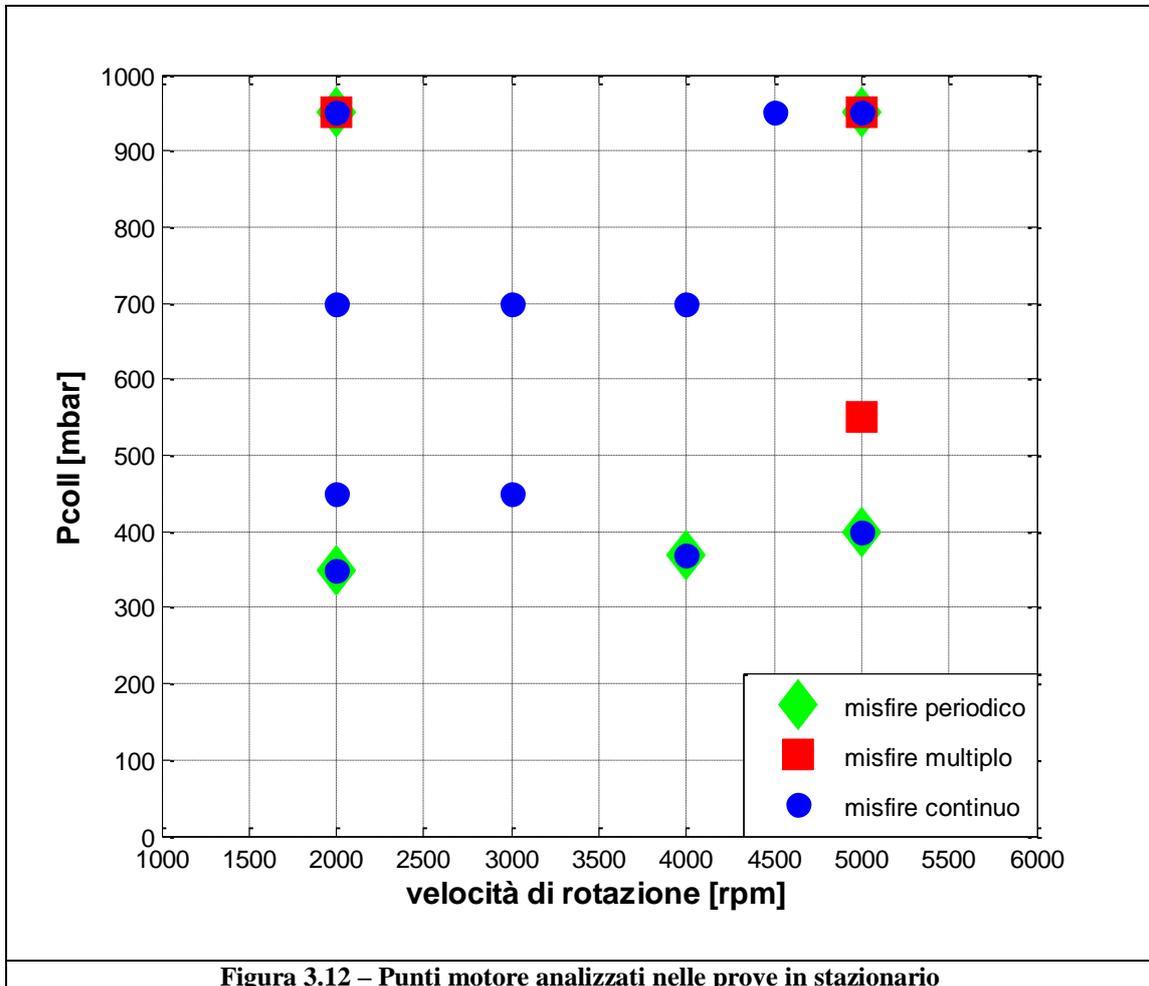
Tale campagna è stata pensata alla luce dei risultati ottenuti durante la precedente analisi preliminare (cfr. capitolo 2).

L'idea originaria consisteva nell'utilizzare le prove con misfire continuo per definire meglio una mappatura delle soglie di diagnosi da impostare sull'algoritmo, con particolare interesse anche per le zone di funzionamento ad alto regime richieste dalla normativa OBDII. Una volta definite tale soglie si sarebbero utilizzate le altre prove per validare la capacità diagnostica dell'algoritmo in fase di definizione.

Si riporta in seguito una lista dettagliata con elencate tutte le prove realizzate con relativa nomenclatura (tabella 3.10).

Si sottolinea che, a differenza della precedente campagna, il carico del motore è stato in questo caso controllato impostando il valore della

pressione del collettore di aspirazione. Per cercare di ricreare punti di funzionamento il più possibile simili a quelli studiati nelle precedenti prove, si è utilizzata una tabella di conversione ETASP-Pcoll fornita da Magneti Marelli, ovviamente nei limiti derivanti dalla diversità dei due motori in esame.



N°	RPM	Pcoll [mbar]	NOTE	NOME	DURATA
1	2000	350	combustione normale	R20P35NM	20 s
2	2000	350	misfire cyl1	R20P35M1	20 s
3	2000	350	misfire cyl2	R20P35M2	20 s
4	2000	350	misfire cyl3	R20P35M3	20 s
5	2000	350	misfire cyl4	R20P35M4	20 s
6	2000	450	combustione normale	R20P45NM	20 s
7	2000	450	misfire cyl1	R20P45M1	20 s
8	2000	450	misfire cyl2	R20P45M2	20 s
9	2000	450	misfire cyl3	R20P45M3	20 s
10	2000	450	misfire cyl4	R20P45M4	20 s

11	2000	700	combustione normale	R20P70NM	20 s
12	2000	700	misfire cyl1	R20P70M1	20 s
13	2000	700	misfire cyl2	R20P70M2	20 s
14	2000	700	misfire cyl3	R20P70M3	20 s
15	2000	700	misfire cyl4	R20P70M4	20 s
16	2000	950	combustione normale	R20P95NM	20 s
17	2000	950	misfire cyl1	R20P95M1	20 s
18	2000	950	misfire cyl2	R20P95M2	20 s
19	2000	950	misfire cyl3	R20P95M3	20 s
20	2000	950	misfire cyl4	R20P95M4	20 s
21	3000	450	combustione normale	R30P45NM	20 s
22	3000	450	misfire cyl1	R30P45M1	20 s
23	3000	450	misfire cyl2	R30P45M2	20 s
24	3000	450	misfire cyl3	R30P45M3	20 s
25	3000	450	misfire cyl4	R30P45M4	20 s
26	3000	700	combustione normale	R30P70NM	20 s
27	3000	700	misfire cyl1	R30P70M1	20 s
28	3000	700	misfire cyl2	R30P70M2	20 s
29	3000	700	misfire cyl3	R30P70M3	20 s
30	3000	700	misfire cyl4	R30P70M4	20 s
31	4000	370	combustione normale	R40P37NM	20 s
32	4000	370	misfire cyl1	R40P37M1	20 s
33	4000	370	misfire cyl2	R40P37M2	20 s
34	4000	370	misfire cyl3	R40P37M3	20 s
35	4000	370	misfire cyl4	R40P37M4	20 s
36	4000	700	combustione normale	R40P70NM	20 s
37	4000	700	misfire cyl1	R40P70M1	20 s
38	4000	700	misfire cyl2	R40P70M2	20 s
39	4000	700	misfire cyl3	R40P70M3	20 s
40	4000	700	misfire cyl4	R40P70M4	20 s
41	4500	950	combustione normale	R45P95NM	20 s
42	4500	950	misfire cyl1	R45P95M1	20 s
43	4500	950	misfire cyl2	R45P95M2	20 s
44	4500	950	misfire cyl3	R45P95M3	20 s
45	4500	950	misfire cyl4	R45P95M4	20 s
46	5000	400	combustione normale	R50P40NM	20 s
47	5000	400	misfire cyl1	R50P40M1	20 s
48	5000	400	misfire cyl2	R50P40M2	20 s
49	5000	400	misfire cyl3	R50P40M3	20 s
50	5000	400	misfire cyl4	R50P40M4	20 s
51	5000	950	combustione normale	R50P95NM	20 s
52	5000	950	misfire cyl1	R50P95M1	20 s
53	5000	950	misfire cyl2	R50P95M2	20 s
54	5000	950	misfire cyl3	R50P95M3	20 s
55	5000	950	misfire cyl4	R50P95M4	20 s
56	2000	950	1:10 misfire cyl1	R20P951R	20 s
57	2000	350	1:10 circa 5 sec per cyl	R20P35R1	20 s
58	2000	950	1:10 circa 5 sec per cyl	R20P95R1	20 s
59	4000	370	1:10 circa 5 sec per cyl	R40P37R1	20 s
60	5000	400	1:10 circa 5 sec per cyl	R50P40R1	20 s
61	5000	950	1:10 circa 5 sec per cyl	R50P95R1	20 s
62	2000	350	1:20 circa 5 sec per cyl	R20P35R2	20 s
63	2000	950	1:20 circa 5 sec per cyl	R20P95R2	20 s
64	4000	370	1:20 circa 5 sec per cyl	R40P37R2	20 s
65	5000	400	1:20 circa 5 sec per cyl	R50P40R2	20 s
66	5000	950	1:20 circa 5 sec per cyl	R50P95R2	20 s

67	2000	950	misfire 1+2	R20P9512	20 s
68	2000	950	misfire 3+4	R20P9534	20 s
69	2000	950	misfire 1+4	R20P9514	20 s
70	2000	950	misfire 2+3	R20P9523	20 s
71	5000	950	misfire 1+2	R50P9512	20 s
72	5000	950	misfire 3+4	R50P9534	20 s
73	5000	950	misfire 1+4	R50P9514	20 s
74	5000	950	misfire 2+3	R50P9523	20 s
75	5000	550	misfire 1+2	R50P5512	20 s
76	5000	550	misfire 3+4	R50P5534	20 s
77	5000	550	misfire 1+4	R50P5514	20 s
78	5000	550	misfire 2+3	R50P5523	20 s
79	2000	400	misfire 1+2	R20P4012	20 s
80	2000	400	misfire 3+4	R20P4034	20 s
81	2000	400	misfire 1+4	R20P4014	20 s
82	2000	400	misfire 2+3	R20P4023	20 s
83	Avv.	Avv.	misfire cyl1	RAVPAVM1	20 s
84	Avv.	Avv.	combustione normale	RAVPAVNM	20 s
85	2000->5000	950	rpm manuale, comb nom	RXXP95NM	20 s
86	2000->5000	950	rpm manuale, misfire cyl1	RXXP95M1	20 s
87	2000->5000	950	combustione normale	RXXP95NM	20 s
88	2000->5000	950	misfire cyl1	RXXP95M1	20 s

Tabella 3.10 – Prove effettuate

Legenda:

-  combustione normale
-  misfire continuo
-  misfire periodico
-  misfire multiplo
-  misfire in avviamento
-  misfire durante transitorio di regime

3.3 – Segnali acquisiti

Oltre ai segnali provenienti dai sensori descritti, sono stati acquisiti altri segnali necessari per la fasatura dell'algoritmo e per l'individuazione ed il conteggio delle mancate combustioni nelle prove con misfire periodico, in particolare:

- *Segnale denti volano*: prelevato attraverso un sensore ad effetto Hall affacciato sul volano a 116 denti (vedi fig. 3.13). Viene usato per determinare la velocità di rotazione istantanea del motore e per l'individuazione del PMS attivo del cilindro 1².
- *Segnale S0*: si tratta di un segnale elaborato dal sistema controllo motore a partire dal segnale di albero a camme (vedi fig. 3.14); è un segnale che rimane alto per metà ciclo e basso per l'altra metà. Serve per individuare in quale fase si trovano i vari cilindri durante un ciclo motore e distinguere tra PMS attivi e non attivi.
- *Segnali di accensione*: sono segnali alto-basso generati dal sistema controllo motore per determinare il tempo di carica della bobina relativa al singolo cilindro; al passaggio da alto a basso corrisponde la scarica della scintilla da parte della candela; in caso di misfire tale segnale non viene ovviamente generato (vedi fig. 3.14).

² nel motore in esame la fasatura viene effettuata con la seguente procedura: il dente "0" corrisponde al primo passaggio per lo zero, in discesa, del segnale volano, che segue il passaggio alto-basso del segnale S0; dal dente 0 ci sono 29 denti e 193.4° prima del PMS attivo del cilindro 1.

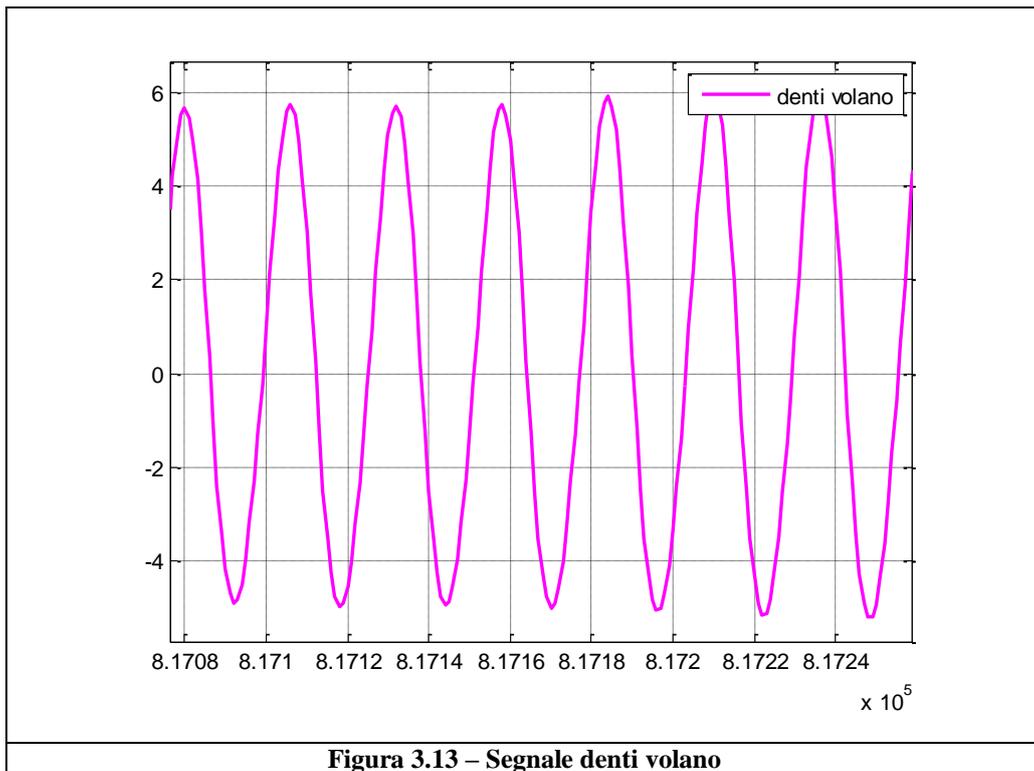


Figura 3.13 – Segnale denti volano

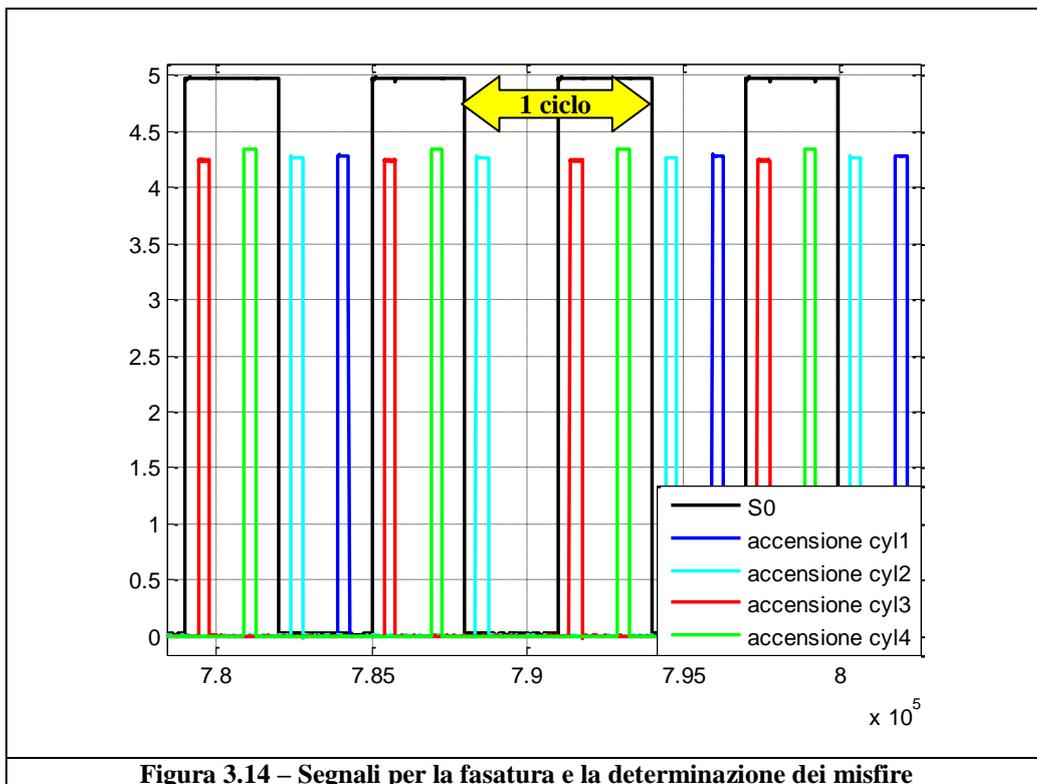


Figura 3.14 – Segnali per la fasatura e la determinazione dei misfire

Tutte le grandezze fin qui citate sono state acquisite con un *oscilloscopio Yokogawa 716 a 16 canali* ad una frequenza di 100 kHz. Tale frequenza è stata ritenuta idonea per indagare in futuro il contenuto informativo dei segnali microfonici anche nel campo degli ultrasuoni (cfr. [14] e [15]).

Per ulteriori dettagli e per la consultazione dei nomi delle variabili al quale si farà riferimento nei capitoli successivi si può consultare la tabella 3.11.

Canale	Variabile	Nome
1	Microfono 1	mic1
2	Microfono 2	mic2
3	Microfono 3	mic3
4	Microfono 4	mic4
5	Accelerometro	acc
6	Denti volano	fonica
7	Pressione collettore di aspirazione	Pcoll
8	Pressione cilindro 1	Pcyl1
9	Segnale di accensione cilindro 1	ign1
10	Segnale di accensione cilindro 2	ign2
11	Segnale S0	S0
12	Pressione cilindro 2	Pcyl2
13	Segnale di accensione cilindro 3	ign3
14	Segnale di accensione cilindro 4	ign4

Tabella 3.11 – Elenco delle variabili acquisite tramite oscilloscopio

Capitolo 4

Analisi dei dati acquisiti

Tutti i dati acquisiti durante le varie prove sono stati registrati dapprima sulla memoria interna dell'oscilloscopio e poi scaricati su PC tramite un collegamento SCSI. Attraverso l'utilizzo di vari tools sono stati poi convertiti in formato *.mat* per essere processati in ambiente Matlab[®].

Come prima fase si sono visualizzati i vari segnali al fine di verificarne la corretta acquisizione. Una volta effettuata questa verifica, sono stati processati i segnali S0 e denti volano per definirne i punti di discesa e tramite tali punti fasare i segnali relativi a prove differenti.

Una volta fasati i vari segnali si è applicato l'algoritmo definito durante la precedente analisi preliminare (cfr. capitolo 2), di cui ricordiamo le principali fasi (fig. 4.1):

- *Caricamento dei segnali acquisiti*
- *Fasatura dei segnali*
- *Filtraggio passa-banda nell'intorno della frequenza di ciclo*
- *Bufferizzazione*
- *Finestratura*
- *FFT (Fast Fourier Transform)*
- *Analisi del vettore relativo alla frequenza di ciclo*

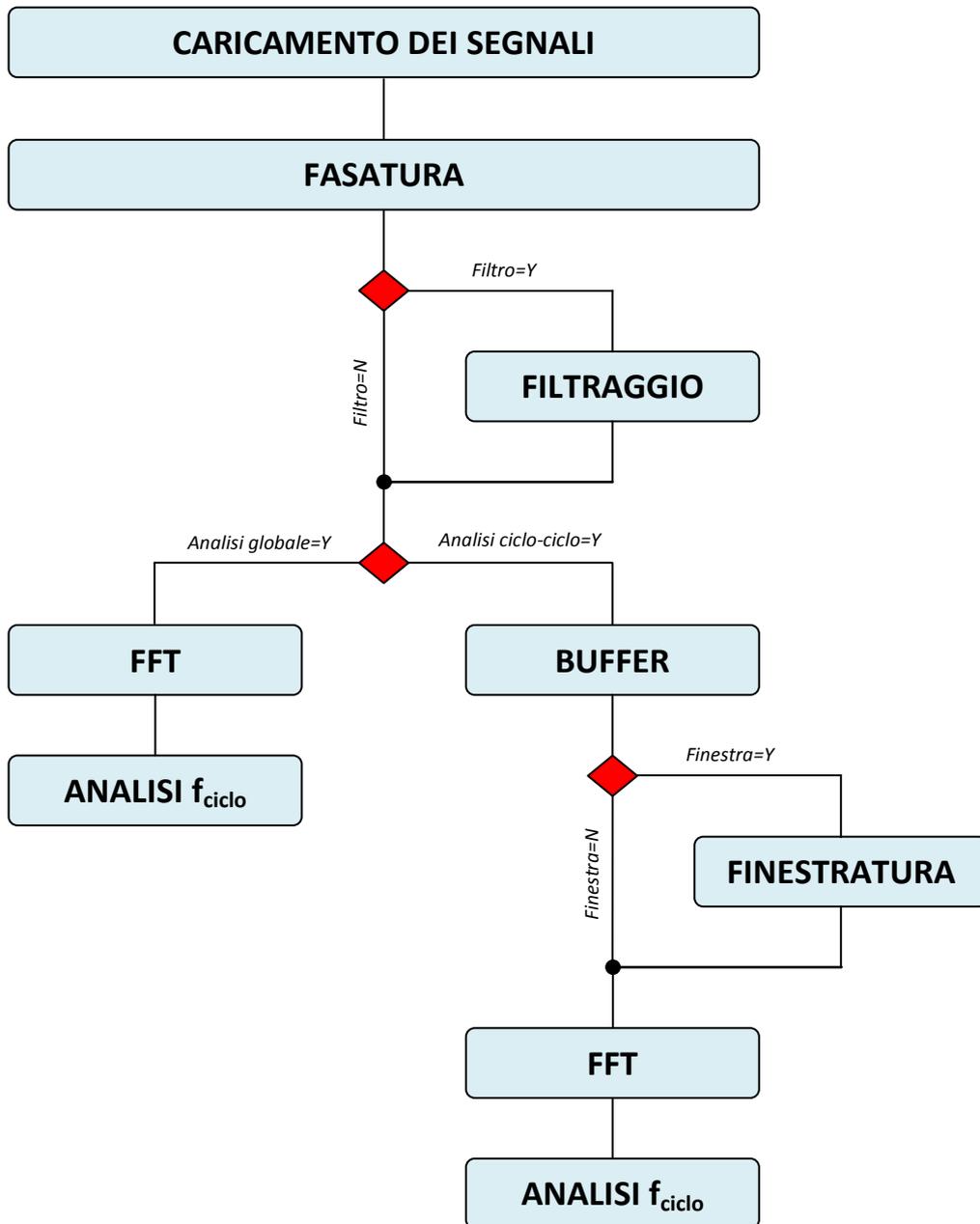


Figura 4.1 - Diagramma di flusso dell'algorithm utilizzato

4.1 - Misfire continuo su un singolo cilindro

Come prime prove, si sono analizzate quelle effettuate con misfire indotto in modo continuativo su un solo cilindro alla volta, confrontandole con la relativa prova allo stesso punto di funzionamento del motore ma con combustione normale su tutti i cilindri.

Si è scelto di partire dallo studio di questi test in quanto analisi analoghe erano già state effettuate sul database a disposizione in precedenza (cfr. capitolo 2) e quindi si è cercato di vedere se anche per questa campagna sperimentale si riscontrassero risultati simili applicando lo stesso algoritmo.

4.1.1 - Fasatura dei segnali

Durante questo tipo di analisi, fondamentale è effettuare una corretta fasatura, in modo che segnali relativi a prove differenti siano confrontabili tra loro.

Durante la precedente campagna sperimentale si erano fasati i segnali utilizzando come punti iniziali di riferimento i PMS attivi del cilindro 1 (chiamati *WinStart1* nello script Matlab). L'intervallo tra tali punti definiva la durata di un ciclo motore in numero di campioni.

In queste analisi si utilizzerà invece il segnale *S0*, prendendo come punti di riferimento i fronti di discesa di tale segnale (chiamati *FronteDisc_S0*), che ricordiamo essere un segnale a gradino del valore di 5V per metà ciclo e 0V per l'altra metà (vedi fig. 4.2).

Il cambiamento di tale scelta non è determinante ai fini delle conclusioni che si vogliono trarre da questa tipologia di prove. Infatti, essendo test effettuati in condizioni di funzionamento "stazionarie", cioè con malfunzionamento indotto per l'intera durata della prova, il segnale microfonico filtrato che viene bufferizzato durante le analisi ciclo-ciclo

sarà esso stesso “stazionario”, cioè avrà una sua periodicità costante durante tutta la durata temporale dell’acquisizione (vedi fig. 4.4). Ciò implica che il punto di riferimento che si prende come inizio per la durata del buffer comporta soltanto una variazione della fase delle varie nuvole di punti, ma non influisce in maniera rilevante sull’ampiezza e sulla dispersione dei valori nel piano complesso (vedi fig. 4.3).

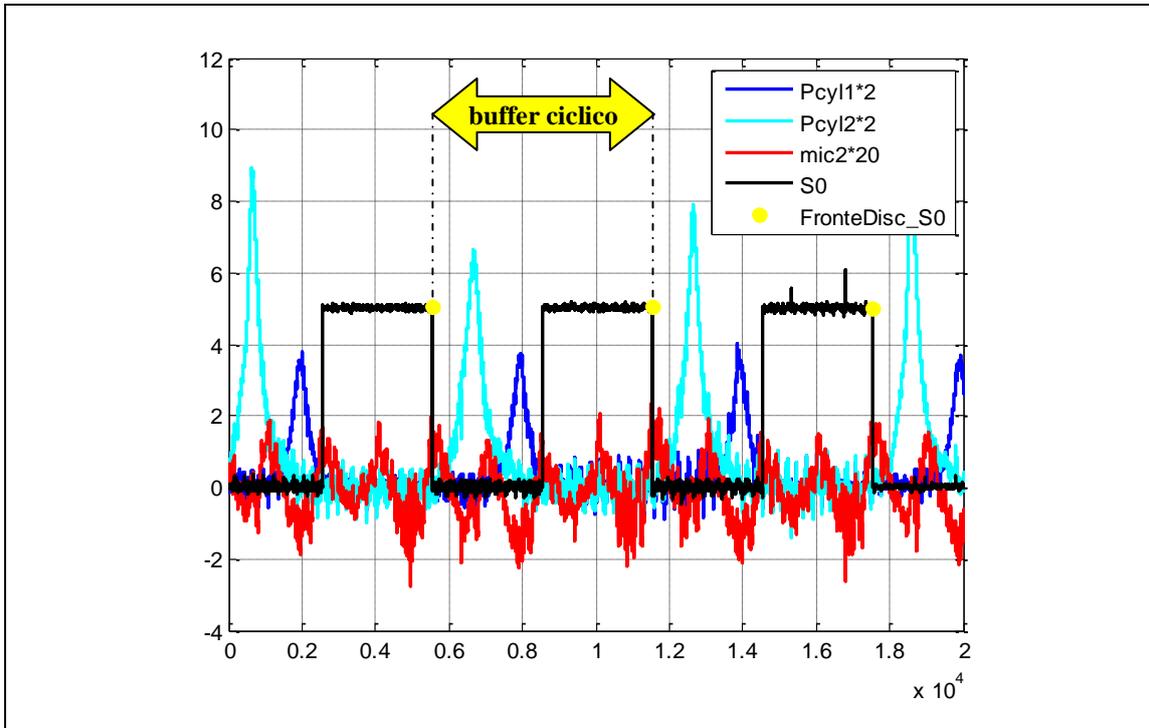


Figura 4.2 – Fasatura e bufferizzazione dei segnali tramite FronteDisc_S0

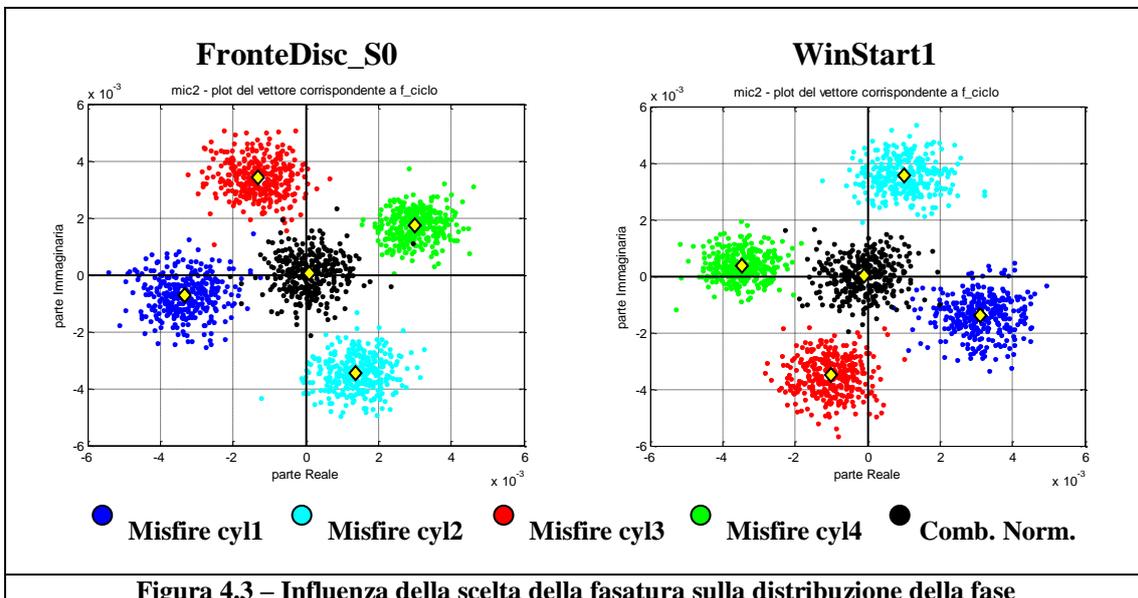


Figura 4.3 – Influenza della scelta della fasatura sulla distribuzione della fase

4.1.2 - Analisi temporale

Innanzitutto è stata effettuata una prima analisi temporale dei dati, andando a vedere l'andamento del segnale filtrato in un'intorno di ± 6 Hz dalla f_{ciclo} e confrontandolo con quello analogo in caso di combustione normale su tutti i cilindri. Si riportano in fig. 4.4 e 4.5 le immagini relative al microfono 2 (che è quello che si è rilevato più performante durante questa campagna sperimentale) nel caso della prova a 2000 rpm, $P_{\text{coll}} = 950$ mbar. In ogni tipologia di analisi si è sempre partiti dallo studio di questo punto di funzionamento del motore, perché è quello più "semplice" per effettuare delle diagnosi basate su un segnale audio, in quanto in tali condizioni il rumore generato dalla combustione è rilevante rispetto a quello generato dalla rotazione di parti meccaniche.

Per gli altri microfoni non si riportano i risultati in quanto sono simili, con la sola differenza di un minore rapporto segnale-rumore che si traduce in una minore differenza in ampiezza tra il segnale filtrato relativo alle prove con misfire e quello relativo alla prova con combustione normale.

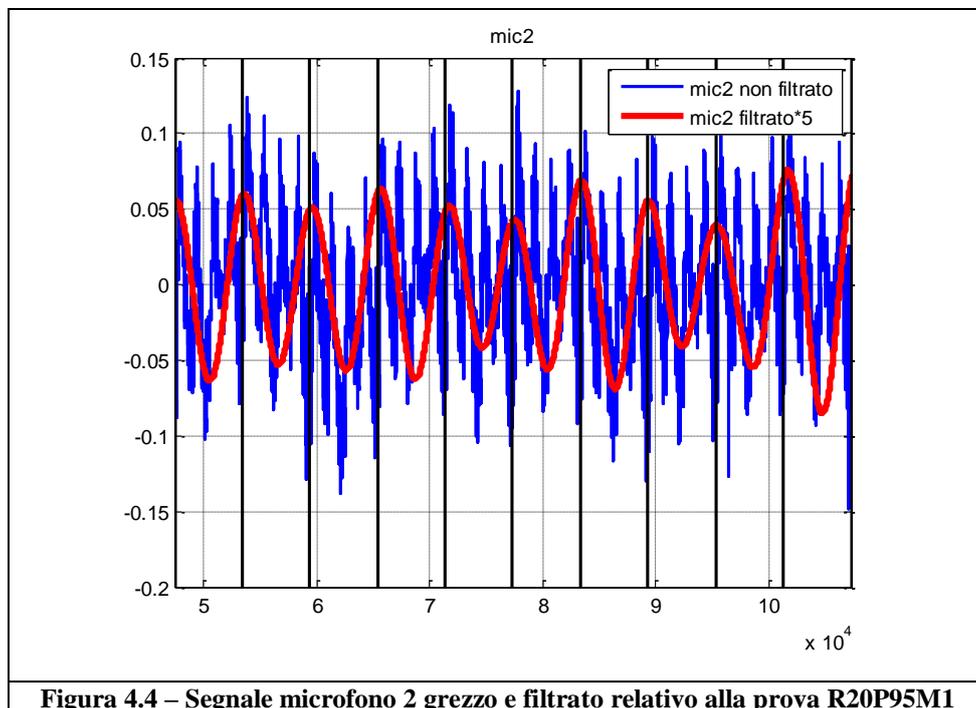


Figura 4.4 – Segnale microfono 2 grezzo e filtrato relativo alla prova R20P95M1

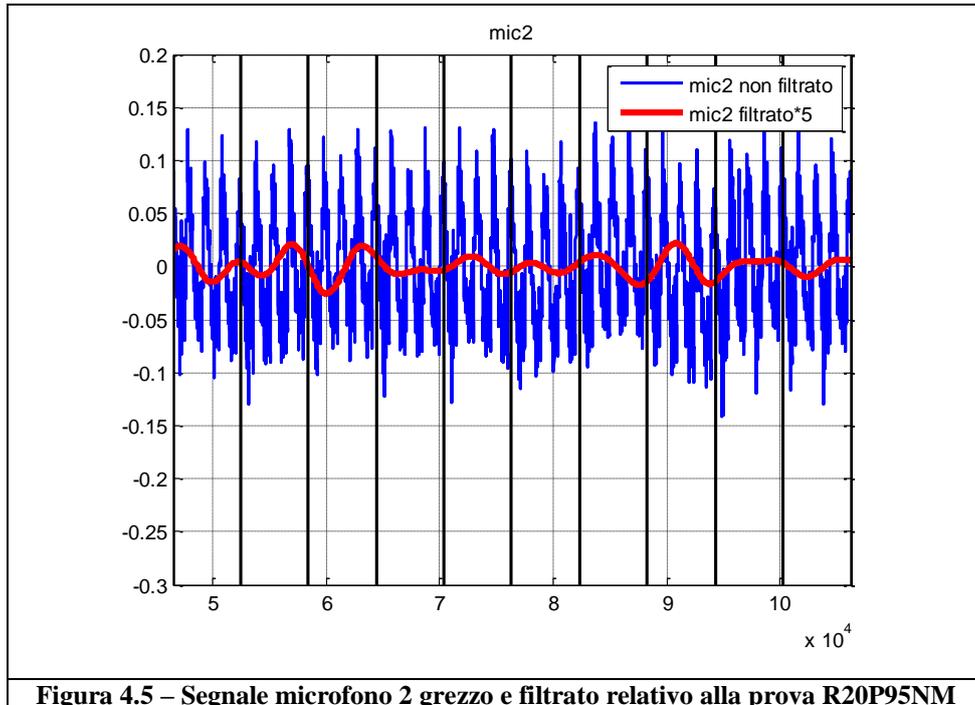


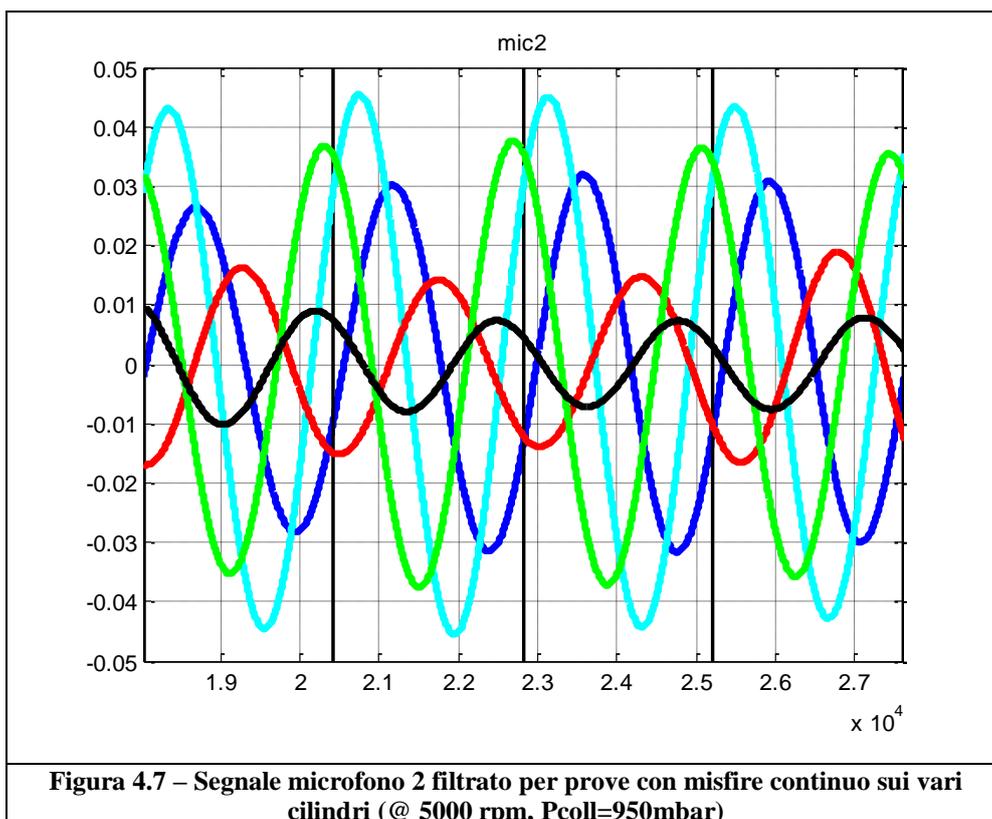
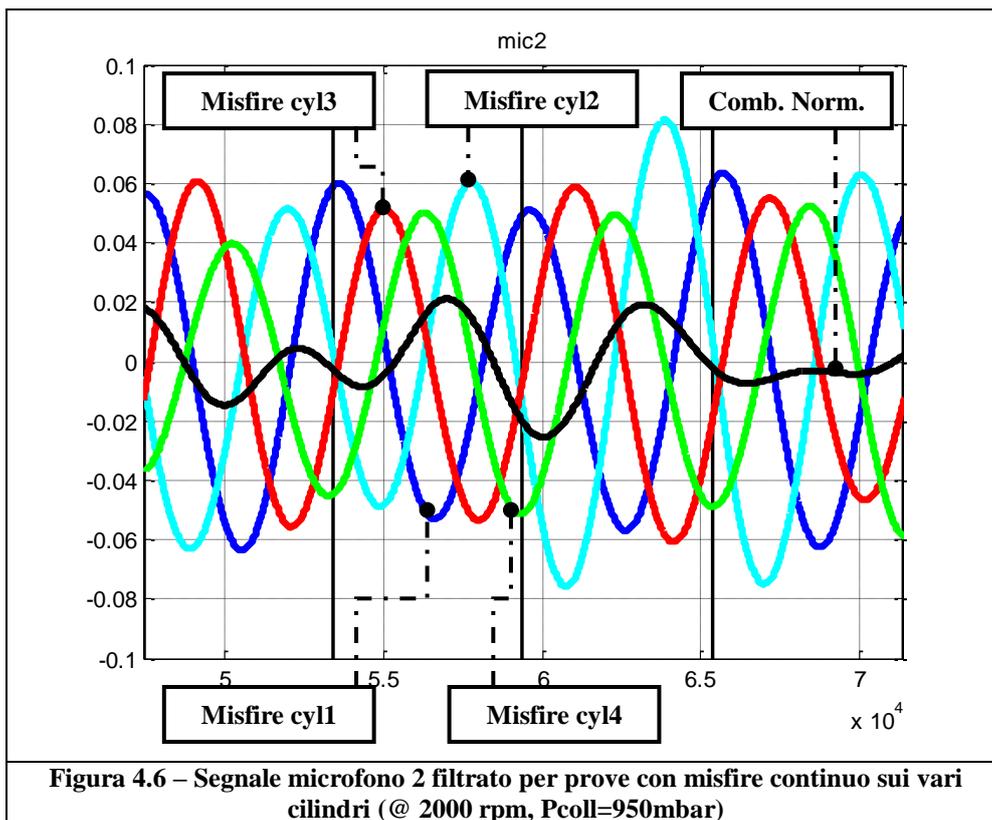
Figura 4.5 – Segnale microfono 2 grezzo e filtrato relativo alla prova R20P95NM

Si può notare come, in presenza di misfire continuo su un singolo cilindro, il segnale filtrato presenti un'ampiezza maggiore ed una periodicità ciclica molto regolare rispetto al caso con combustione normale (i buffer ciclici sono rappresentati in figura da righe verticali nere).

Inoltre, in fig. 4.6, si vede come il segnale filtrato presenti una fase diversa a seconda di quale sia il cilindro in cui avvenga la mancata combustione, seguendo l'ordine di scoppio 1-3-4-2 in analogia a quanto visto nel capitolo 2 sul segnale P_{tot} .

La legenda che verrà usata d'ora in avanti per distinguere le prove relative a misfire su cilindri diversi è la seguente:

- *Misfire cilindro 1*
- *Misfire cilindro 2*
- *Misfire cilindro 3*
- *Misfire cilindro 4*
- *Combustione normale*



Un comportamento analogo si riscontra anche a 5000 rpm pieno carico, nonostante una diminuzione in ampiezza del segnale e il generarsi di un'onda sistematica alla f_{ciclo} anche in caso di combustione normale.

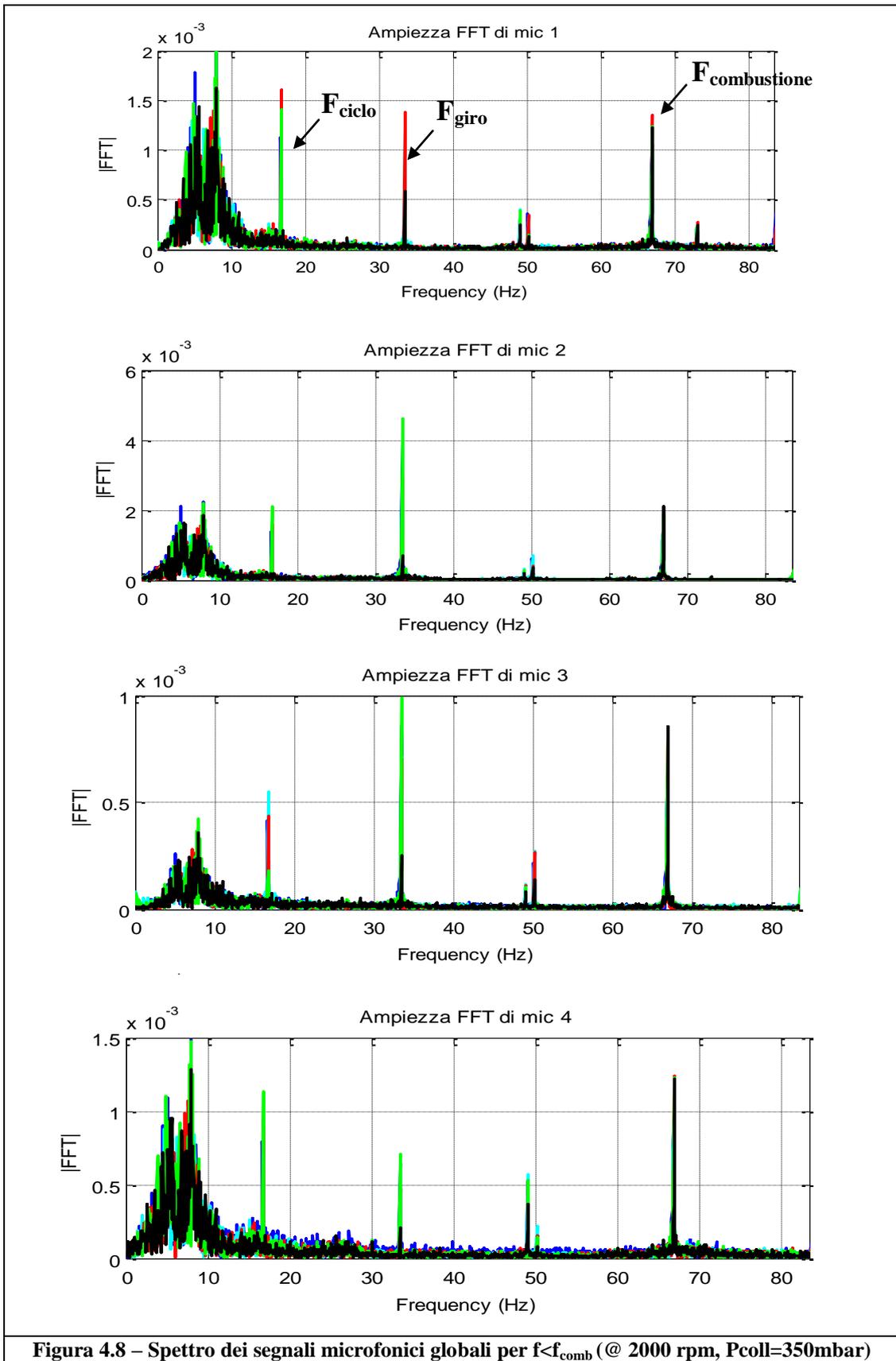
4.1.3 - Analisi in frequenza

Partendo da tali osservazioni e seguendo lo stesso procedimento descritto nel capitolo 2, si è effettuata un'analisi in frequenza dei segnali tramite l'utilizzo della FFT, dapprima per studiarne lo spettro, poi per evidenziarne l'informazione contenuta alla sola frequenza di ciclo.

L'idea fondamentale alla base di questa analisi era quella di studiare la distribuzione delle nuvole di punti nelle varie condizioni di funzionamento del motore, al fine di valutare l'effettiva possibilità di realizzare una mappatura delle soglie di diagnosi da utilizzare poi per validare l'algoritmo durante le prove con misfire periodico.

Riportiamo nelle pagine seguenti le immagini relative ai risultati ottenuti per le diverse prove con misfire continuo. Riportiamo sia lo spettro del segnale globale grezzo (cioè senza filtraggio e finestatura) limitato a frequenze minori di quella di combustione, sia lo zoom di tale spettro nell'intorno della f_{ciclo} , che le nuvole di punti ottenute tramite l'analisi ciclo-ciclo utilizzando le impostazioni che erano risultate migliori durante lo studio del precedente database, cioè:

- *Filtraggio passa-banda ideale a ± 6 Hz dalla f_{ciclo}*
- *Finestra Tukey centrata sul ciclo di interesse: - ratio = 0.65*
- lunghezza = 2 cicli
- *Shift della finestra = 1 ciclo*



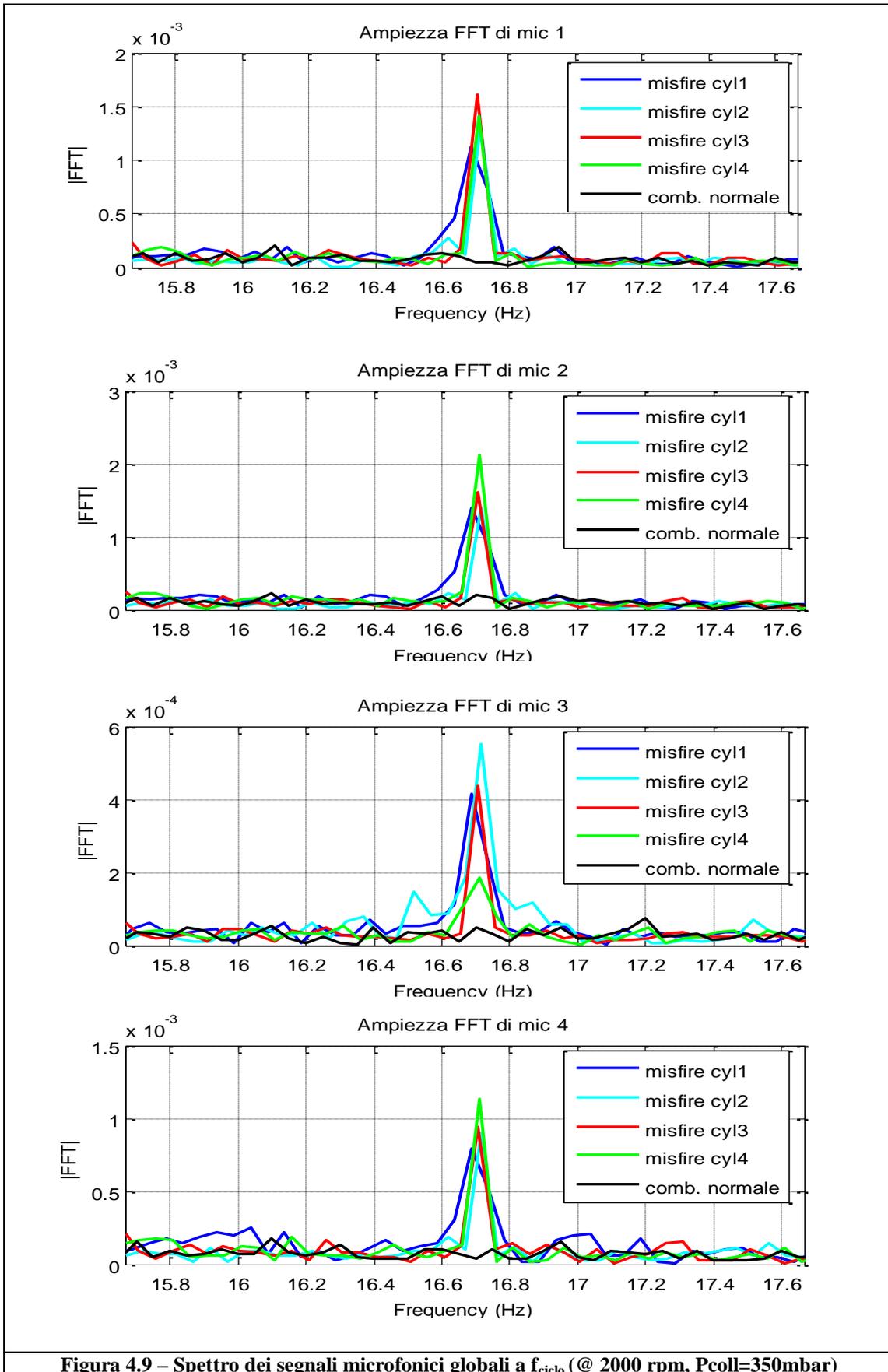


Figura 4.9 – Spettro dei segnali microfonici globali a f_{ciclo} (@ 2000 rpm, $P_{coll}=350\text{mbar}$)

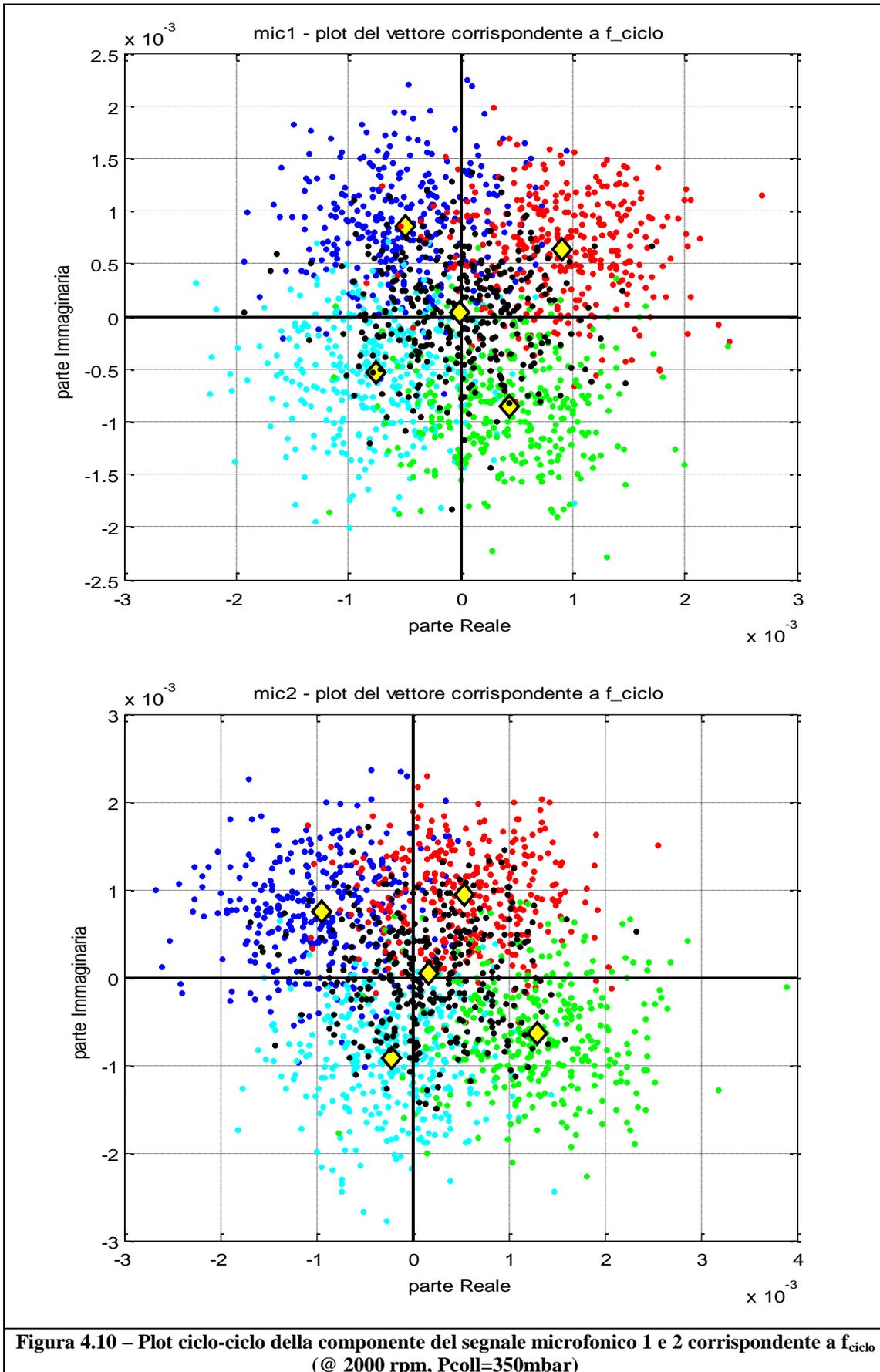


Figura 4.10 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 1 e 2 corrispondente a f_{ciclo} (@ 2000 rpm, $P_{coll}=350\text{mbar}$)

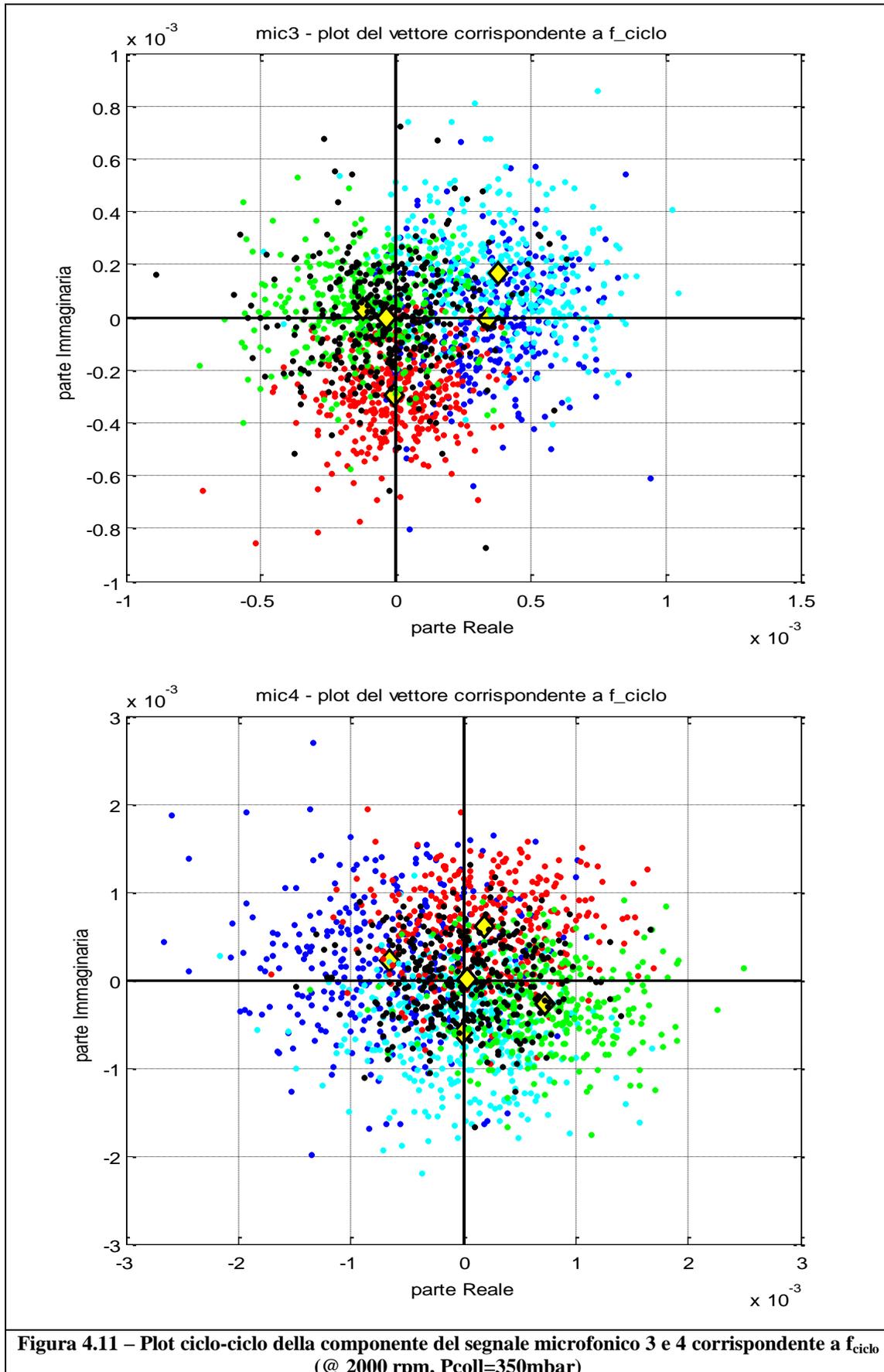


Figura 4.11 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 3 e 4 corrispondente a f_{ciclo} (@ 2000 rpm, $P_{coll}=350\text{mbar}$)

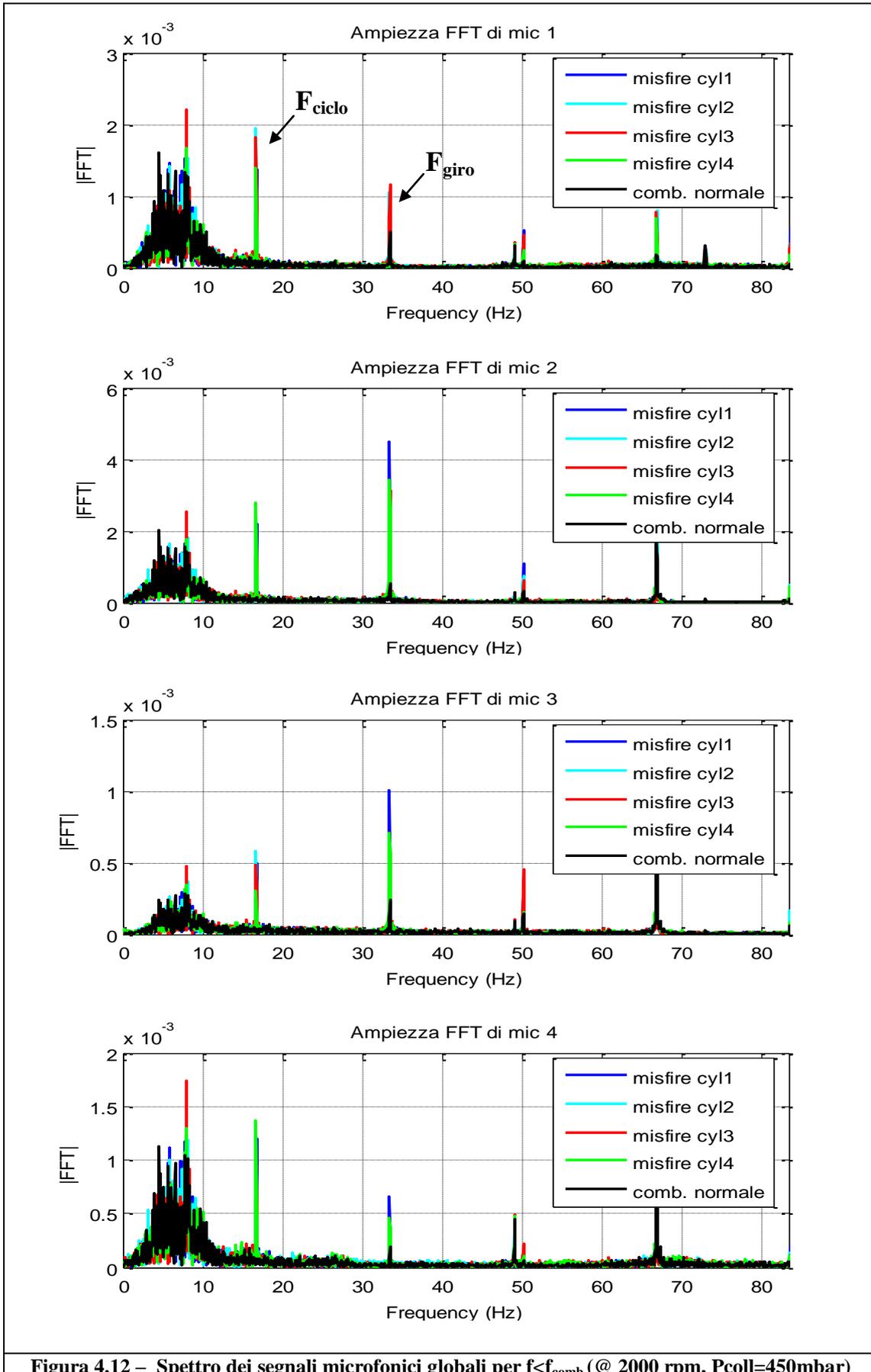


Figura 4.12 – Spettro dei segnali microfonic globali per $f < f_{comb}$ (@ 2000 rpm, $P_{coll}=450\text{mbar}$)

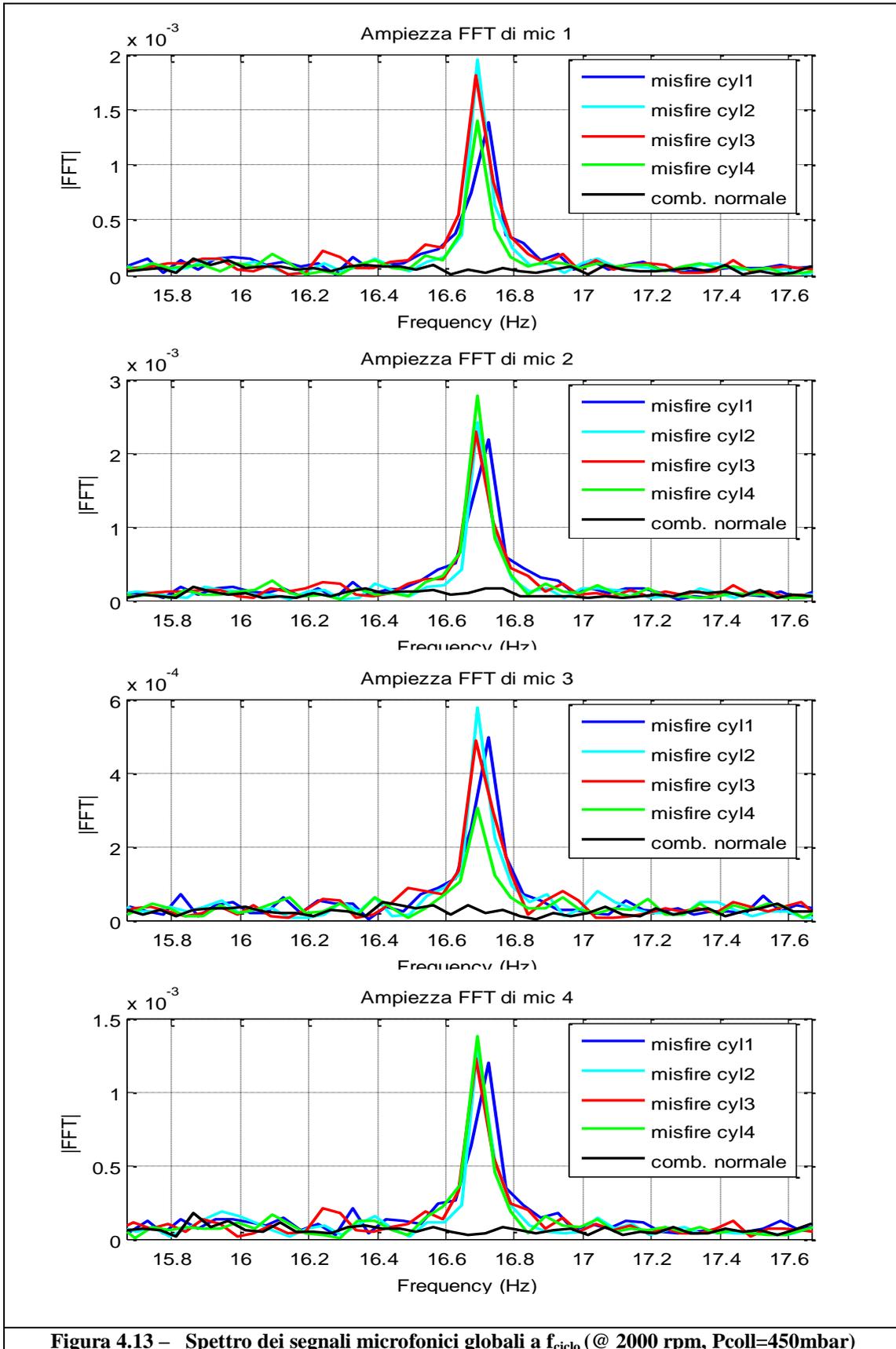


Figura 4.13 – Spettro dei segnali microfonici globali a f_{ciclo} (@ 2000 rpm, $P_{coll}=450\text{mbar}$)

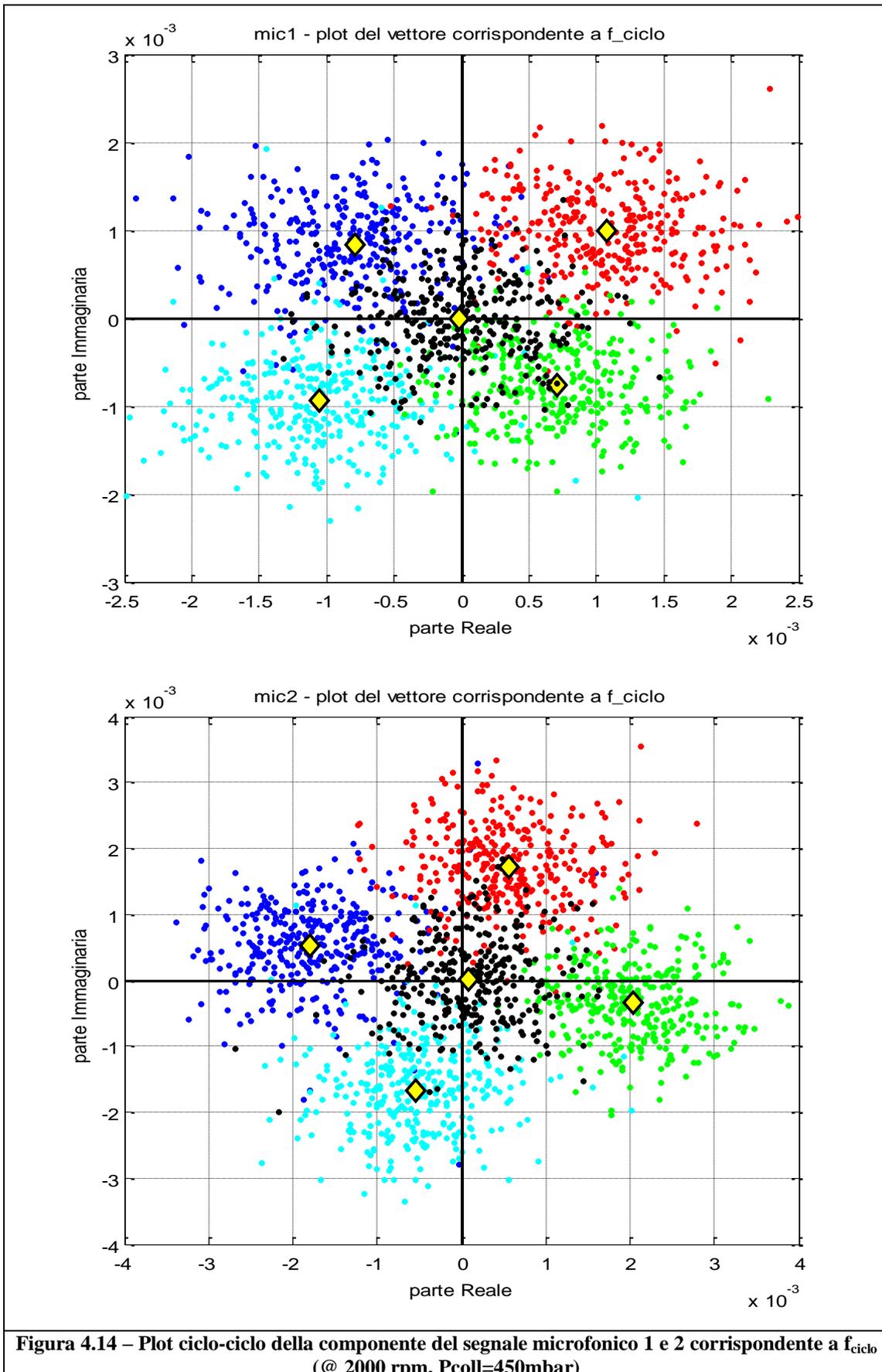


Figura 4.14 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 1 e 2 corrispondente a f_{ciclo}
 (@ 2000 rpm, Pcoll=450mbar)

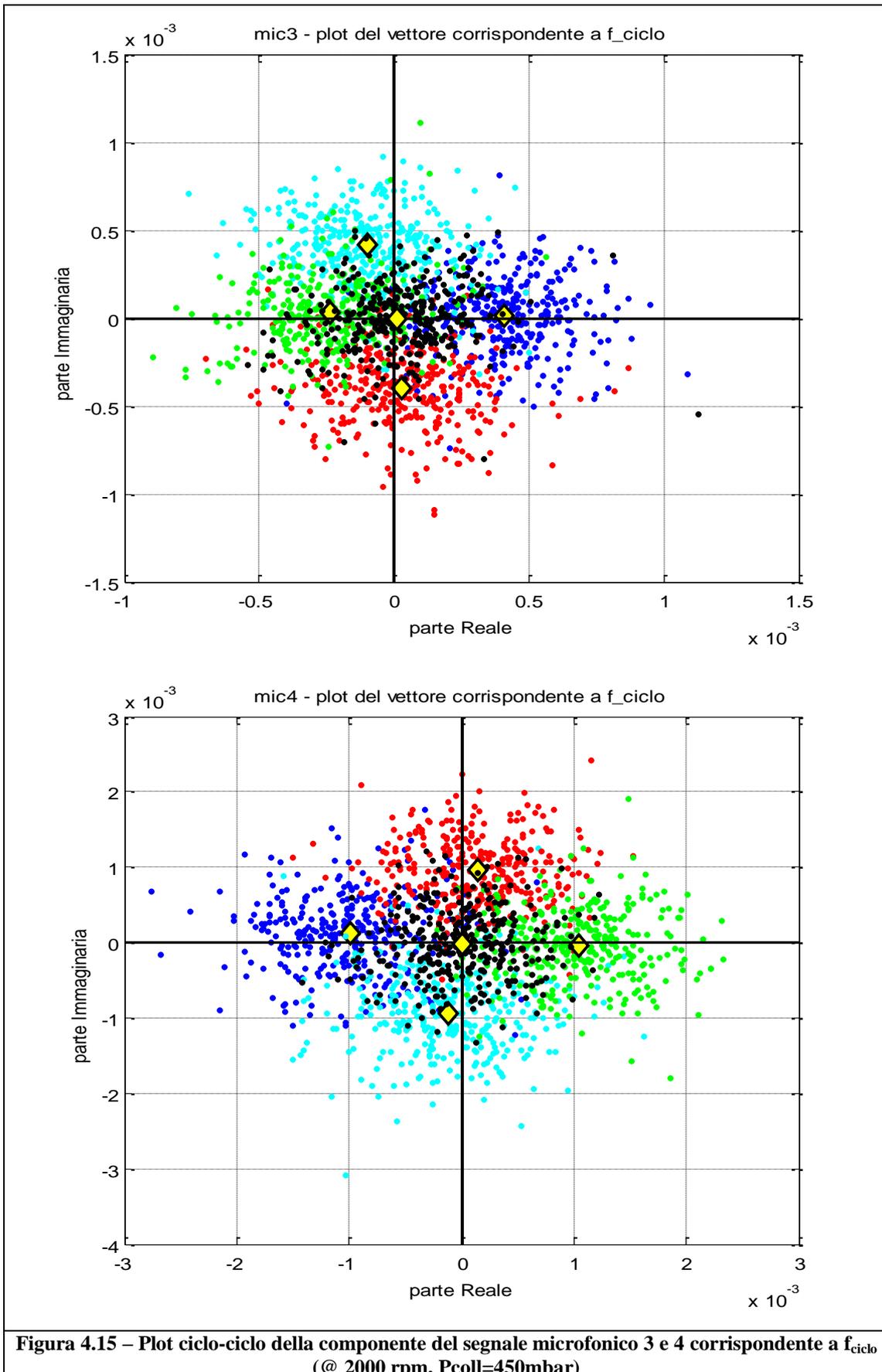


Figura 4.15 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 3 e 4 corrispondente a f_{ciclo} (@ 2000 rpm, $P_{coll}=450\text{mbar}$)

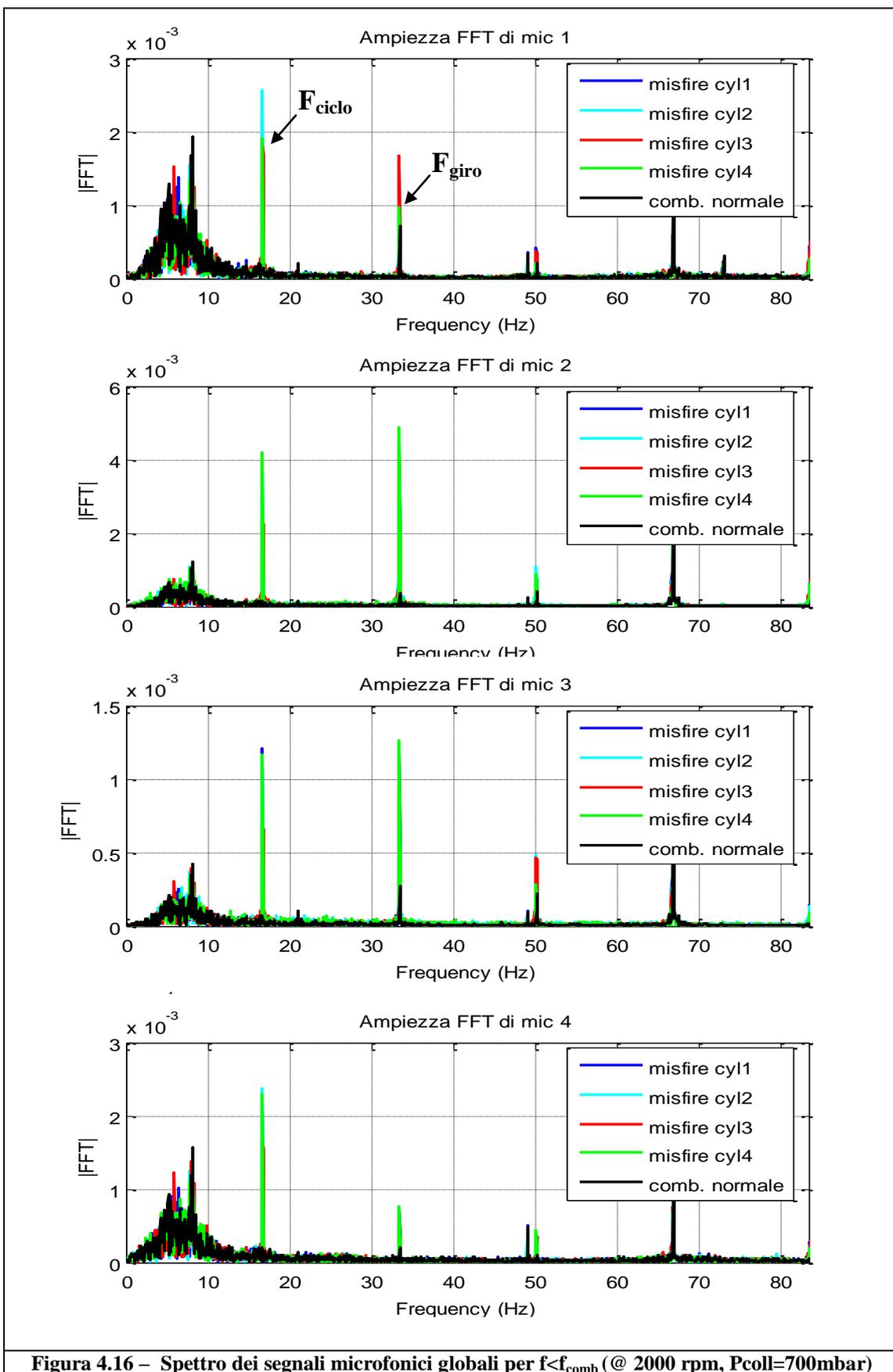


Figura 4.16 – Spettro dei segnali microfonici globali per $f < f_{comb}$ (@ 2000 rpm, $P_{coll}=700\text{mbar}$)

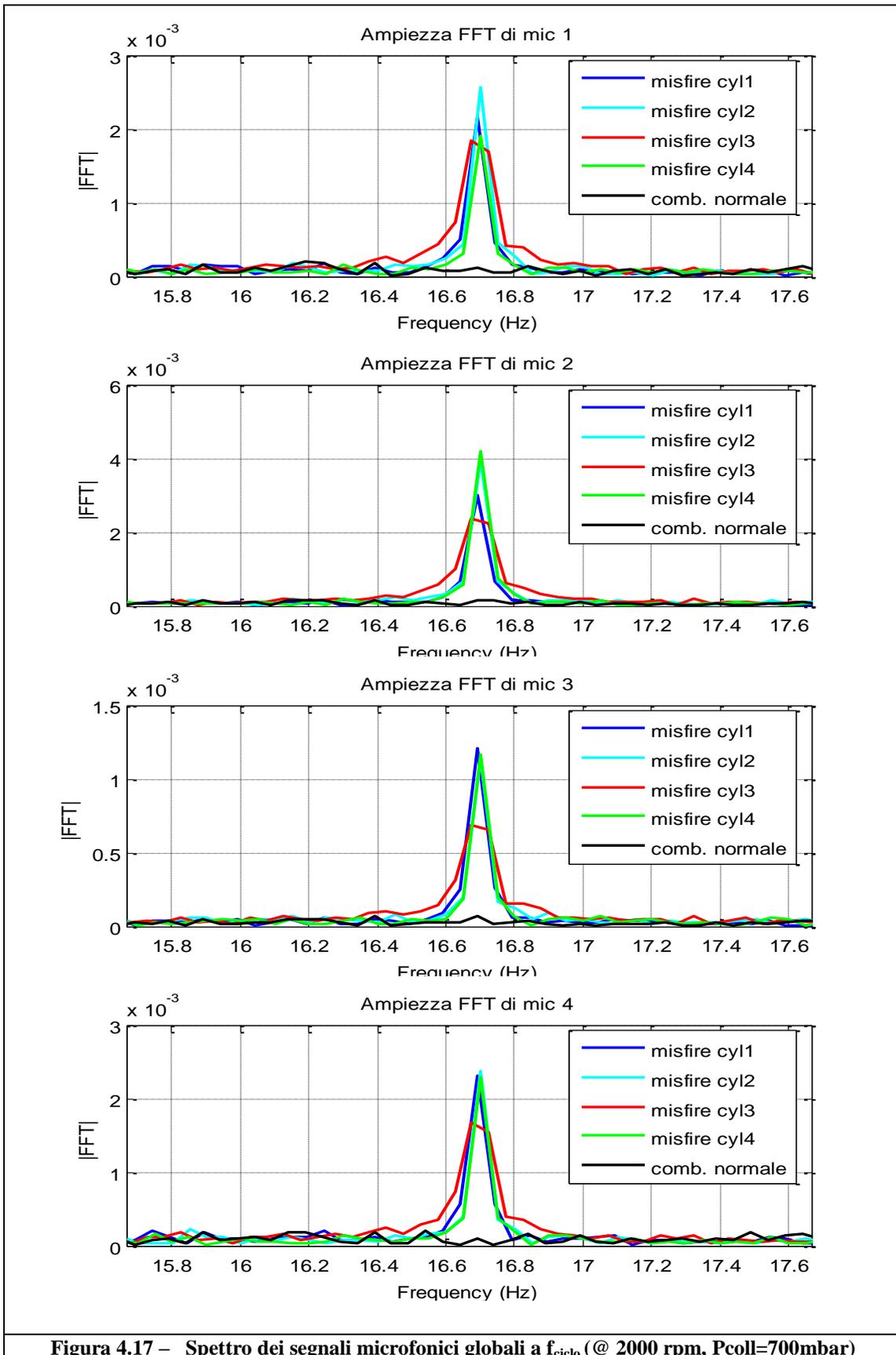


Figura 4.17 – Spettro dei segnali microfonici globali a f_{ciclo} (@ 2000 rpm, $P_{coll}=700\text{mbar}$)

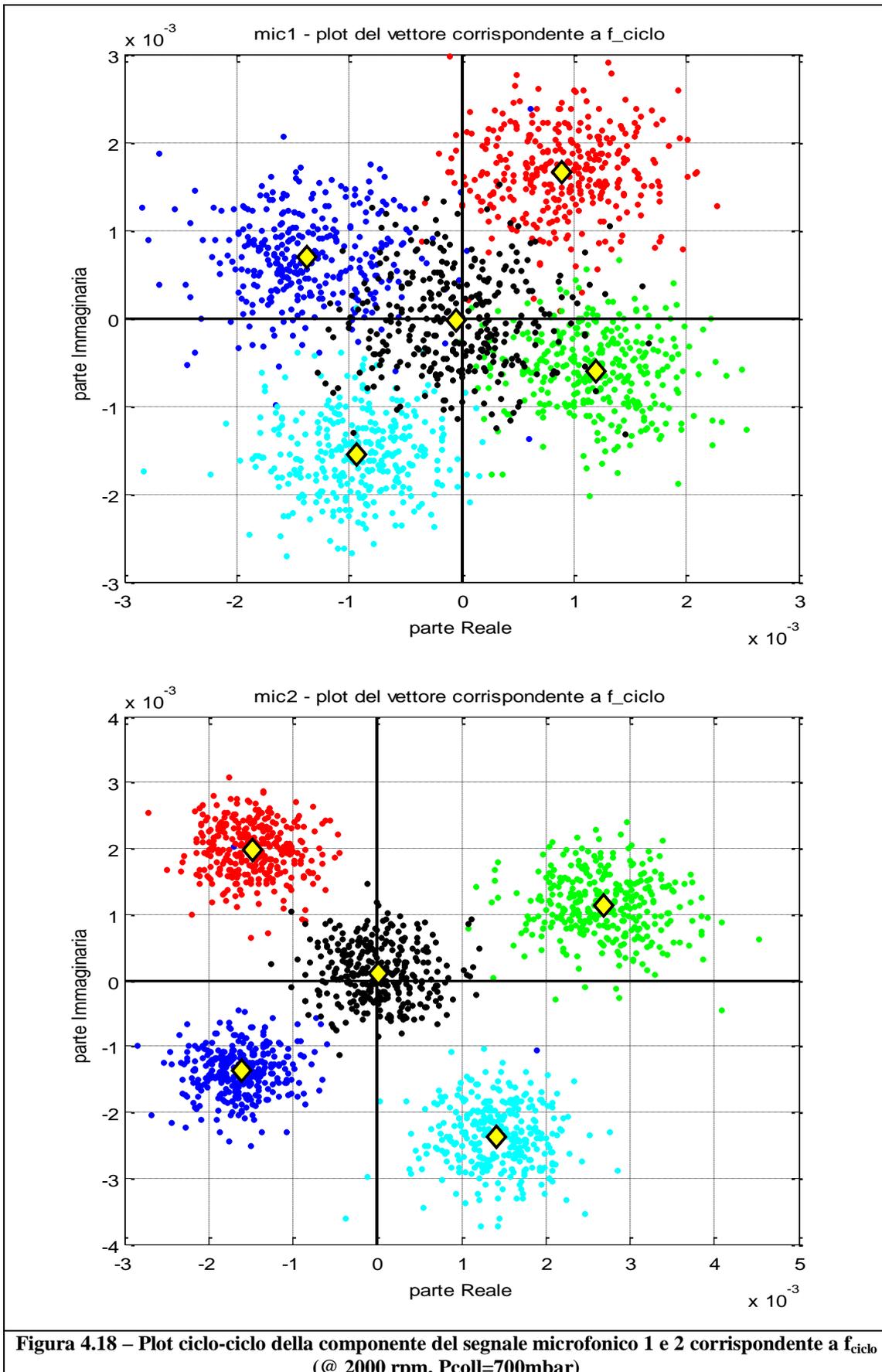


Figura 4.18 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 1 e 2 corrispondente a f_{ciclo} (@ 2000 rpm, $P_{coll}=700\text{mbar}$)

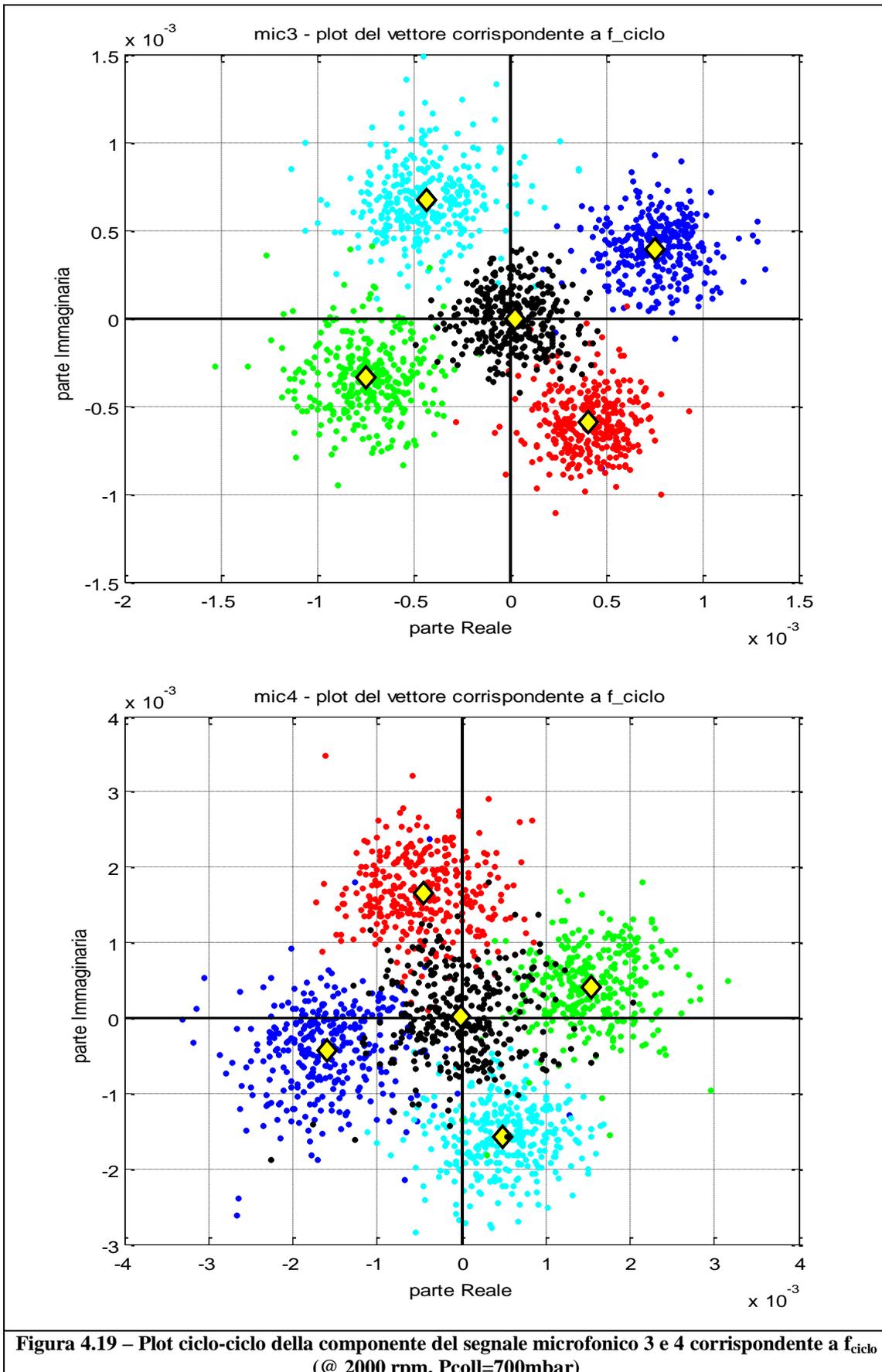


Figura 4.19 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 3 e 4 corrispondente a f_{ciclo} (@ 2000 rpm, $P_{coll}=700\text{mbar}$)

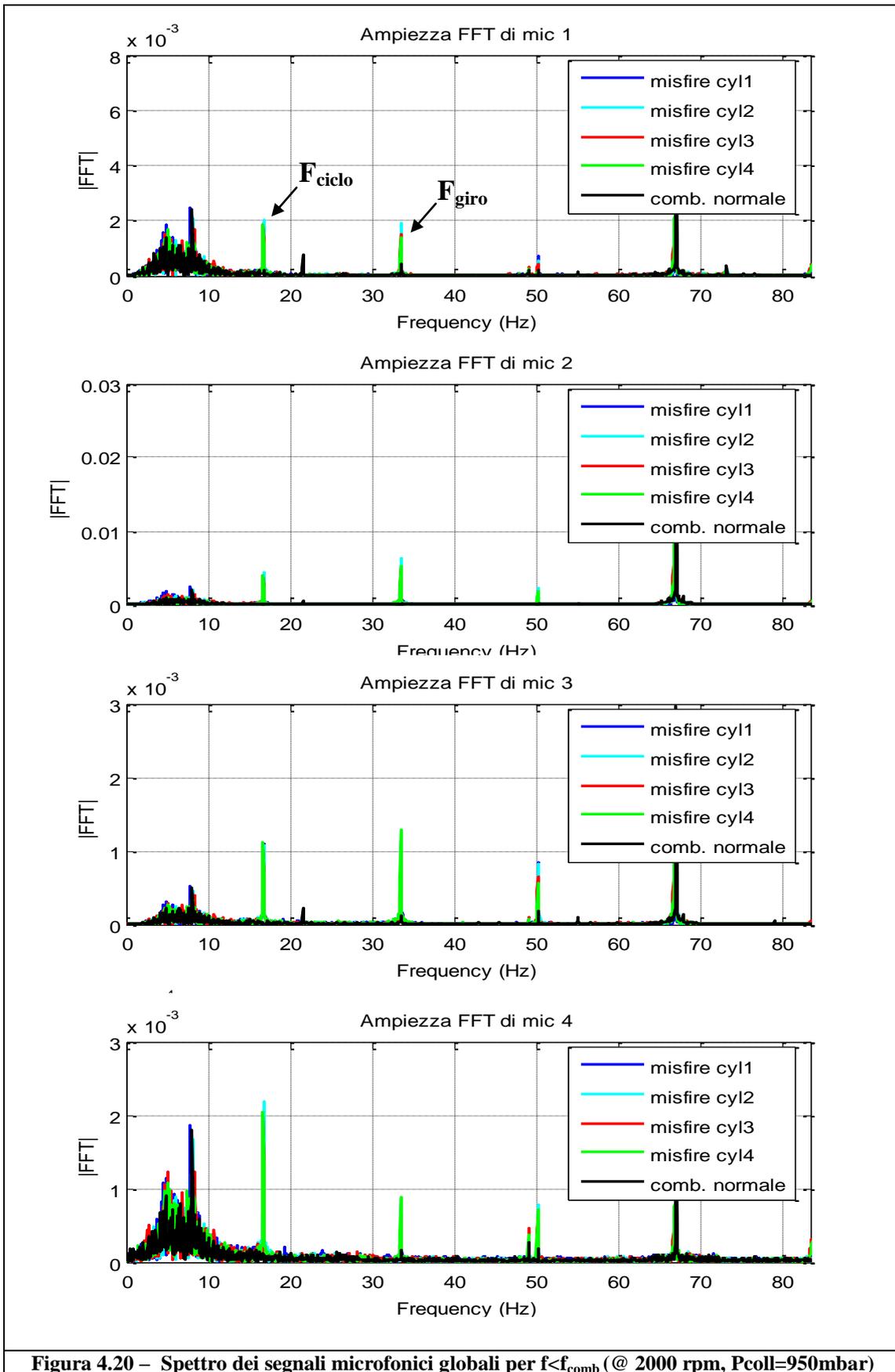


Figura 4.20 – Spettro dei segnali microfonici globali per $f < f_{comb}$ (@ 2000 rpm, $P_{coll}=950\text{mbar}$)

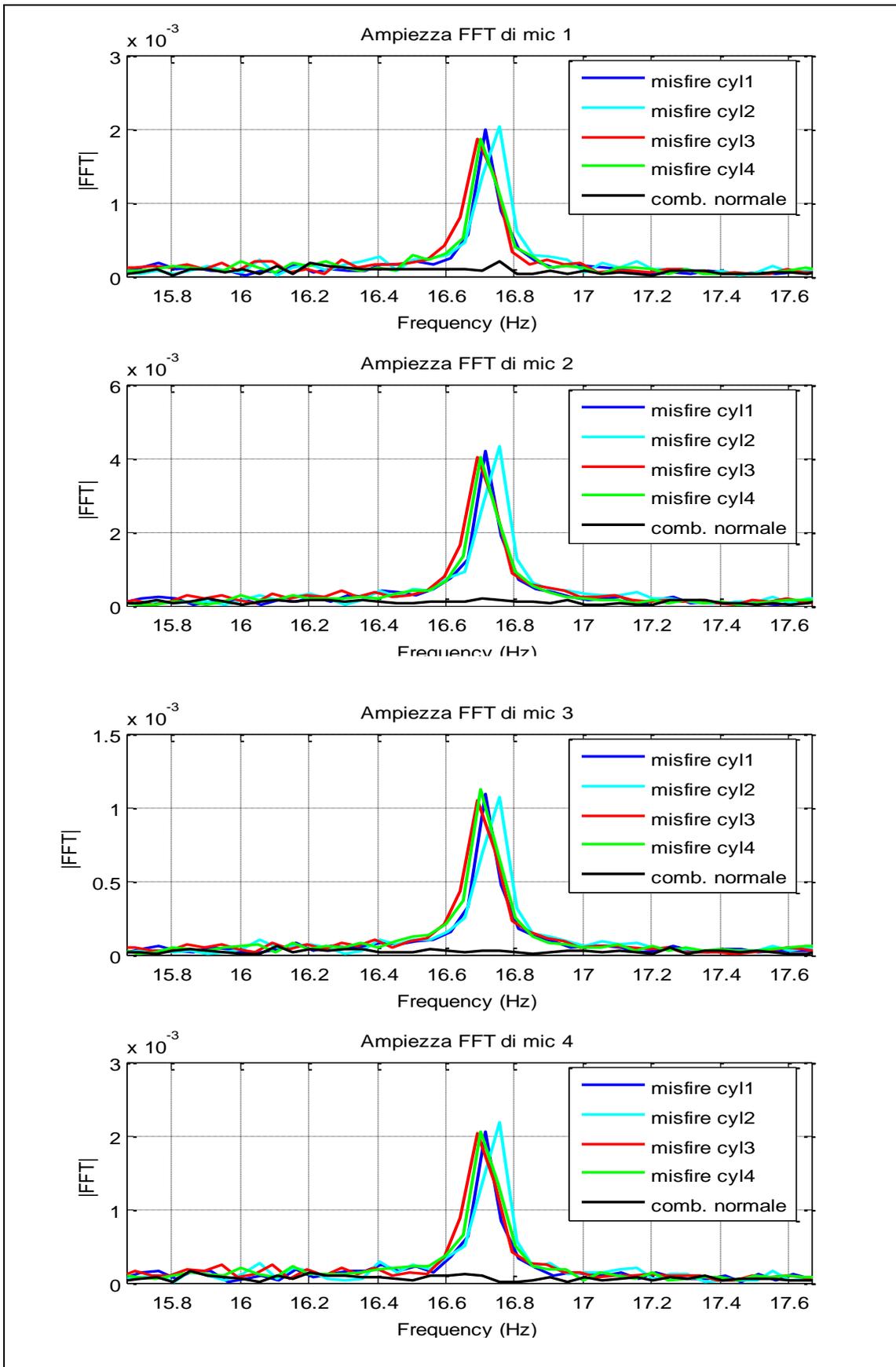


Figura 4.21 – Spettro dei segnali microfonici globali a f_{ciclo} (@ 2000 rpm, $P_{coll}=950\text{mbar}$)

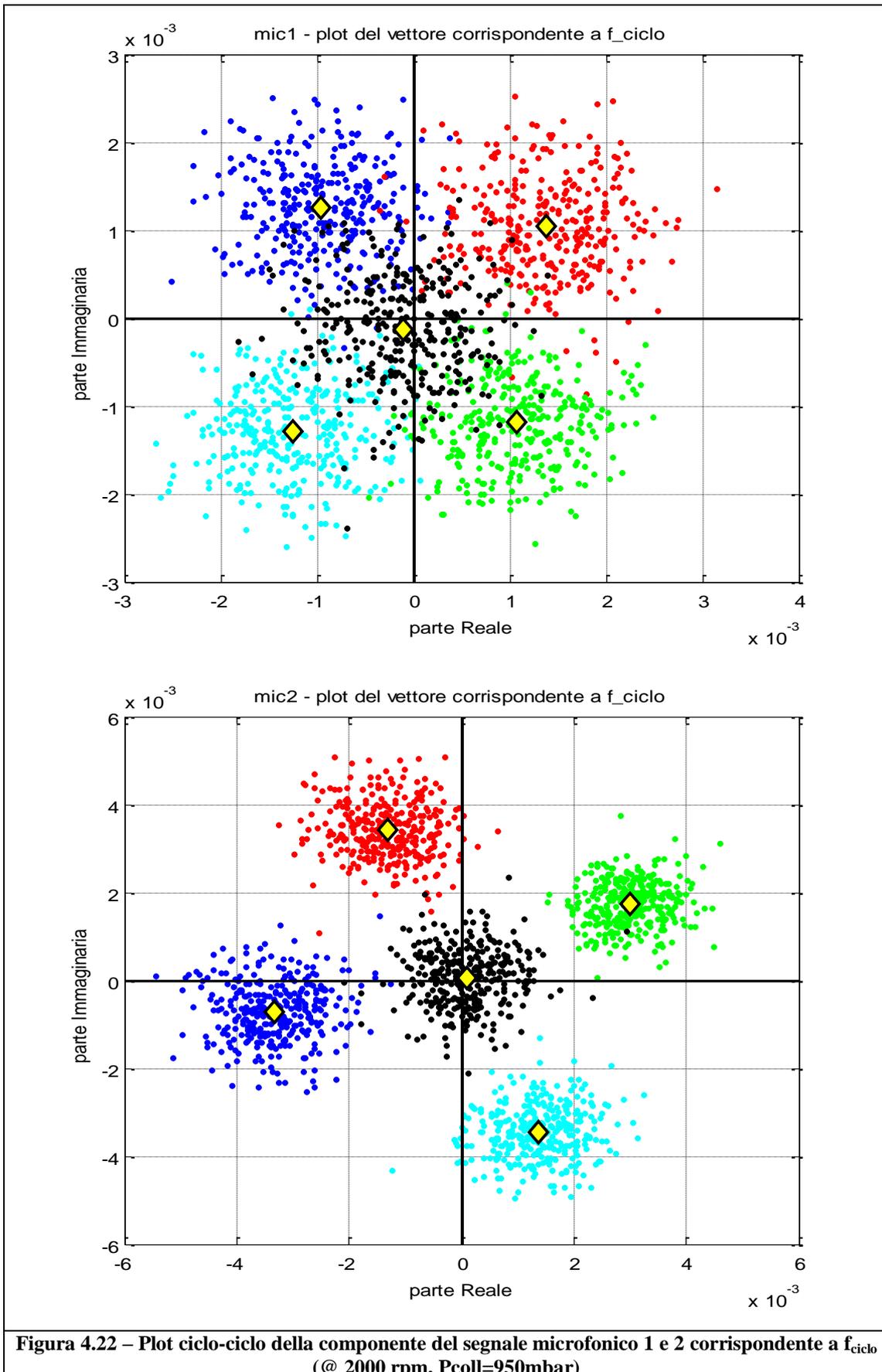


Figura 4.22 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 1 e 2 corrispondente a f_{ciclo} (@ 2000 rpm, Pcoll=950mbar)

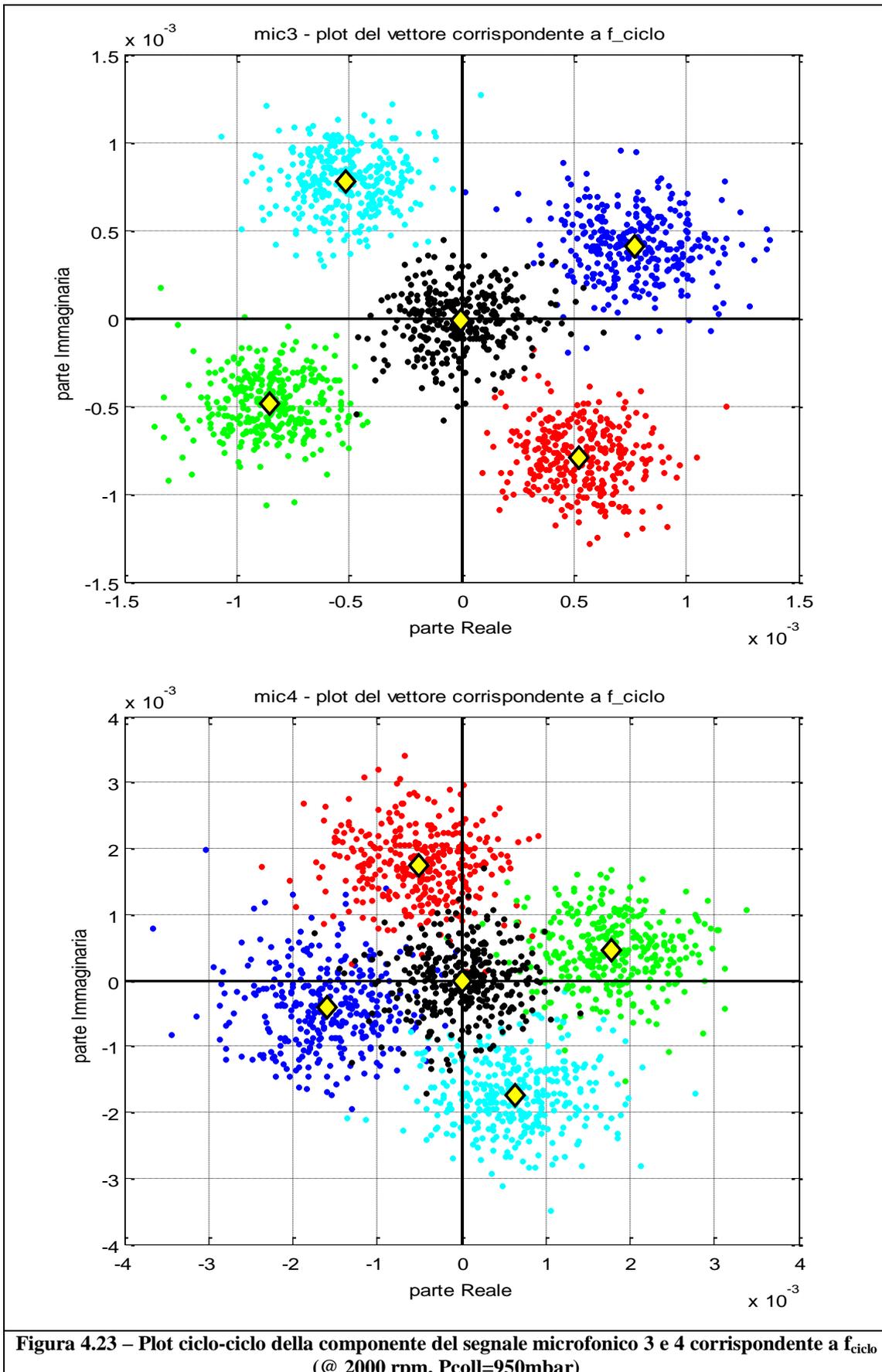


Figura 4.23 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 3 e 4 corrispondente a f_{ciclo}
 (@ 2000 rpm, Pcoll=950mbar)

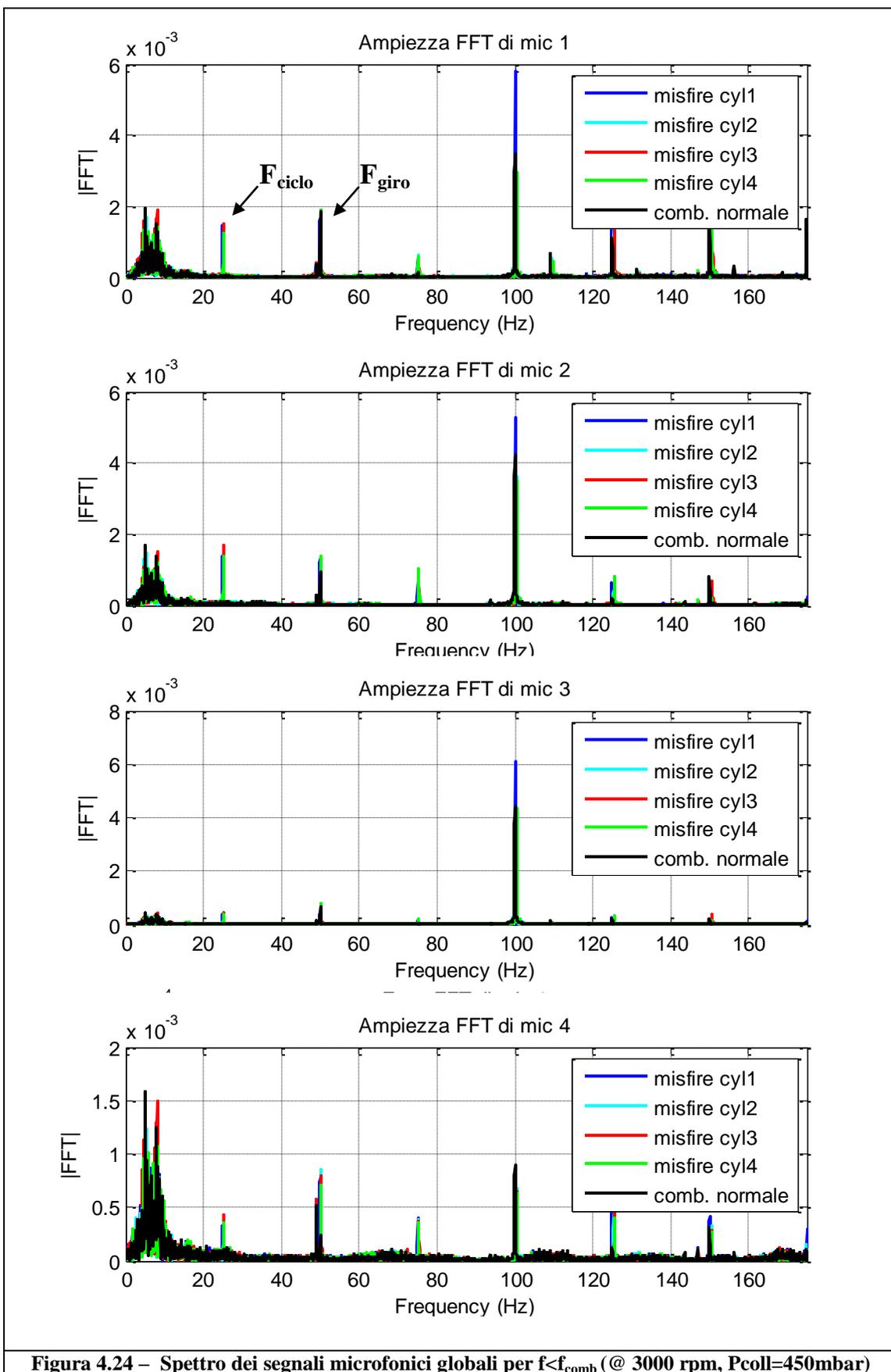


Figura 4.24 – Spettro dei segnali microfonici globali per $f < f_{comb}$ (@ 3000 rpm, $P_{coll}=450\text{mbar}$)

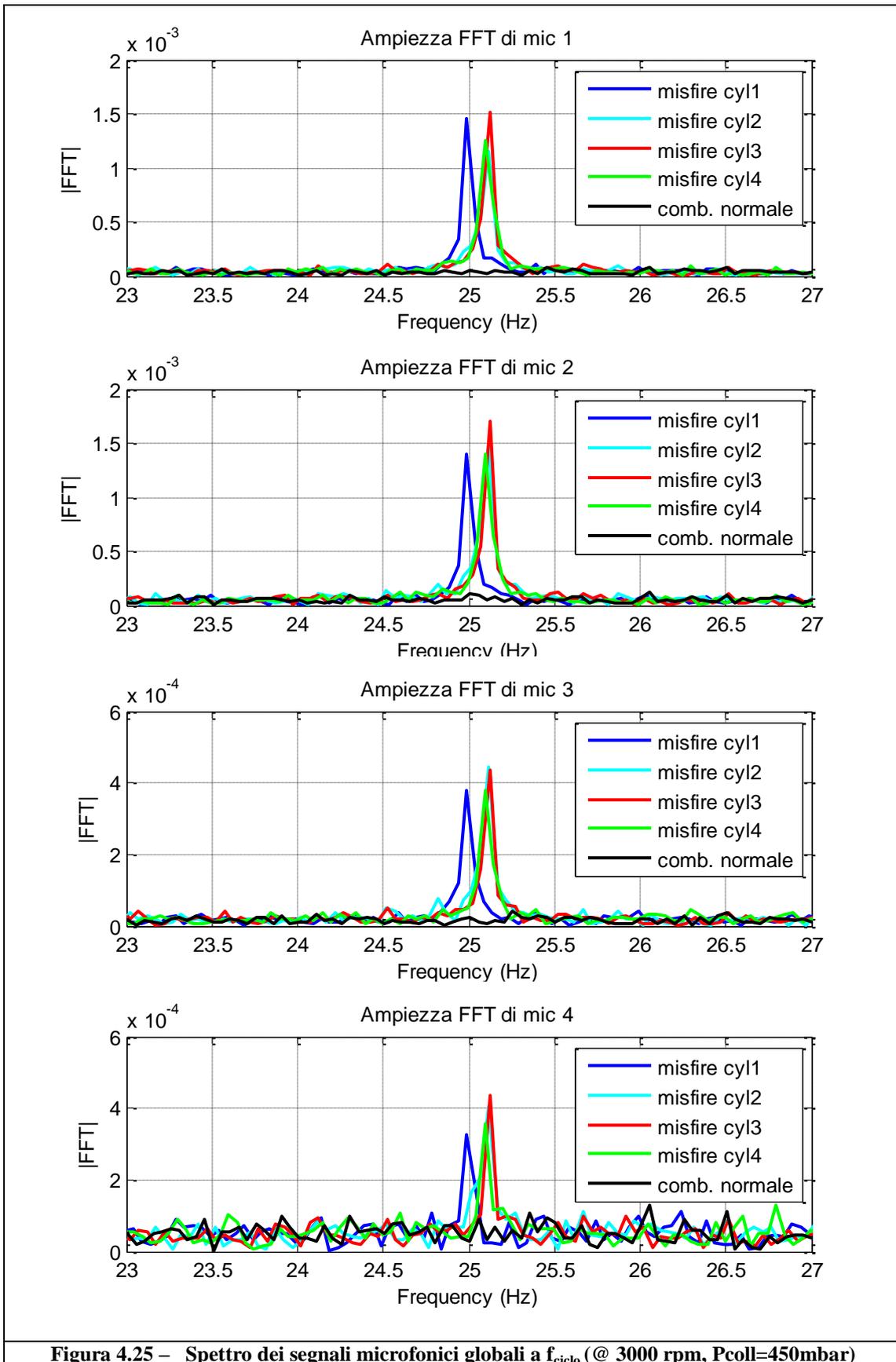
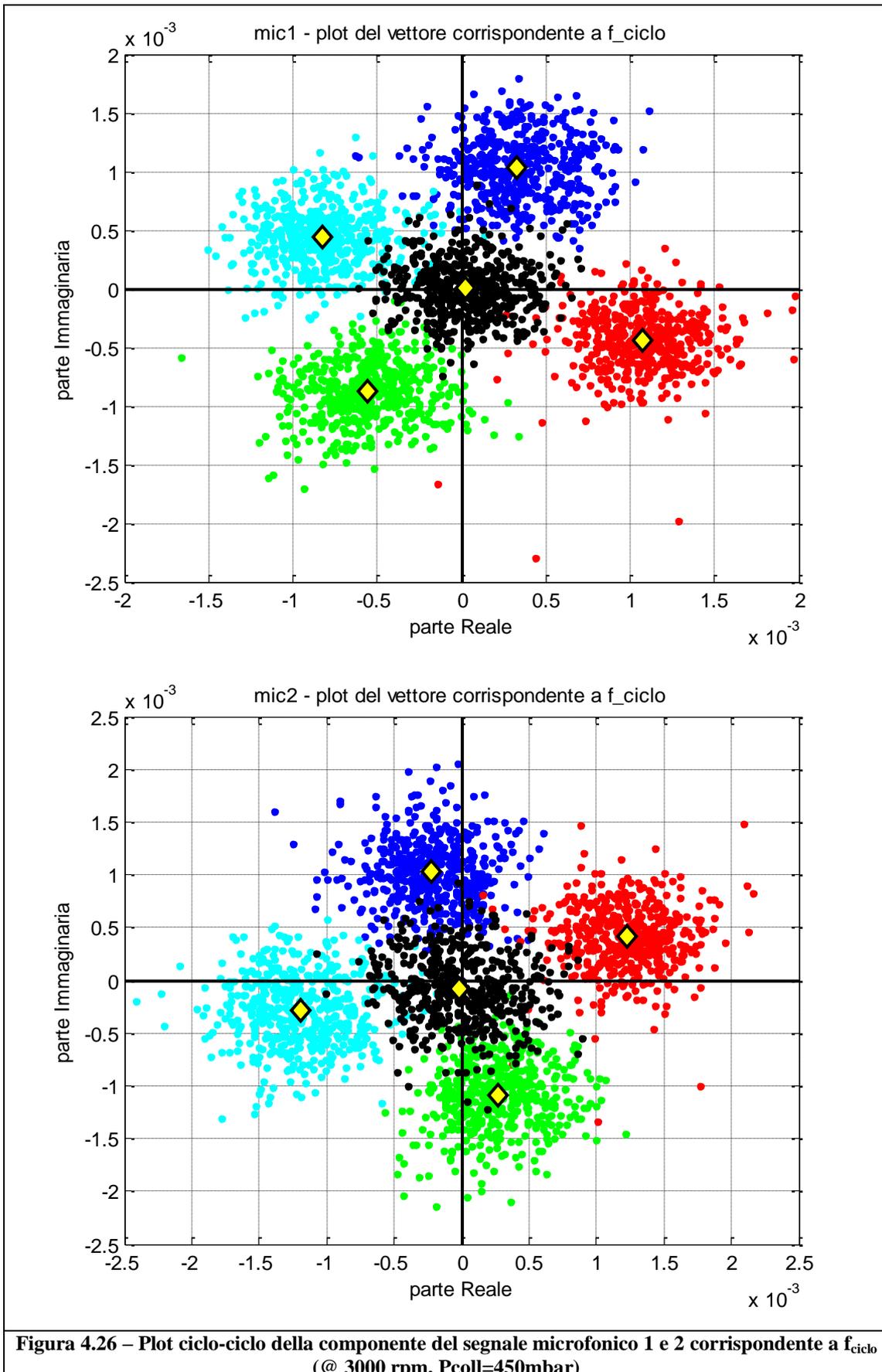


Figura 4.25 – Spettro dei segnali microfonici globali a f_{ciclo} (@ 3000 rpm, $P_{coll}=450\text{mbar}$)



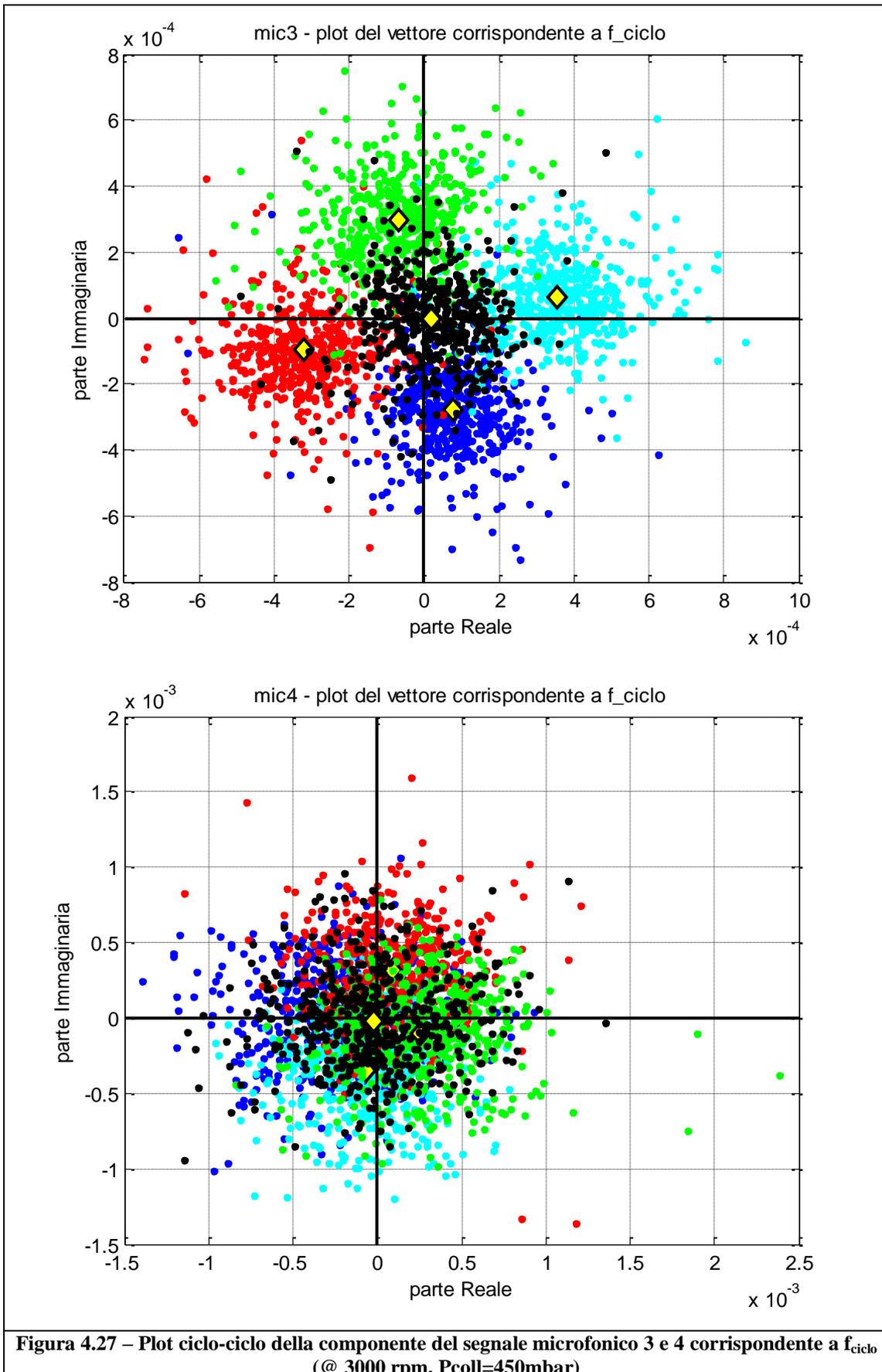


Figura 4.27 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 3 e 4 corrispondente a f_{ciclo} (@ 3000 rpm, Pcoll=450mbar)

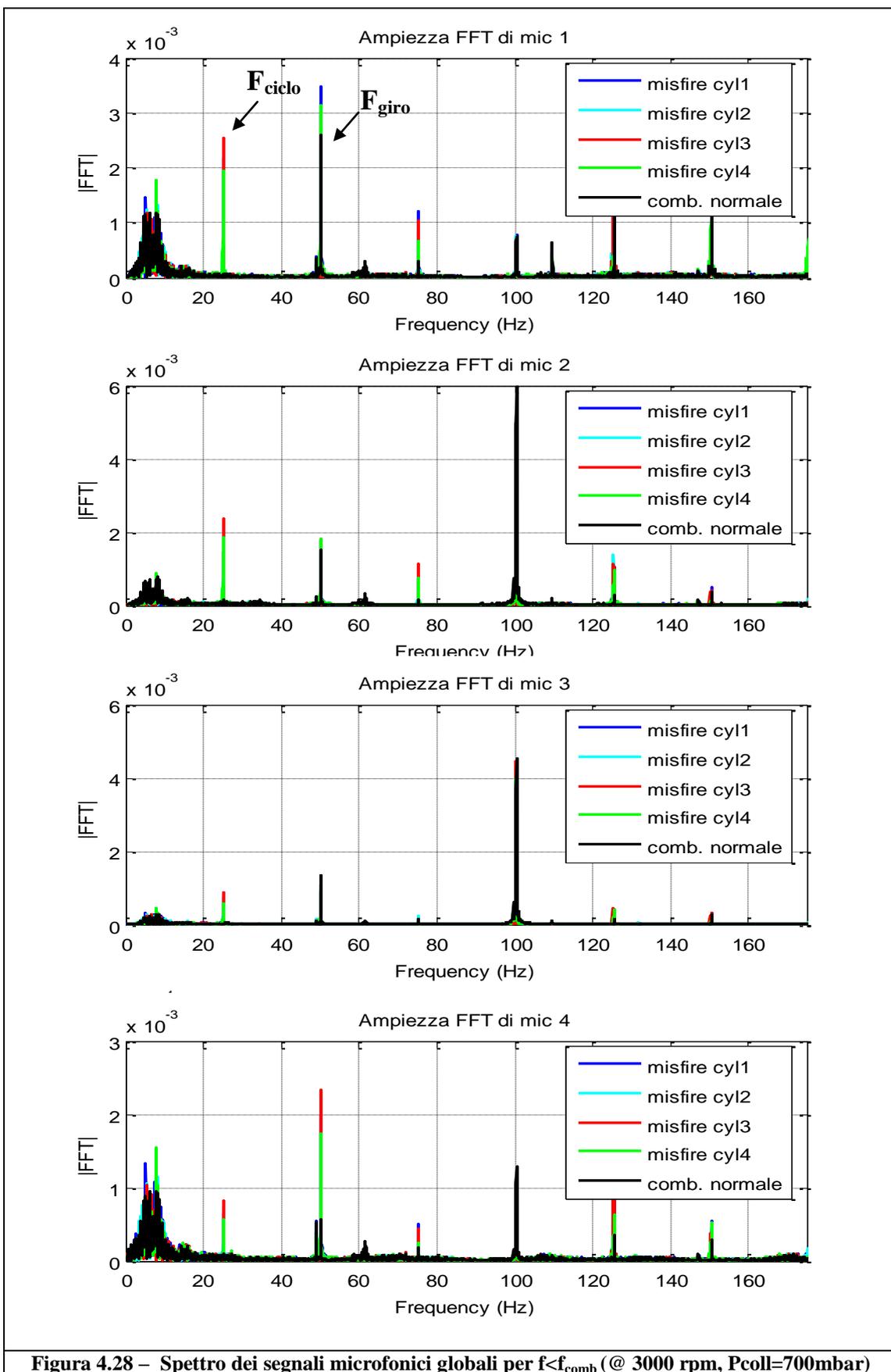
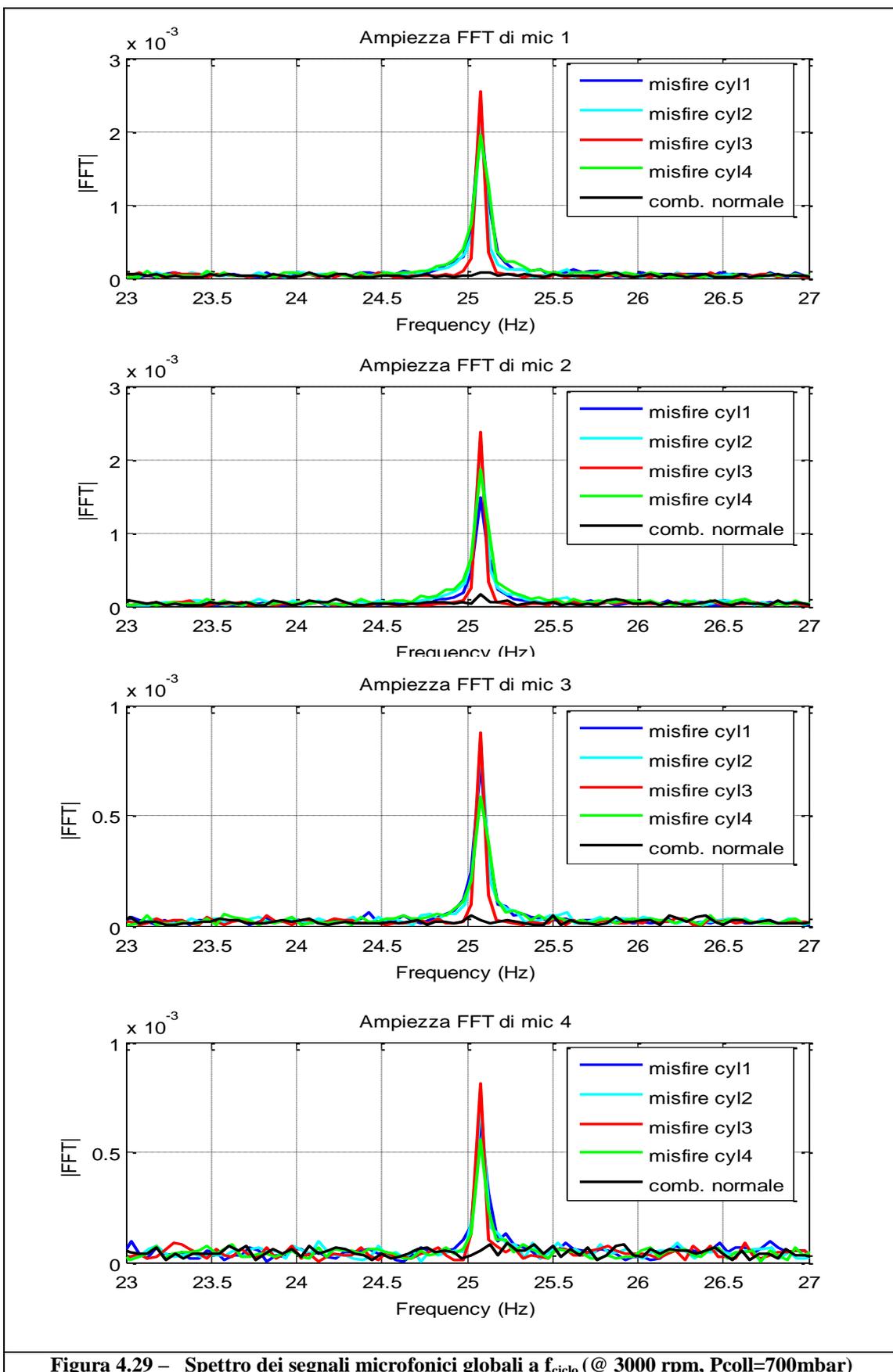


Figura 4.28 – Spettro dei segnali microfonici globali per $f < f_{comb}$ (@ 3000 rpm, $P_{coll}=700\text{mbar}$)



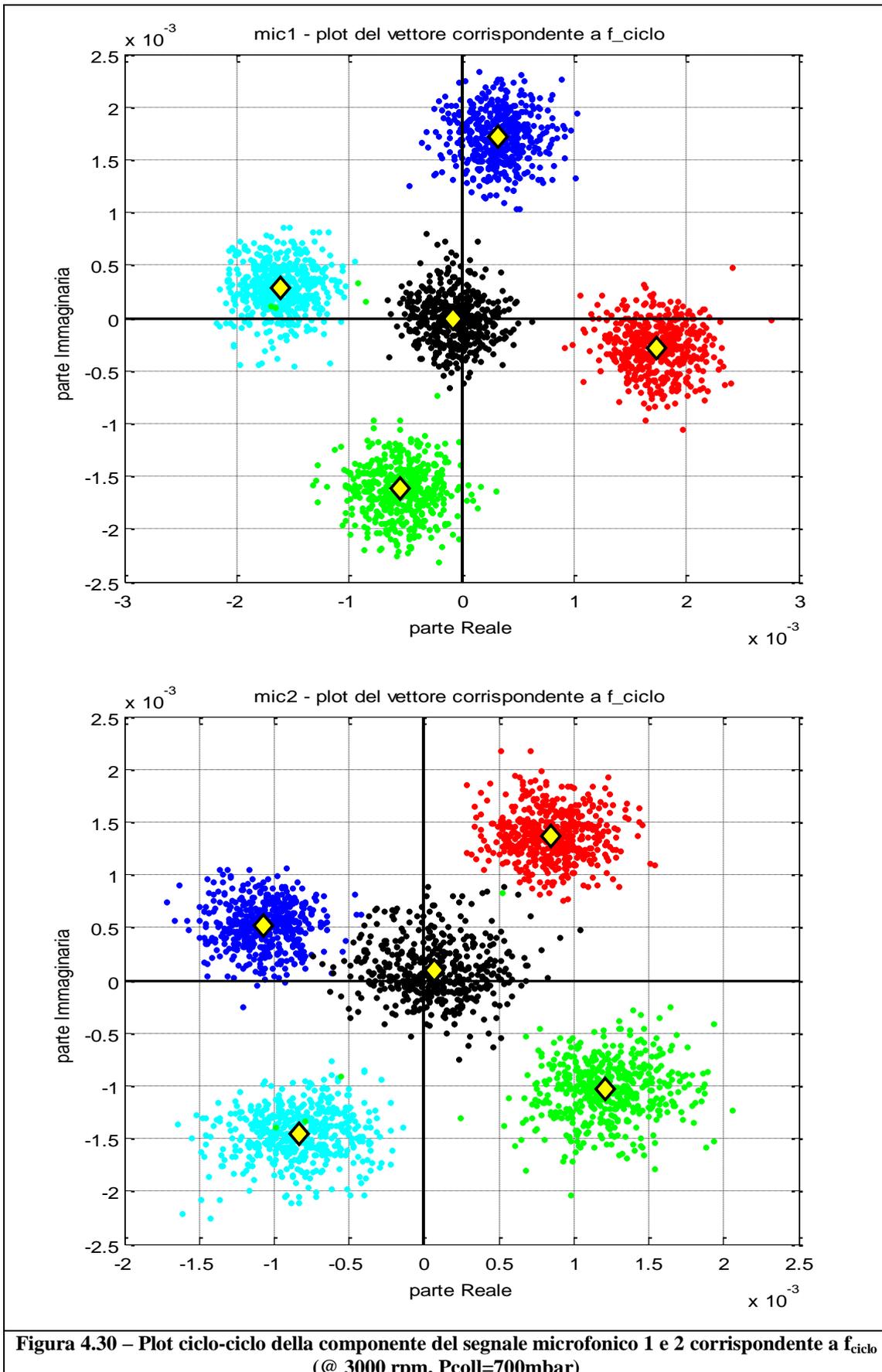


Figura 4.30 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 1 e 2 corrispondente a f_{ciclo} (@ 3000 rpm, $P_{coll}=700\text{mbar}$)

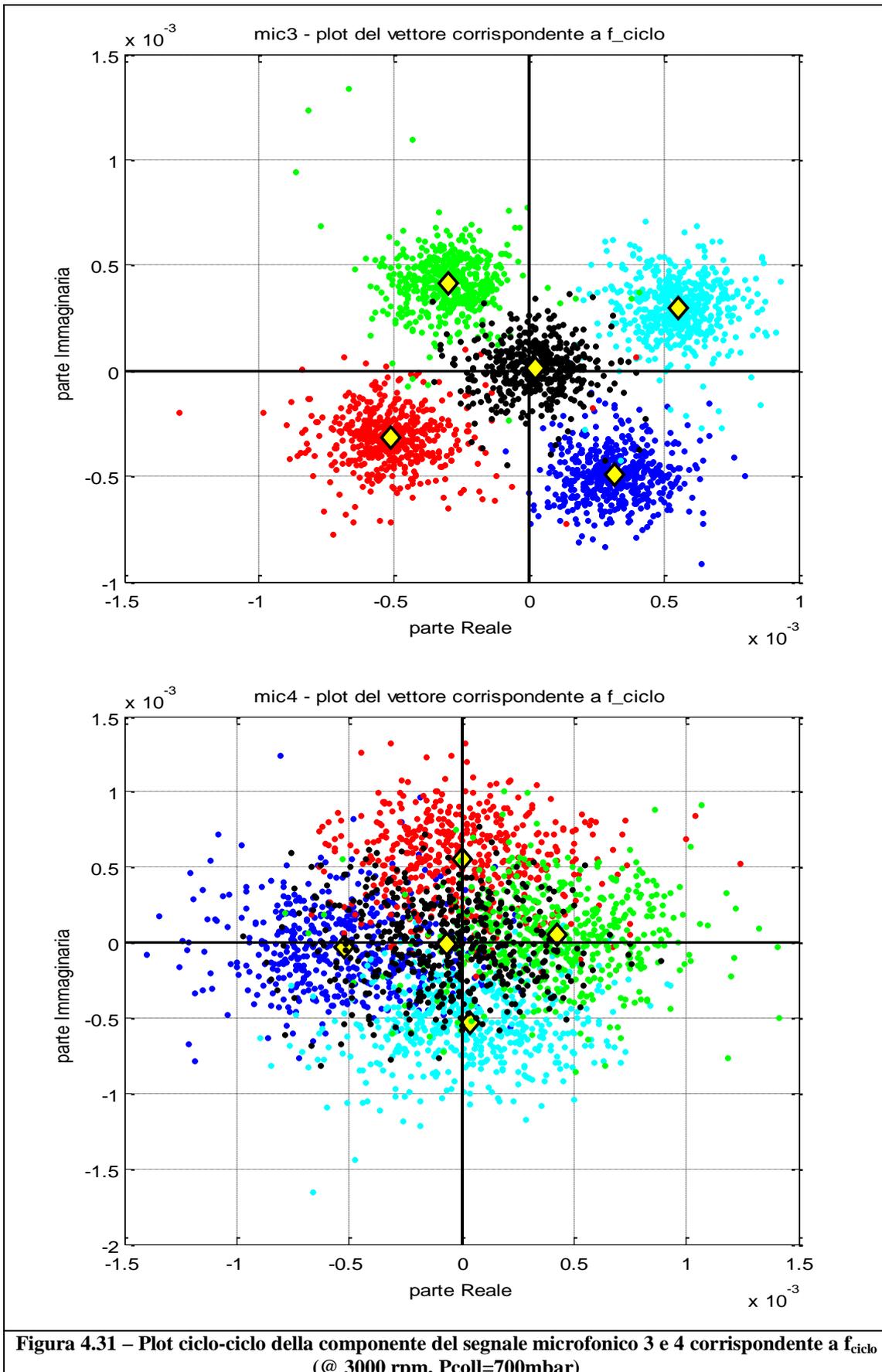


Figura 4.31 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 3 e 4 corrispondente a f_{ciclo} (@ 3000 rpm, $P_{coll}=700\text{mbar}$)

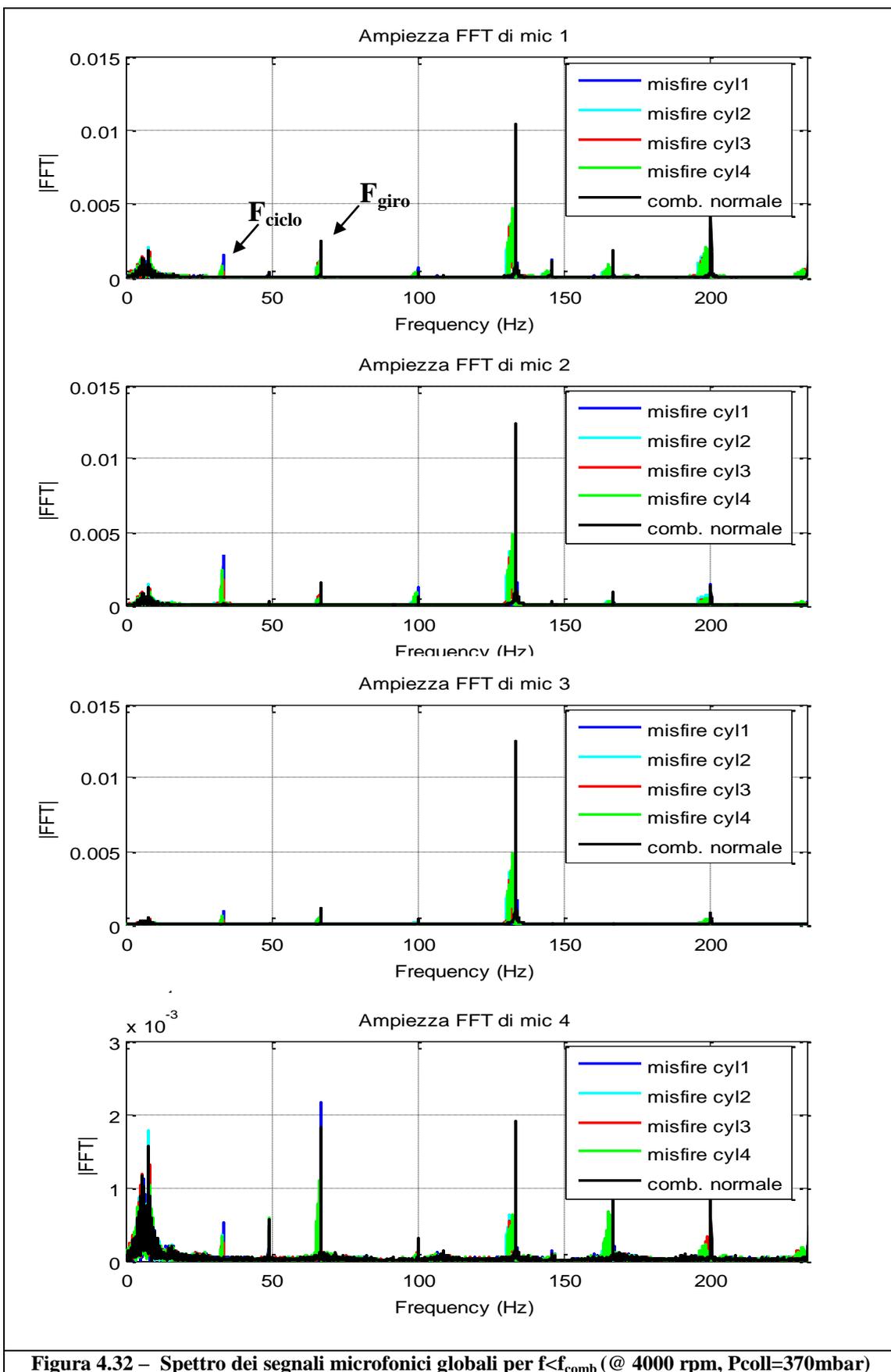


Figura 4.32 – Spettro dei segnali microfonici globali per $f < f_{comb}$ (@ 4000 rpm, $P_{coll}=370\text{mbar}$)

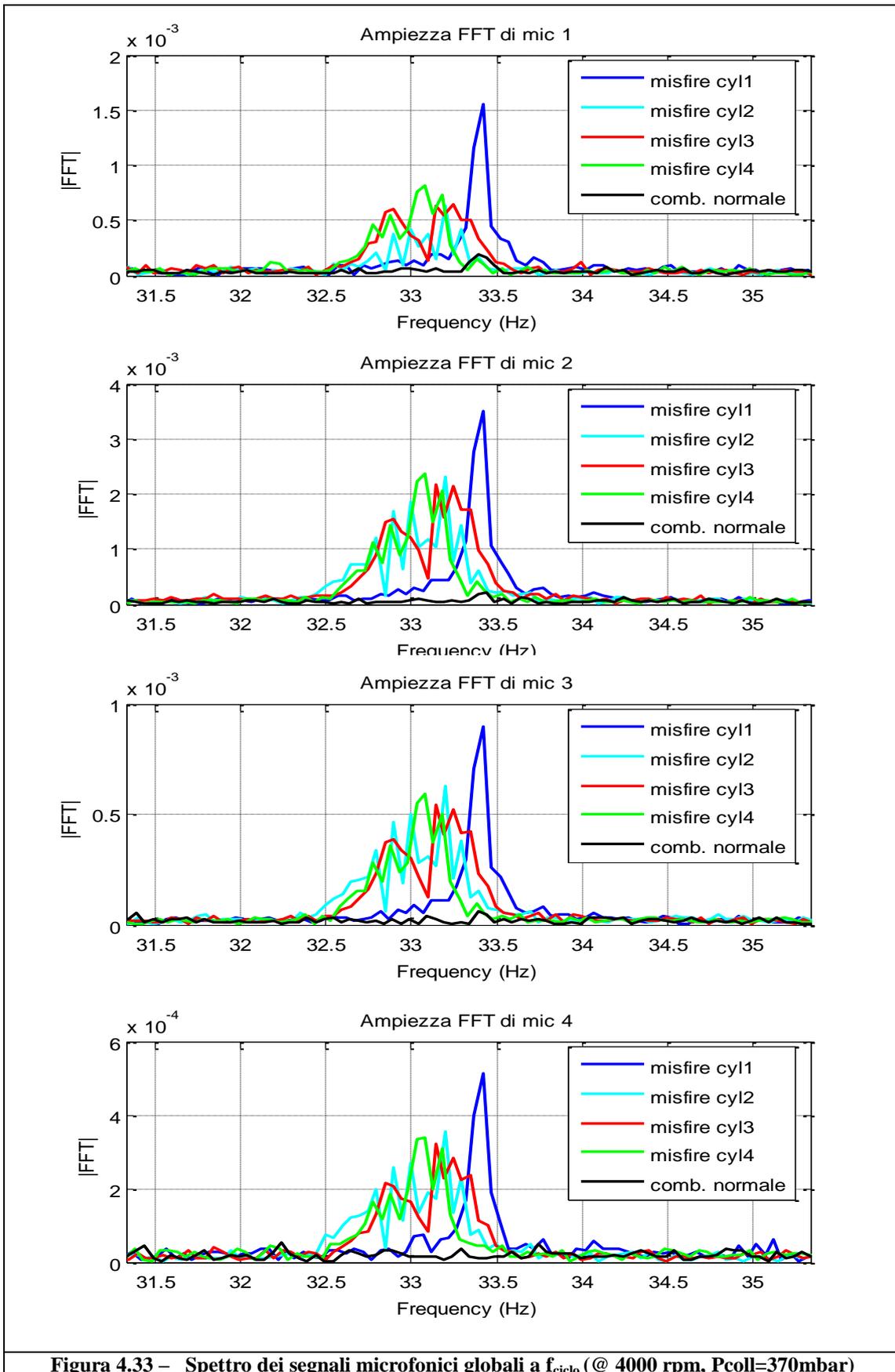


Figura 4.33 – Spettro dei segnali microfonici globali a f_{ciclo} (@ 4000 rpm, $P_{coll}=370\text{mbar}$)

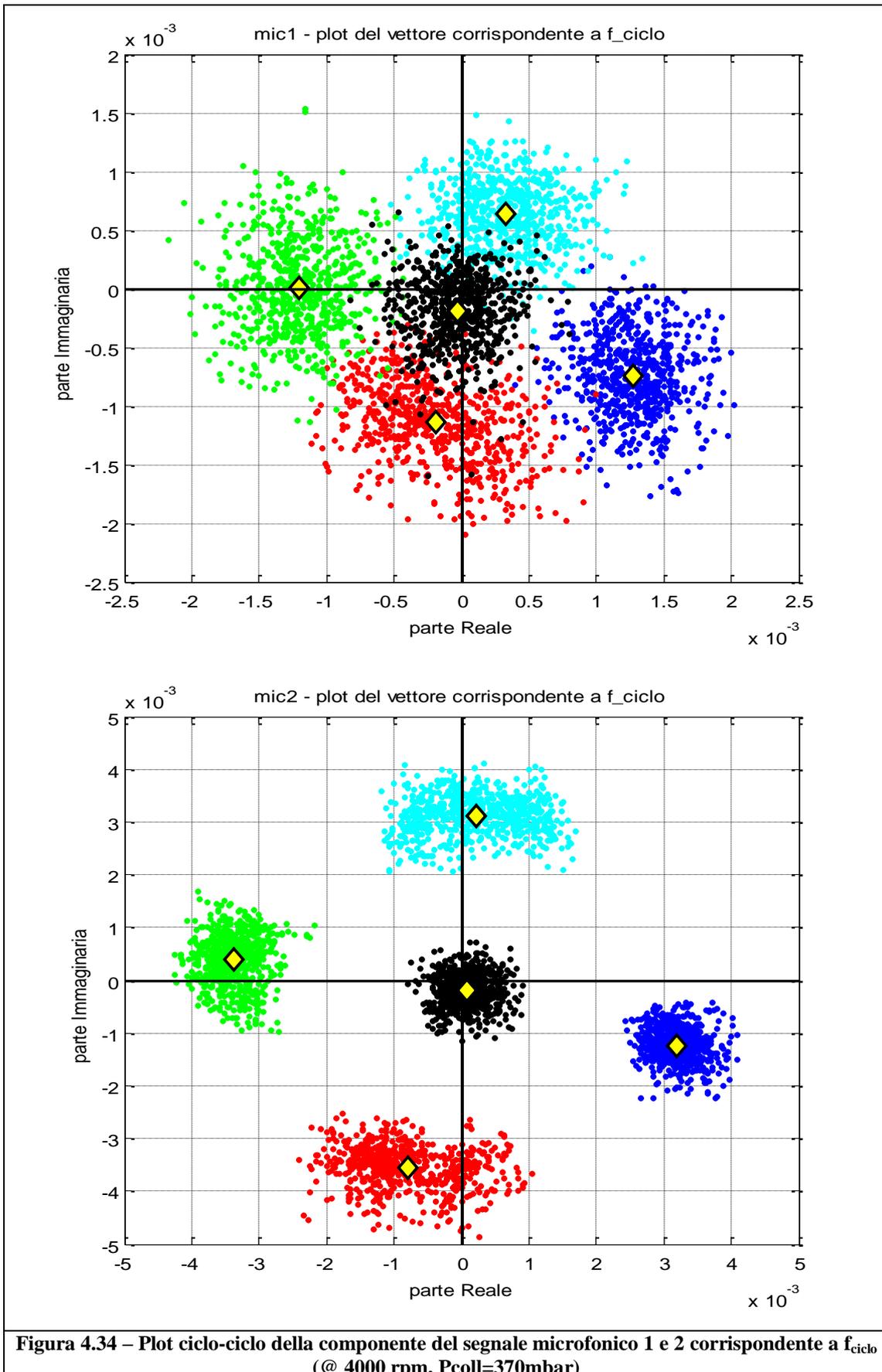


Figura 4.34 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 1 e 2 corrispondente a f_{ciclo} (@ 4000 rpm, Pcoll=370mbar)

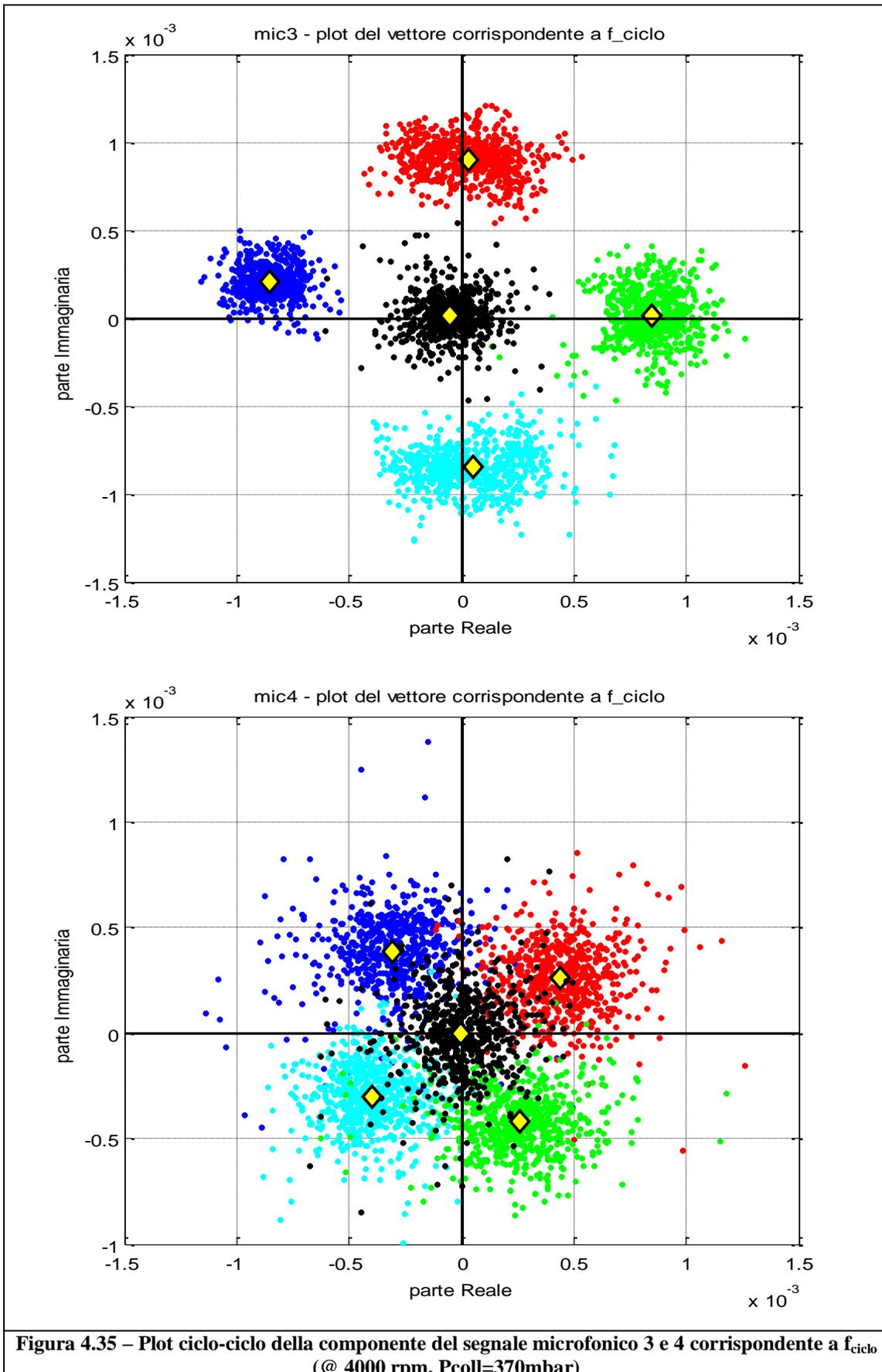
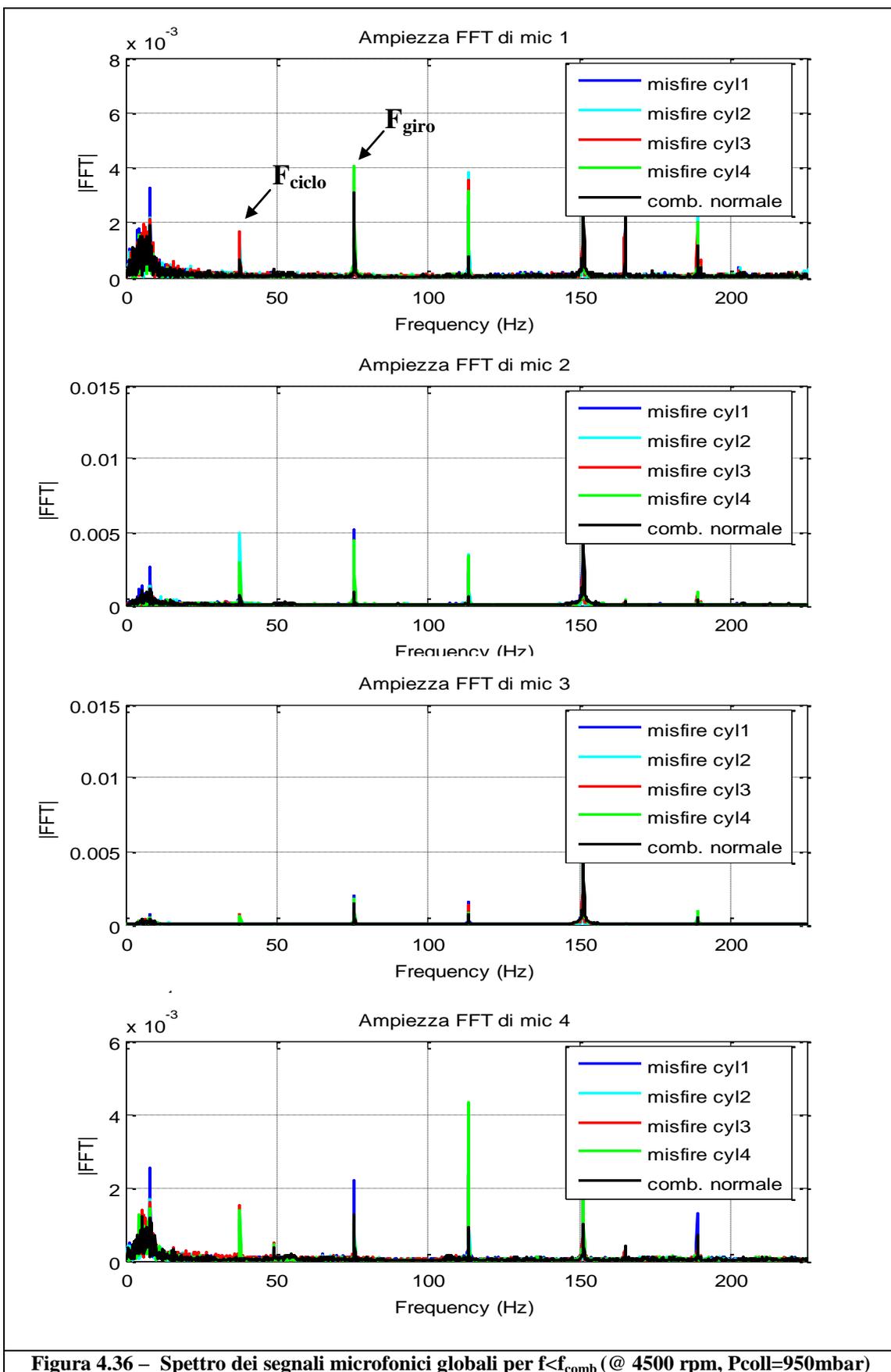


Figura 4.35 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 3 e 4 corrispondente a f_{ciclo} (@ 4000 rpm, Pcoll=370mbar)



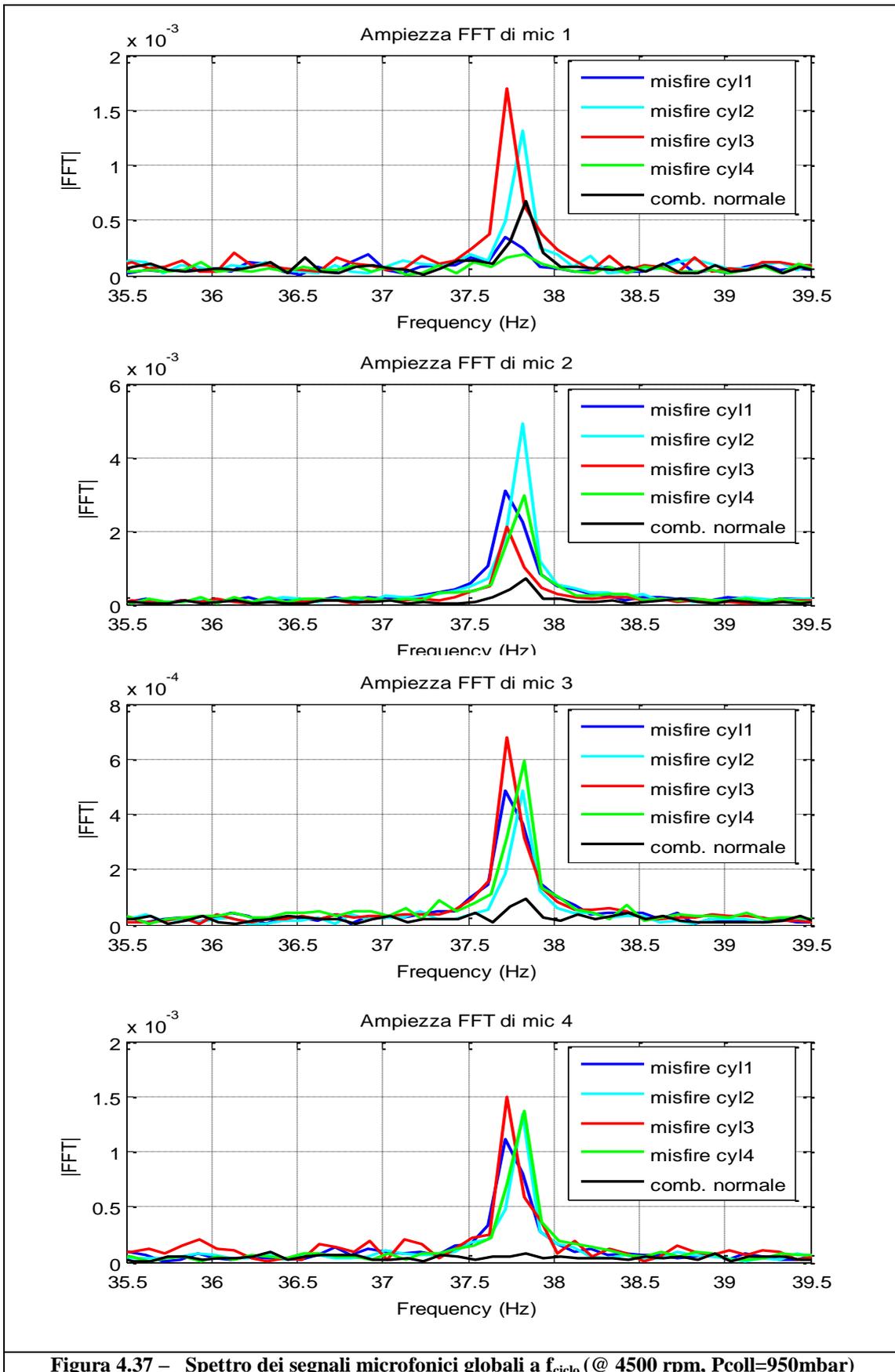


Figura 4.37 – Spettro dei segnali microfonici globali a f_{ciclo} (@ 4500 rpm, $P_{coll}=950\text{mbar}$)

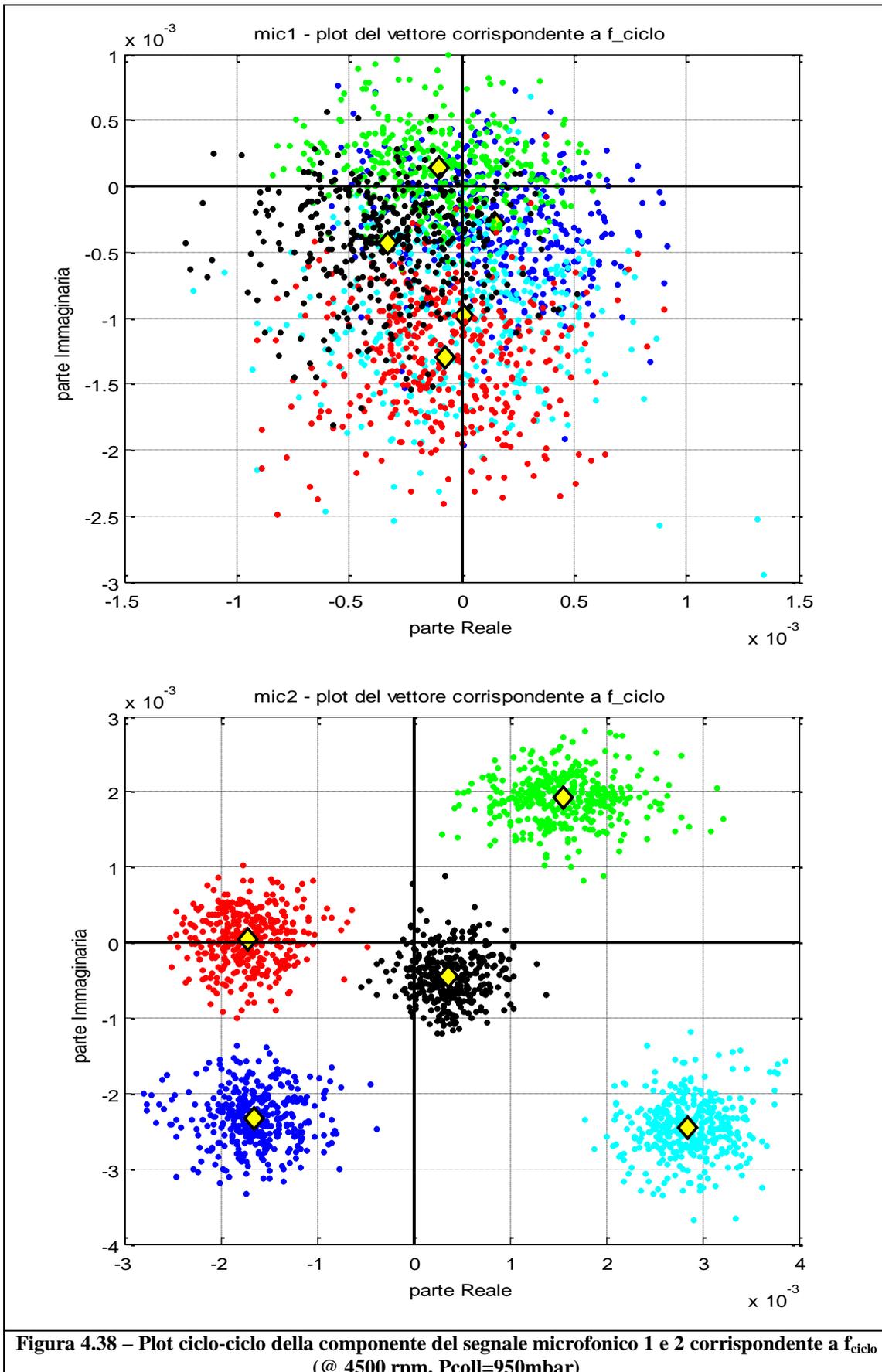


Figura 4.38 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 1 e 2 corrispondente a f_{ciclo} (@ 4500 rpm, Pcoll=950mbar)

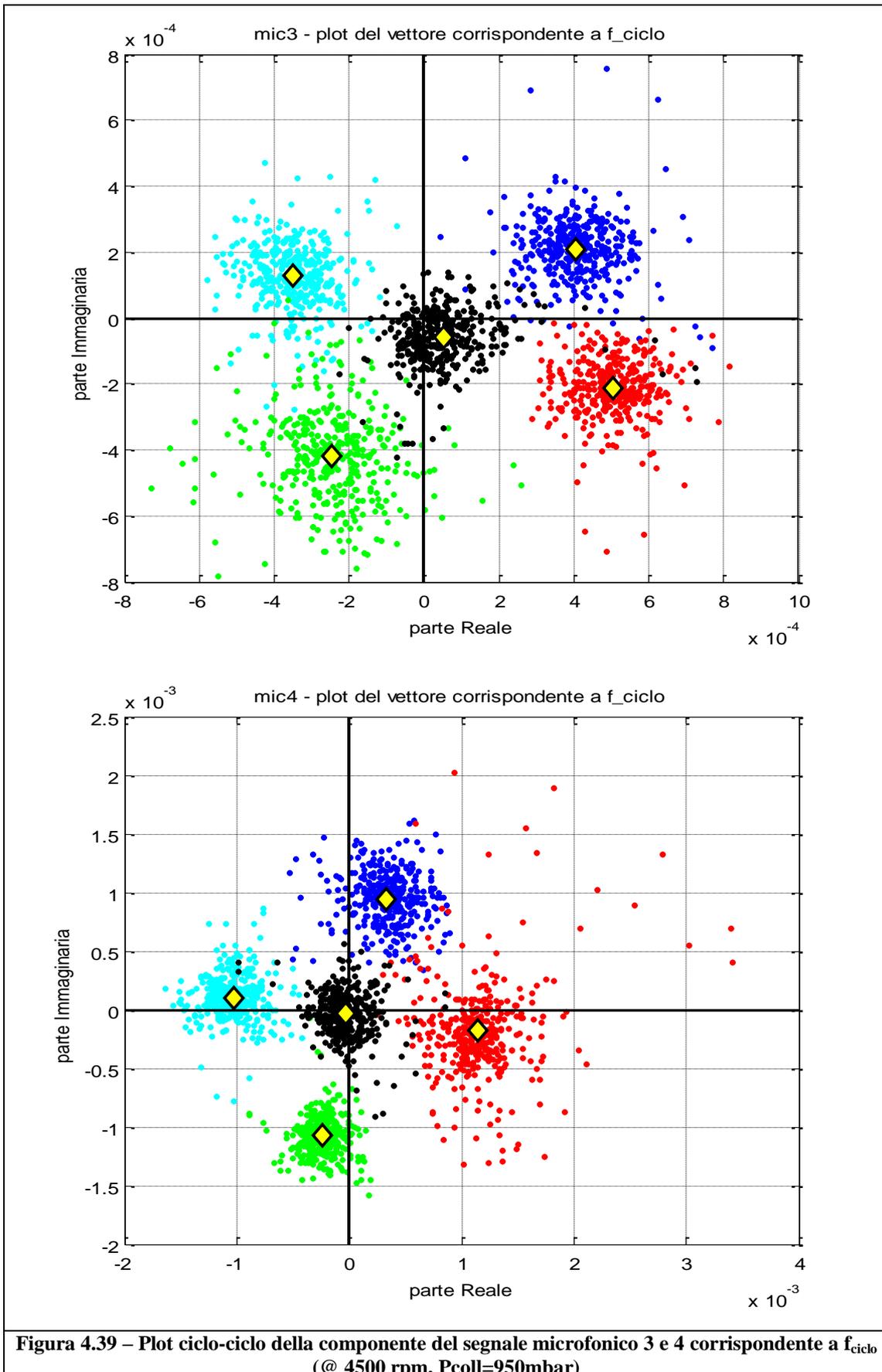


Figura 4.39 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 3 e 4 corrispondente a f_{ciclo} (@ 4500 rpm, Pcoll=950mbar)

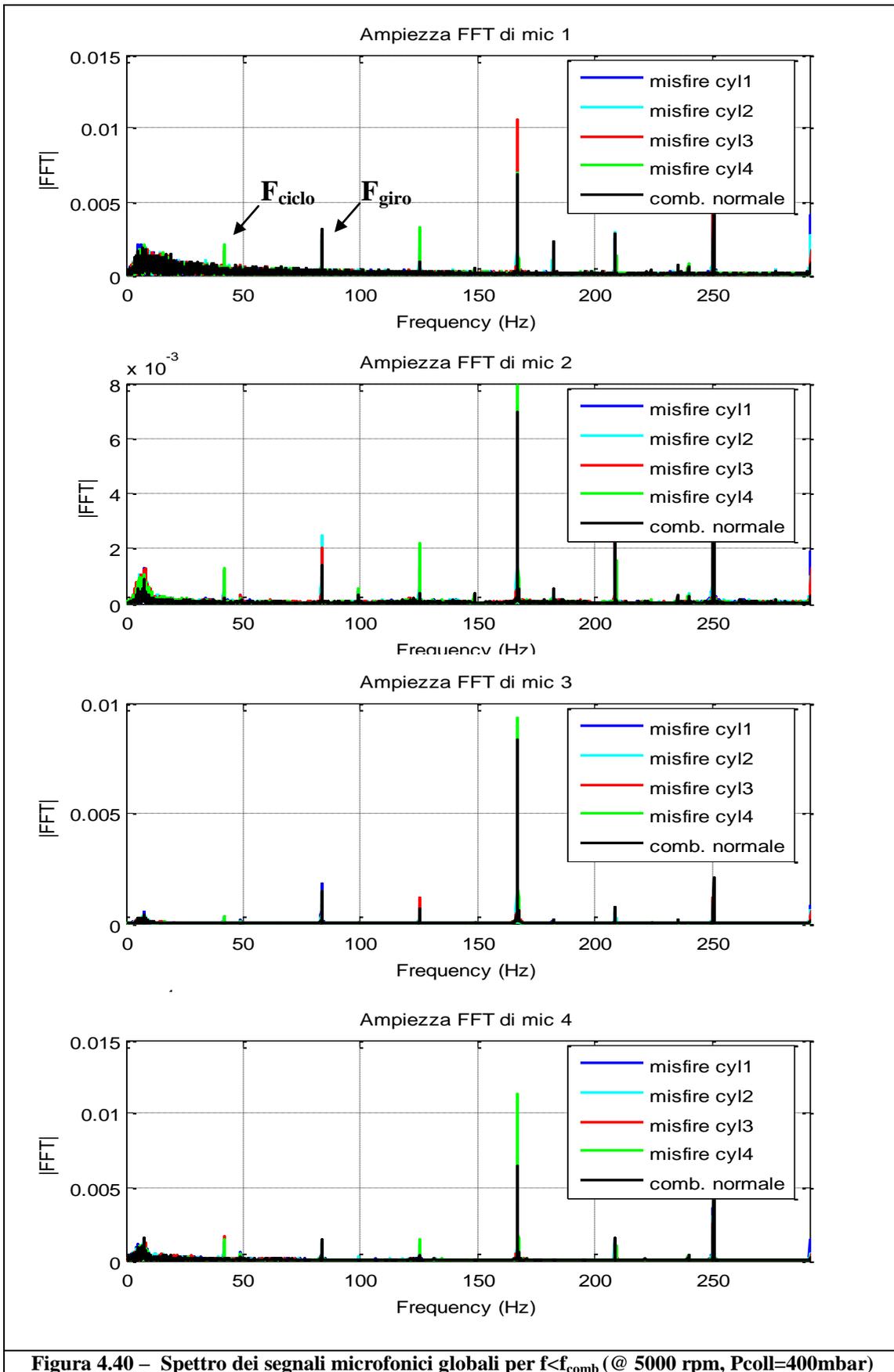


Figura 4.40 – Spettro dei segnali microfonici globali per $f < f_{comb}$ (@ 5000 rpm, $P_{coll}=400\text{mbar}$)

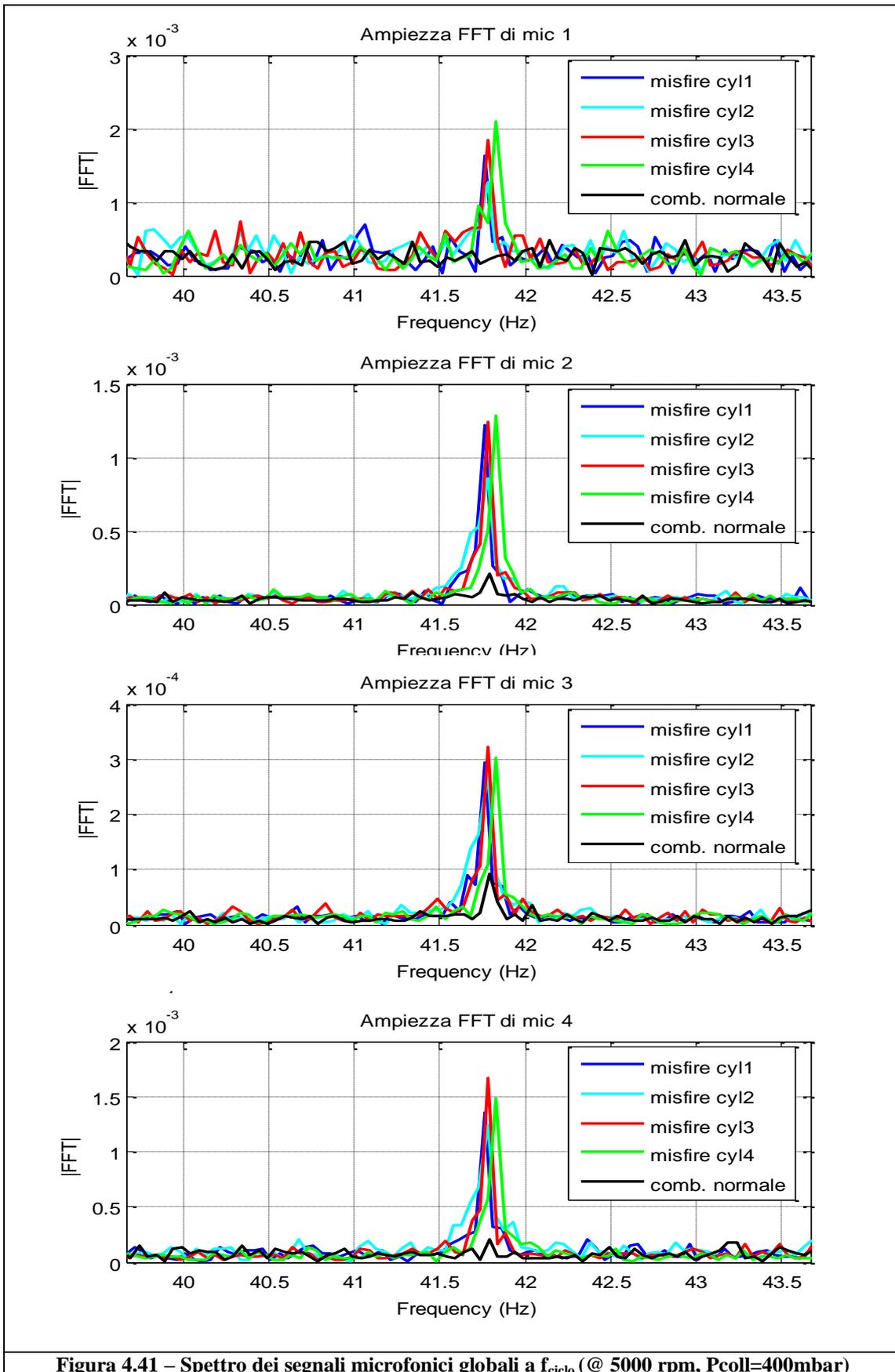
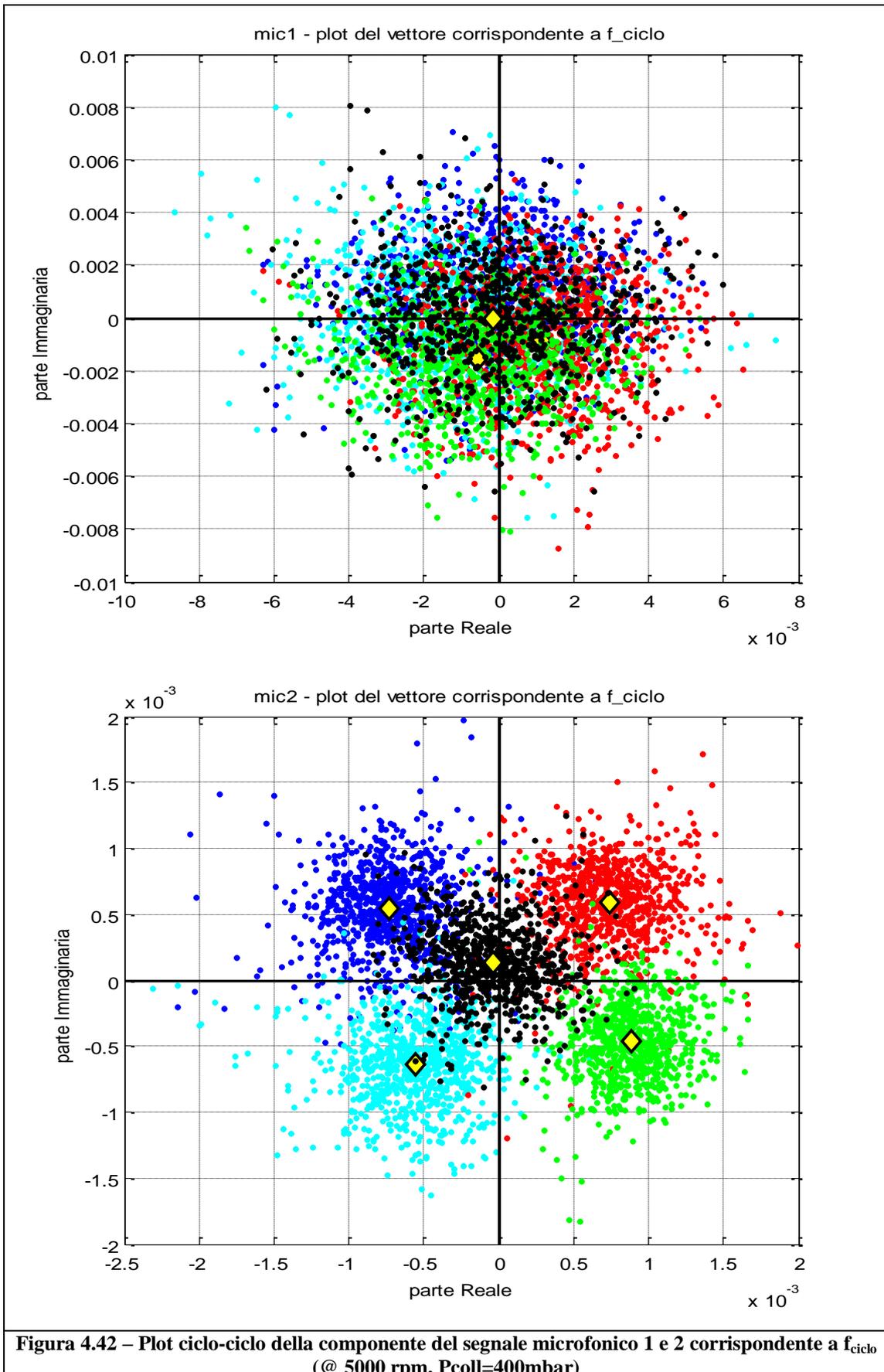


Figura 4.41 – Spettro dei segnali microfonici globali a f_{ciclo} (@ 5000 rpm, $P_{coll}=400\text{mbar}$)



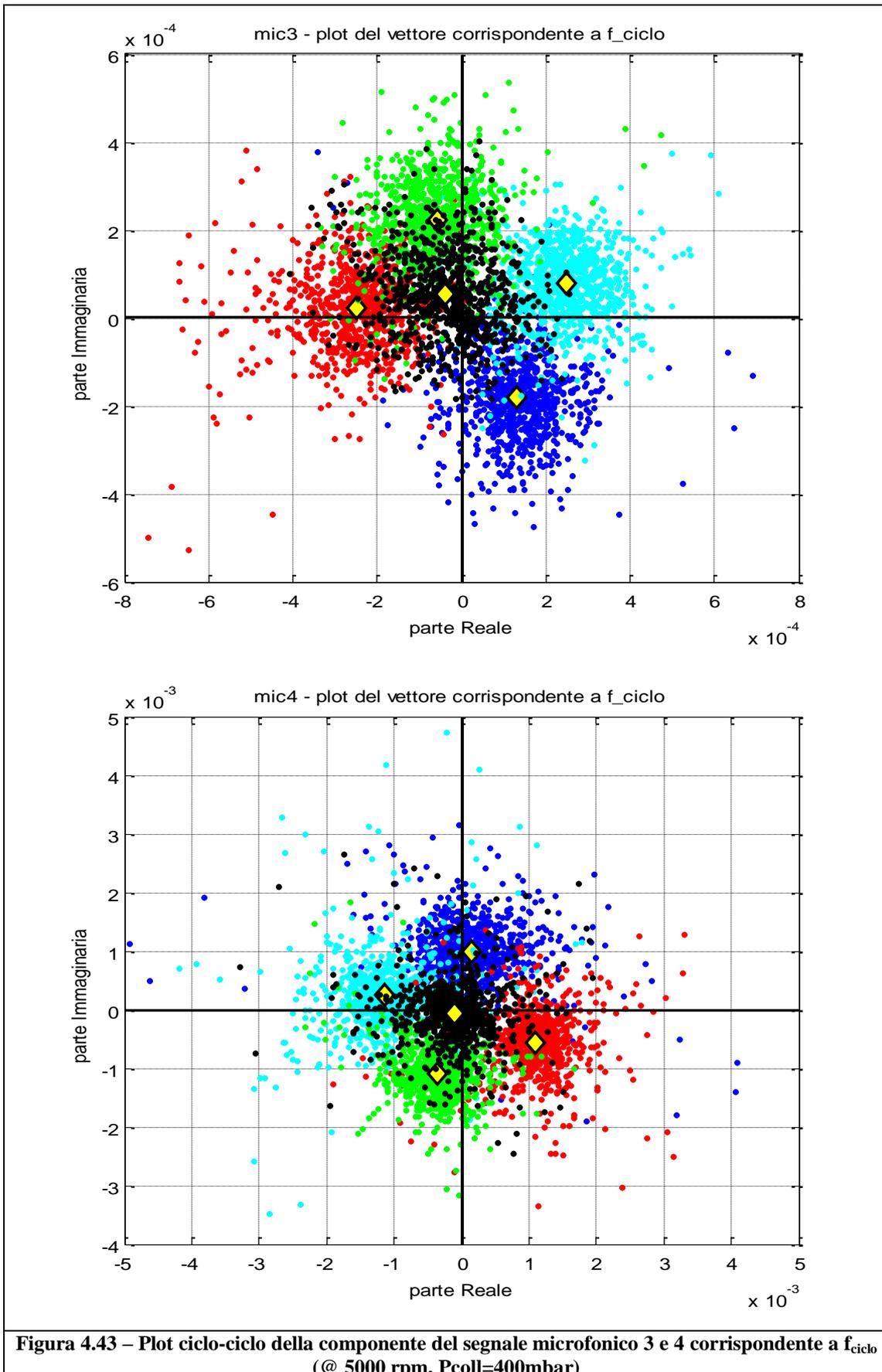


Figura 4.43 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 3 e 4 corrispondente a f_{ciclo} (@ 5000 rpm, Pcoll=400mbar)

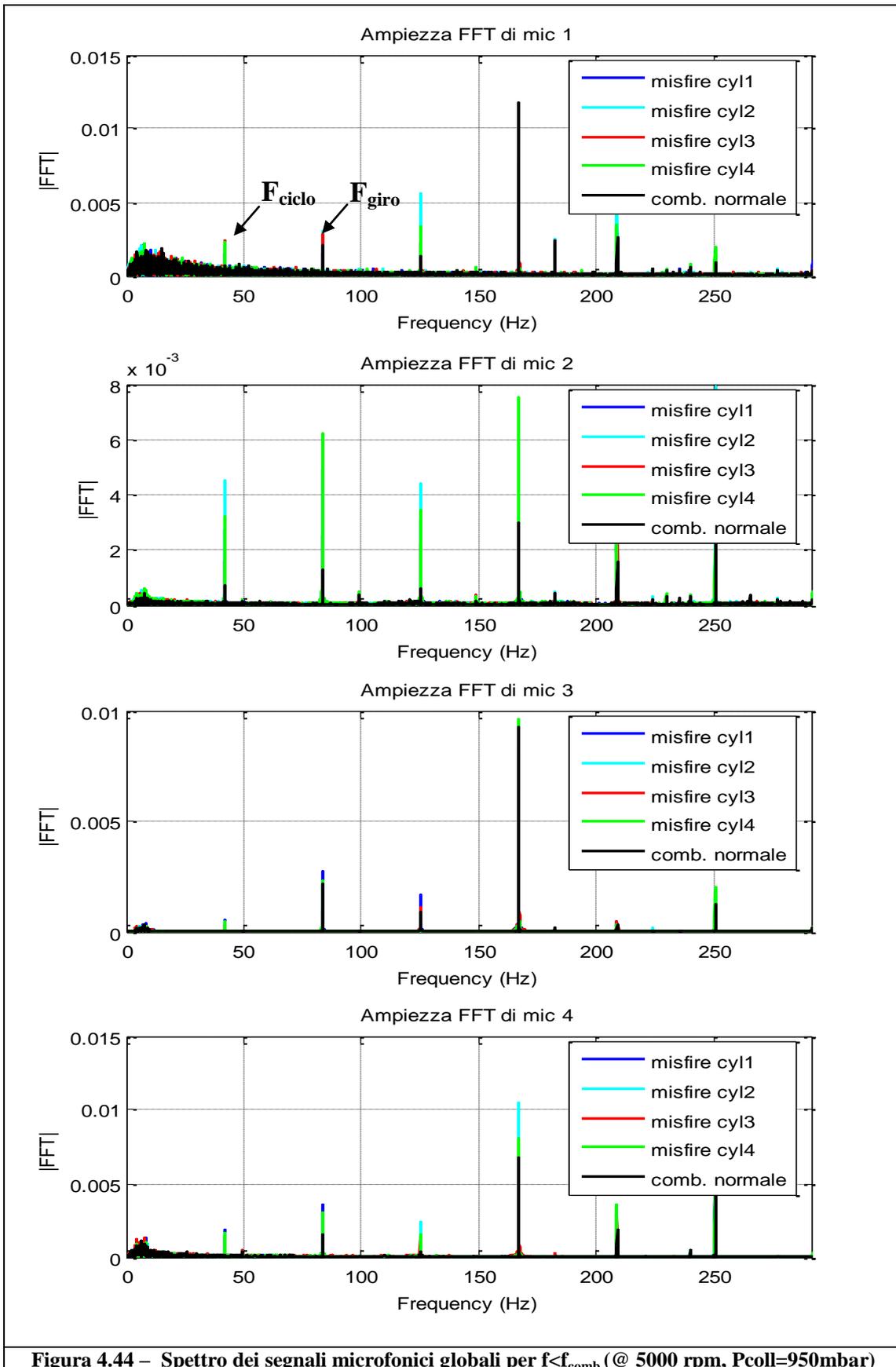


Figura 4.44 – Spettro dei segnali microfonici globali per $f < f_{comb}$ (@ 5000 rpm, $P_{coll}=950\text{mbar}$)

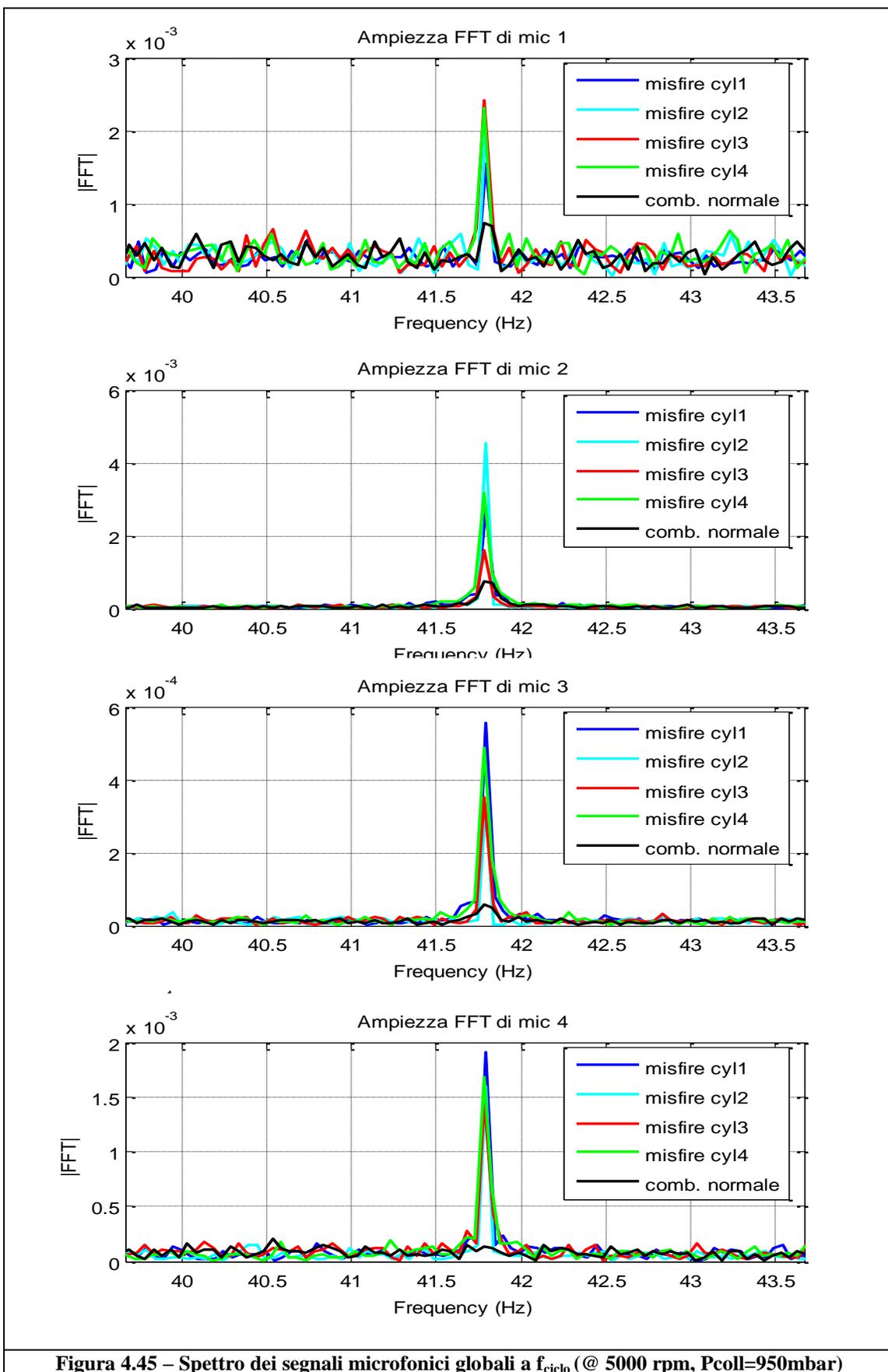


Figura 4.45 – Spettro dei segnali microfonici globali a f_{ciclo} (@ 5000 rpm, $P_{coll}=950\text{mbar}$)

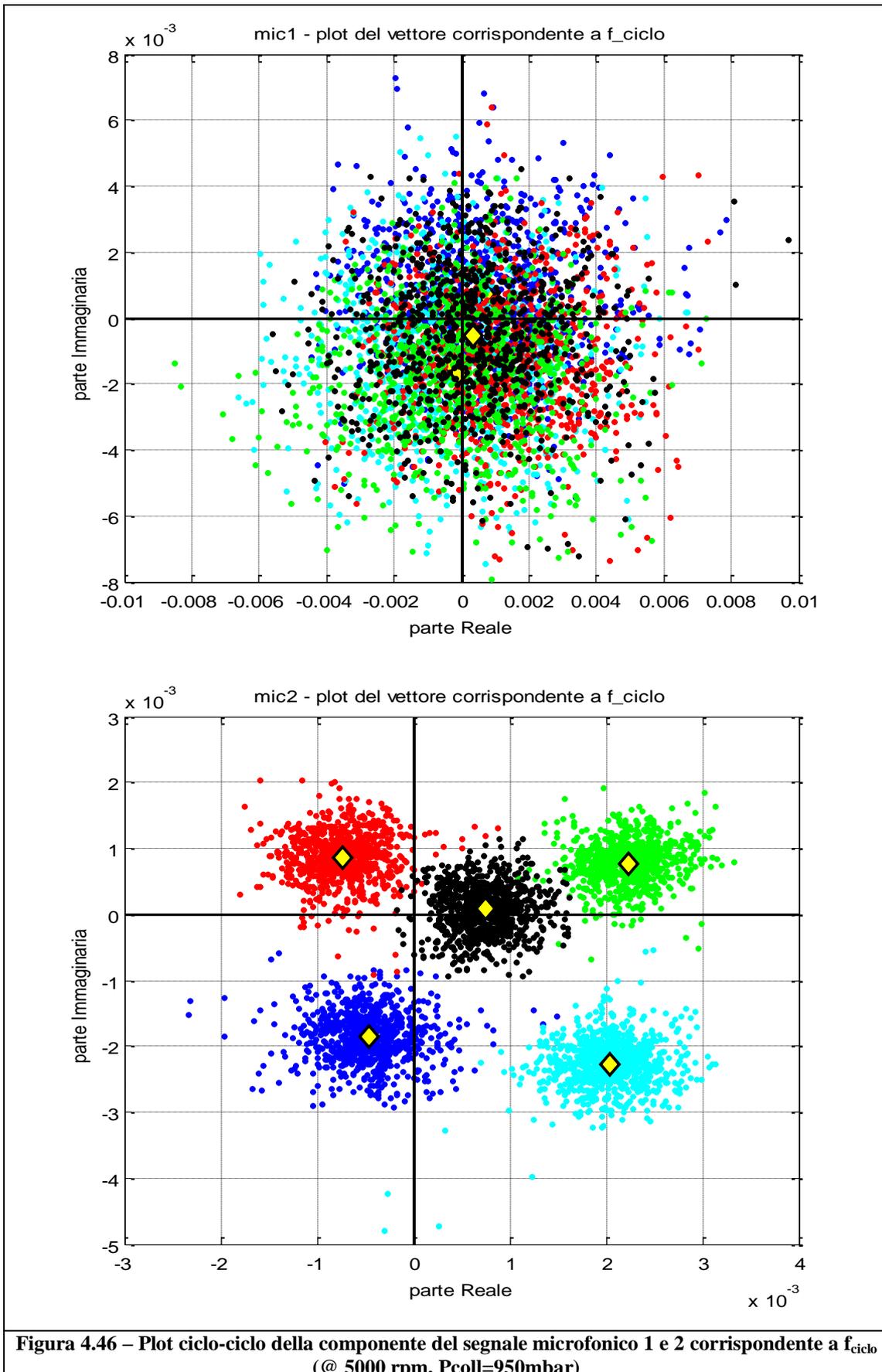


Figura 4.46 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 1 e 2 corrispondente a f_{ciclo} (@ 5000 rpm, $P_{coll}=950\text{mbar}$)

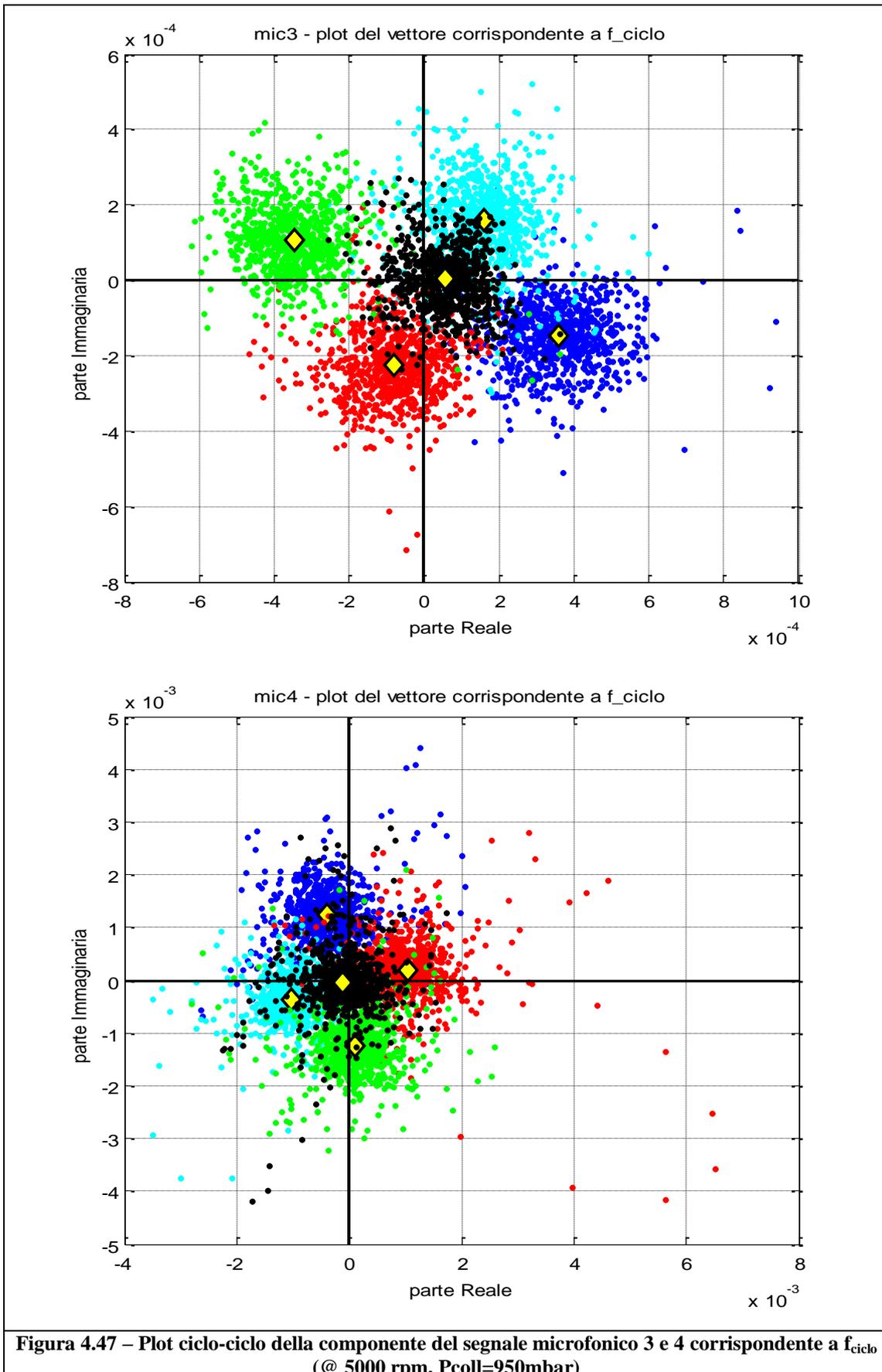


Figura 4.47 – Plot ciclo-ciclo della componente del segnale microfonico 3 e 4 corrispondente a f_{ciclo} (@ 5000 rpm, Pcoll=950mbar)

Osservando i risultati ottenuti, si nota come gli andamenti riscontrati durante l'analisi del precedente database siano rintracciabili anche su questo nuovo set di prove (cfr. figure da 2.27 a 2.36).

Ciò porta ad avvalorare l'ipotesi che, in presenza di misfire continuativo su un singolo cilindro alla volta, il vettore complesso legato alla frequenza di ciclo contenga effettivamente informazioni legate alla mancata combustione.

Confrontando i risultati ottenuti sui microfoni 1 e 4 (utilizzati anche nella precedente campagna sperimentale), si nota in questo caso un minor rapporto segnale-rumore (SNR). Ciò potrebbe essere dovuto a vari fattori, tra cui: una diversa rumorosità delle sale prove utilizzate e dei motori in esame, un posizionamento non esattamente identico dei microfoni e una maggiore lunghezza dei cavi BNC usati per portare i segnali fino all'oscilloscopio.

Per quanto riguarda le prestazioni dei vari microfoni, si nota come il *microfono 2* sia quello che garantisce i migliori risultati durante tutti i punti motore analizzati. Ciò porta a sostenere che il rumore generato dalla mancata combustione si propaghi con maggior intensità in direzione del condotto di scarico e potrebbe essere in qualche modo correlato con le onde di pressione all'interno di quest'ultimo.

Per questo microfono riportiamo anche le performance indicative ottenute impostando delle soglie di diagnosi manuali, che ricordiamo essere definite come:

$$indice_di_performance = \frac{numero_diagnosi_corrette}{numero_cicli_totale} \cdot 100$$

A tutti i punti è stato sottratto il valor medio della nuvola in combustione normale, in modo da far coincidere il sistema di riferimento con il baricentro di tale nuvola.

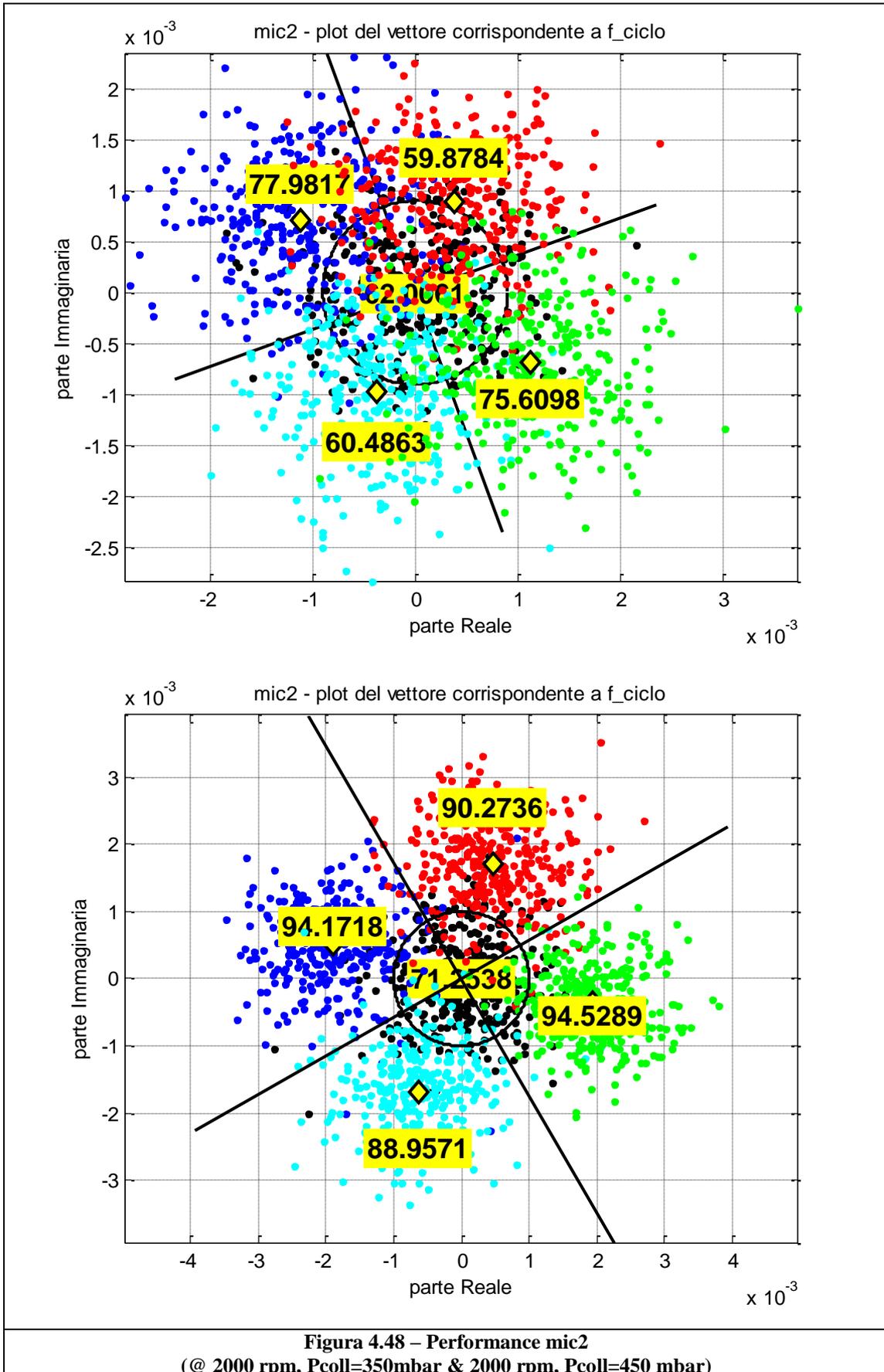


Figura 4.48 – Performance mic2
 (@ 2000 rpm, Pcoll=350mbar & 2000 rpm, Pcoll=450 mbar)

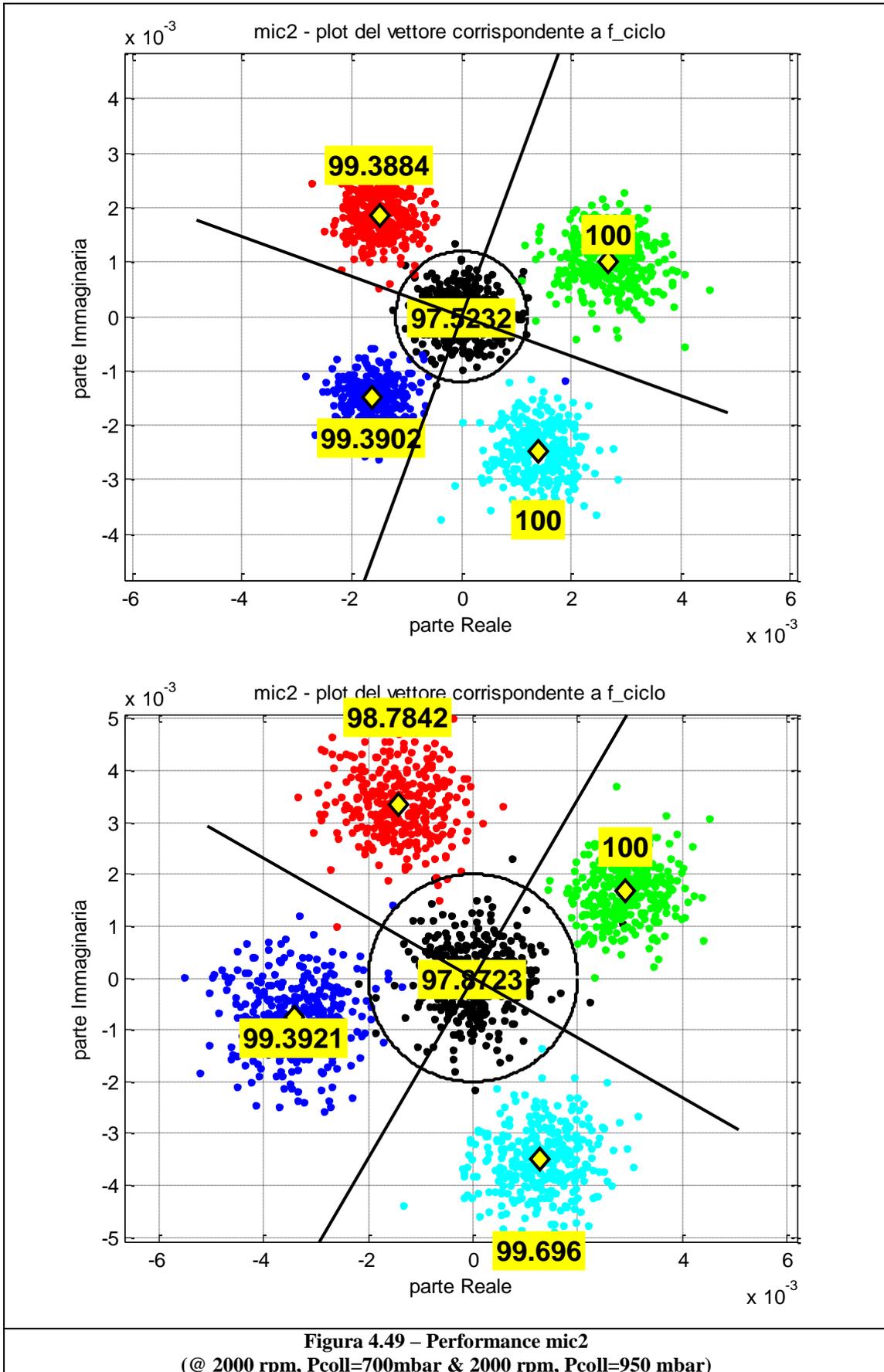


Figura 4.49 – Performance mic2
 (@ 2000 rpm, Pcoll=700mbar & 2000 rpm, Pcoll=950 mbar)

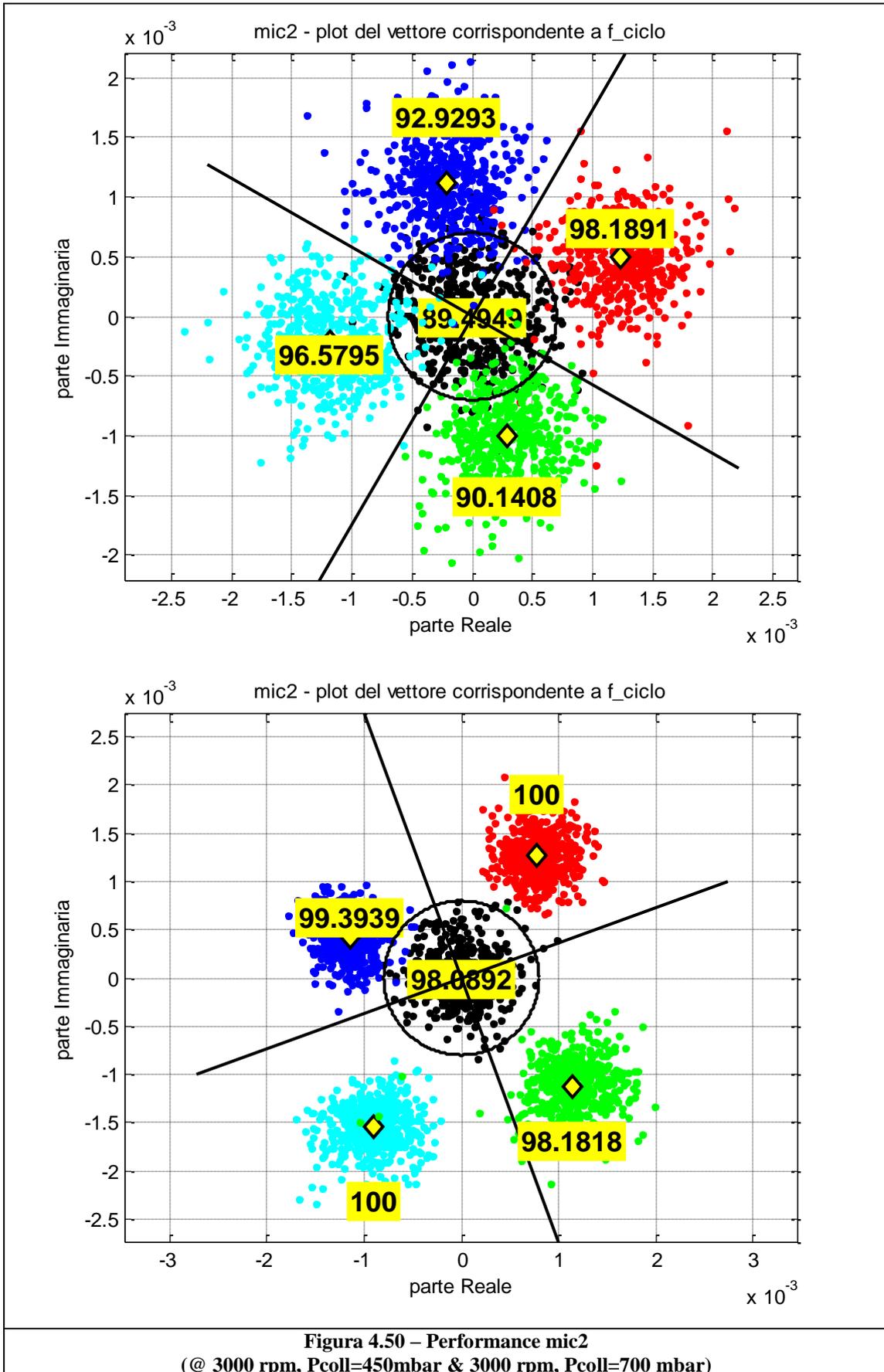


Figura 4.50 – Performance mic2
 (@ 3000 rpm, Pcoll=450mbar & 3000 rpm, Pcoll=700 mbar)

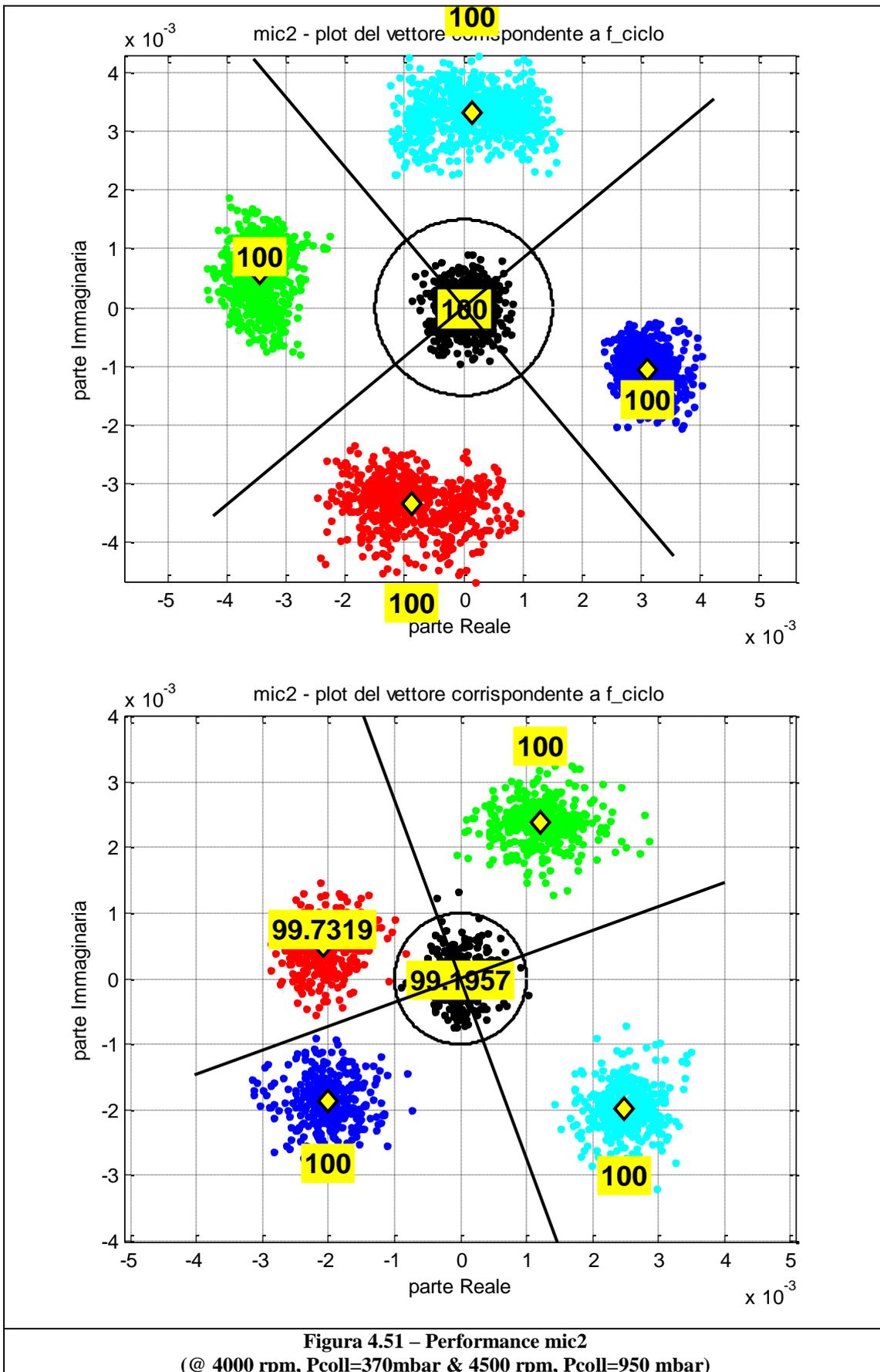


Figura 4.51 – Performance mic2
 (@ 4000 rpm, Pcoll=370mbar & 4500 rpm, Pcoll=950 mbar)

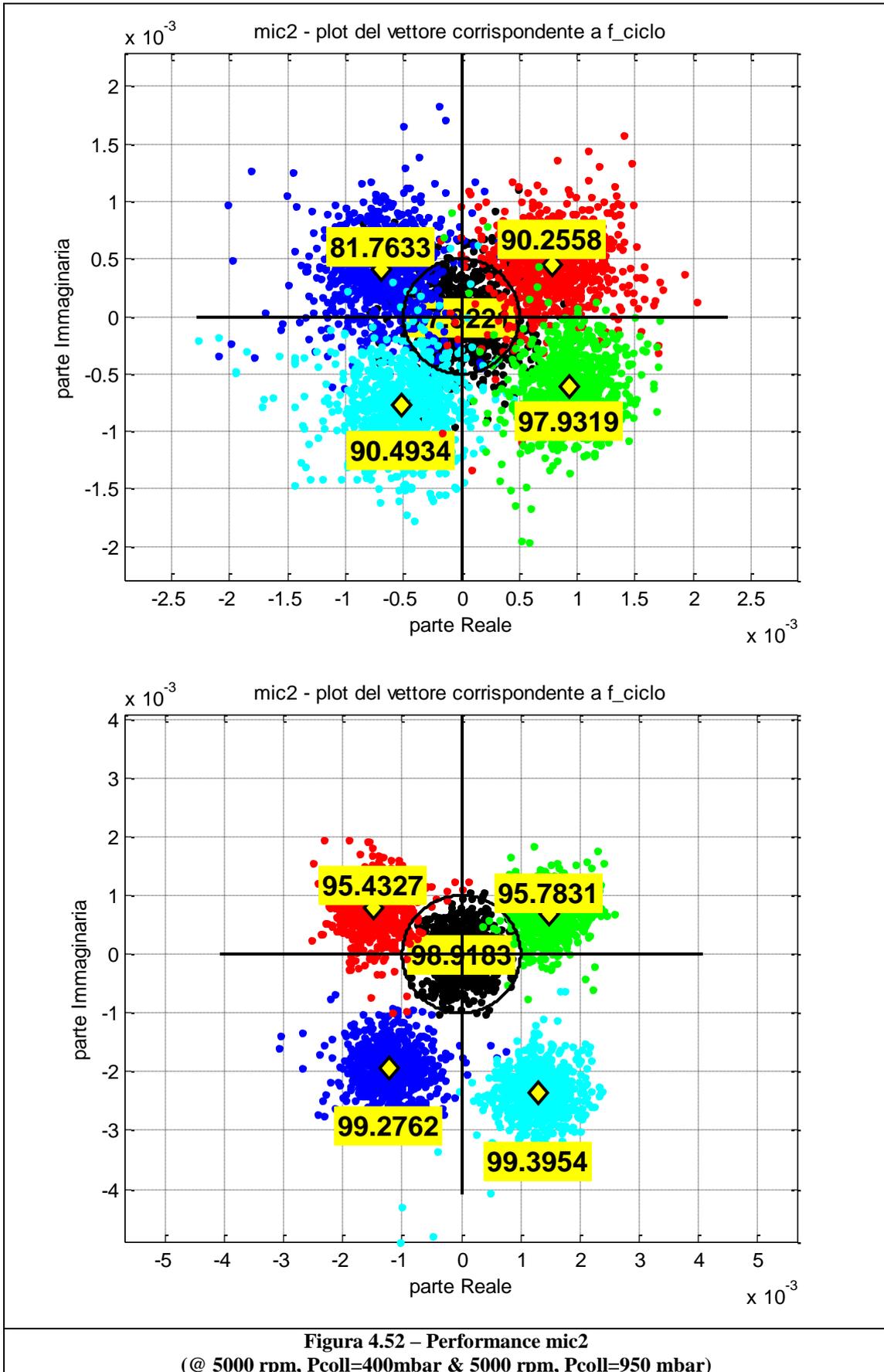


Figura 4.52 – Performance mic2
 (@ 5000 rpm, Pcoll=400mbar & 5000 rpm, Pcoll=950 mbar)

4.1.4 – Ampiezza e fase del vettore valor medio

In ottica di una eventuale mappatura delle soglie di diagnosi da impostare nell’algoritmo (vedi par. 2.6), si è cercato di studiare l’andamento della posizione delle nuvole di punti al variare delle condizioni di funzionamento del motore.

Si è fatto riferimento ai valori assunti dal *vettore valor medio*, ottenuto effettuando la media di tutti i punti e rappresentante il baricentro della nuvola stessa (indicato nelle figure precedenti con un rombo giallo).

Si riportano in seguito i grafici ottenuti plottando ampiezza e fase di tale vettore in funzione del carico e del regime. Si considera solo il microfono 2, in quanto, come sottolineato in precedenza, è quello più affidabile lungo tutto l’arco delle prove. Per quanto riguarda gli altri microfoni gli andamenti sono qualitativamente simili finché il SNR si mantiene accettabile.

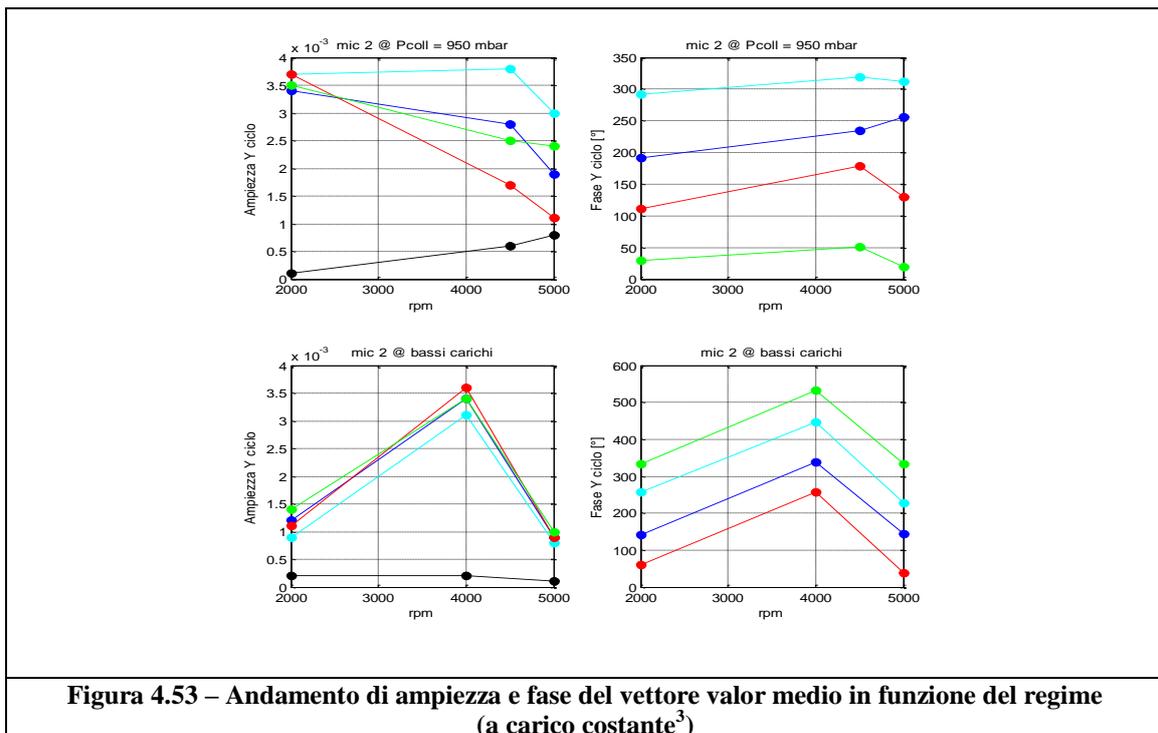
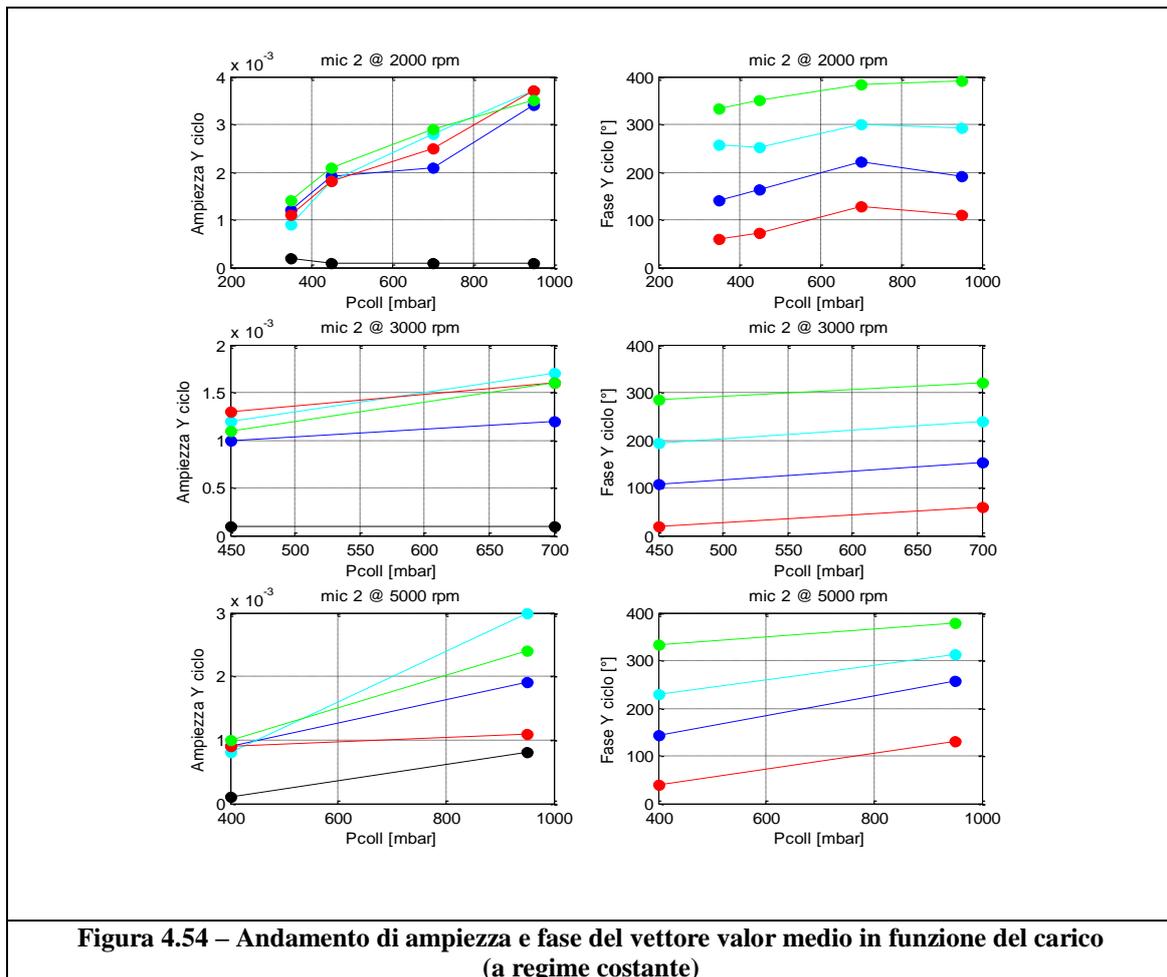


Figura 4.53 – Andamento di ampiezza e fase del vettore valor medio in funzione del regime (a carico costante³)

³ A basso carico Pcoll è leggermente diversa (350mbar@2000rpm, 370mbar@4000rpm, 400mbar@5000rpm) a causa del fatto che per evitare lo spegnimento del motore durante le prove con misfire è stato necessario modificare il carico in funzione del regime. Si tratta quindi di punti di funzionamento a carico minimo, pertanto particolarmente critici dal punto di vista diagnostico.



Da una analisi qualitativa di tali andamenti, si può notare come l'ampiezza del vettore valor medio tenda ad aumentare con il carico. Ciò significa che le nuvole di punti tendono ad allontanarsi dal centro del piano complesso, rendendo più facilmente distinguibile una combustione normale da una con mancata accensione. Tale comportamento potrebbe essere dovuto al fatto che, aumentando il carico e quindi la quantità di combustibile introdotta, la combustione generi maggiore energia, il che si traduce in una maggiore rumorosità del motore (e/o in un maggiore contenuto energetico dei gas allo scarico) e in un più elevato contenuto energetico del segnale audio stesso.

Mantenendo il carico costante e facendo variare il regime, si nota invece come l'ampiezza in caso di misfire tenda a diminuire, mentre quella in caso di combustione normale tenda ad aumentare (perlomeno a pieno

carico; ai bassi regime l'andamento non è chiaro). Ciò significa che la diagnosi si rivelerà sempre più difficoltosa e potrebbe essere imputabile al fatto che, all'aumentare del regime del motore, il rumore generato dalla rotazione delle parti meccaniche diventi preponderante rispetto a quello derivante dalla combustione.

Per quanto riguarda la fase, invece, si riscontrano dei trend di rotazione comuni alle 4 nuvole di punti, ma l'interpretazione fisica di tale fenomeno non è tuttora ben chiara, data la scarsa conoscenza che si ha del processo di propagazione delle onde sonore nello spazio e soprattutto data l'incertezza su quale sia effettivamente la fonte di emissione di tali onde.

4.2 – *Misfire multiplo su due cilindri*

Procediamo ora allo studio delle prove effettuate inducendo mancate accensioni in modo continuativo su due cilindri contemporaneamente.

Tali prove sono state realizzate al fine di testare la risposta dell'algoritmo anche su questa tipologia di malfunzionamento. La normativa OBDII richiede infatti che, in presenza di misfire su più cilindri, il sistema di diagnosi sia in grado di riconoscere tale anomalia, distinguendola dal caso di misfire singolo. In questo caso, però, non è necessario individuare quali siano i cilindri in cui avvenga la mancata combustione.

Sono state effettuate due tipologie di prove (si ricorda che l'ordine di accensione è 1-3-4-2):

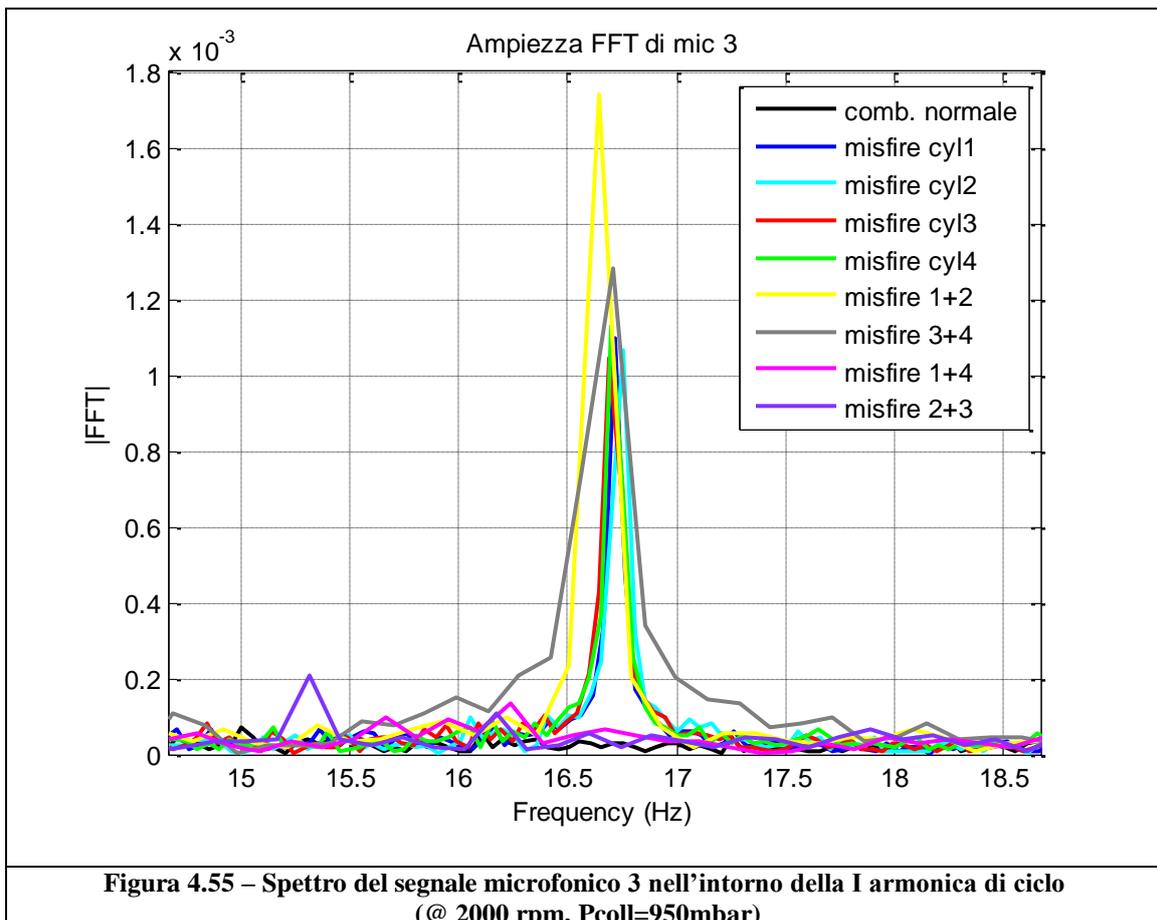
- Inducendo *misfire su cilindri consecutivi*: 1+2 e 3+4
- Inducendo *misfire su cilindri non consecutivi*: 1+4 e 2+3

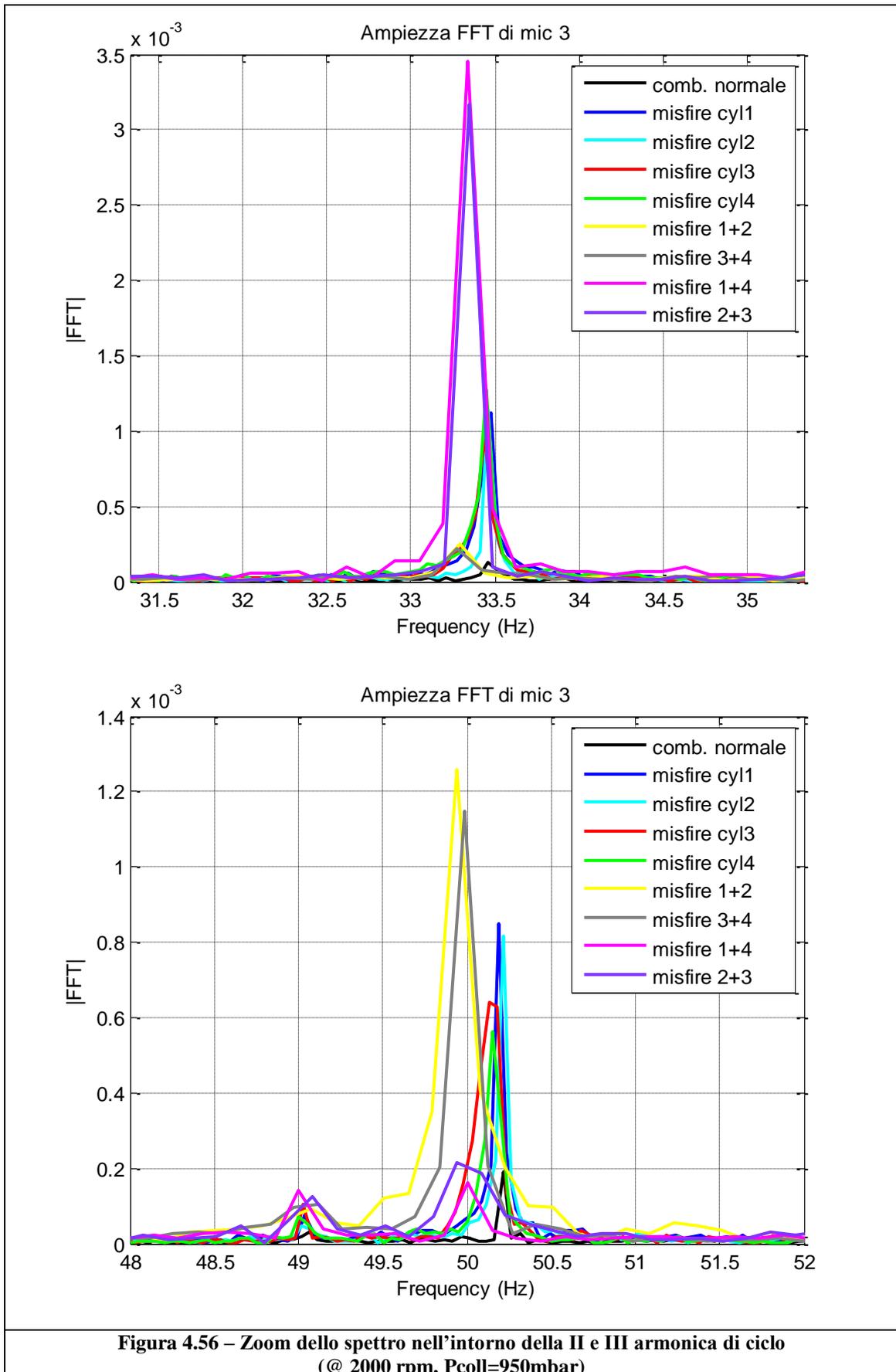
Tale scelta è stata fatta per analizzare l'influenza dell'ordine di accensione sul contenuto in frequenza del segnale microfonico e per testare se l'algoritmo riesca a distinguere anche la fase dei cilindri in misfire.

Anche in questo caso siamo partite dall'analisi della prova a 2000 rpm e 950 mbar di pressione collettore.

Si riportano in seguito le immagini relative allo spettro del segnale microfonico risultato più performante per la data prova, zoomato nell'intorno della I, II e III armonica di ciclo (fig. 4.55 e 4.56).

Al fine di distinguere meglio le differenze tra questo tipo di malfunzionamento e quello con misfire singolo, si è plottato sullo stesso grafico anche lo spettro del segnale audio relativo a tali prove, oltre a quello relativo alla condizione di funzionamento normale.





Dall'analisi visiva degli spettri, si nota che, in caso di misfire su cilindri non consecutivi, il contenuto energetico alla f_{giro} (*II armonica di ciclo*) risulta più elevato rispetto agli altri casi.

In presenza di misfire su cilindri consecutivi, invece, la componente alla f_{ciclo} risulta di ampiezza paragonabile ai casi con misfire singolo, mentre si nota un contenuto energetico più elevato sulla *III armonica di ciclo*.

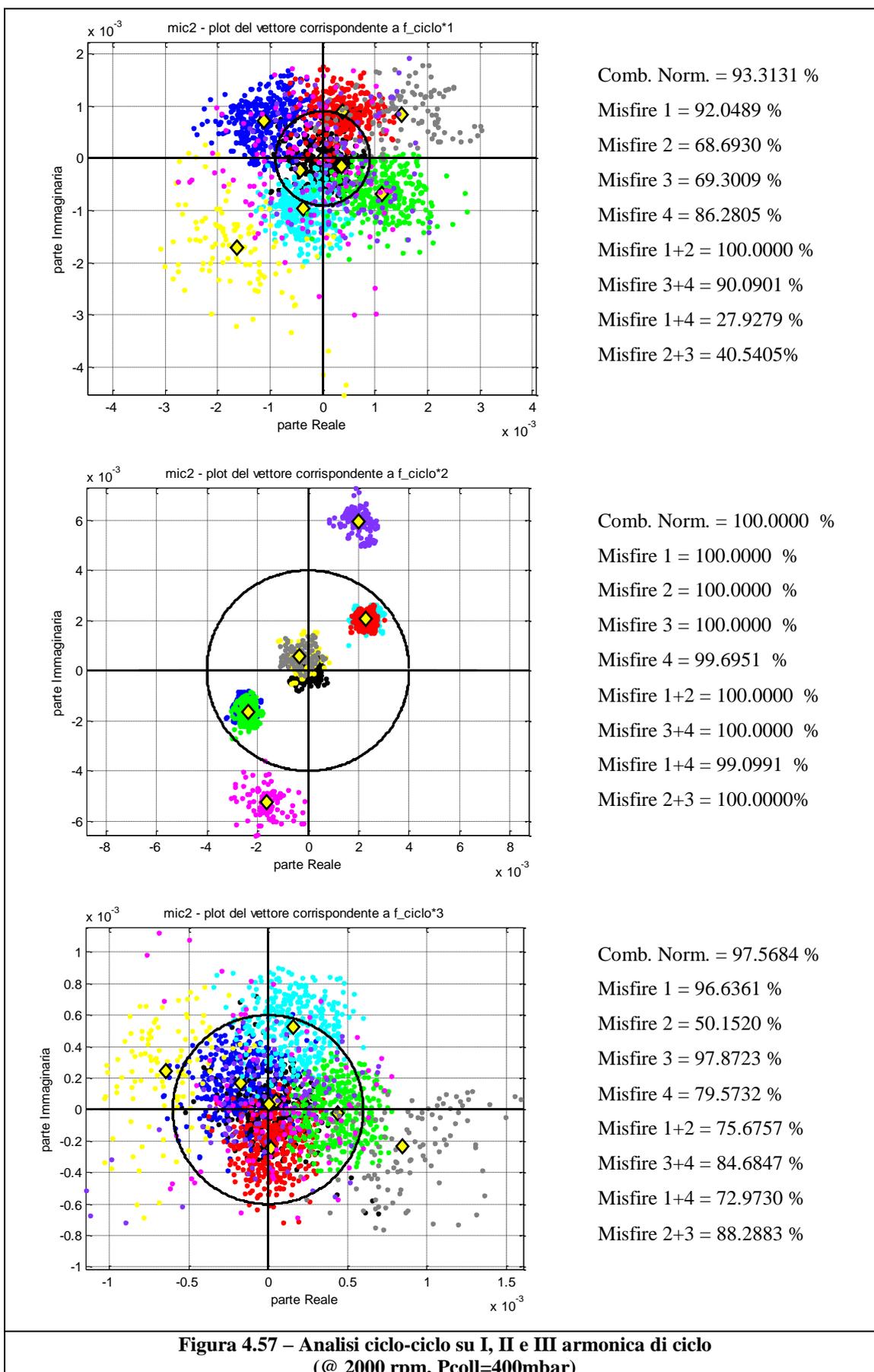
Per cercare di valutare la possibilità di individuare delle soglie di diagnosi, si è effettuata anche un'analisi ciclo-ciclo sulle diverse armoniche.

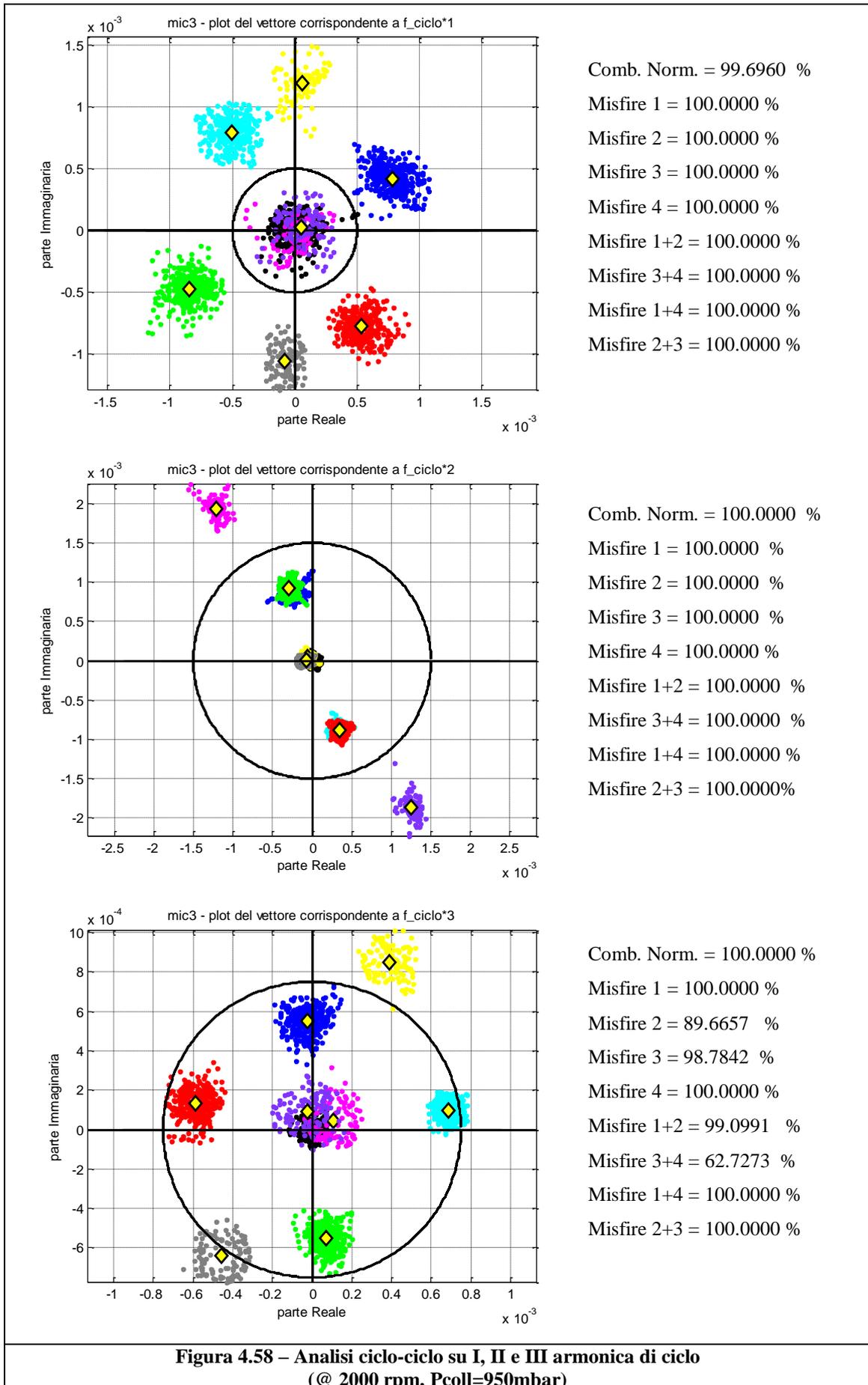
Riportiamo nelle figure seguenti i risultati ottenuti nei casi migliori, utilizzando un filtraggio passa-banda ideale a ± 2 Hz dalla frequenza di interesse e una finestra di tipo Tuckey con $\text{ratio}=0.65$. Si è usato questo filtraggio perché si è notato che stringendo la banda passante si migliora il SNR, a causa della presenza di “rumore” alle basse frequenze.

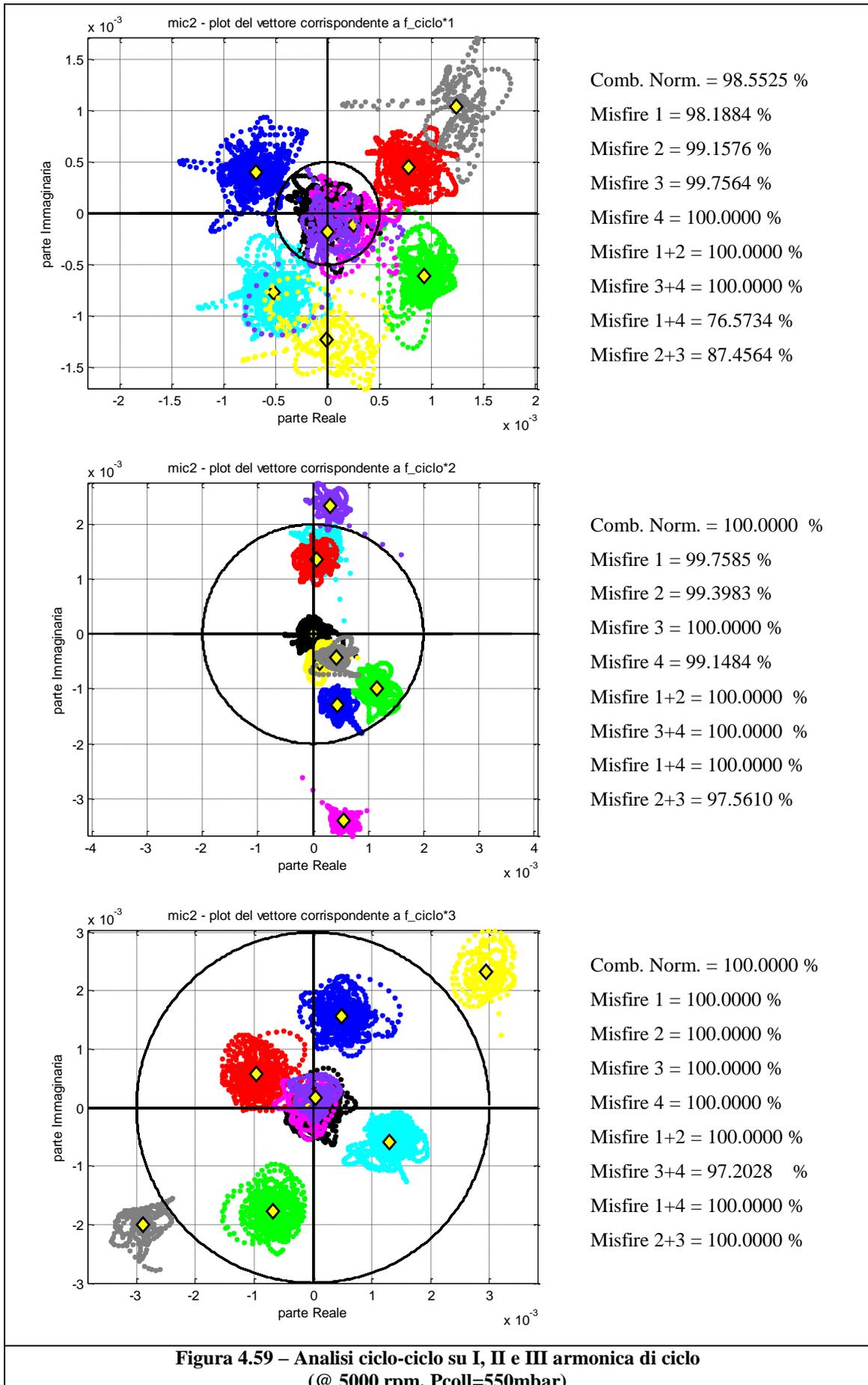
Sono state poste anche delle soglie di primo tentativo per avere un'idea di massima delle capacità diagnostiche dell'algoritmo nelle varie prove a disposizione. Accanto ad ogni figura si riporta anche la percentuale di diagnosi corrette effettuate, seguendo lo schema logico indicato in fig. 4.67.

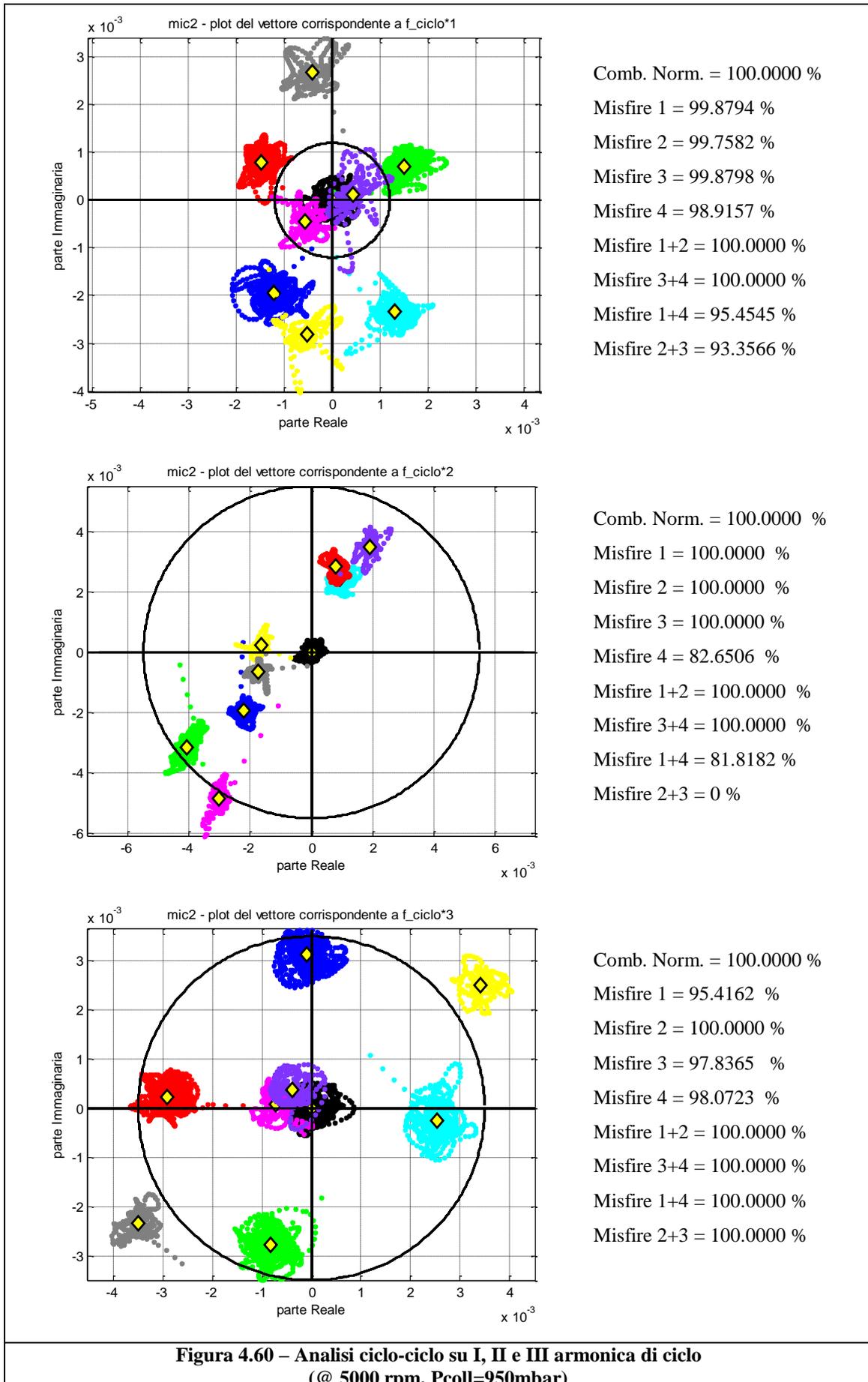
Si ricorda che tali soglie andrebbero poi ottimizzate, seguendo per esempio le linee guida accennate nei paragrafi 2.6.1 e 2.6.2.

Per i colori dei punti si fa riferimento alla legenda utilizzata nelle figure precedenti.









**Figura 4.60 – Analisi ciclo-ciclo su I, II e III armonica di ciclo
(@ 5000 rpm, Pcoll=950mbar)**

4.3 - Schema per la diagnosi di misfire continui

Da quanto evidenziato nei paragrafi precedenti, risulta possibile impostare un primo schema indicativo su cui basare un algoritmo per la diagnosi di misfire continui.

Si è visto infatti che, quando il malfunzionamento si presenta in maniera continuativa, è possibile mappare delle soglie al superamento delle quali l'algoritmo sia in grado di distinguere una mancata combustione da una combustione normale.

In particolare, seguendo quanto visto in precedenza, le soglie andrebbero poste su I, II e III armonica di ciclo.

Se l'ampiezza della II armonica di ciclo supera il valore di soglia, contemporaneamente ad un basso valore di I e III armonica, l'algoritmo diagnosticherà una situazione di *misfire multiplo su cilindri non consecutivi* in ordine di accensione. Dall'analisi della fase sarà poi in grado di distinguere se si tratti dei cilindri 1+4 o 2+3.

Se, invece, la soglia viene superata sulla I armonica di ciclo l'algoritmo diagnosticherà una situazione di misfire, non essendo però ancora in grado di distinguere se si tratti di misfire su un singolo cilindro o su due cilindri consecutivi.

A questo punto è necessario valutare anche l'ampiezza della III armonica di ciclo. Se tale ampiezza supera il valore di soglia saremo in presenza di *misfire multiplo su cilindri consecutivi* e tramite lo studio della fase si potrà distinguere di quali cilindri si tratti.

Se tale soglia non viene superata, l'algoritmo diagnosticherà la presenza di *misfire su un singolo cilindro* e tramite l'individuazione della fase della I armonica sarà in grado di individuare il cilindro in misfire.

Tutte queste soglie andranno ovviamente mappate accuratamente in funzione delle condizioni di funzionamento del motore, della posizione del microfono e del tipo di filtraggio e finestrazione utilizzato.

Nella pagina seguente (fig. 4.61) si riporta una diagramma a blocchi indicativo del processo di diagnosi sopra descritto. Tale schema logico è stato utilizzato nel paragrafo precedente per determinare le percentuali di diagnosi corrette che l'algoritmo sarebbe in grado di rilevare (vedi fig. da 4.57 a 4.60). In tal caso i valori si riferiscono solo al superamento delle soglie in ampiezza per le tre armoniche, in quanto un primo studio sulla capacità di diagnosticare anche il singolo cilindro in misfire tramite la fase della I armonica di ciclo era già stato svolto in precedenza (vedi fig. da 4.48 a 4.52). In caso di misfire doppio, invece, la distinzione tra le diverse combinazioni di cilindri in malfunzionamento sarebbe banale, in quanto le nuvole di punti si dispongono su semipiani opposti.

Per quanto riguarda le performance dell'algoritmo appena definito, si nota che in certe condizioni di funzionamento del motore è possibile raggiungere valori ottimi, mentre in altri punti motore l'algoritmo entra in difficoltà nell'individuazione di certi malfunzionamenti (vedi fig. 4.57 misfire 1+4 e 2+3 e fig. 4.60 misfire 2+3).

Ciò porta a pensare che il metodo impostato sia potenzialmente in grado di realizzare una diagnosi misfire efficace nel caso in cui il malfunzionamento si presenti in modo continuativo. Certamente, però, ci sono condizioni di funzionamento in cui, dalle prove a nostre disposizione, risulta che questo metodo entri in difficoltà. Tali condizioni andrebbero sicuramente analizzate più dettagliatamente, per cercare di vedere se, tramite l'ottimizzazione della catena di misura, del filtraggio, della finestrazione e magari utilizzando anche indici legati alla somma pesata dell'ampiezza delle tre armoniche, si sia in grado di migliorarne le prestazioni.

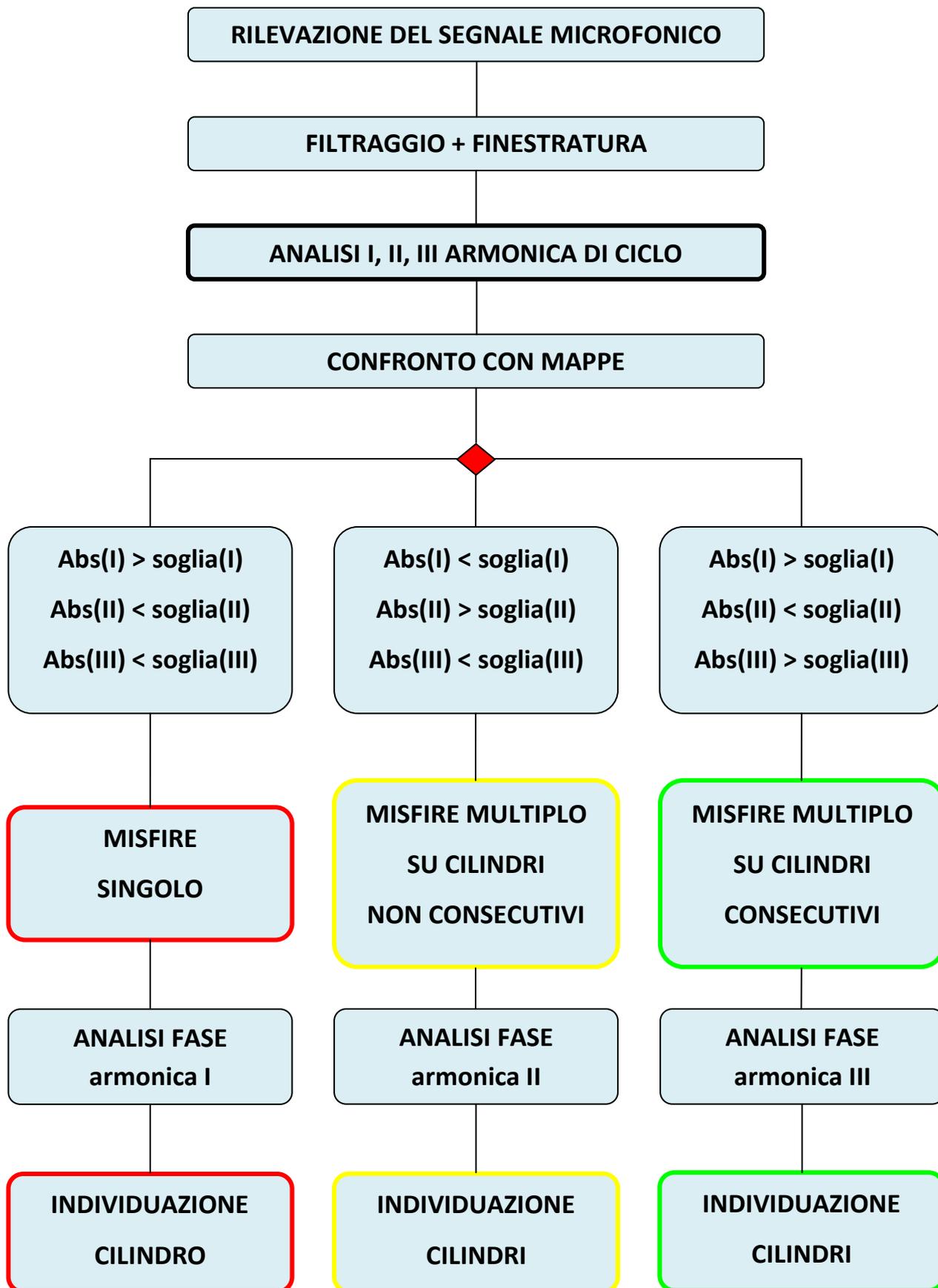


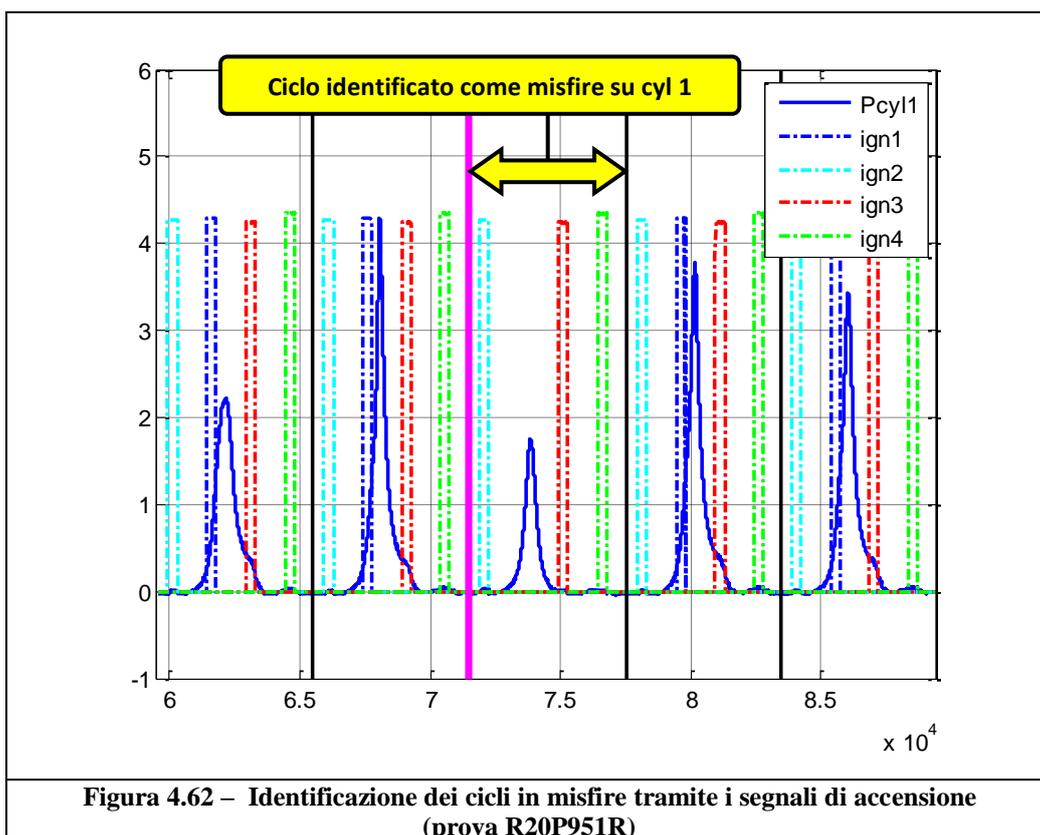
Figura 4.61 - Schema indicativo dell' algoritmo di diagnosi per misfire continui

4.4 - Misfire random su un singolo cilindro

Una volta studiato il contenuto informativo del microfono in caso di misfire continuo, si è cercato di analizzarne il comportamento anche in caso di mancata accensione indotta soltanto durante un ciclo ogni n (cioè in modo saltuario), al fine di testare la sensibilità dell'algoritmo.

Secondo quanto visto fino ad ora, ciò che ci aspettavamo da questo tipo di prova era l'ottenimento di un grafico sul piano complesso con i punti relativi ai cicli in combustione normale concentrati intorno all'origine e i punti relativi ai cicli con misfire divergenti verso le zone caratteristiche individuate nel caso di misfire continuo.

Per identificare i cicli con misfire si è fatto riferimento ai segnali di accensione, andando ad individuare il ciclo in cui tale segnale per un dato cilindro non fosse presente (vedi fig. 4.62; la linea magenta identifica l'inizio del ciclo in misfire).



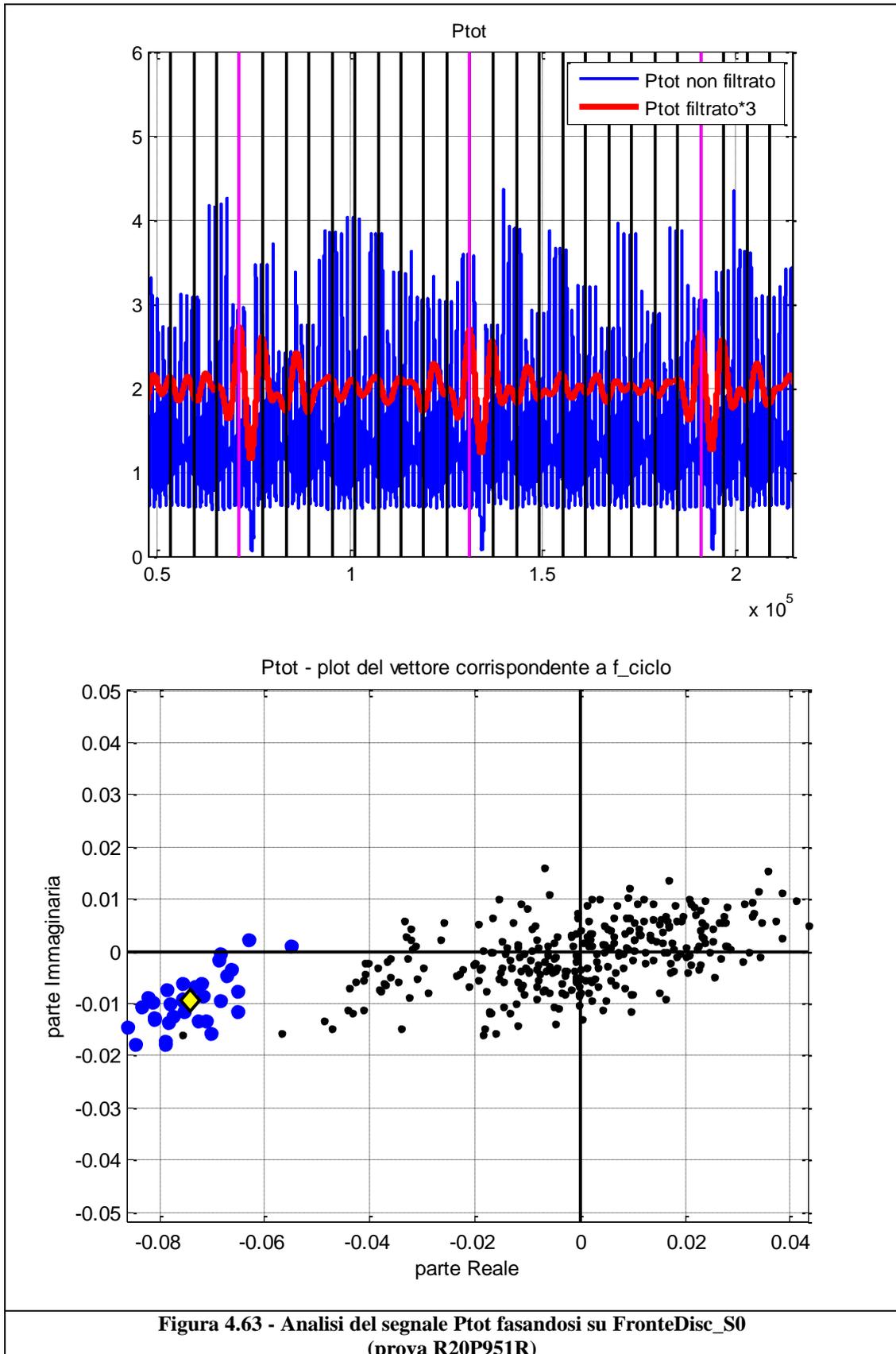
Una volta individuati il ciclo e il cilindro in misfire, si è utilizzata questa informazione per plottare il punto relativo a tale ciclo con lo stesso colore utilizzato nei grafici precedenti (blu - misfire cyl1; celeste - misfire cyl2; rosso - misfire cyl3; verde - misfire cyl4, nero - comb. norm.). In tal modo è possibile identificare immediatamente la posizione di tali punti sul piano complesso.

Inizialmente si è partiti dalla prova R20P951R, con misfire indotto 1 volta ogni 10 cicli solo sul cilindro 1. Sono stati usati gli stessi settaggi e la stessa fasatura (FronteDisc_S0) utilizzati nelle prove precedenti, per cercare di vedere come rispondeva l'algoritmo in tale situazione.

Per avere un segnale di riferimento, si è creato un segnale P_{tot} che simulasse condizioni di funzionamento analoghe a quelle della prova in esame. È stato necessario riprodurlo artificialmente in quanto avevamo a disposizione solo 2 sensori di pressione in camera e quindi si è dovuto sfasare e sommare opportunamente tali segnali per ricreare un segnale simile a quello che si avrebbe avendo a disposizione tutti i cilindri strumentati (vedi fig. 4.63-1).

Riportiamo nelle figure seguenti i risultati ottenuti, mostrando sia l'andamento temporale dei segnali filtrati (zoomato su 3 cicli di misfire) che la nuvola di punti che si ottiene effettuando l'analisi ciclo-ciclo dell'armonica di ciclo.

I punti blu rappresentano i cicli identificati come misfire sul cilindro 1 (chiamati *cicli_mis1* nel codice Matlab; in figura sono i cicli immediatamente successivi alla linea magenta).



**Figura 4.63 - Analisi del segnale Ptot fasandosi su FronteDisc_S0
(prova R20P951R)**

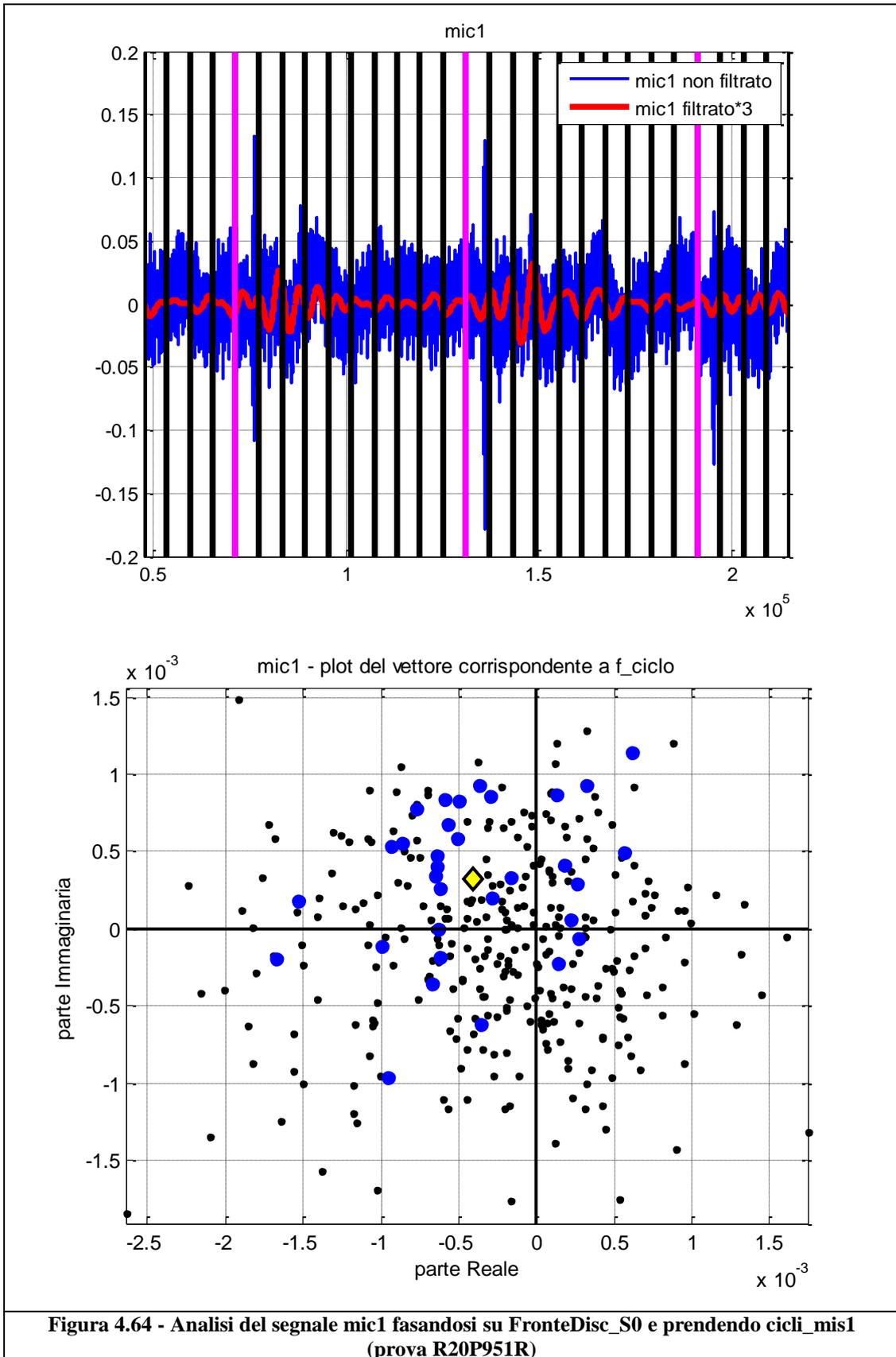


Figura 4.64 - Analisi del segnale mic1 fasandosi su FronteDisc_S0 e prendendo cicli_mis1 (prova R20P951R)

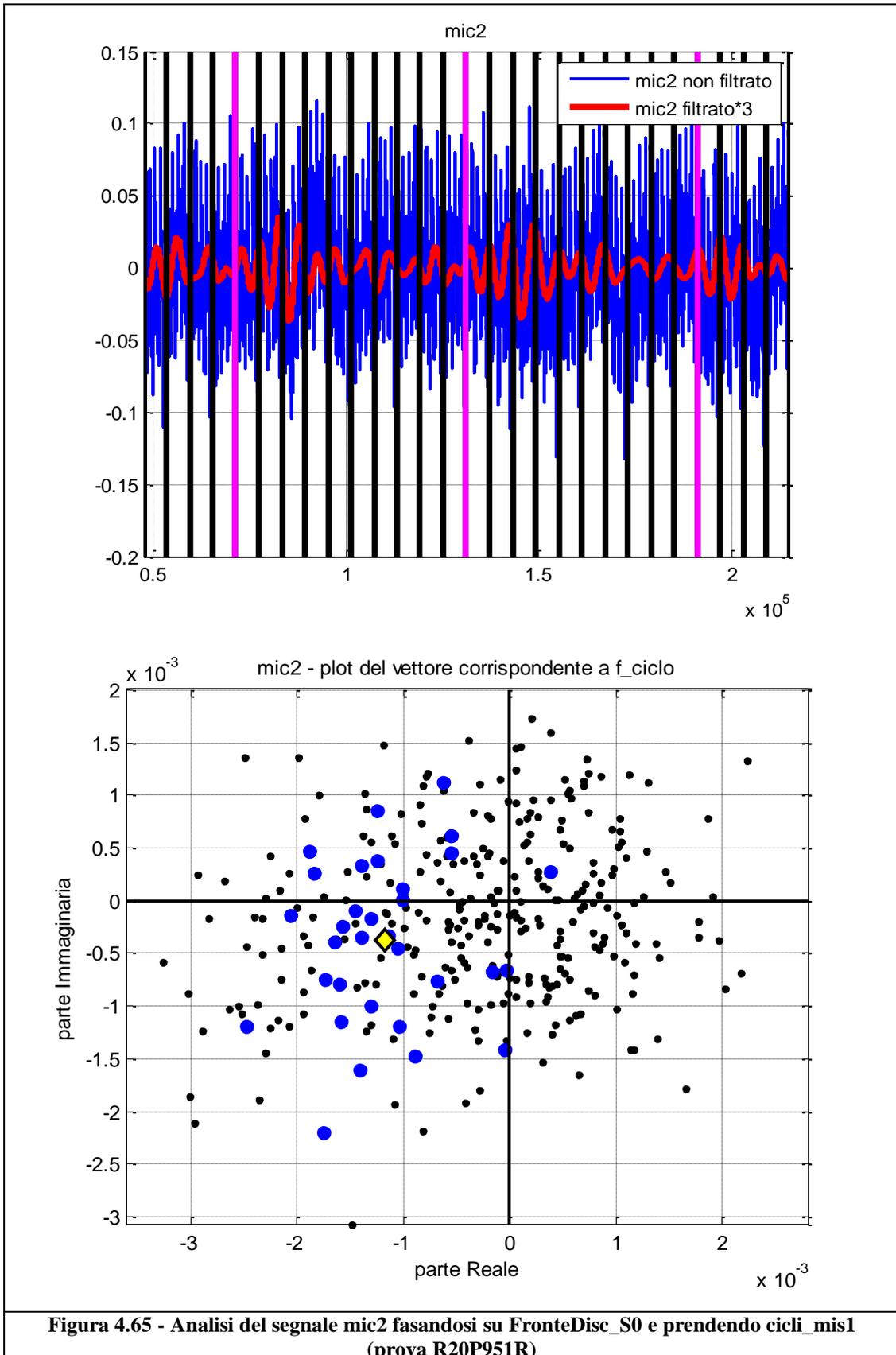


Figura 4.65 - Analisi del segnale mic2 fasandosi su FronteDisc_S0 e prendendo cicli_mis1 (prova R20P951R)

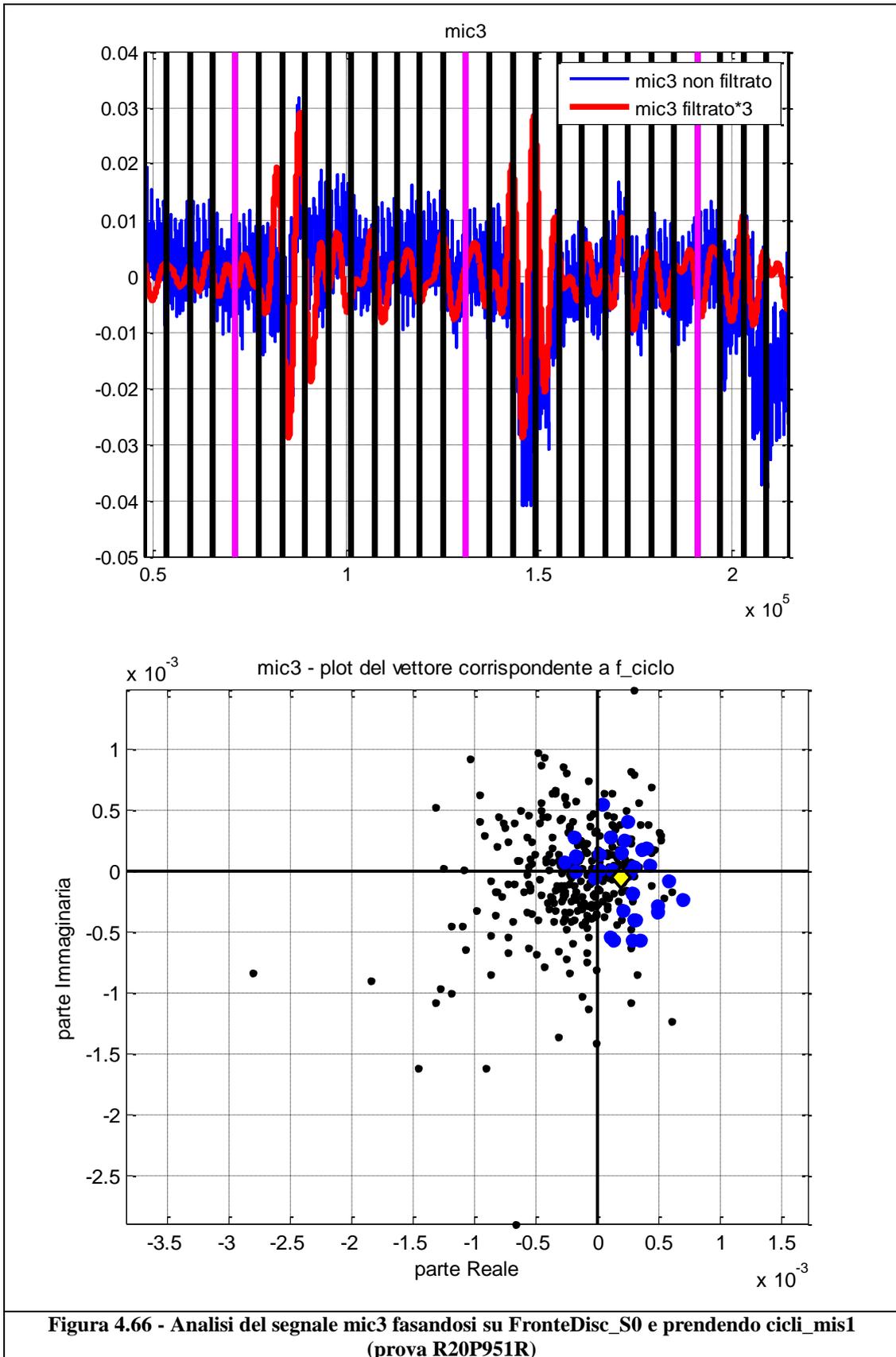


Figura 4.66 - Analisi del segnale mic3 fasandosi su FronteDisc_S0 e prendendo cicli_mis1 (prova R20P951R)

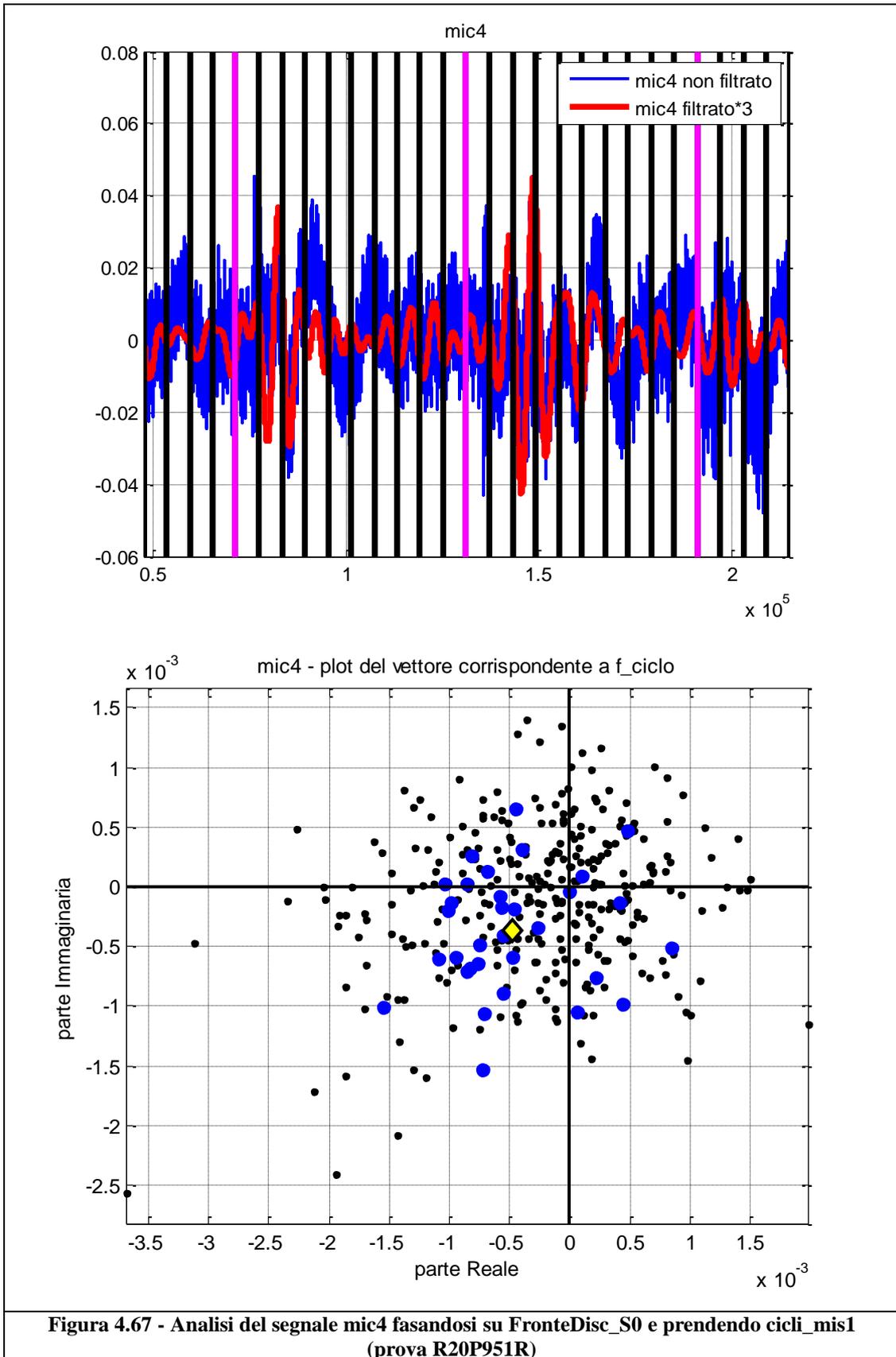


Figura 4.67 - Analisi del segnale mic4 fasandosi su FronteDisc_S0 e prendendo cicli_mis1 (prova R20P951R)

Osservando la fig. 4.63, si vede come, in presenza di misfire, l'ampiezza del segnale filtrato nell'intorno della frequenza di ciclo sia maggiore rispetto ad un ciclo con combustione normale. Anche dall'analisi ciclo-ciclo risulta evidente la distinzione tra cicli con e senza misfire.

Per quanto riguarda i segnali microfonici, si nota che, dopo l'evento di mancata combustione, si generano delle oscillazioni di ampiezza elevata, ma tali oscillazioni sembrano generarsi con un certo ritardo rispetto all'evento di misfire e soprattutto presentano una variabilità di forma e posizione notevole. Ciò si riflette, nell'analisi ciclo-ciclo, in una impossibilità nel distinguere il malfunzionamento, in quanto i punti che individuano i cicli in misfire presentano ampiezze analoghe a quelle in combustione normale, con una conseguente sovrapposizione delle nuvole di punti.

Confrontando tali grafici con quelli ottenuti in caso di misfire continuativo (vedi fig. 4.22, 4.23), si vede che il valor medio dei punti relativi a cicli con mancata accensione sul cilindro 1 (punti blu in figura) tende verso una posizione angolare simile a quella del caso con misfire continuo, ma che tale valor medio rimane comunque interno alla nuvola di punti composta dai cicli in combustione normale. Tale nuvola, inoltre, presenta un raggio paragonabile in entrambi i casi. Ciò sembra far intuire che la "firma" del misfire sia ancora contenuta nell'armonica di ciclo, ma che, in presenza di un solo evento di mancata accensione, l'algoritmo finora definito non sia in grado di distinguere tale anomalia dalle condizioni di normale funzionamento.

Si è cercato allora di modificare la fasatura, prendendo dei diversi intervalli di definizione dei cicli.

Finora, infatti, i cicli motore sono sempre stati identificati utilizzando i fronti di discesa del segnale S_0 (*FronteDisc_S0*). Tale scelta, come sottolineato nel par. 4.1.1, non è fondamentale in caso di prova

“stazionaria”, in quanto comporta solo una variazione della fase (vedi fig. 4.3), ma non influisce in maniera rilevante sulla “qualità” del ciclo che si va ad analizzare. Infatti, essendo il segnale circa identico da un ciclo all’altro (vedi fig. 4.4), la scelta dell’intervallo che si va a considerare come rappresentativo di un ciclo motore non ne modificherà in maniera significativa il contenuto in frequenza durante il calcolo della FFT.

Ciò, invece, non è più vero in condizioni “non stazionarie”, come quella in esame in questo capitolo. Osservando l’andamento nel tempo dei segnali filtrati (vedi fig. da 4.63-1 a 4.67-1), si vede, infatti, che da ciclo a ciclo la forma dell’onda varia notevolmente. Ciò implica che, per centrare al meglio l’onda derivante dal fenomeno di misfire e minimizzare i problemi di leakage, la scelta della posizione del buffer diventa un parametro determinante.

Si è cercato allora di definire un nuovo ciclo centrato sull’evento di misfire (presente solo sul cyl 1 in questa prova), facendo in modo che il PMS attivo del cilindro 1 cada al centro del buffer.

Utilizzando questa fasatura, si nota un’ovvia variazione della fase e nel caso del segnale P_{tot} migliora leggermente la distinzione tra punti di misfire e punti normali, ma non in maniera rilevante. Ciò è dovuto al fatto che in questo caso, per pura casualità, i nuovi punti presi per definire i buffer non differiscono di molto rispetto a quelli utilizzando FronteDisc_S0 e quindi, come si può vedere dalla figure precedenti (cfr. fig. 4.63-1 e 4.68-1), la parte di segnale su cui si effettua la FFT è quasi identica nei due casi e di conseguenza i risultati ciclo-ciclo non variano in maniera sensibile.

Per quanto riguarda i microfoni, questa differenza risulta ancor meno evidente.

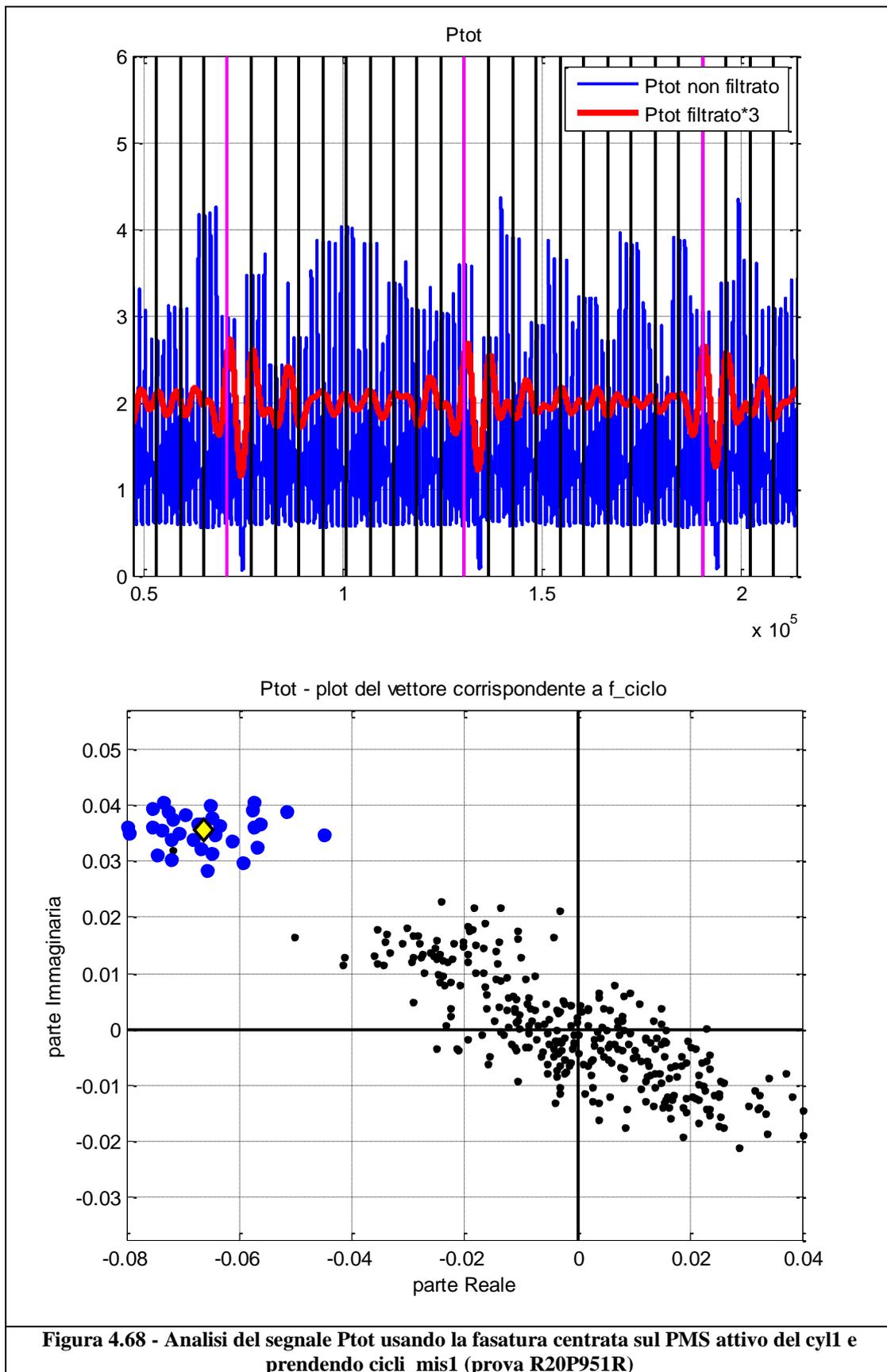


Figura 4.68 - Analisi del segnale Ptot usando la fasatura centrata sul PMS attivo del cyl1 e prendendo cicli_mis1 (prova R20P951R)

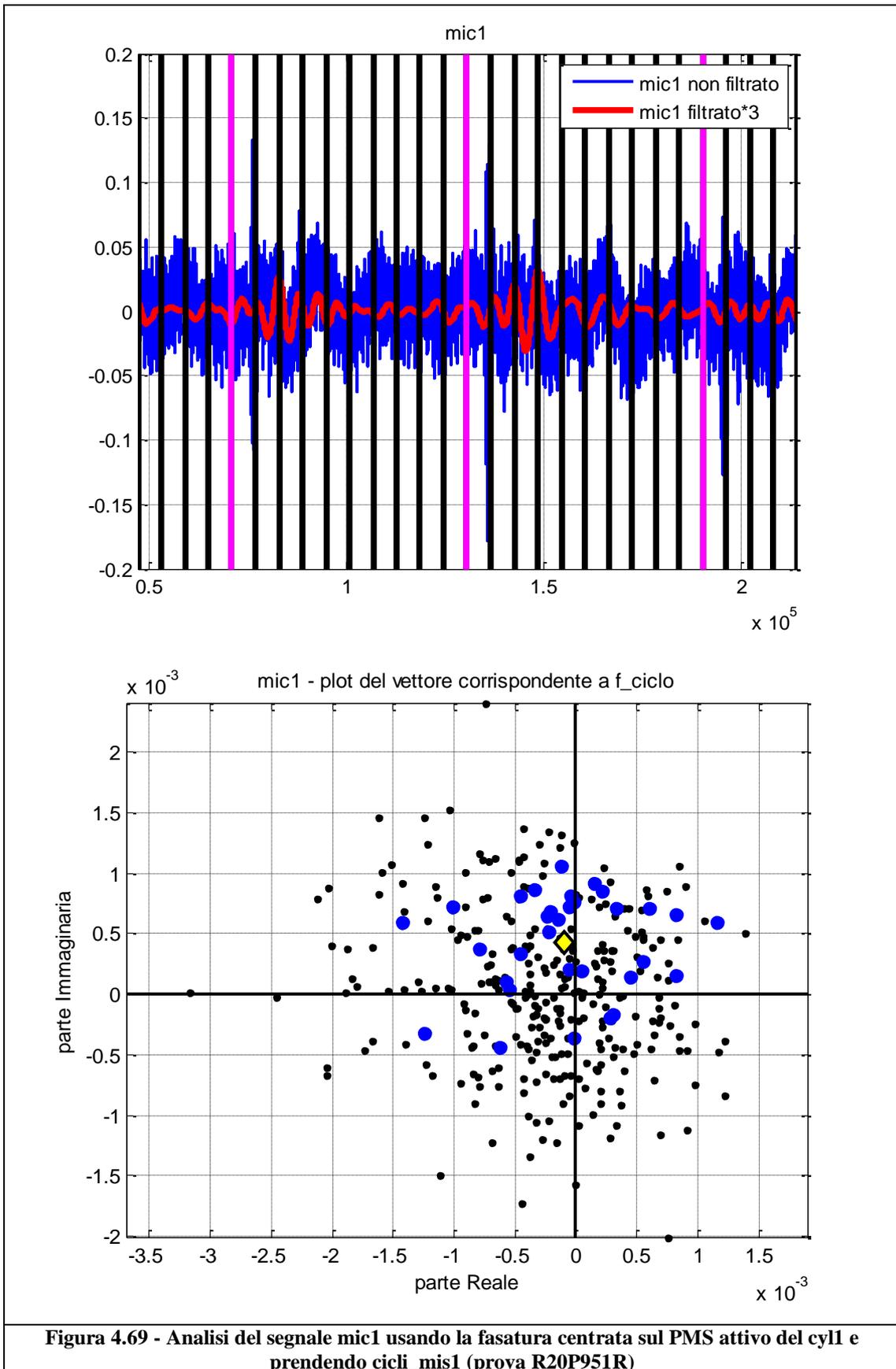


Figura 4.69 - Analisi del segnale mic1 usando la fasatura centrata sul PMS attivo del cyl1 e prendendo cicli_mis1 (prova R20P951R)

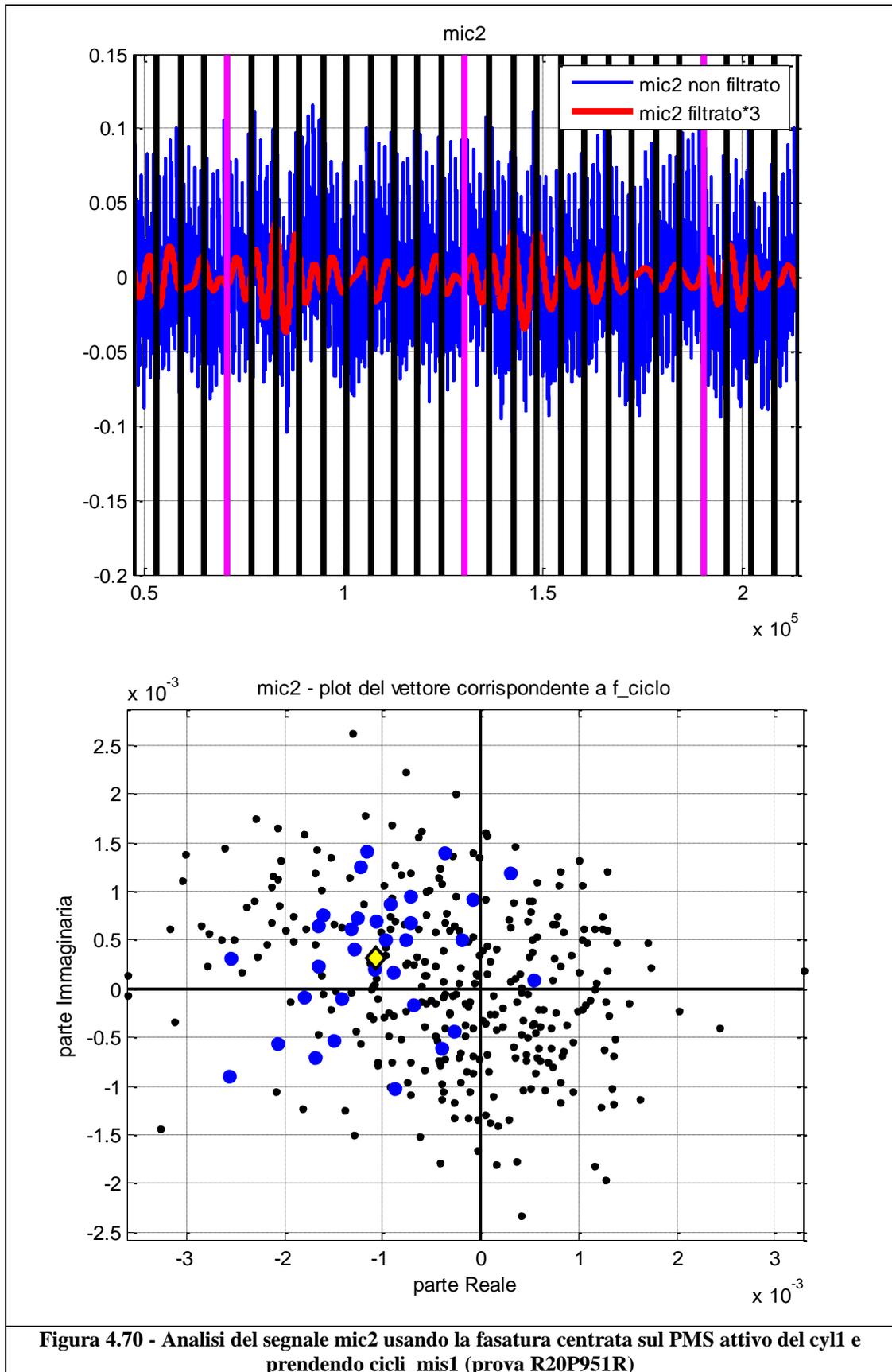


Figura 4.70 - Analisi del segnale mic2 usando la fasatura centrata sul PMS attivo del cyl1 e prendendo cicli_mis1 (prova R20P951R)

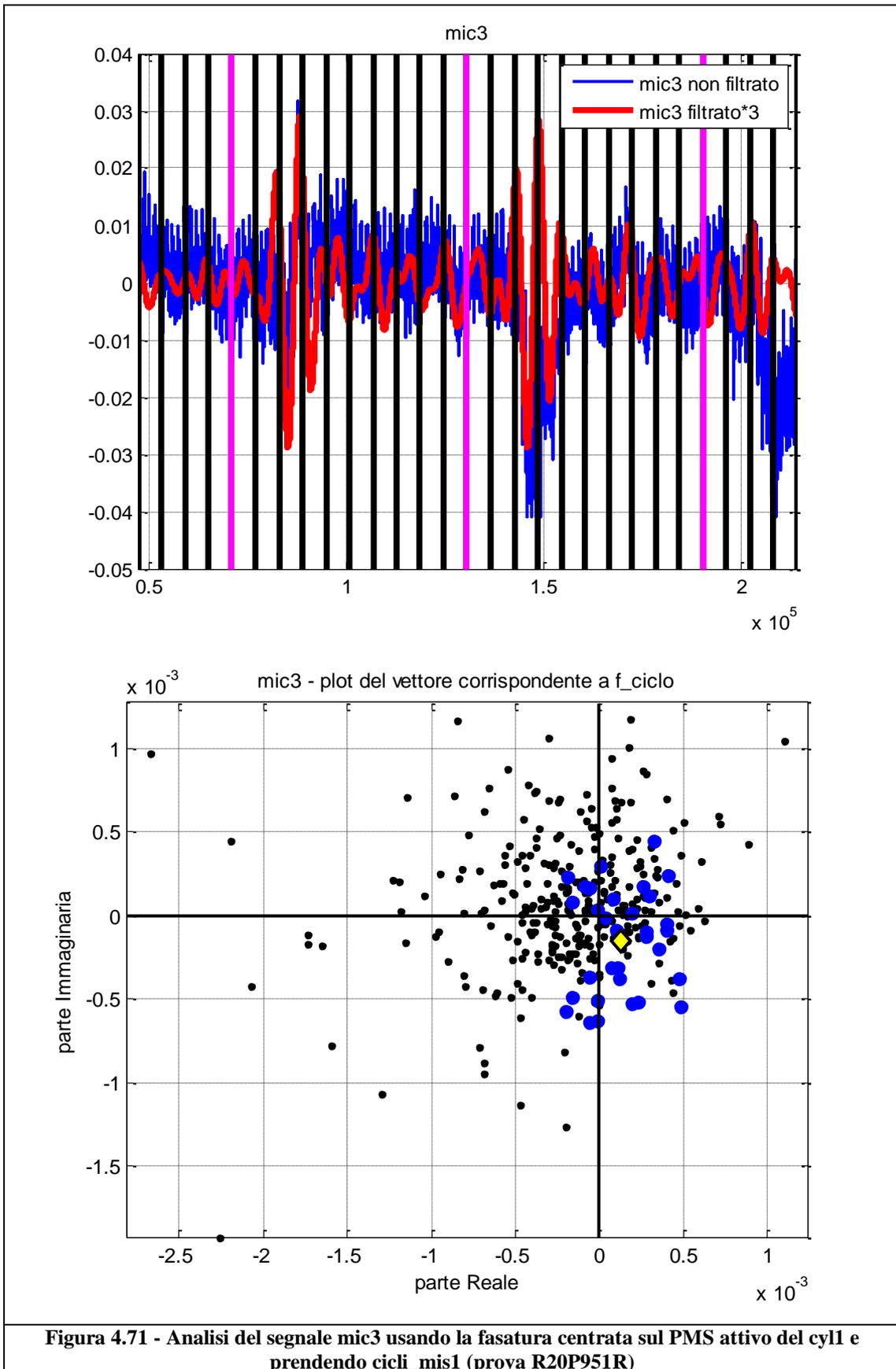


Figura 4.71 - Analisi del segnale mic3 usando la fasatura centrata sul PMS attivo del cyl1 e prendendo cicli_mis1 (prova R20P951R)

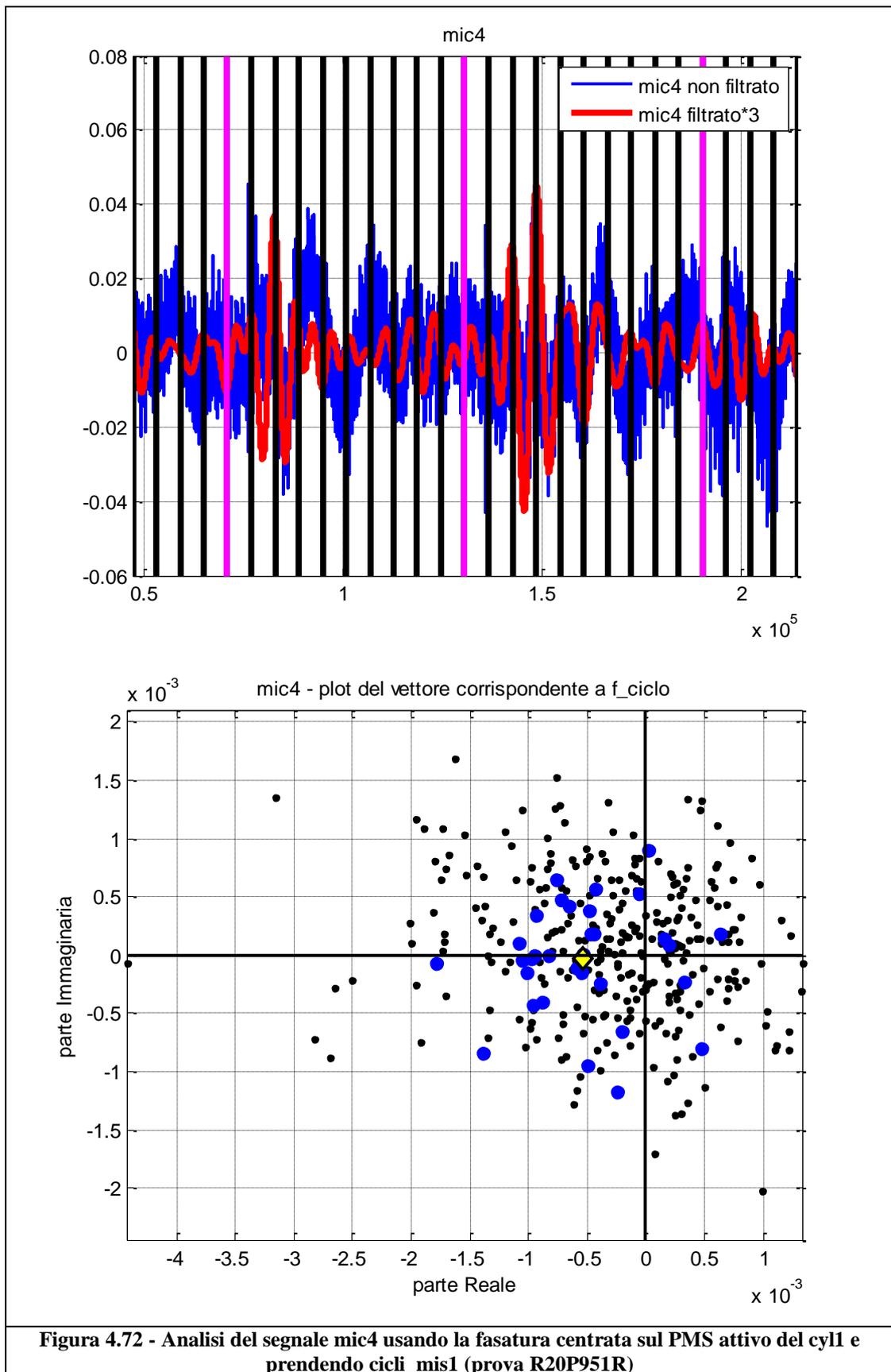


Figura 4.72 - Analisi del segnale mic4 usando la fasatura centrata sul PMS attivo del cyl1 e prendendo cicli_mis1 (prova R20P951R)

4.4.1 - Transitorio di misfire

A questo punto, si è cercato di capire meglio quale fosse la natura del segnale audio che si sta analizzando, in modo da cercare di spiegarsi il perché del fatto che, alle stesso punto di funzionamento del motore e con misfire sullo stesso cilindro, se tale malfunzionamento è indotto in maniera continuativa l’algoritmo sia in grado di distinguerlo, mentre se è indotto su un singolo ciclo tale capacità diagnostica venga persa.

A tal fine, sono state realizzate nuove prove mirate al riconoscimento del transitorio generato dal misfire:

89	2000	350	misfire cyl 1	R20P35P1	20 s
90	2000	350	misfire cyl 2	R20P35P2	20 s
91	2000	350	misfire cyl 3	R20P35P3	20 s
92	2000	350	misfire cyl 4	R20P35P4	20 s
93	2000	950	misfire cyl 1	R20P95P1	20 s
94	2000	950	misfire cyl 2	R20P95P2	10 s
95	2000	950	misfire cyl 3	R20P95P3	20 s
96	2000	950	misfire cyl 4	R20P95P4	20 s
97	4000	370	misfire cyl 1	R40P37P1	20 s
98	4000	370	misfire cyl 2	R40P37P2	20 s
99	4000	370	misfire cyl 3	R40P37P3	20 s
100	4000	370	misfire cyl 4	R40P37P4	20 s
101	4000	950	misfire cyl 1	R40P95P1	20 s
102	4000	950	misfire cyl 2	R40P95P2	20 s
103	4000	950	misfire cyl 3	R40P95P3	20 s
104	4000	950	misfire cyl 4	R40P95P4	20 s

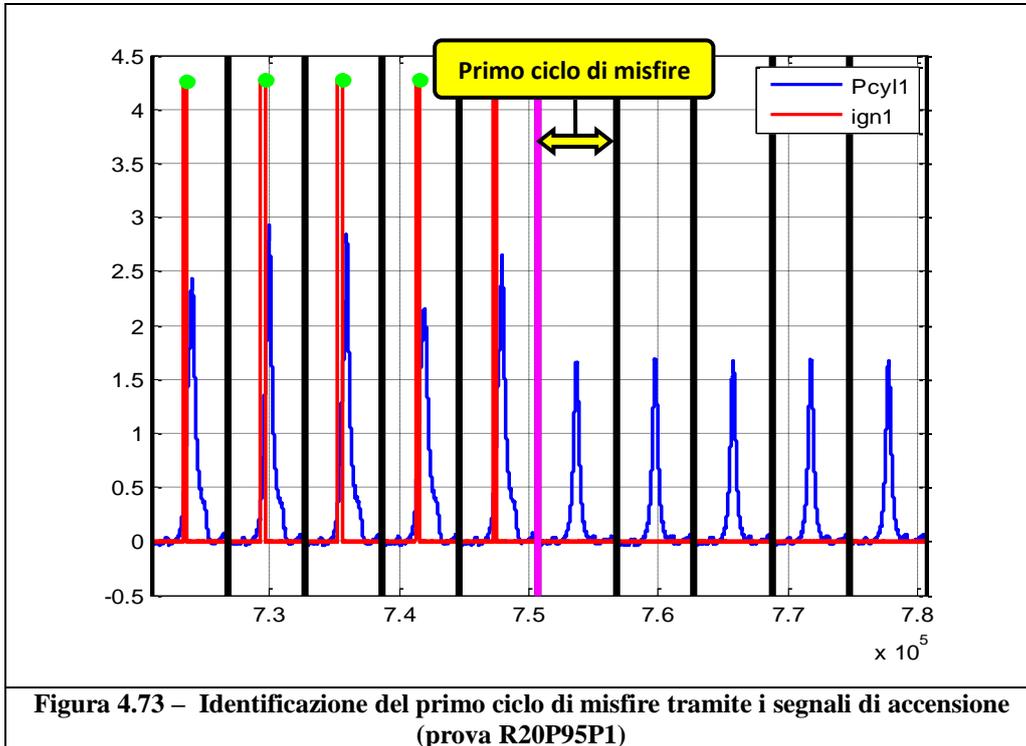
Tabella 4.1 - Nuove prove effettuate

Durante tali prove, a differenza delle precedenti, la mancata accensione continua su un dato cilindro è stata indotta ad acquisizione già iniziata e terminata ad acquisizione ancora in corso.

In tal modo riusciremo ad evidenziare sia il ciclo di passaggio da combustione normale a misfire (chiamato *ciclo_primo_mis*) che viceversa (*ciclo_ultimo_mis*, si tratta del primo ciclo in combustione normale).

Per riconoscere tali cicli si è utilizzato anche in questo caso il segnale di accensione (vedi fig. 4.73).

L'idea alla base di queste prove è quella di vedere se l'onda sonora generata dall'evento di misfire debba in un qualche modo "regimarsi" prima di essere effettivamente distinguibile.



Si è deciso di acquisire anche il segnale di *pressione nel collettore di scarico*, in modo da confrontarlo con il segnale microfonico e vedere se ci siano effettivamente delle similitudini che possano validare l'ipotesi che il rumore percepito sia legato alle onde di pressione in uscita dai cilindri.

Si è utilizzata la fasatura con FronteDisc_S0, in modo da poter confrontare i risultati ottenuti con quelli per prove analoghe con misfire continuo (fig. da 4.8 a 4.47).

Al fine di analizzare meglio le caratteristiche del transitorio di inizio e fine misfire, si è scelto di plottare i punti immediatamente successivi a tali eventi con una simbologia dedicata che descriviamo in seguito:

- $X = \text{ciclo_primo_mis}$
- Triangolo con vertice in alto = $\text{ciclo_primo_mis} + 1$
- Quadrato = $\text{ciclo_primo_mis} + 2$
- + = $\text{ciclo_primo_mis} + 3$
- * = ciclo_ultimo_mis
- Triangolo con vertice in basso = $\text{ciclo_ultimo_mis} + 1$
- Stella a cinque punte = $\text{ciclo_ultimo_mis} + 2$
- Stella a sei punte = $\text{ciclo_ultimo_mis} + 3$

Riportiamo anche uno zoom dell'andamento temporale dei segnali microfonicici e pressione scarico nell'intorno del primo e ultimo evento di misfire (fig. da 4.74 a 4.75). Anche in questo caso, per non appesantire troppo l'esposizione, si riportano a titolo illustrativo soltanto le immagini relative alla prova e al microfono che ha evidenziato meglio il comportamento che si vuole descrivere. Negli altri casi il rapporto segnale-rumore risulta inferiore per i segnali audio.

Si può notare come sia il segnale microfonico filtrato che quello di pressione scarico necessitano di qualche ciclo prima di regimarsi ad un'ampiezza chiaramente distinguibile rispetto alla condizione di combustione normale. In particolare, il segnale microfonico presenta una dinamica più lenta rispetto al segnale di pressione scarico; infatti, mentre quest'ultimo si regima dopo un paio di cicli, il suono ne impiega circa il doppio. Ciò si verifica sia ad inizio che a fine misfire e si evidenzia anche dall'analisi ciclo-ciclo (fig. 4.76). Infatti, facendo riferimento al segnale P_{scarico} dove il fenomeno risulta più facilmente visibile, si nota come ad inizio misfire il primo punto a raggiungere una posizione interna alla nuvola di punti sia il quadrato (cioè il secondo ciclo dopo il primo misfire), mentre a fine misfire sia la stella a cinque punte (cioè il secondo ciclo dopo la prima combustione normale).

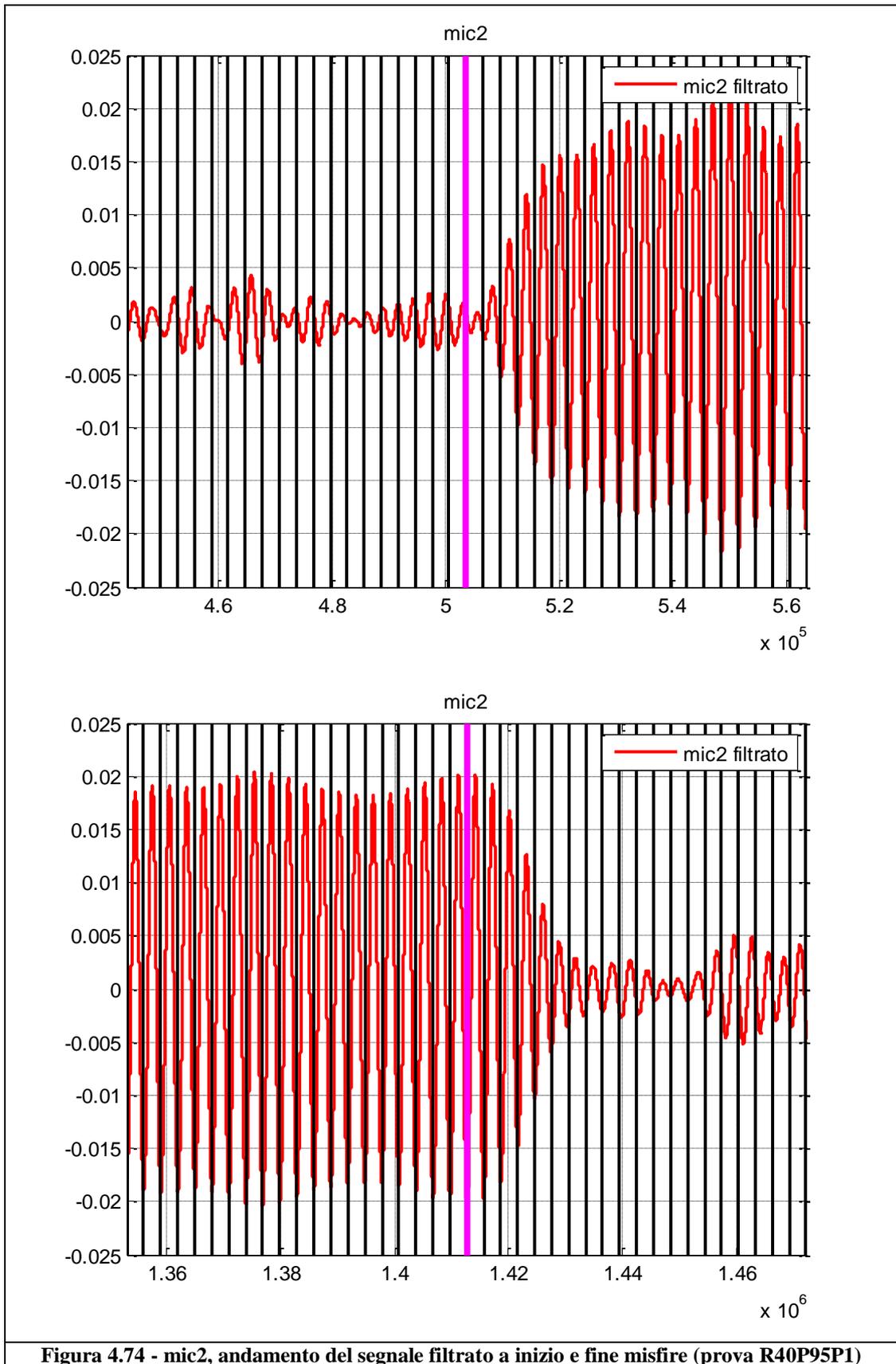


Figura 4.74 - mic2, andamento del segnale filtrato a inizio e fine misfire (prova R40P95P1)

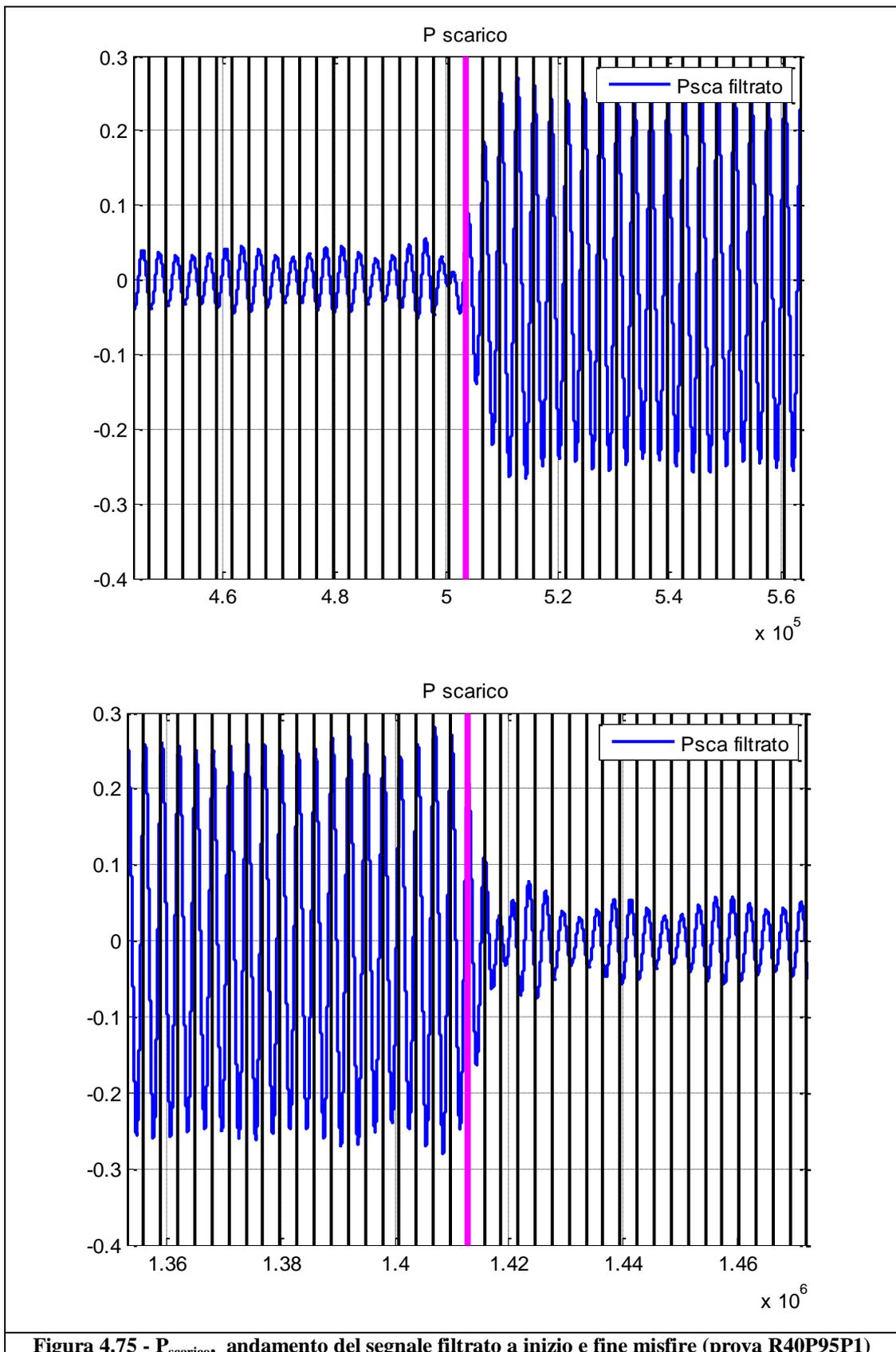


Figura 4.75 - P_{scarico} , andamento del segnale filtrato a inizio e fine misfire (prova R40P95P1)

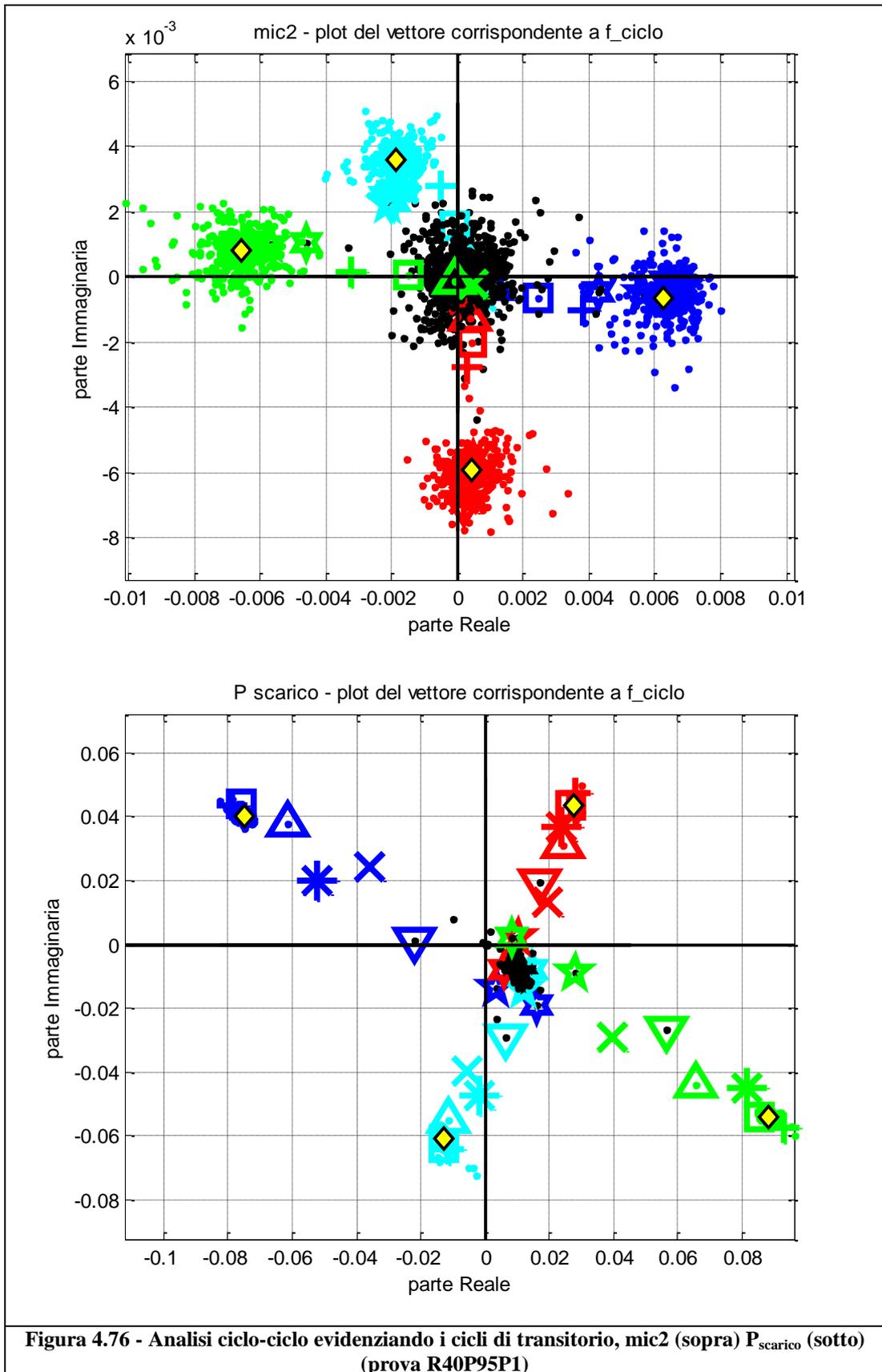


Figura 4.76 - Analisi ciclo-ciclo evidenziando i cicli di transitorio, mic2 (sopra) $P_{scarico}$ (sotto) (prova R40P95P1)

Nel caso del microfono tale dinamica di transitorio è più lenta ma comunque presente. Dalla figura sovrastante si può infatti intuire una progressiva tendenza dei punti successivi all'inizio misfire ad avvicinarsi al punto medio della nuvola di punti, mentre in fase di fine misfire si vede che il primo punto ad uscire dalla nuvola è la stella a sei punte.

Tutto ciò potrebbe spiegare il perché dell'incapacità dell'algoritmo finora elaborato di diagnosticare un singolo evento di mancata accensione.

Dal punto di vista fisico, ciò è un altro indizio che porta a pensare che il suono che rileviamo con i microfoni sia effettivamente legato alla dinamica dei gas nel collettore di scarico.

Infatti, la mancata combustione in un cilindro genera una variazione di pressione nel collettore di scarico che sembra necessitare di più eventi consecutivi prima di raggiungere una condizione "stabile".

Queste onde di pressione sarebbero poi alla base che del rumore che si propaga fino ai microfoni, probabilmente mettendo in vibrazione le pareti del collettore stesso.

4.4.2 - *Analisi dei cicli vicini al ciclo di misfire*

Partendo dalle considerazioni appena svolte sulla regimazione del segnale, si è cercato di caratterizzare in maniera più dettagliata le nuvole di punti sul piano complesso, al fine di evidenziare la posizione in cui si collocano i cicli nelle immediate vicinanze di quello identificato come misfire.

In particolare si è usata la seguente rappresentazione (il primo termine indica la rappresentazione usata per i singoli punti, il secondo per il valor medio di tali punti):

- punto/rombo - ciclo di misfire
- cerchio/cerchio - ciclo precedente a quello di misfire
- X/triangolo - primo ciclo dopo quello di misfire
- quadrato/quadrato - secondo ciclo dopo quello di misfire

Riportiamo nelle figure seguenti i grafici relativi alla prova R20P951R.

Facendo riferimento ai valori medi, si nota che i punti che tendono ad avere un'ampiezza maggiore sono quelli corrispondenti ai primi cicli di misfire, mentre sia quelli di misfire che quelli due cicli dopo tendono a presentare ampiezze minori.

Ciò sembra giustificare quanto visto in precedenza sulla regimazione del segnale.

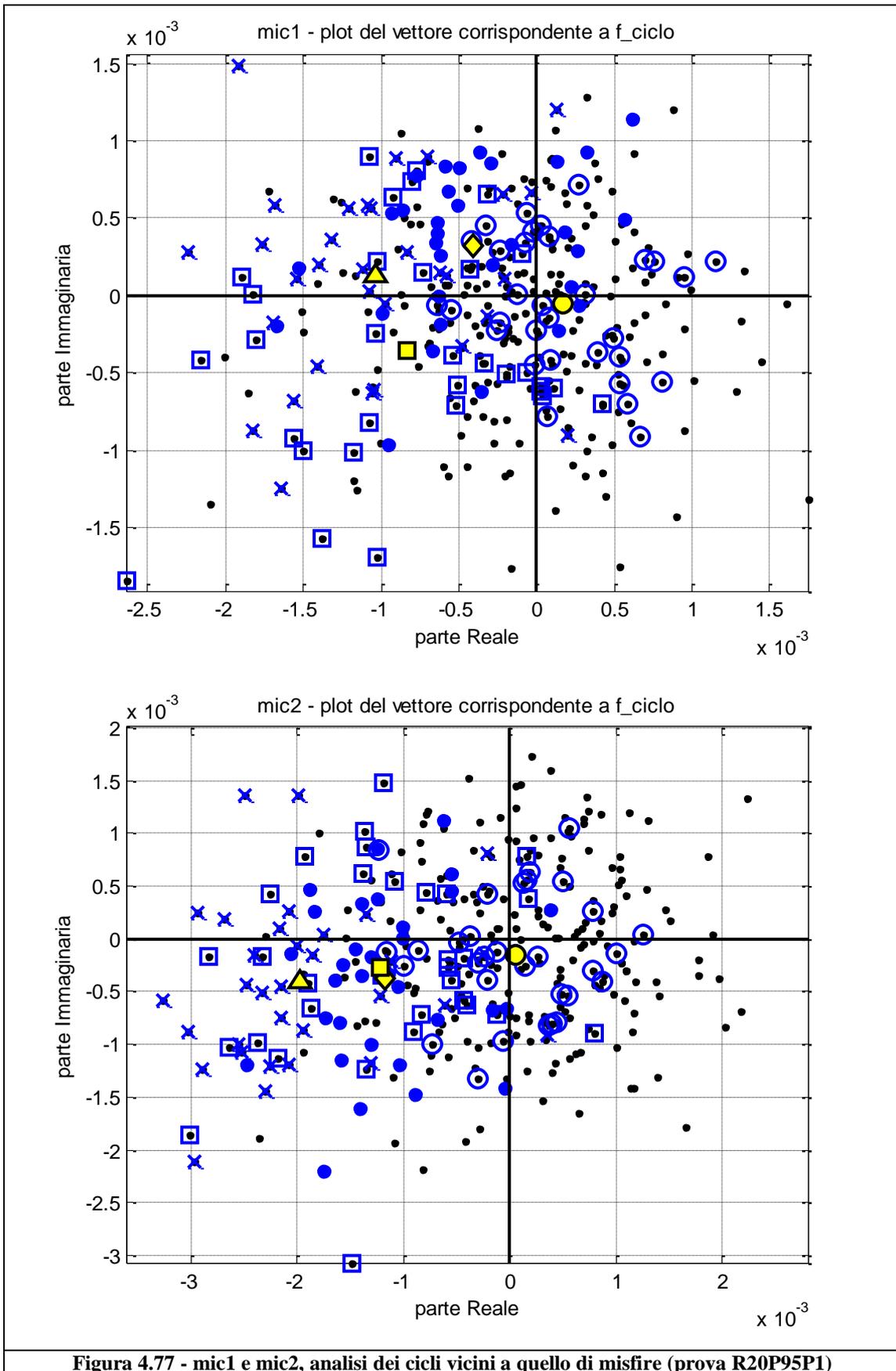


Figura 4.77 - mic1 e mic2, analisi dei cicli vicini a quello di misfire (prova R20P95P1)

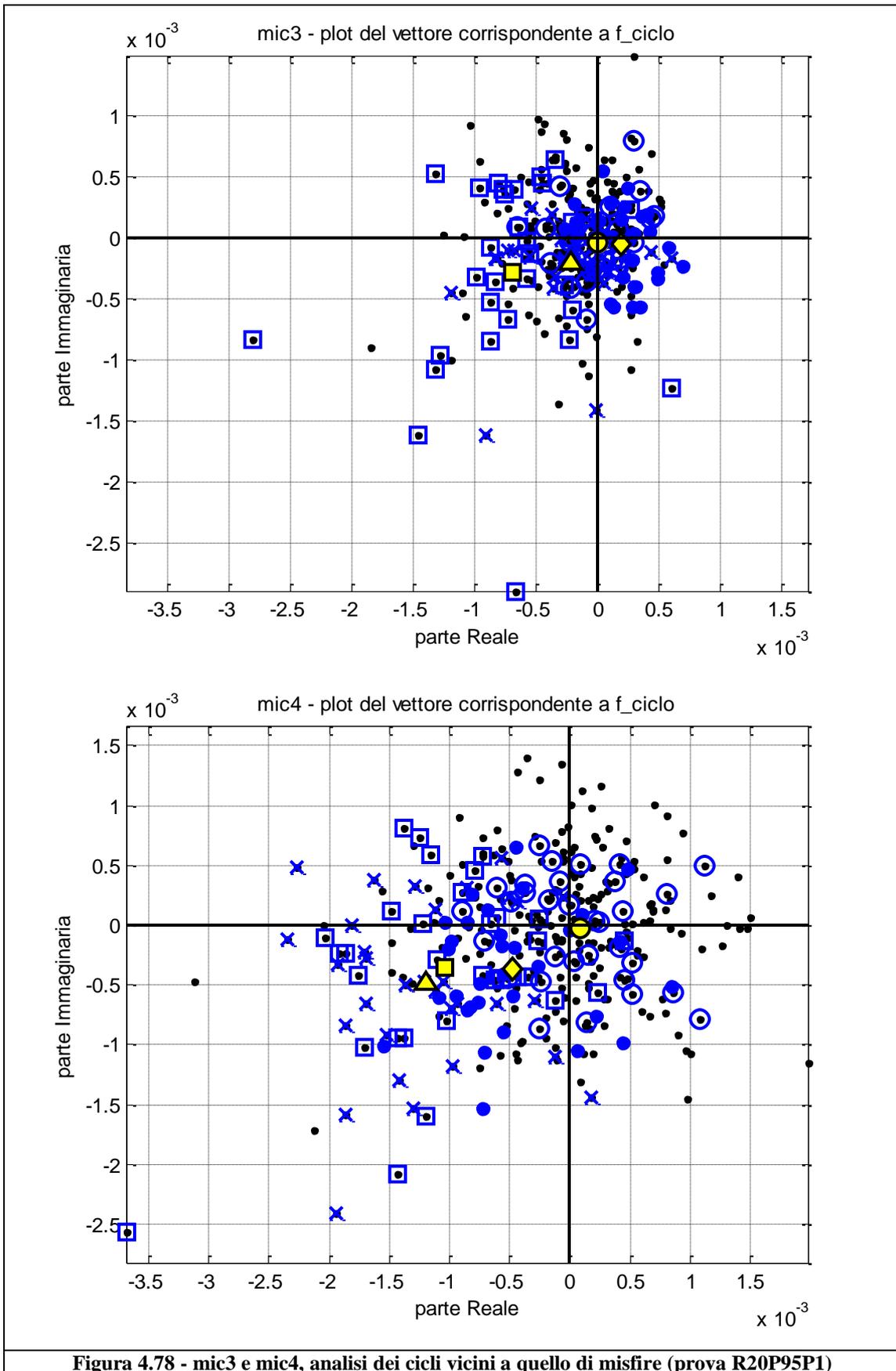
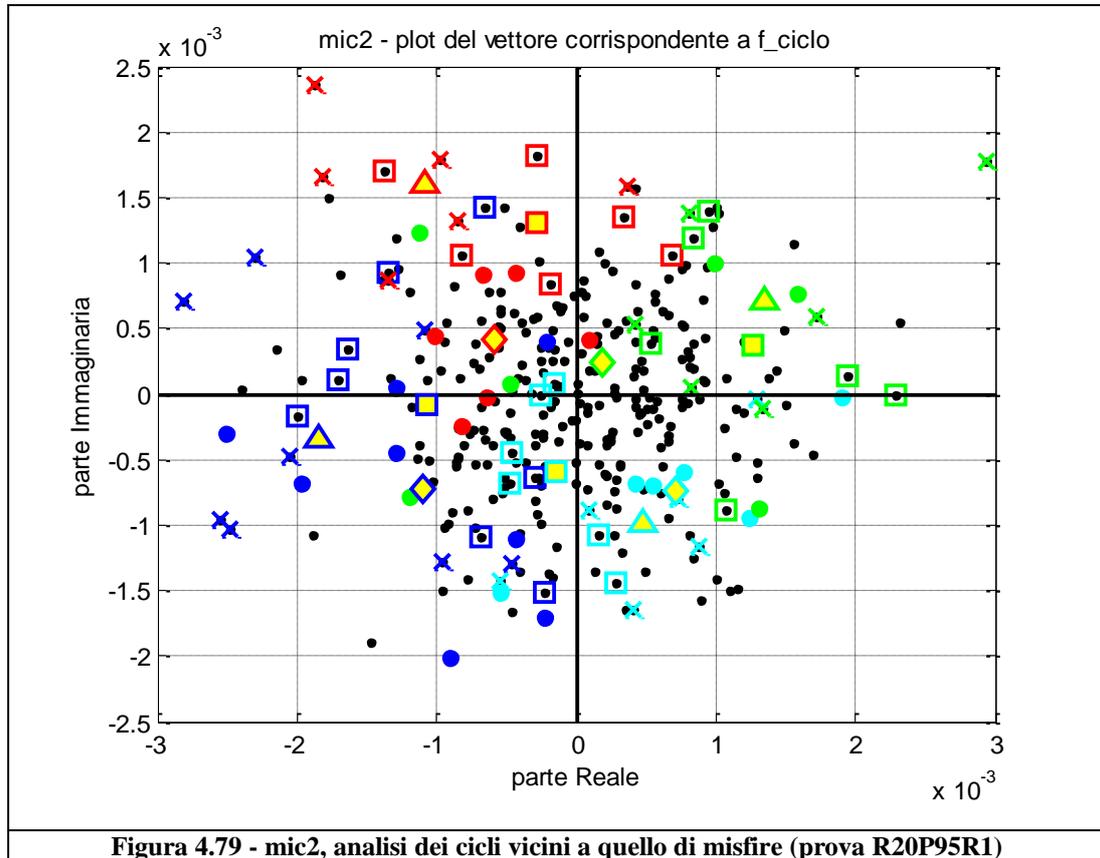


Figura 4.78 - mic3 e mic4, analisi dei cicli vicini a quello di misfire (prova R20P95P1)

Riportiamo nella figura sottostante i risultati di tali analisi svolta anche su una prova con misfire random su cilindri diversi.



Anche in questo caso sembra riscontrarsi quanto visto in precedenza, con il ciclo successivo a quello di misfire che tende ad essere quello ad ampiezza più elevata.

Anche per quanto riguarda la fase, si può vedere come i vari punti tendano a dirigersi verso il quadrante che caratterizza il misfire sul dato cilindro.

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppi futuri

Data la totale assenza di bibliografia in merito, in base alle prove svolte e alle analisi effettuate si può concludere che l'utilizzo di capsule microfoniche low-cost per effettuare una diagnosi misfire è potenzialmente fattibile, perlomeno come supporto alle attuali tecnologie implementate in centralina.

In particolare, attraverso l'analisi di ampiezza e fase delle prime tre armoniche di ciclo, è possibile impostare un algoritmo in grado di diagnosticare una mancata accensione quando questa si presenti in modo continuativo. Tale analisi risulta facilitata se il microfono si trova posizionato vicino al collettore di scarico.

Le performance di questo sistema di diagnosi, però, dipendono fortemente dalla qualità del segnale acquisito e dal rapporto segnale-rumore per il dato microfono. Infatti, essendo il contenuto informativo legato al misfire presente sulle prime armoniche di ciclo, la risoluzione in frequenza di cui disponiamo è necessariamente dello stesso ordine di grandezza delle frequenze che andiamo ad analizzare, il che significa che il rumore gioca un ruolo rilevante sulla qualità dei risultati ottenibili.

Per quanto riguarda l'individuazione del singolo evento di misfire, invece, l'algoritmo qui definito non sembra in grado di disporre della sensibilità necessaria per effettuare una diagnosi efficace, in quanto la perturbazione indotta da una mancata combustione sull'onda sonora

necessita di più eventi consecutivi prima di raggiungere una condizione di regime.

In base a quanto detto, risulta necessario uno studio più approfondito sull'ottimizzazione della catena di misura stessa, al fine di massimizzare il rapporto segnale-rumore in uscita dal microfono e capire se, migliorando il filtraggio, sia possibile risolvere i problemi riscontrati finora e garantire una maggiore solidità dell'algoritmo durante tutte le condizioni di funzionamento del motore.

Per quanto riguarda l'ottimizzazione della diagnosi di misfire continui, si consiglia di valutare la possibilità di utilizzare indici basati sulla somma pesata delle tre armoniche di ciclo, al fine di ottenere soglie in ampiezza più solide.

Data la presenza di un vasto database, si sottolinea inoltre la possibilità di utilizzare i segnali campionati a 100 kHz per esplorare il contenuto informativo dei segnali audio anche nel campo degli ultrasuoni, al fine di individuare altri parametri caratteristici del processo di combustione.

Bibliografia

- [1] Giancarlo Ferrari, *“Motori A Combustione Interna”*, Il Capitello, Torino, 2001
- [2] Heywood, *“Internal Combustion Engine Fundamentals”*, Mcgraw-Hill, 1988
- [3] Taylor, *“The Internal Combustion Engine In Theory And Practice”*, The MIT Press, 2005
- [4] Dante Giacosa, *“Motori endotermici”*, Hoepli, 2004
- [5] Giorgio Minelli, *“Motori endotermici alternativi”*, Pitagora, 1984
- [6] Gian Marco Bianchi, *“Appunti Del Corso Di Fluidodinamica Dei Motori Combustione Interna”*, 2007
- [7] Azzoni, Cantoni, Minelli, Moro, Rizzoni, Ceccarani, Mazzetti, *“Measurement of engine misfire in the Lamborghini 533 V-12 engine using crankshaft speed fluctuations”*, SAE Technical Paper 950837, 1995
- [8] Forster, Lohmann, Mezger, Ries-Muller, *“Advanced engine misfire detection for SI-engines”*, SAE Technical Paper 970855, 1997
- [9] Soliman, Rizzoni, Krishnaswami, *“The effect of engine misfire on exhaust emission levels in spark ignition engines”*, SAE Technical Paper 950480, 1995
- [10] Lee, Pyko, *“Engine misfire detection by ionization current monitoring”*, SAE Technical Paper 950003, 1995
- [11] Shiao, Moskwa, *“Misfire detection and cylinder pressure reconstruction for SI engines”*, SAE Technical Paper 940144, 1994

-
- [12] Ribbens, Park, “*Road tests of a misfire detection system*”, SAE Technical Paper 940975, 1994
- [13] Cavina, Moro, De Cesare, Serra, “*Exhaust gas turbocharger speed measurement via acoustic emission analysis*”, SAE Technical Paper 2008-01-1007, 2008
- [14] Ball, Gu, Li, Leung, “*The condition monitoring of Diesel engines using acoustic measurements Part 1: acoustic characteristics of the engine and representation of the acoustic signals*”, SAE Technical Paper 2000-01-0730, 2000
- [15] Ball, Gu, Li, “*The condition monitoring of Diesel engines using acoustic measurements Part 2: fault detection and diagnosis*”, SAE Technical Paper 2000-01-0368, 2000
- [16] Li, Akishita, Kato, “*Engine failure diagnosis with sound signal using wavelet transform*”, SAE Technical Paper 970034, 1997
- [17] Villarroel, Agren, “*Wavelet transform analysis of measurements of engine combustion noise*”, SAE Technical Paper 972003, 1997
- [18] Giancarlo Bisanti, “*Sviluppo di strategie di diagnosi e controllo motore basate sull’analisi delle emissioni acustiche*”, Tesi di laurea specialistica in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Bologna, Facoltà di Ingegneria, 2008
- [19] Marco Cesaroni, “*Stima della fasatura e della velocità di chiusura delle valvole motore*”, Tesi di laurea specialistica in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Bologna, Facoltà di Ingegneria, 2008
- [20] J.A. Massey, “*Indication of In-cylinder pressure rise rate by means of vibration and acoustic emissions of an internal combustion engine*”, Master of Science in Mechanical Engineering, University of Missouri University of Science and Technology, 2008

-
- [21] Souder, Mack, Hedrick, Dibble, “*Microphones and knock sensors for feedback control of HCCI engines*”, ICEF 2004-960, 2004
- [22] Cavina, Corti, Minelli, Serra, “*Misfire detection based on engine speed time-frequency analysis*”, SAE Technical Paper 2002-01-0480, 2002
- [23] Moro, Ponti, Cipolla, Mammetti, Poggio, “*An approach for misfire diagnosis in critical zones of the operating range of a high performance engine*”, SAE Technical Paper 2003-01-1058, 2003
- [24] VanDyne, Burckmyer, Wahl, Funaioli, “*Misfire detection from ionization feedback utilizing the SmartFire[®] plasma ignition technology*”, SAE Technical Paper 2000-01-1377, 2000
- [25] Willimowski, Isermann, “*A time domain based diagnostic system for misfire detection in spark-ignition engines by exhaust gas pressure analysis*”, SAE Technical Paper 2000-01-0366, 2000
- [26] Park, Chung, Park, “*The OBD II system in the Hyundai Accent*”, SAE Technical Paper 982551, 1998
- [27] Chiatti, Chiavola, “*Misfire diagnosis in spark ignition engines*”, SAE Technical Paper 2002-01-1670, 2002
- [28] Lang, Liu, Lang, Liu, “*Multi-purpose flywheel (MPF) and misfire detection*”, SAE Technical Paper 2005-01-1141, 2005
- [29] Nagayama, Kawamura, Ujihira, “*Study on the detection of misfiring cylinder in a heavy machinery multy-cylinder Diesel engine under the state of rotational fluctuation*”, SAE Technical Paper 2006-01-3550, 2006
- [30] Legislazione Internazionale Unione Europea, “*Inquinamento atmosferico autoveicoli leggeri*”, LI 11 – 711 1/222, 2004
- [31] California’s OBD II, “*Title 13, California Code of Regulation, Section 1968, Malfunction and diagnostic system requirements for*

- 2004 and subsequent model-year passenger cars, light-duty trucks, and medium-duty vehicles and engines (OBD II)*", 2003
- [32] Villarino, Bohme, "*Misfire detection in automotive engines using structure-borne sound*", SAE Technical Paper 2004-01-0520, 2004
- [33] Chung, Bae, Choi, Yoon, "*Application of a wide range oxygen sensor for the misfire detection*", SAE Technical Paper 1999-01-1485, 1999
- [34] Ball, Bowe, Stone, McFadden, "*Torque estimation and misfire detection using block angular acceleration*", SAE Technical Paper 2000-01-0560, 2000
- [35] Ceccarani, Rebottini, Bettini, "*Engine misfire monitoring for a V12 engine by exhaust pressure analysis*", SAE Technical Paper 980518, 1998
- [36] Klenk, Ries-Mueller, Kassner, "*Method for diagnosing an internal combustion engine*", Patent No: US 0133177 A1, 2008
- [37] Hamada, Kusao, Ogino, Ando, Edo, "*System for evaluating abnormal sound, sound recorder and apparatus for evaluating abnormal sound*", Patent No: US 7187733 B2, 2007