

Capitolo 9

Analisi dei segnali di una prova bending con rottura

9.1 Introduzione

Durante la X prova bending, si è verificata la rottura del dente contrassegnato con il n°1 sulla ruota 8948, come illustrato dalla figura successiva.



Figura 9- 1 Posizione del dente rotto

Il danneggiamento della ruota, che ha determinato l'asportazione del dente, fig.9-2 e 9-3, ha azionato gli allarmi che hanno arrestato il banco prova in corrispondenza del 149° secondo della registrazione indicata con il nome "RAW 106".



Figura 9- 2 Ruota danneggiata



Figura 9- 3 Dente rotto

I sensori in funzione durante tale prova erano i 4 accelerometri della zona test, l'accelerometro triassiale, nella direzione x e y, l'accelerometro mobile ed il microfono, il quale era posizionato ad una distanza di 30 mm dalla zona test, puntato in direzione dell'accelerometro 4 fig.(9-4).

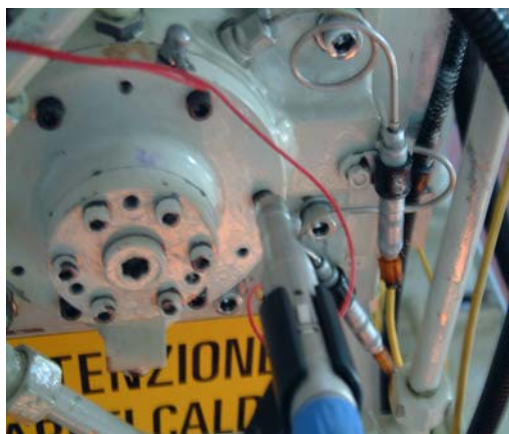


Figura 9- 4

Il banco si è arrestato a seguito dell'intervento dell'allarme sul Crest Factor dell'accelerometro 3, ma esaminando l'andamento dei parametri statistici RMS, CF e KURTOSIS in off-line, si è osservato che l'arresto del banco poteva essere anticipato di 7 minuti, utilizzando il Kurtosis, non disponibile al momento della rottura in on-line.

Questo ritardo nell'arresto del banco è dipeso principalmente dal fatto che gli allarmi implementati on-line risentono sia del minor numero di dati elaborati, per l'elevato costo computazionale richiesto alla strumentazione in uso, sia perché le soglie di allarme sono impostate in funzione di un valore di riferimento, la "baseline", scelta in base all'esperienza acquisita e tale da impedire un numero elevato di falsi allarmi, provocati generalmente da improvvisi disturbi elettrici, che determinano arresti non giustificati del banco.

Tali considerazioni hanno portato a scegliere delle soglie elevate per il RMS ed il CF, in particolar modo per gli accelerometri 1 e 2, ovvero i due accelerometri che in off-line hanno individuato il difetto con maggior anticipo.

Si è confrontato i risultati ottenuti con dati non trattati con quelli ottenuti trattando i dati con un filtro passa alto che eliminasse i disturbi elettrici provocati dalla frequenza di rete a 50 Hz nel segnale degli accelerometri e la bassa frequenza per il microfono.

Si è poi proceduto all'esame spettrale, sia FFT che PSD, per valutare se, nel tempo, si osservano variazioni utili alla diagnosi del danneggiamento, usando anche una rappresentazione tempo-frequenza, in cui l'intensità delle componenti frequenziali viene rappresentata tramite una scala cromatica.

9.2 Parametri statistici

Il primo aspetto affrontato nella valutazione dei segnali acquisiti ha riguardato l'analisi dell'andamento dei 3 parametri statistici, RMS, CF e Kurtosis nel tempo.

9.2.1 RMS

Il parametro RMS, per gli accelerometri, è un parametro che rimane costante al progredire della prova e che varia lentamente, durante le prime fasi di generazione del difetto, mentre il RMS relativo al microfono tende a crescere in modo lento nel tempo, sia che il segnale sia filtrato oppure no, per poi riaumentare con pendenza elevata quando l'ingranaggio inizia a danneggiarsi.

Nel caso degli accelerometri, s'individua il danneggiamento dall'aumento della pendenza della retta che descrive l'andamento del RMS ed in particolare, in corrispondenza del 350° secondo (≈ 7 minuti prima dell'arresto del banco), come illustrato dalle figure 9-7 e 9-8, ed evidenziato dalle frecce verdi, se confrontate con i dati relativi ad inizio prova, si registra un incremento rilevante per i segnali degli accelerometri 2 e 3 ed un leggero aumento per il segnale microfonico.

Gli stessi segnali, compresi quelli relativi agli accelerometri 1 e 4, aumentano decisamente nei 150 secondi che anticipano l'arresto del banco (fig.9-9 e 9-10).

Si tratta di variazioni % inferiori rispetto a quelle registrate con il CF ed il Kurtosis, ed inoltre, essendo l' RMS il parametro che maggiormente risente dei disturbi elettrici, i quali causano improvvisi aumenti del suo valore, occorre adottare una baseline elevata per costruire un allarme efficace, ovvero privo di falsi allarmi, ma adottare una baseline elevata significa perdere in efficacia in quanto l'eventuale danneggiamento viene segnalato con ritardo.

Si è osservato, in una prova senza rottura, che, a differenza di quanto accade per gli accelerometri test, l'andamento del RMS del microfono non rimane costante, a regime, durante l'intera durata della prova.

Le figure 9-13 e 9-14 riportano l'andamento del RMS relativo agli ultimi 10 minuti di funzionamento del banco e mostrano le capacità del RMS nelle fasi finali prima del distacco del dente.

Dall'esame dell'andamento del RMS dell'accelerometro 1, figura 9-5, si rileva la presenza di improvvisi picchi del RMS stesso, probabilmente legati a disturbi di natura elettrica, che non hanno determinato l'arresto del banco per l'elevato valore della baseline adottato.

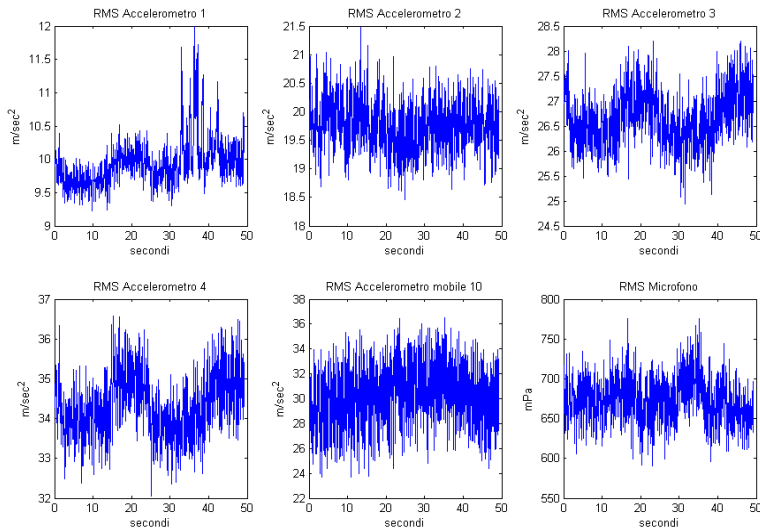


Figura 9- 5 Andamento del RMS a 0 Cicli

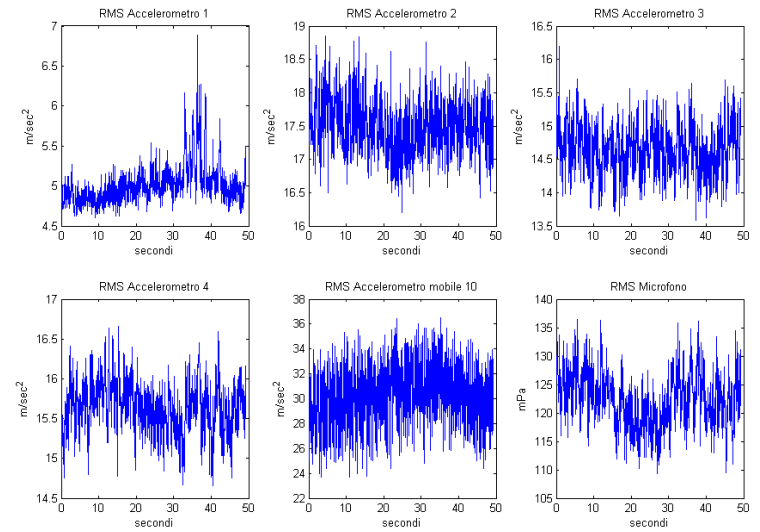


Figura 9- 6 Andamento del RMS a 0 Cicli filtrato a bassa frequenza

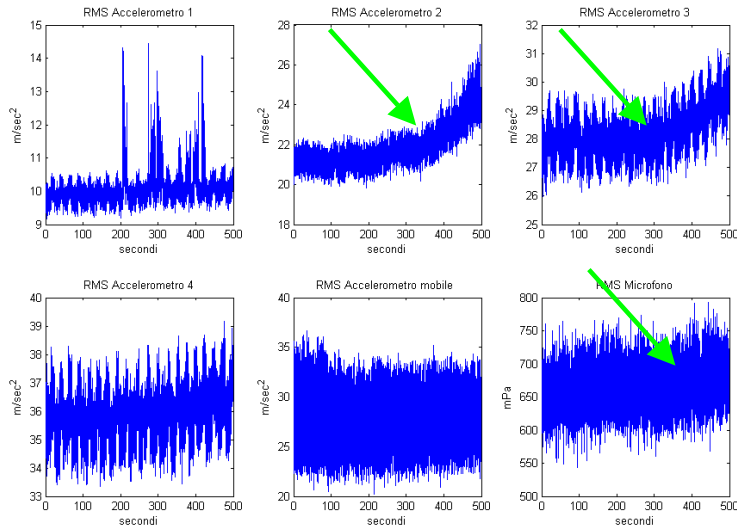


Figura 9- 7 Andamento del RMS da 3.240.000 a 3.320.000 Cicli

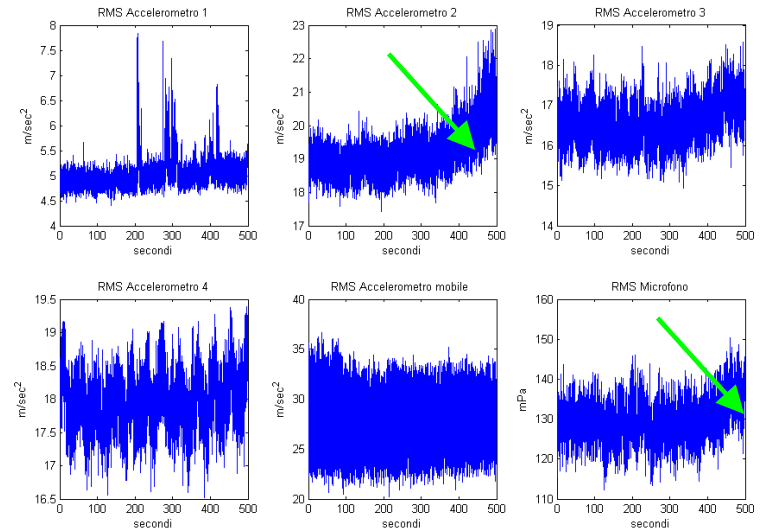


Figura 9-8 Andamento RMS da 3.240.000 a 3.320.000 Cicli Filtrato a bassa frequenza

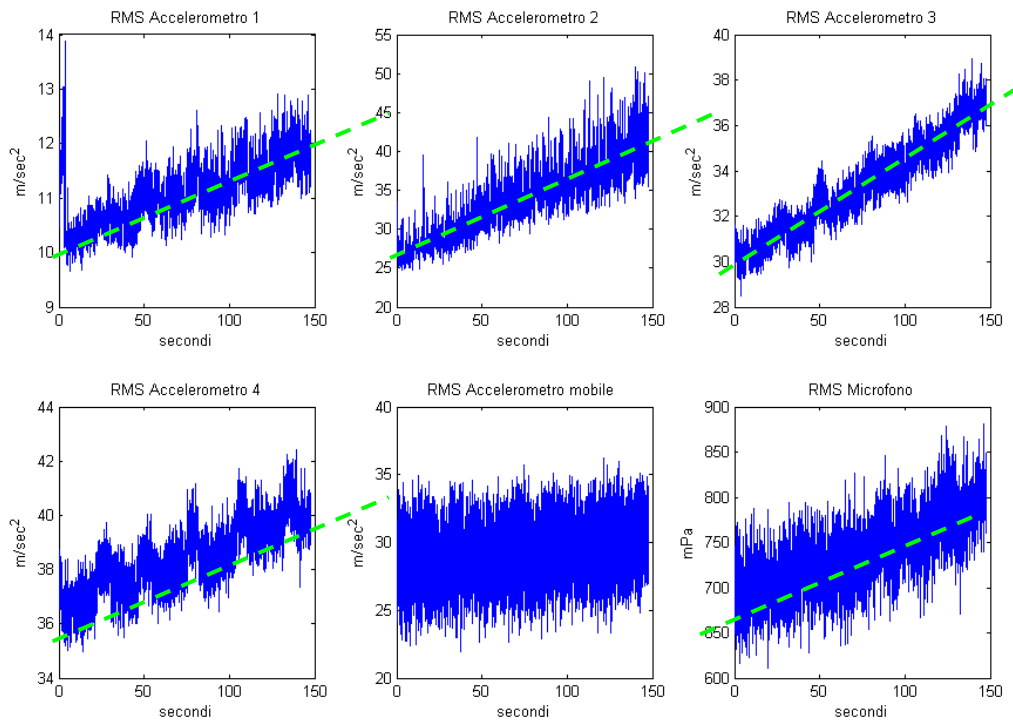


Figura 9- 9 Andamento del RMS da 3.320.000 Cicli ad arresto banco

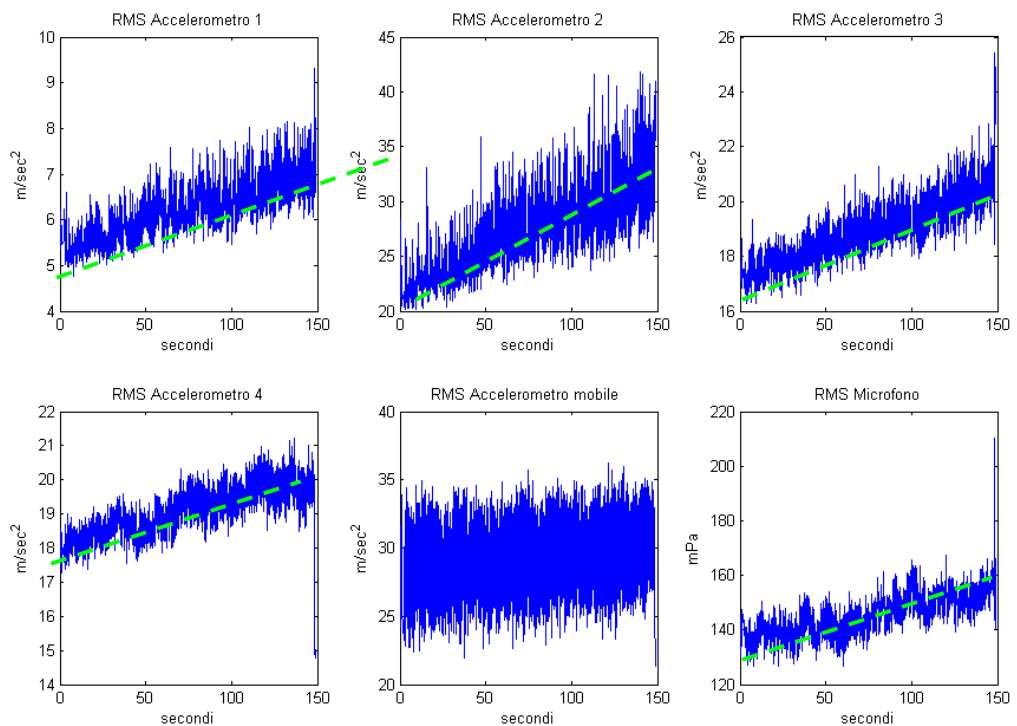


Figura 9-10 Andamento RMS da 3.320.000 Cicli ad arresto con Filtro a bassa frequenza

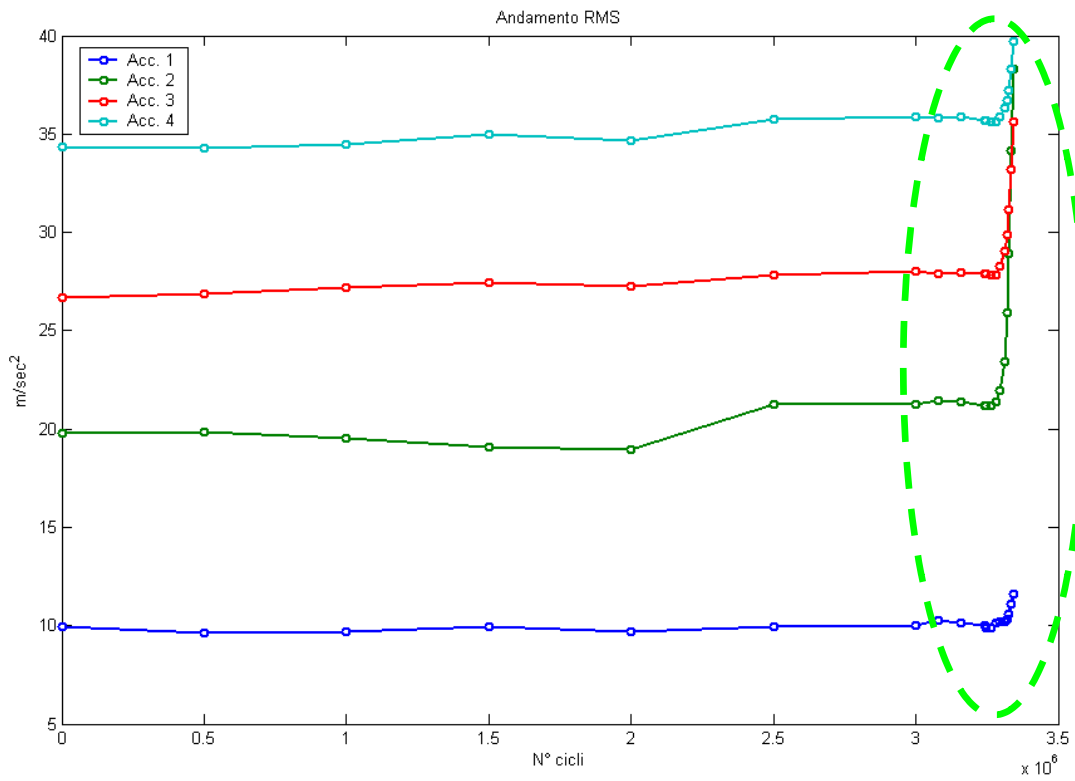


Figura 9- 11 RMS ACCELEROMETRI ZONA TEST

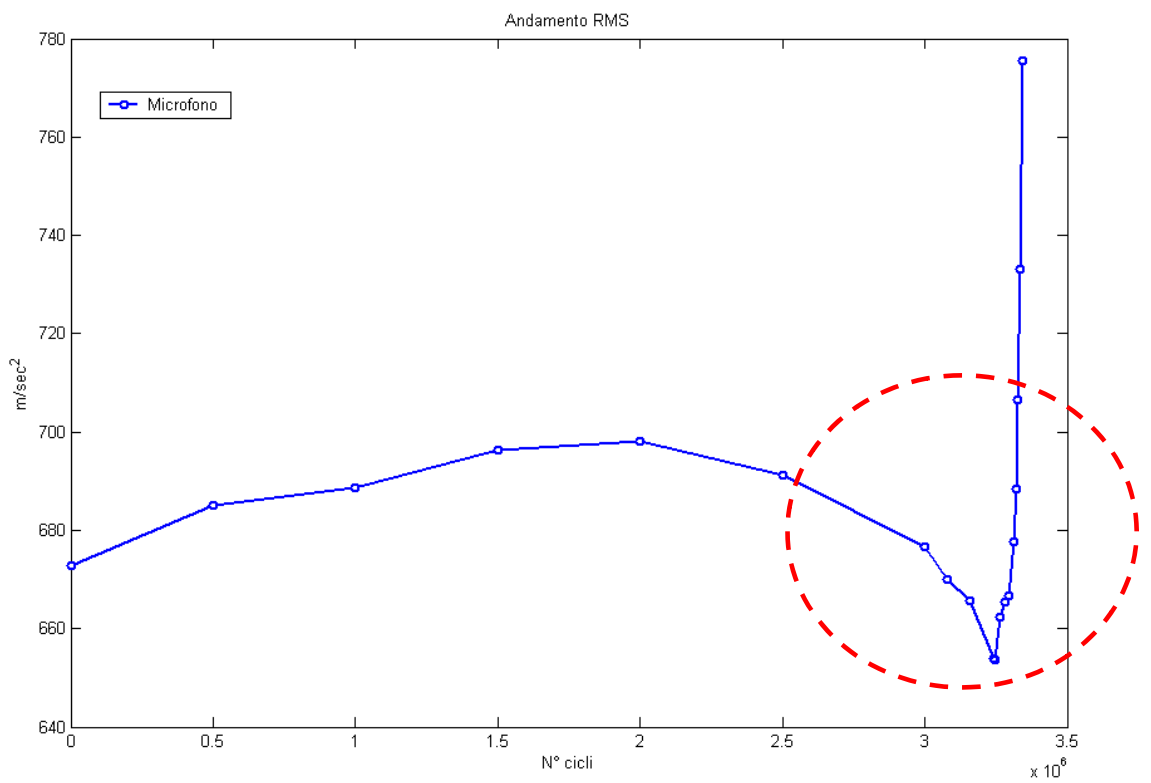


FIGURA 9- 12 RMS MICROFONO

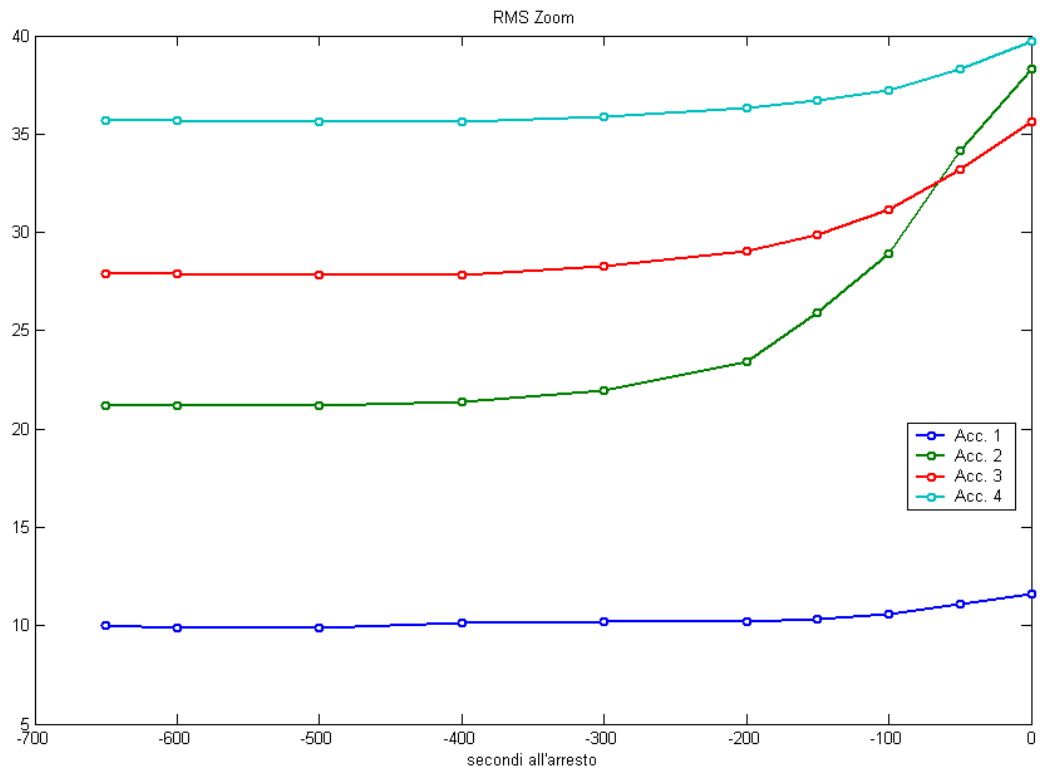


FIGURA 9- 13 RMS ACCELEROMETRI ZONA TEST ULTIMI 10 MINUTI

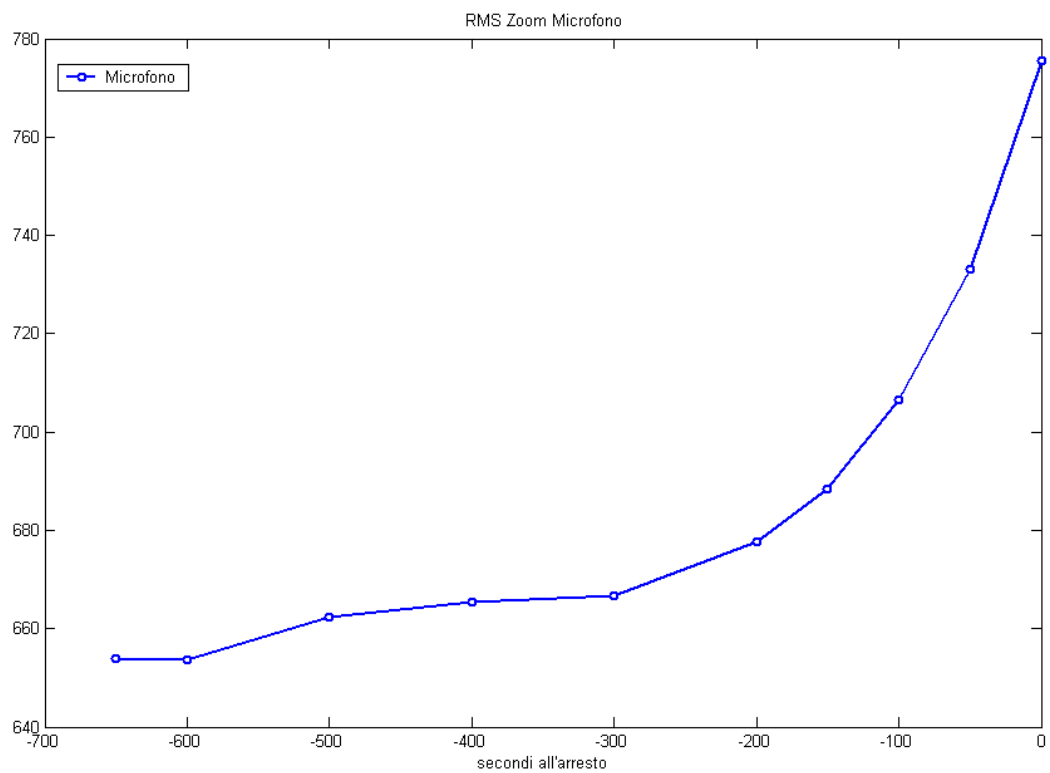


FIGURA 9- 14 RMS MICROFONO ULTIMI 10 MINUTI

9.2.2 Crest Factor CF

Il CF è un parametro utile nel realizzare un allarme efficiente nel controllare una struttura complessa come quella costituita dal banco Renk, in quanto durante il danneggiamento del dente il CF aumenta % in maniera rilevante, come nel caso del CF relativo all'accelerometro 2 che passa da un valore medio di ~3.4 a ~3.8 in 100 secondi, nella versione di segnale non filtrato, fig.9-20, e passa da ~3.2 a 4.3 (+35%) relativamente al segnale filtrato, fig.9-21.

Analizzando i valori massimi, anziché i valori medi, nell'intervallo di tempo preso in esame, si ha un aumento rilevante del valore massimo del CF, che nel caso dell'accelerometro 2 passa, a 500 secondi dall'arresto, da 4.2 a 5.6 (+33%) in 100 secondi, per raggiungere nei successivi 100 il valore di 7.2 (+72%), con un massimo di 9.7 (+110%) a 50 secondi dall'arresto.

A differenza di quanto accade per gli accelerometri, il CF non fornisce risultati di interesse per il microfono.

In effetti, osservando le figure 9-17 e 9-18, che riportano l'andamento del CF negli ultimi 150 secondi, sia nella versione non filtrata che nella versione filtrata, il CF relativo al segnale microfonico non aumenta, come evidenziato anche dal valor medio riportato in fig.9-20.

L'unica cosa particolare per il segnale microfonico è la comparsa di un picco del CF, nella versione filtrata, a circa 40 secondi dall'arresto del banco.

Questo porta ad ipotizzare, dato che tale picco non è presente nella versione non filtrata e, come vedremo nel paragrafo successivo, un picco simile si registra nell'analisi del Kurtosis, anch'esso relativo solo alla versione filtrata, che il Crest Factor del segnale microfonico individua l'istante in cui si ha il distacco del dente danneggiato dalla ruota.

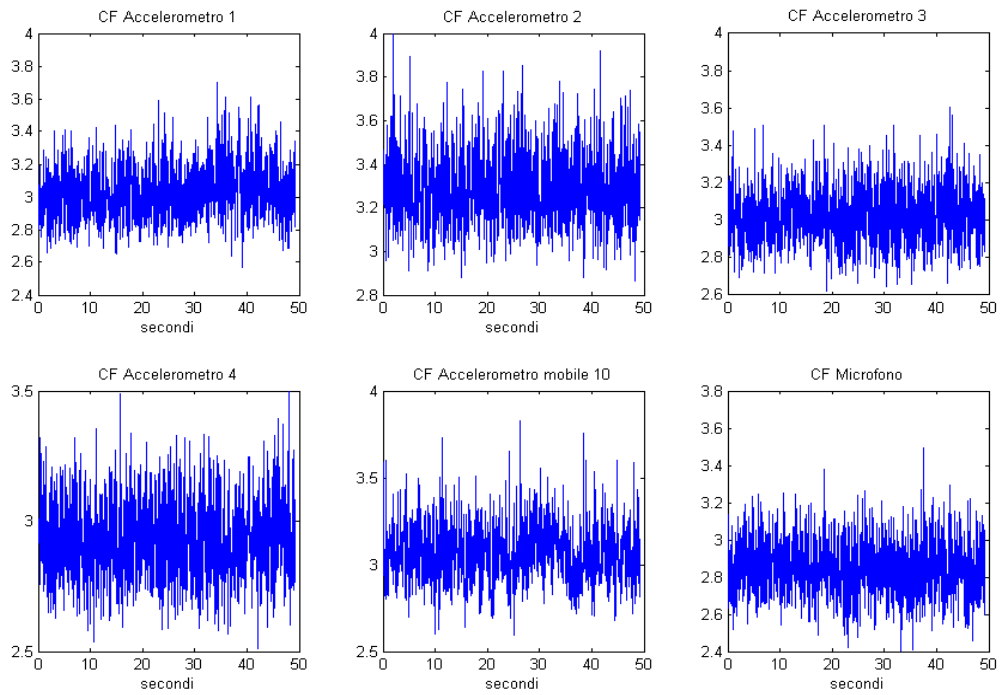


Figura 9- 15 Andamento del CF a 0 Cicli

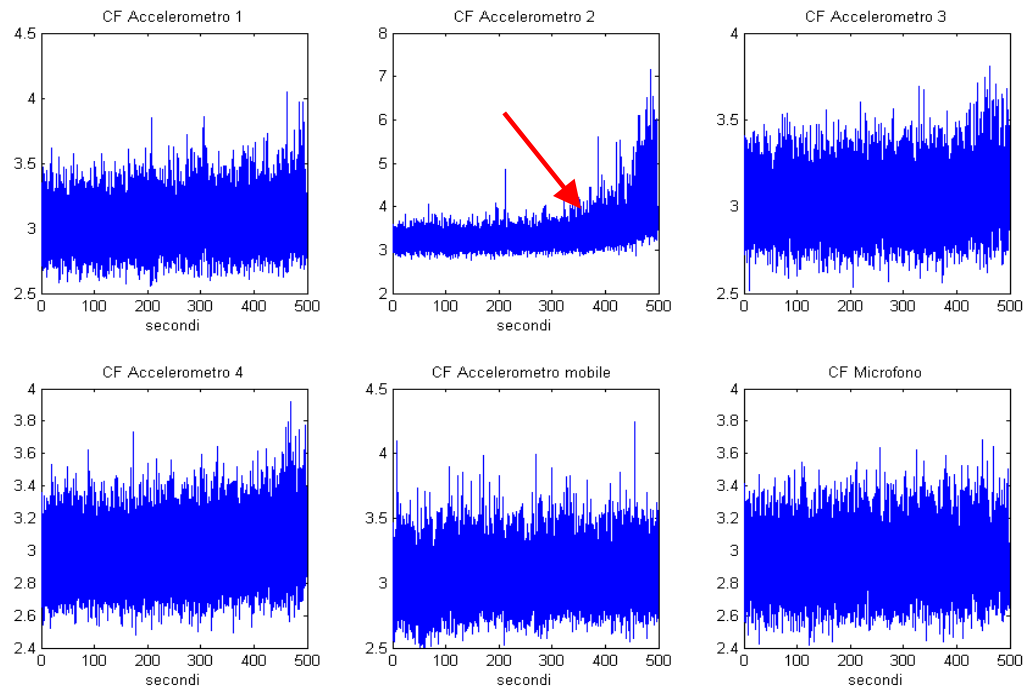


Figura 9- 16 Andamento del CF da 3.240.000 a 3.320.000 Cicli

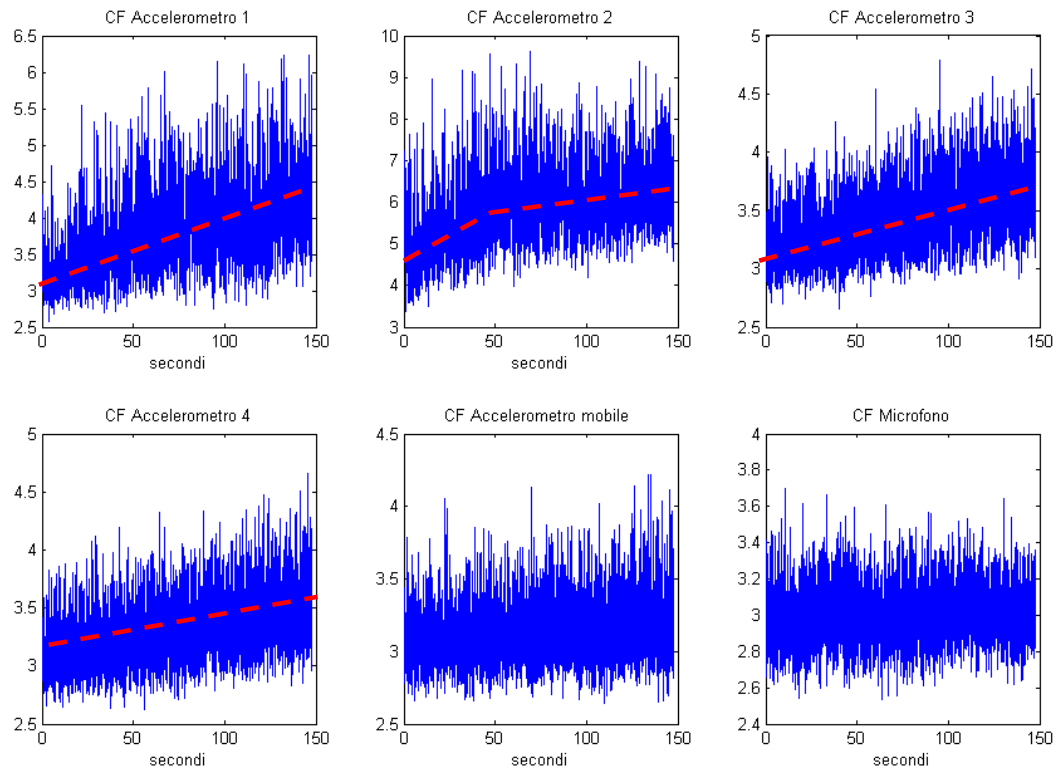


Figura 9- 17 Andamento del CF da 3.320.000 Cicli ad arresto banco

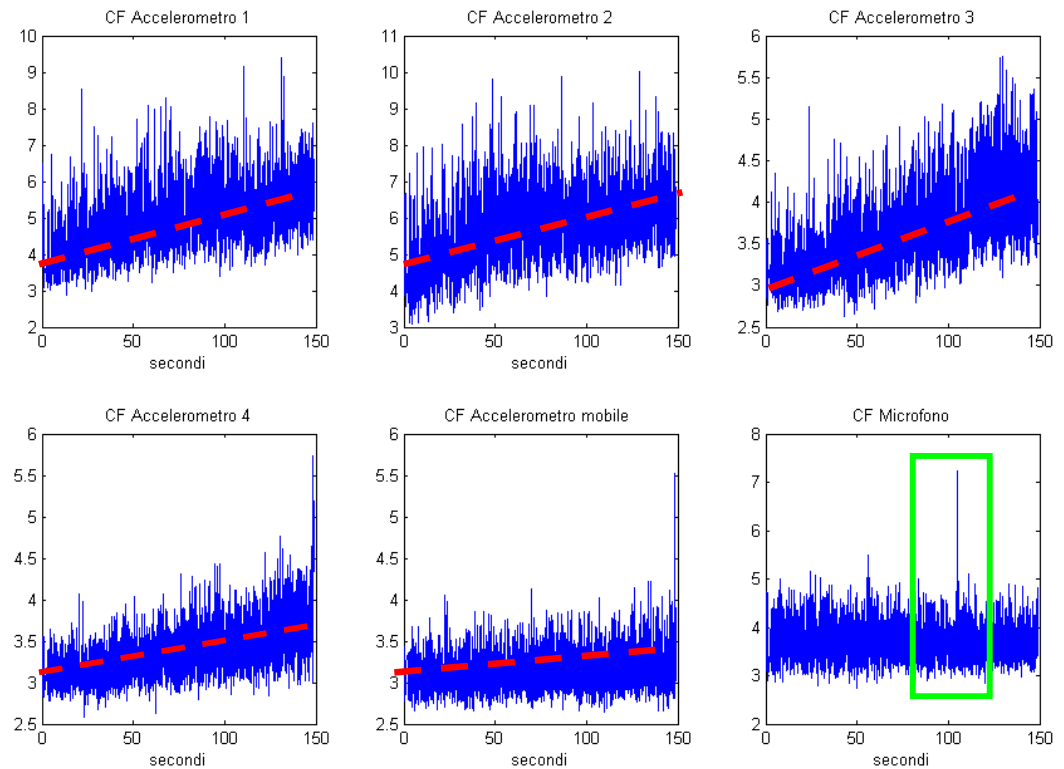


Figura 9- 18 Andamento del CF da 3.320.000 Cicli ad arresto banco Filtrato a bassa frequenza

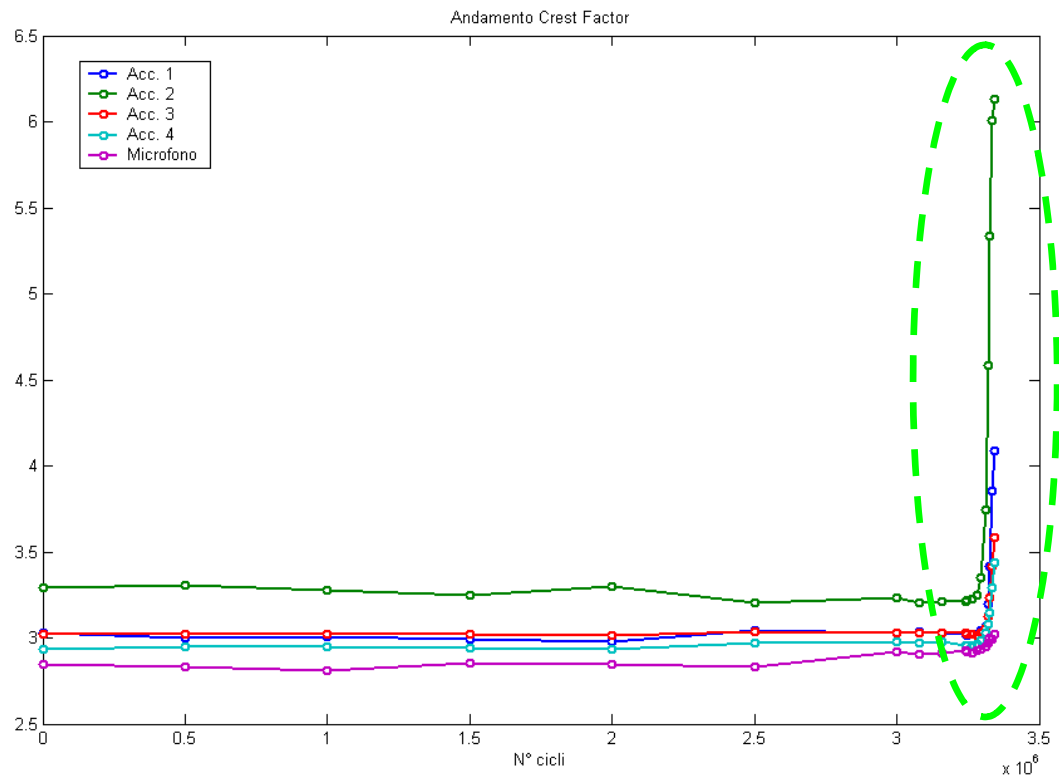


Figura 9- 19 Andamento Crest Factor

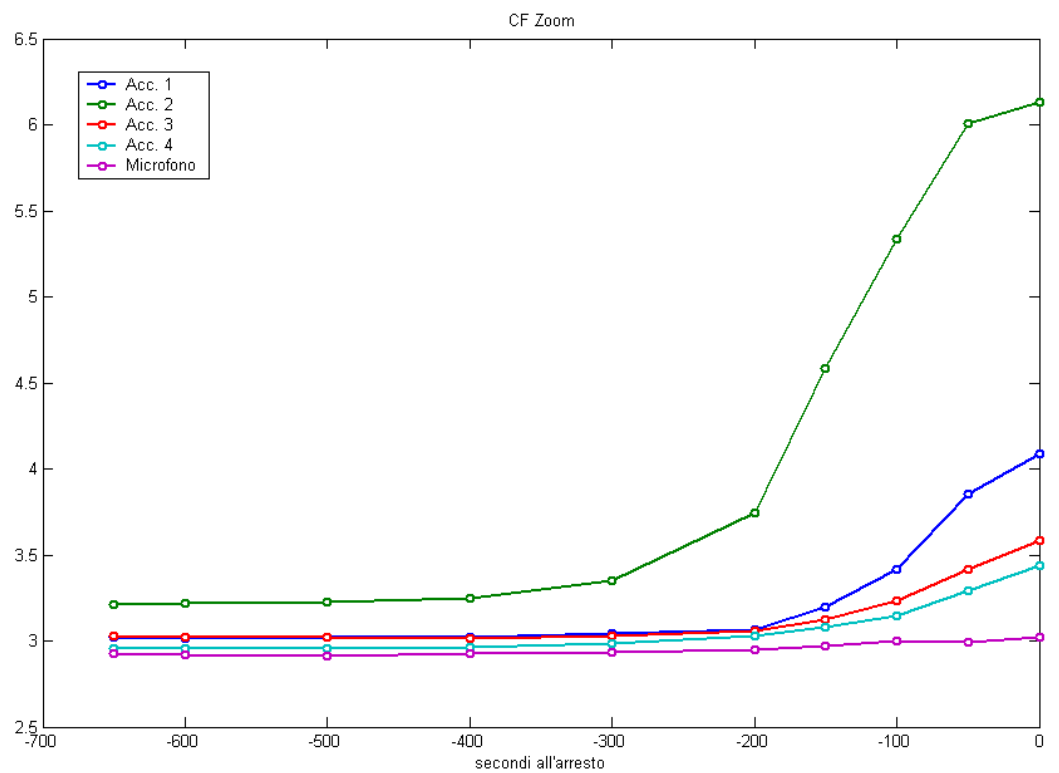


Figura 9- 20 Andamento Crest Factor ultimi 10 minuti

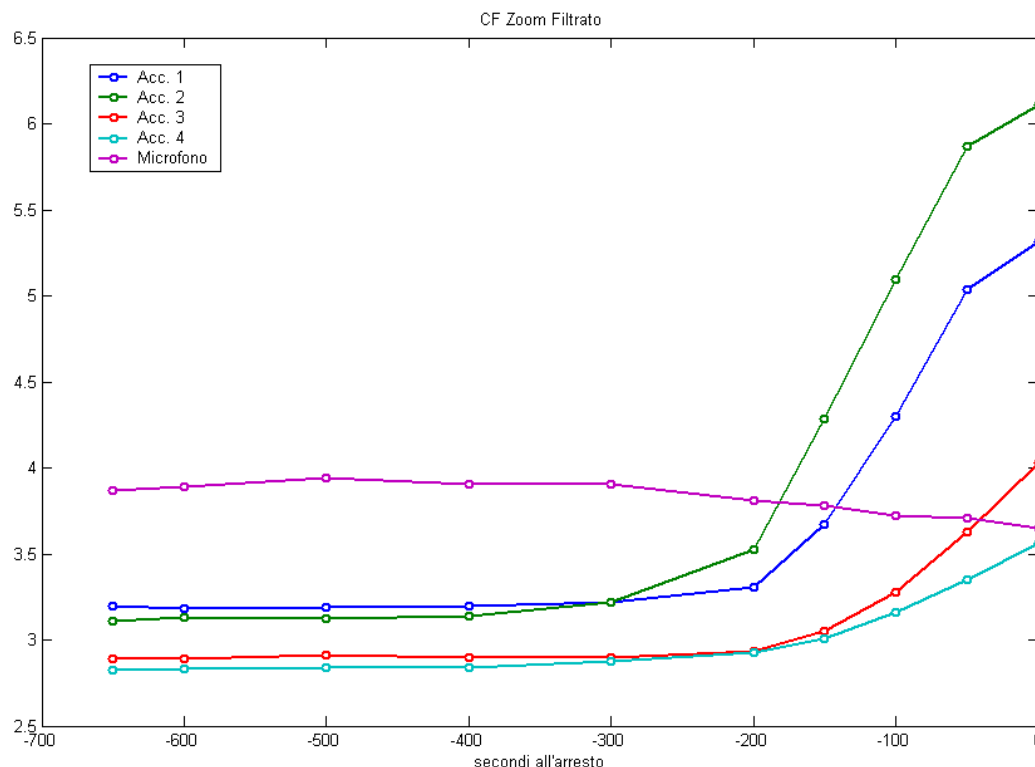


Figura 9- 21 Andamento Crest Factor ultimi 10 minuti filtrato a bassa frequenza

9.2.3 Kurtosis

Tra i parametri utilizzati il Kurtosis si è rivelato il parametro più efficace nel realizzare un allarme adatto a controllare lo stato generale di una struttura complessa come quella costituita dal banco Renk.

Nella figura 9-27, che riporta l'andamento del valor medio del Kurtosis, si rileva che, durante il danneggiamento del dente, il valore del Kurtosis aumenta percentualmente in un breve intervallo di tempo, passando dal valore medio di riferimento vicino a 3 (valore caratteristico di un segnale privo di componenti impulsive) ad un valore medio di 5 (accelerometro 2) in 150 secondi.

Analizzando in fig.9-23 il valore del Kurtosis, relativo all'accelerometro 2, si osserva un aumento notevole nel suo valore massimo che passa da 3.8 (250° secondo) a 8.7 in 100 secondi e 12.5 in ulteriori 100 secondi, indicati dalle frecce nere, ed arrivare ad un valore di 52, circa 20 secondi prima dell'arresto del banco, fig 9-24.

Come accaduto per il Crest Factor, anche il valore del Kurtosis relativo al segnale microfonico non segnala, nel suo valore medio, il danneggiamento della ruota, ma, come accennato nel precedente paragrafo, nella versione relativa al segnale filtrato, fig.9-24, contrassegnato dal rettangolo verde, si registra un picco a 23.8 a 45 secondi dall'arresto.

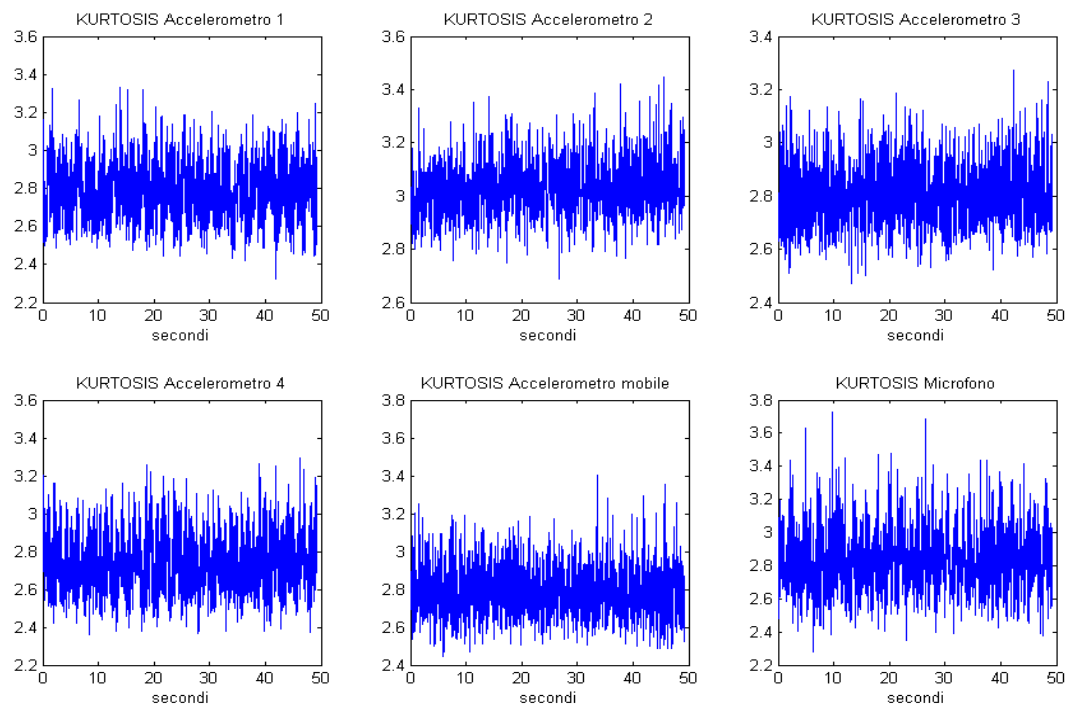


Figura 9- 22 Andamento del Kurtosis 0 Cicli

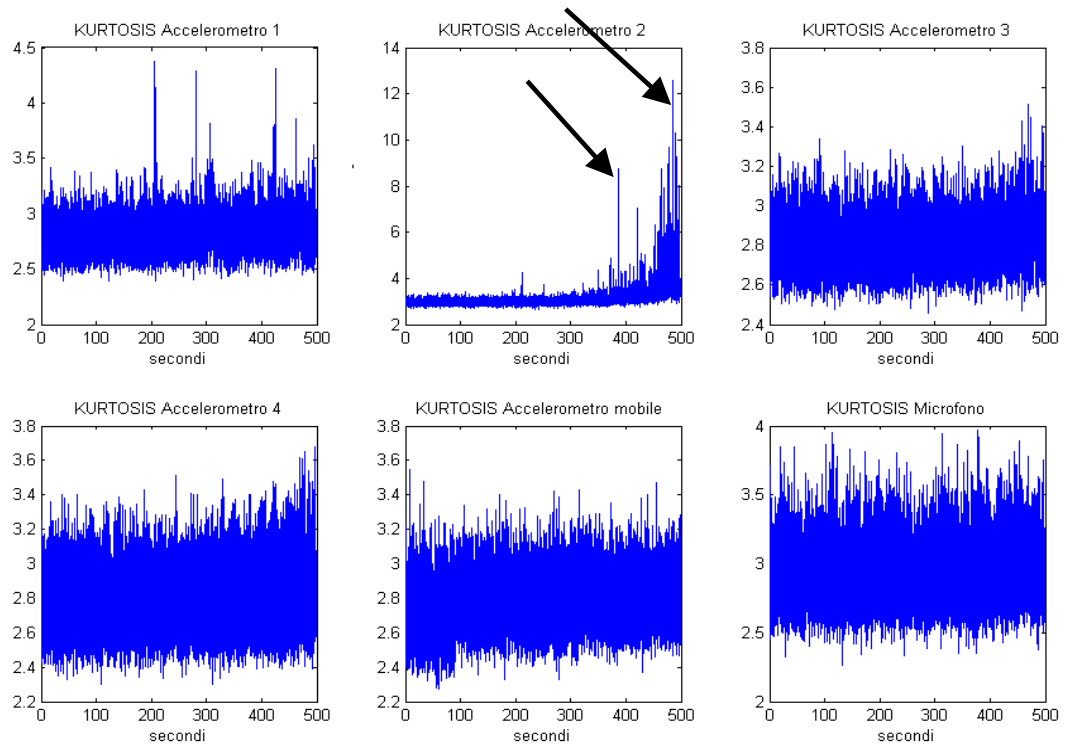


Figura 9- 23 Andamento del Kurtosis da 3.240.000 a 3.320.000 Cicli

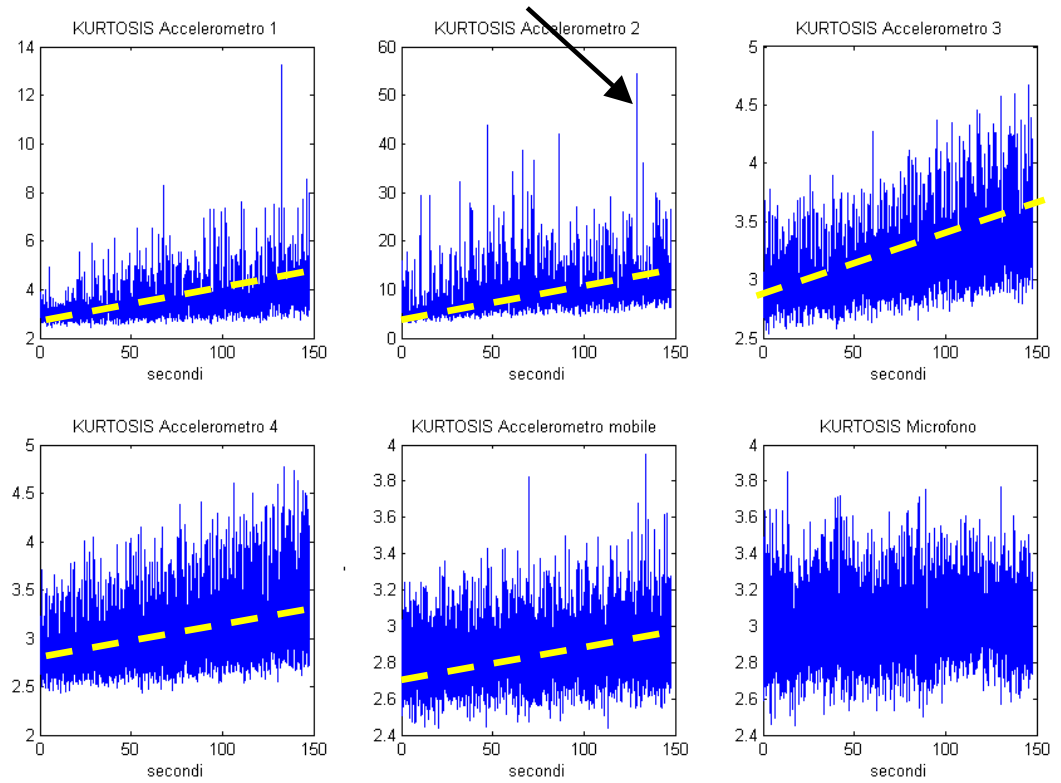


Figura 9- 24 Andamento del Kurtosis da 3.320.000 Cicli ad arresto banco

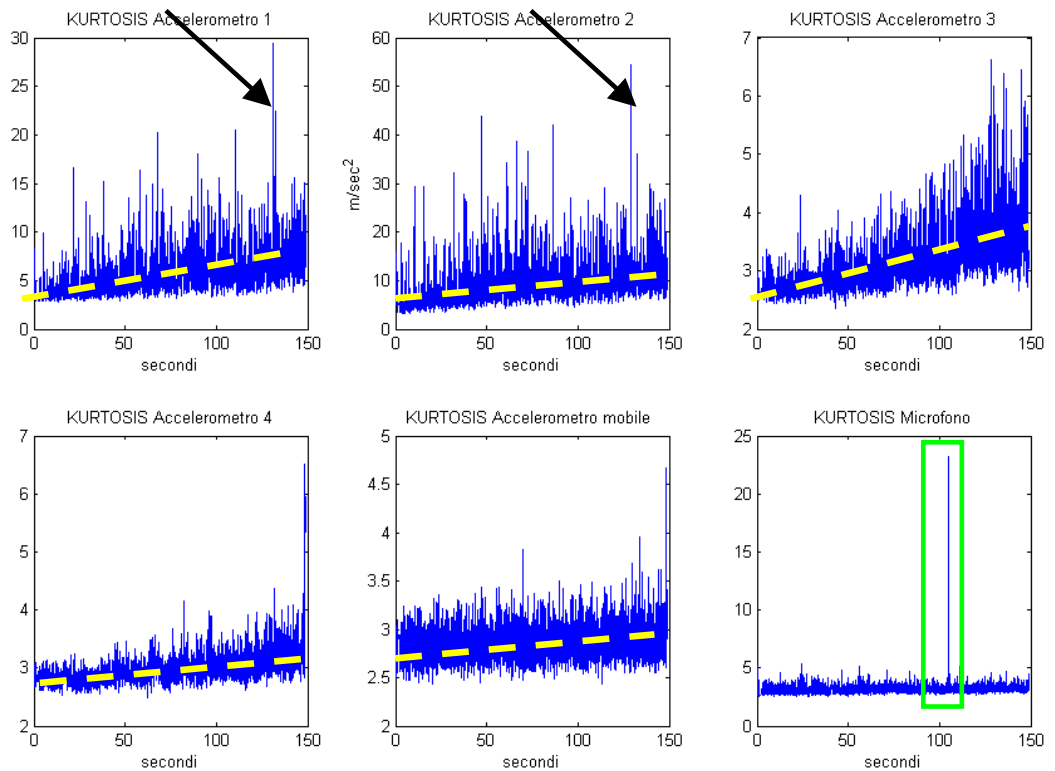


Figura 9- 25 Andamento del Kurtosis da 3.320.000 Cicli ad arresto banco Filtrato a bassa frequenza

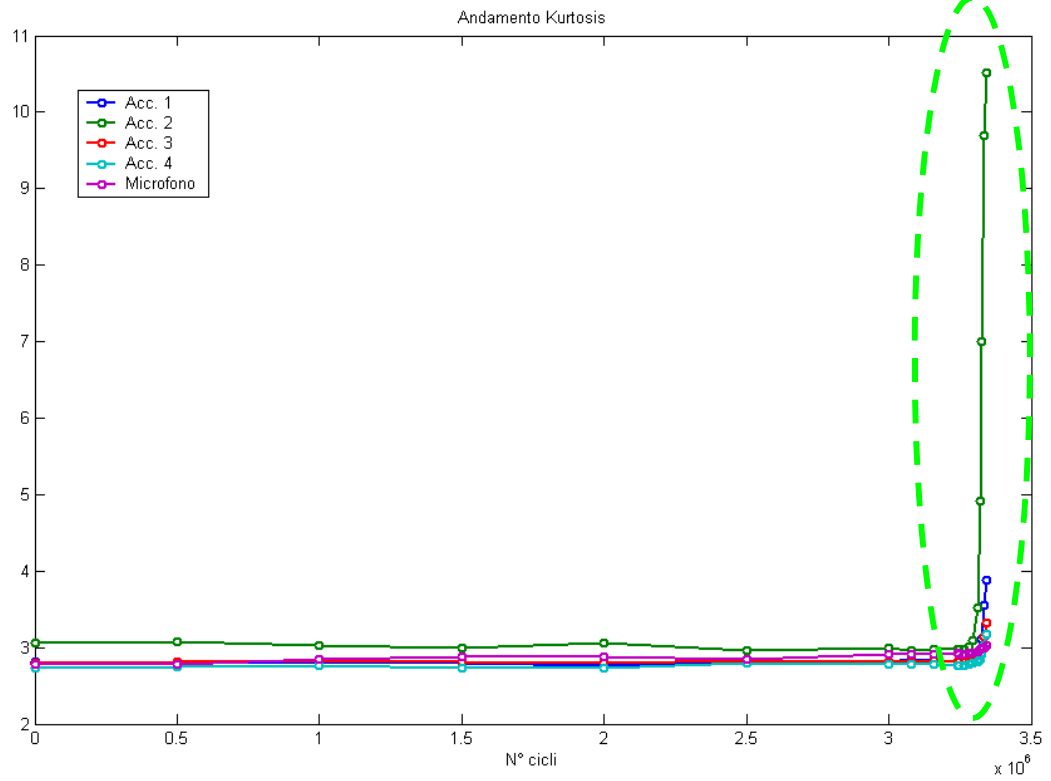


Figura 9- 26 ANDAMENTO KURTOSIS

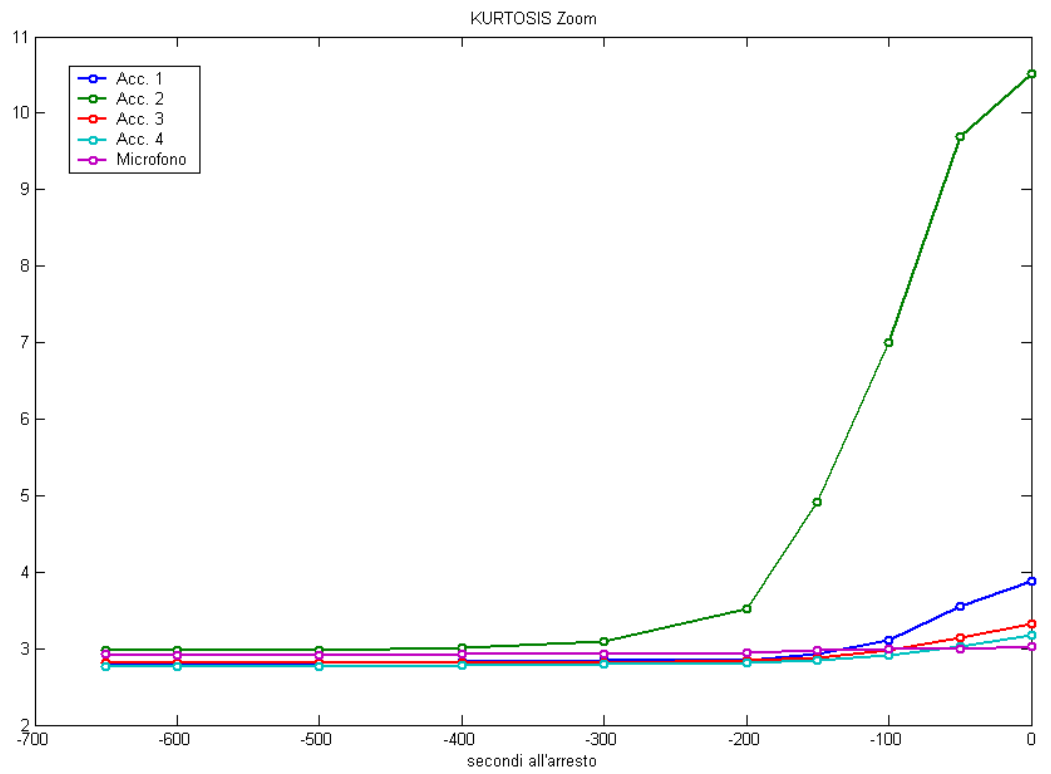


Figura 9- 27 ANDAMENTO KURTOSIS ULTIMI 10 MINUTI

I parametri statistici adottati risultano validi nell'esame del segnale accelerometrico, purché l'accelerometro venga opportunamente schermato da disturbi esterni, come dimostra il fatto che l'accelerometro che ha permesso di diagnosticare il difetto con rilevante anticipo, è proprio l'unico che non risente dei disturbi derivanti dalla frequenza di rete.

Risulta inoltre che il Kurtosis fornisce risultati migliori rispetto agli altri due parametri utilizzati, in quanto al generarsi del danneggiamento aumenta percentualmente in misura decisamente superiore.

Ma, come riportato in letteratura, l'utilizzo di tale parametro non deve mai prescindere dall'uso del RMS, come parametro di conferma.

I parametri statistici non hanno invece fornito buone indicazioni del danneggiamento per il segnale microfonico, ad eccezione del RMS.

I parametri CF e Kurtosis, si ritiene che risentano dell'elevata attività a bassa frequenza del segnale microfonico, e che pertanto non risultano parametri validi per tale tipo di segnale, anche se la comparsa del picco, sia per il valore del CF che del Kurtosis, a 40 secondi dall'arresto del banco, nella versione filtrata, può far ipotizzare, adottando opportuni filtri che ci permettano di analizzare solo il segnale nell'intorno della frequenza di ingranamento, di calcolare il valore di tali parametri nell'intorno della frequenza di ingranamento.

9.3 Analisi spettrale

Si è proceduto ad analizzare gli spettri FFT e PSD dei segnali accelerometrici e microfonico per valutare se con l'analisi spettrale si è in grado di individuare la nascita e lo sviluppo del difetto.

In particolare sono stati analizzati i seguenti campi di frequenza:

- accelerometri 1,2,3 e 4:
 - 0-90 e.o.
 - 77-83 e.o.
- Microfono:
 - 0-90 e.o.
 - 77-83 e.o.

Per seguire l'evoluzione durante la prova delle componenti frequenziali di maggior interesse si è proceduto ad evidenziare tali componenti, figure da 9-29 a 9-32 :

- Freccia rossa : frequenza di ingranamento test, $f_{g\text{test}}$;
- Freccia rossa tratteggiata : Frequenza di modulazione ruota test;
- Rettangolo verde : frequenza di switching inverter (4000 Hz);



- Rettangolo verde tratteggiato : 2x frequenza di switching inverter (8000 Hz);
- Rettangolo celeste : frequenze di disturbo elettrico.

Esaminando la zona nell'intorno della frequenza di ingranamento, 77-83 e.o., gli spettri FFT e PSD non mostrano significativi cambiamenti, ad eccezione di un frastagliamento sulla parte sinistra del picco relativo alla frequenza di ingranamento (80 e.o.) ai 3.320.000 cicli, non presente precedentemente.

In figura 9-28 si riportano gli spettri FFT tra 77 e 83 e.o. relativi ad inizio prova, 3.240.000 e a 3.320.000 cicli del segnale microfonico.

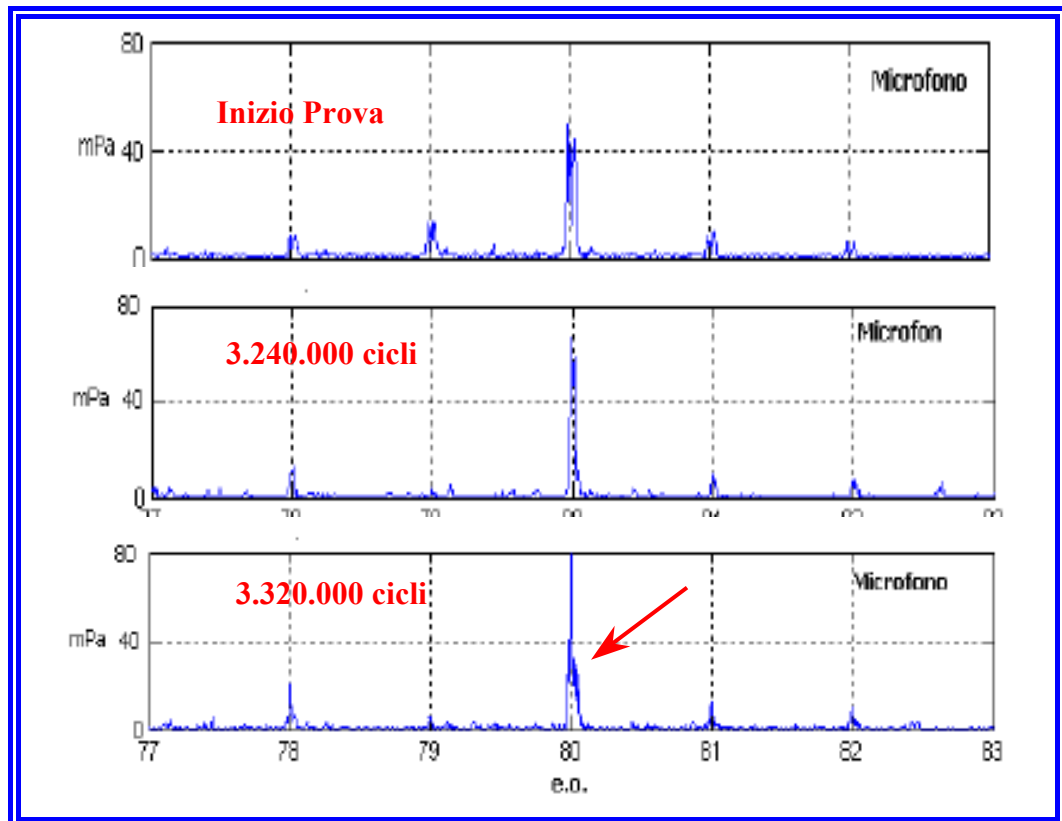


Figura 9- 28 Spettro FFT del segnale microfonico tra 77-83 e.o.

Mentre risultanti interessanti sono forniti dall'analisi del campo spettrale tra 0 e 90 e.o., ed in particolare in quegli intervalli frequenziali che risultano "puliti" a denti integri, ovvero privi di attività spettrale rilevante.

In effetti, si nota dal confronto eseguito sulle figure 9-33, 34 (3.160.000 cicli), le figure 9-35, 36 (3.240.000 cicli) e le figure 9-37, e 38 (3.320.000 cicli), ed indicato con la freccia rossa, l'aumento dell'intensità delle componenti frequenziali, in particolare tra i 20 ed i 30 e.o., dove si registra un aumento consistente, ancor più messo in risalto dall'aver contrassegnato il massimo valore presente a 3.160.000 cicli in quell'intervallo frequenziale con una linea rossa tratteggiata

Riportando, infatti, tale linea nei grafici successivi, si osserva che la situazione non è sostanzialmente cambiata a 3.240.000 cicli, mentre è notevole il cambiamento in corrispondenza dei 3.320.000 cicli, soprattutto per lo spettro FFT e PSD dell'accelerometro 2 e per il microfono, ed in parte per la FFT dell'accelerometro 3.

Nello spettro FFT dell'accelerometro 2 si è evidenziata, inoltre, con un rettangolo grigio tratteggiato la zona tra 30-70 e.o. caratterizzata da una sorta di “barbetta”, ovvero da una attività frequenziale di bassa ampiezza, che a 3.320.000 risulta intensificata.

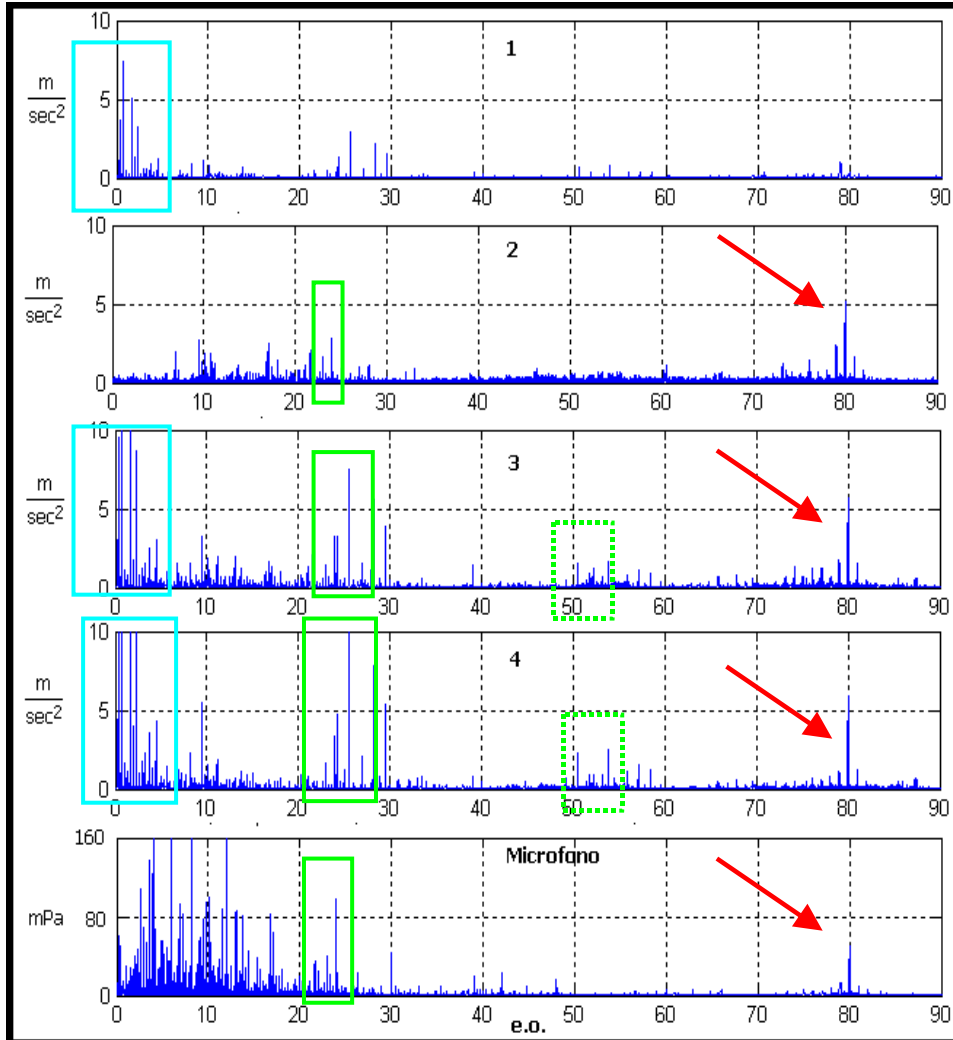


Figura 9- 29 0 cicli 0-90 FFT

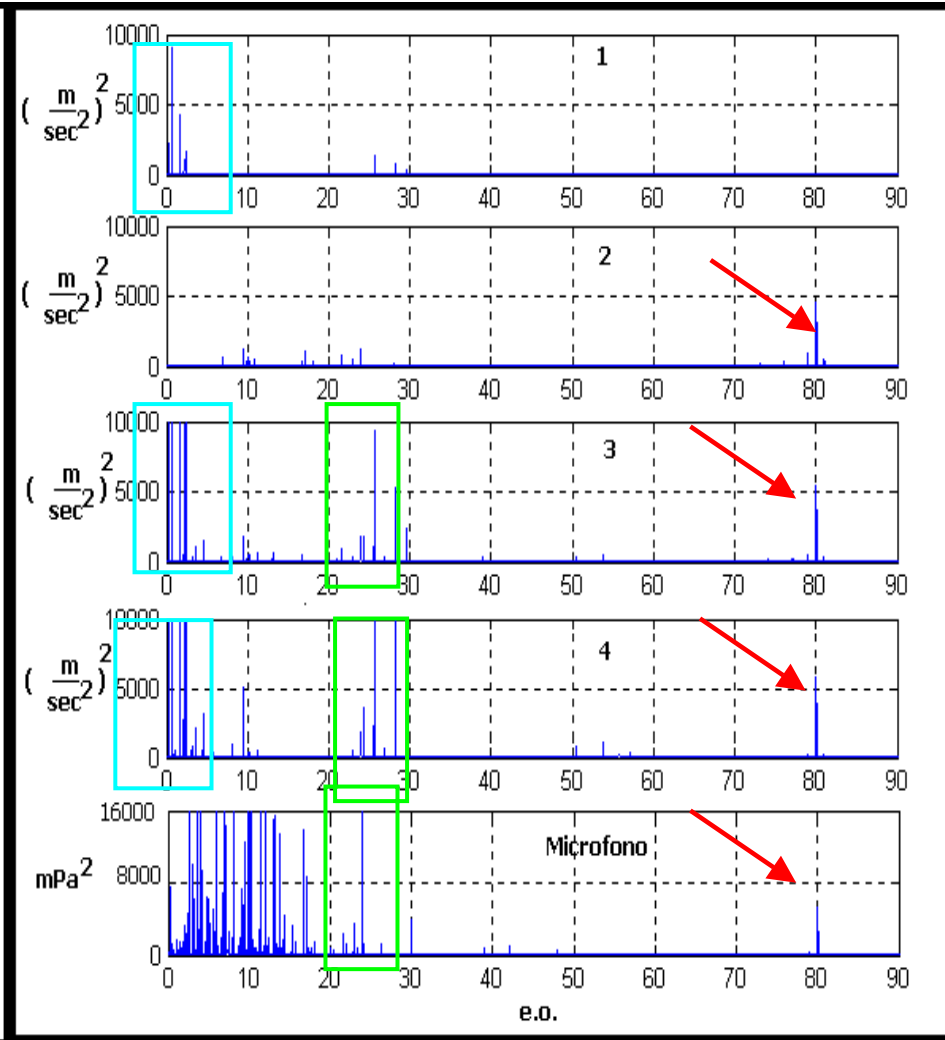


Figura 9- 30 0 cicli 0-90 PSD

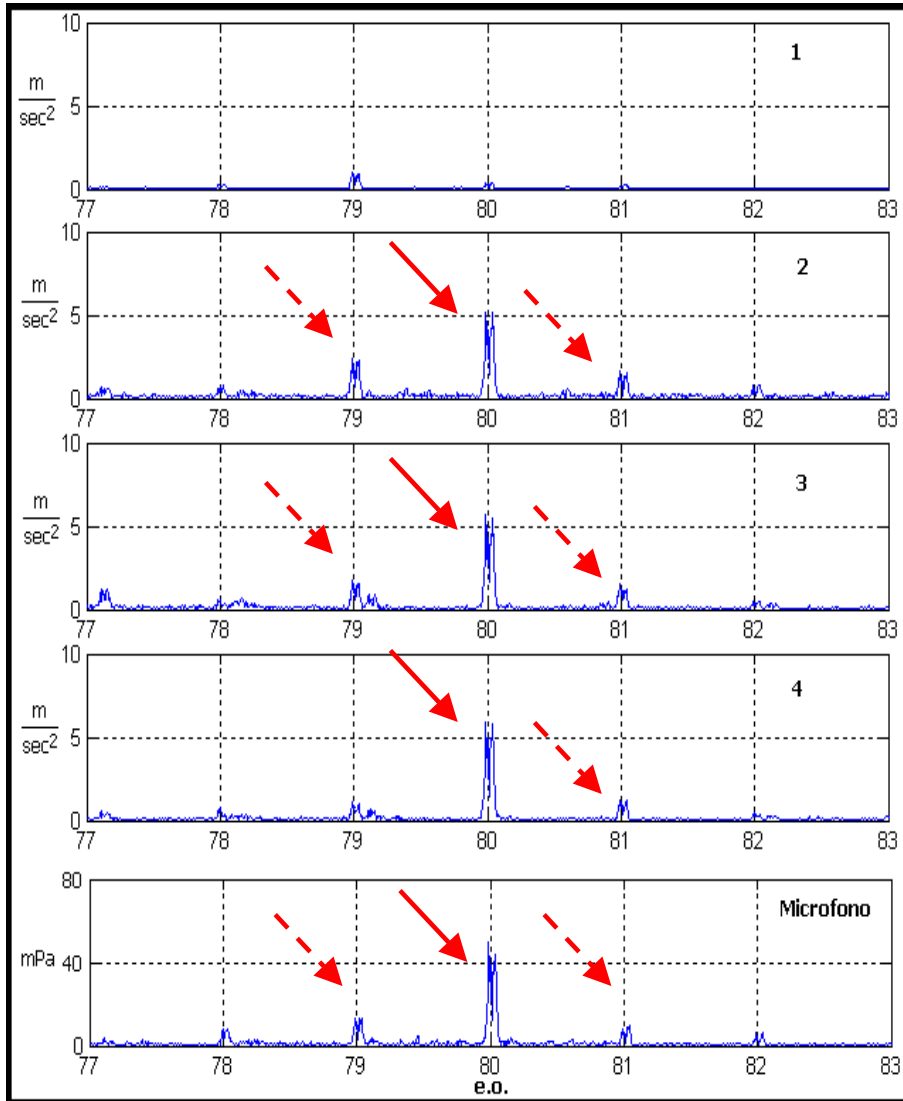


Figura 9- 31 0 cicli 77-83 FFT

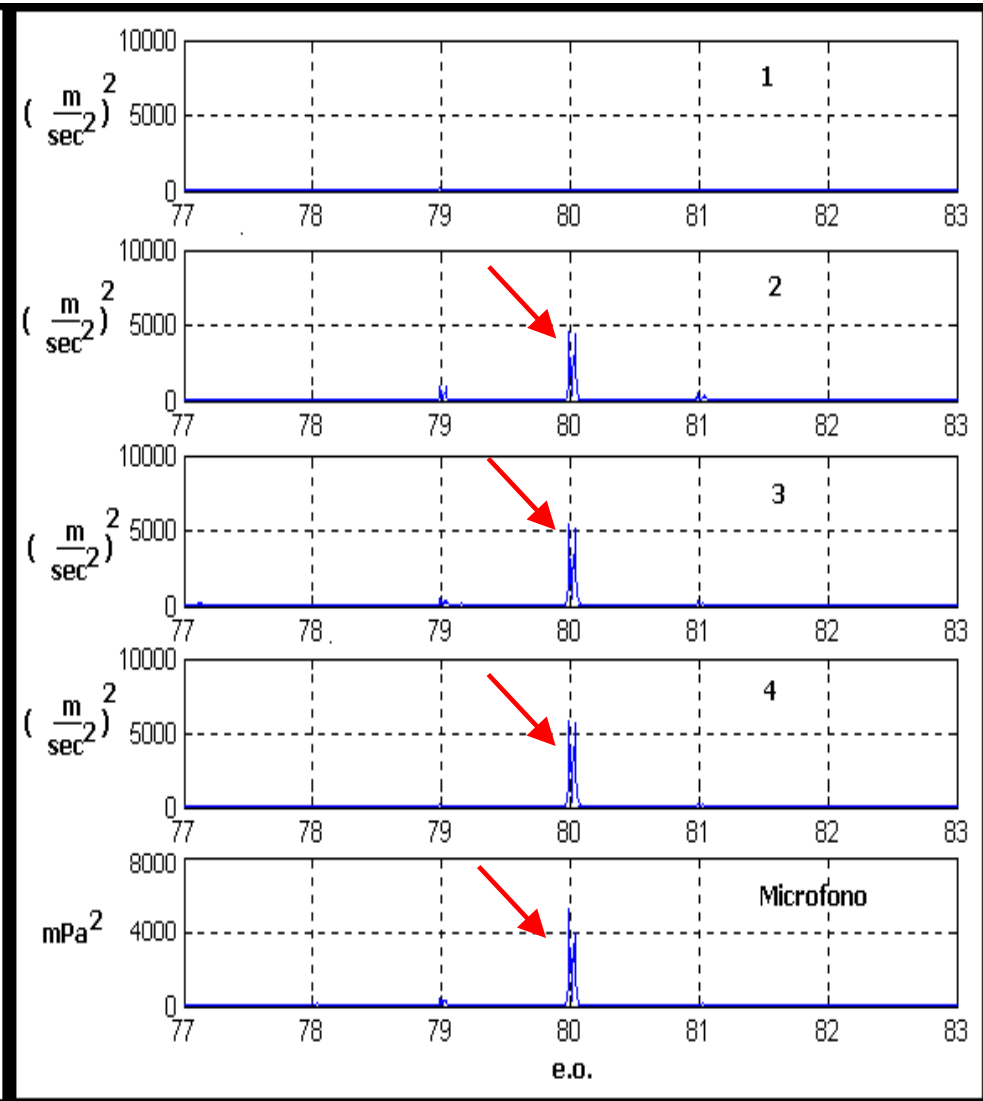


Figura 9- 32 0 cicli 77-83 PSD

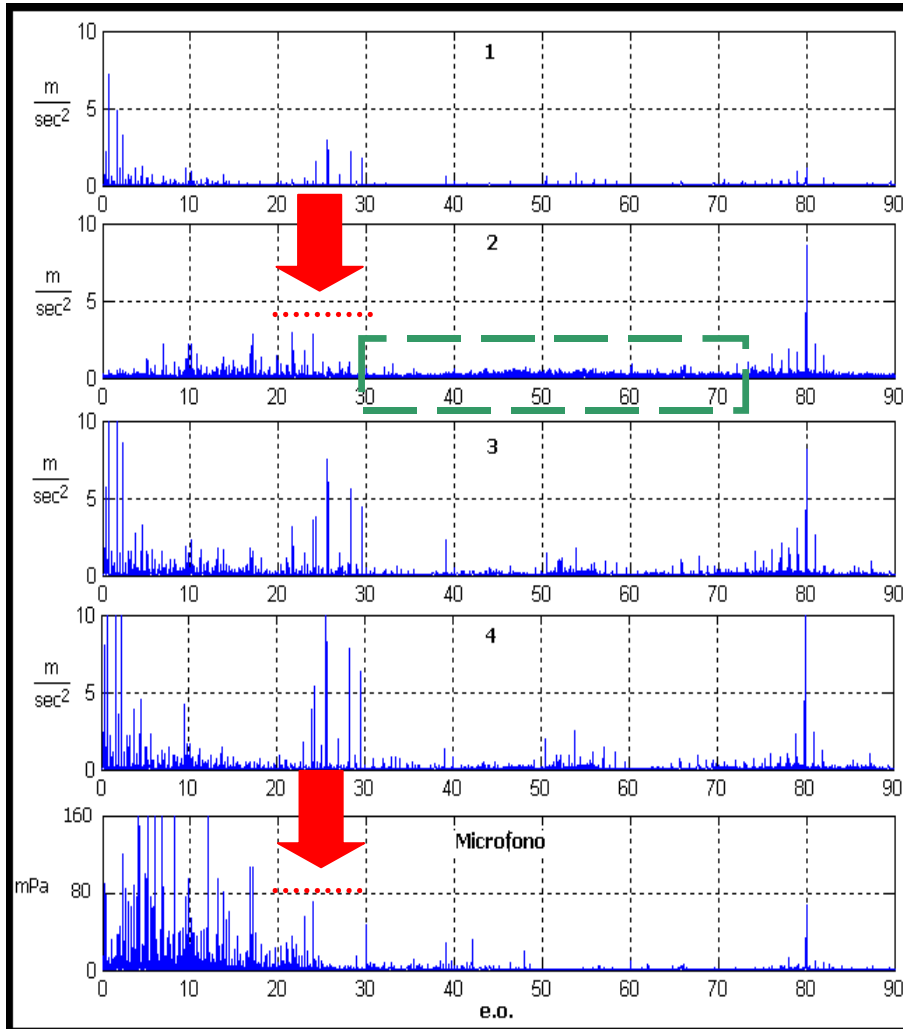


Figura 9- 33 3.160.000 cicli 0-90 FFT

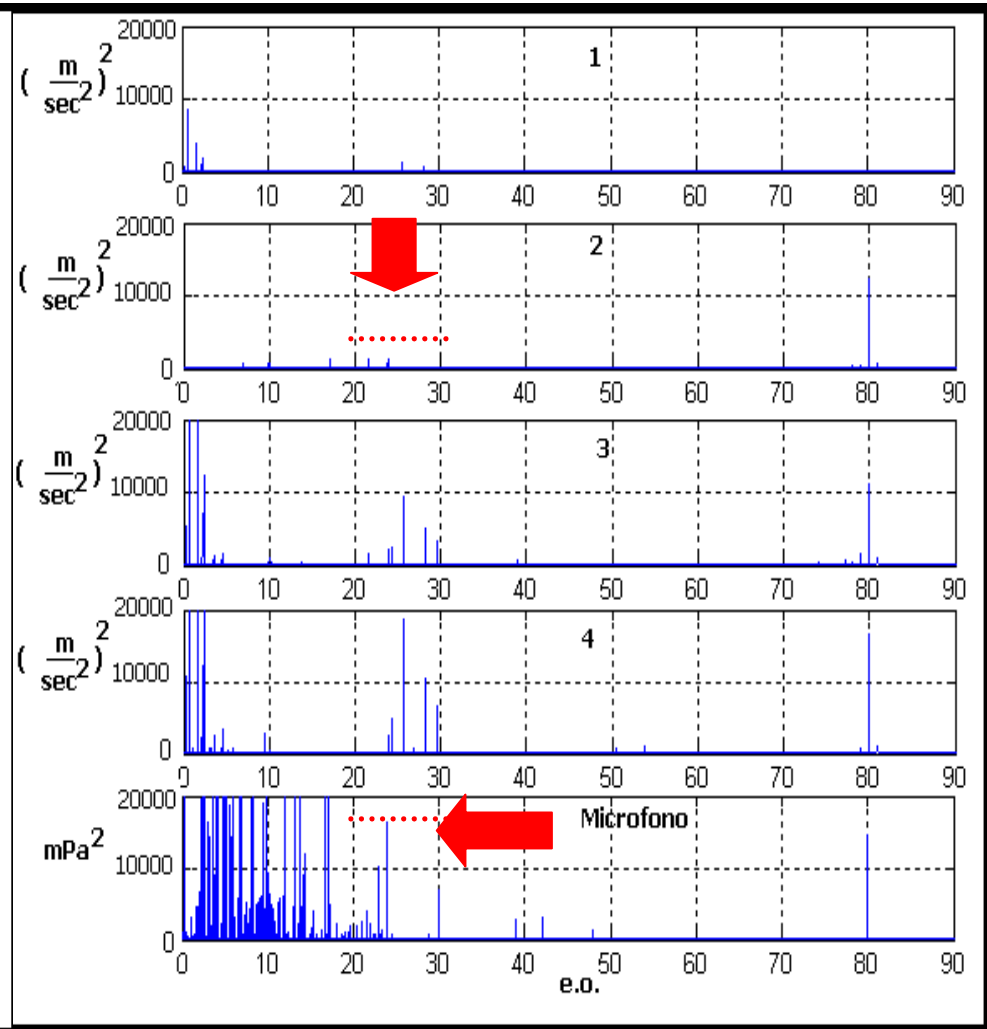


Figura 9- 34 3.160.000 cicli 0-90 PSD

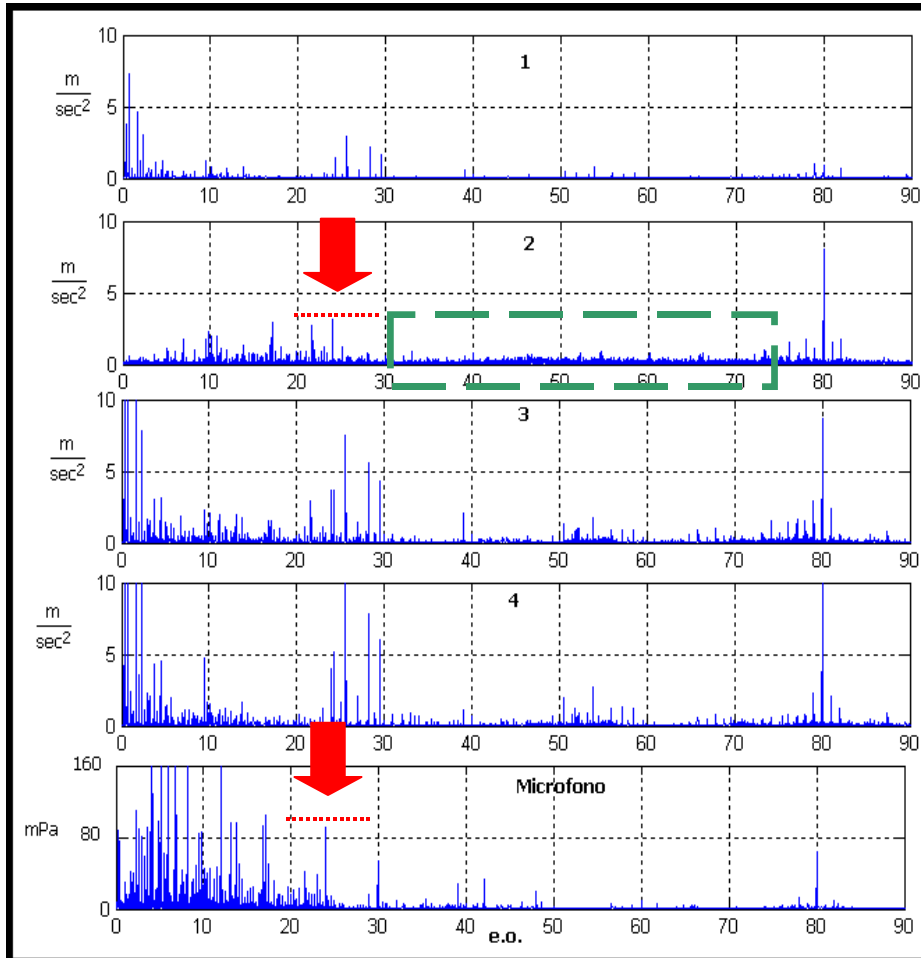


Figura 9- 35 3.240.000 cicli 0-90 FFT

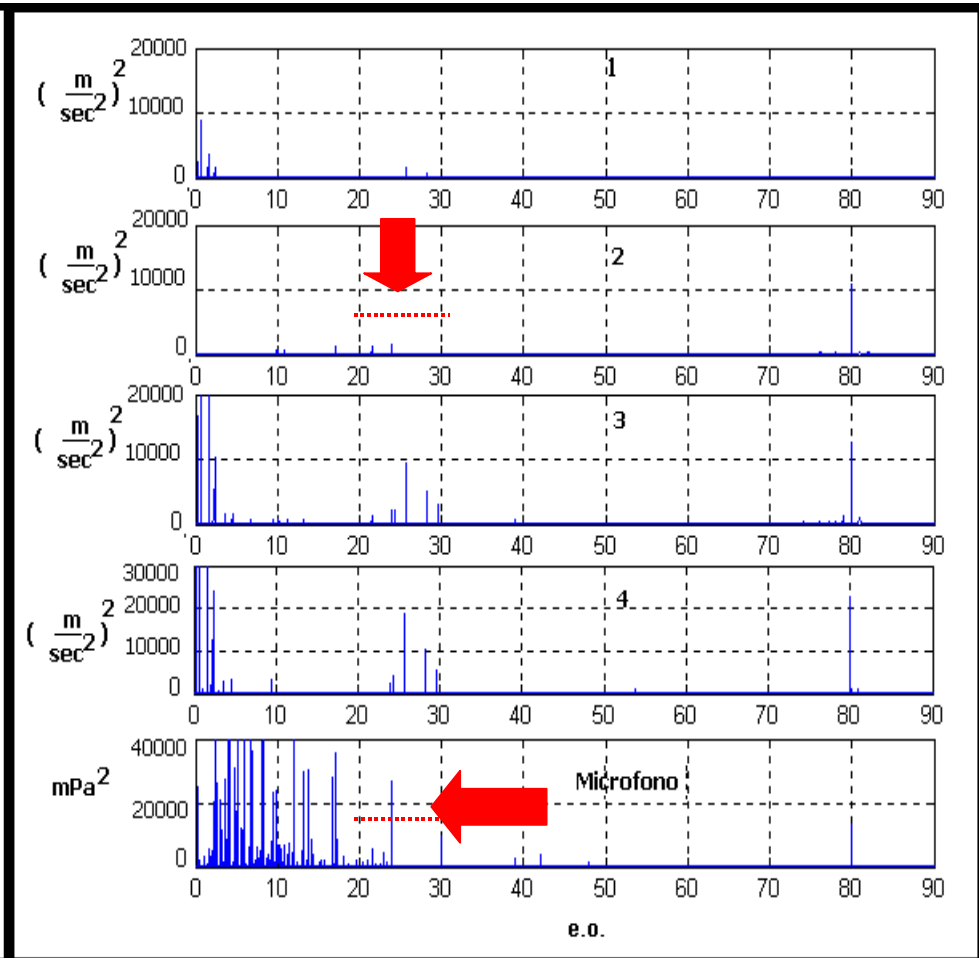


Figura 9- 36 3.240.000 cicli 0-90 PSD

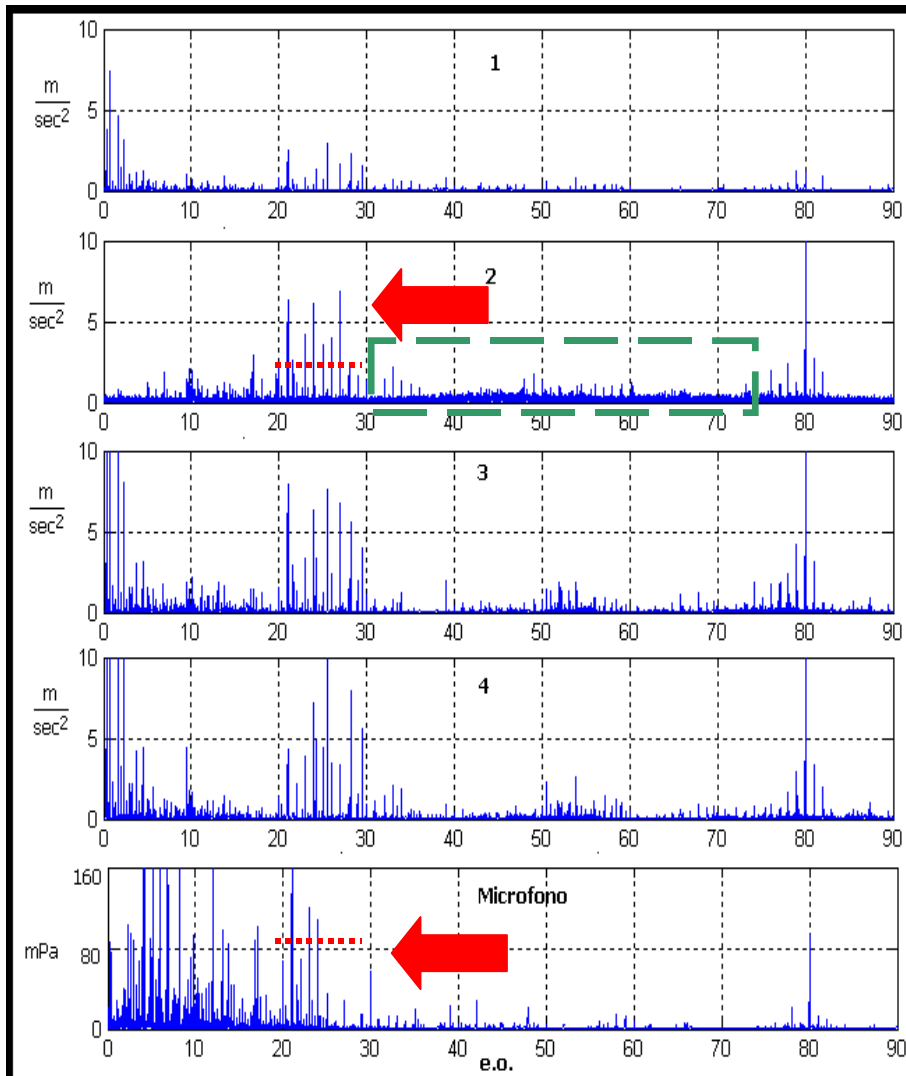


Figura 9- 37 3.320.000 cicli 0-90 FFT

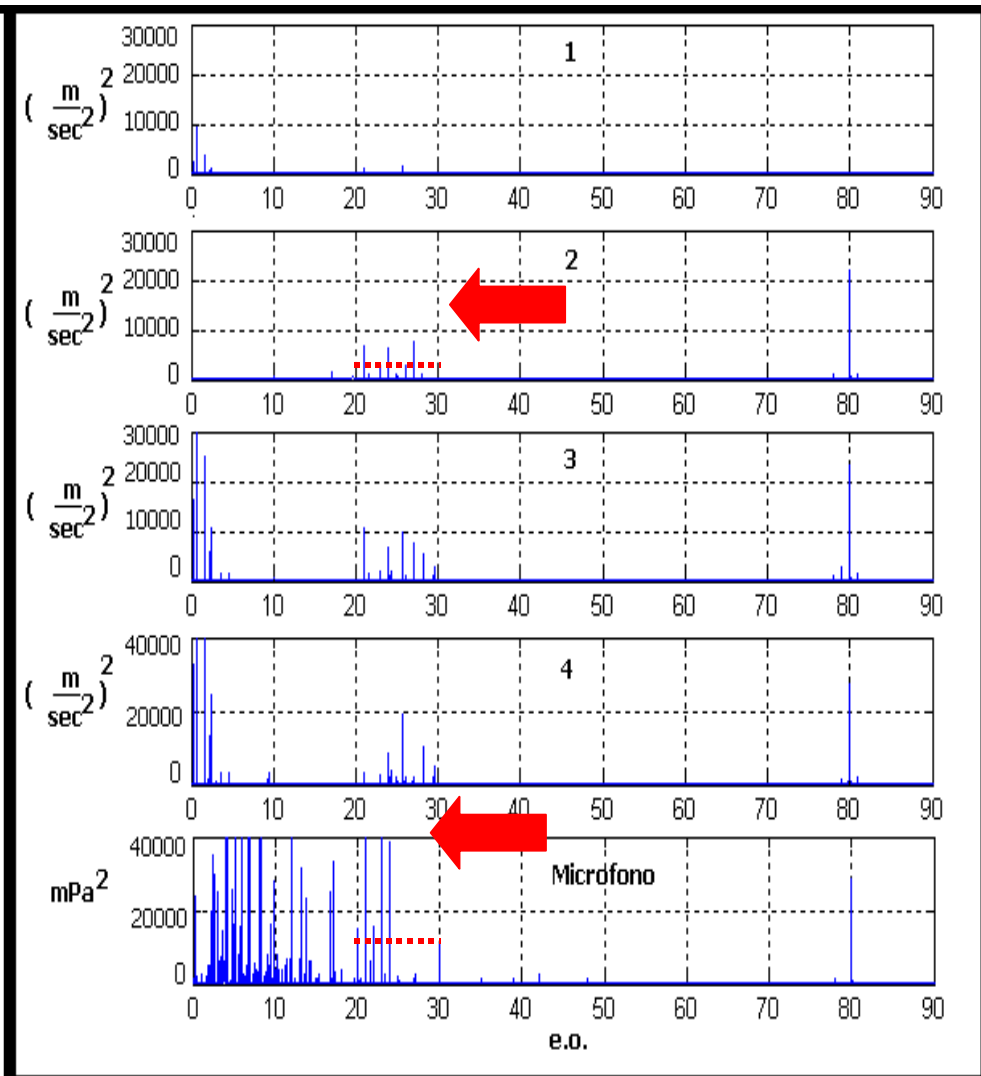


Figura 9- 38 3.320.000 cicli 0-90 PSD

9.4 Analisi Tempo-Frequenza

Nel paragrafo precedente si è esaminato, confrontando gli spettri FFT e PSD relativi ad istanti successivi, l'andamento delle componenti frequenziali.

Per ottenere una più rapida ed efficace lettura delle possibili variazioni in intensità delle componenti frequenziali, si è utilizzata una rappresentazione tempo-frequenza che consente di seguire nel tempo l'evolversi delle componenti frequenziali che costituiscono lo spettro.

Per sincronizzare le finestre FFT o PSD con il tempo si è utilizzato l'algoritmo basato sui marker esposto in §5.1, pag.86, mentre l'intensità spettrale viene rappresentata per mezzo di una scala cromatica.

Anche con tale tipo di analisi s'individua il danneggiamento e il suo sviluppo dall'intensificazione dell'attività spettrale nella zona tra 20 e 30 e.o.

Esaminando l'accelerometro 2 ed il microfono si ottengono le seguenti informazioni:

1. l'accelerometro individua il danneggiamento, utilizzando la rappresentazione FFT, circa 250 secondi prima dell'arresto del banco.

In effetti dal confronto tra la situazione a 20 minuti e quella a 250 secondi dall'arresto, figure 9-39 e 9-40, l'attività nel range 20-30 e.o. cambia radicalmente, si intensifica, come illustrato dalla freccia verde, a cui farà seguito un aumento dell'attività tra 40 e 60 e.o. come indicato con la freccia rossa in fig.9-41.

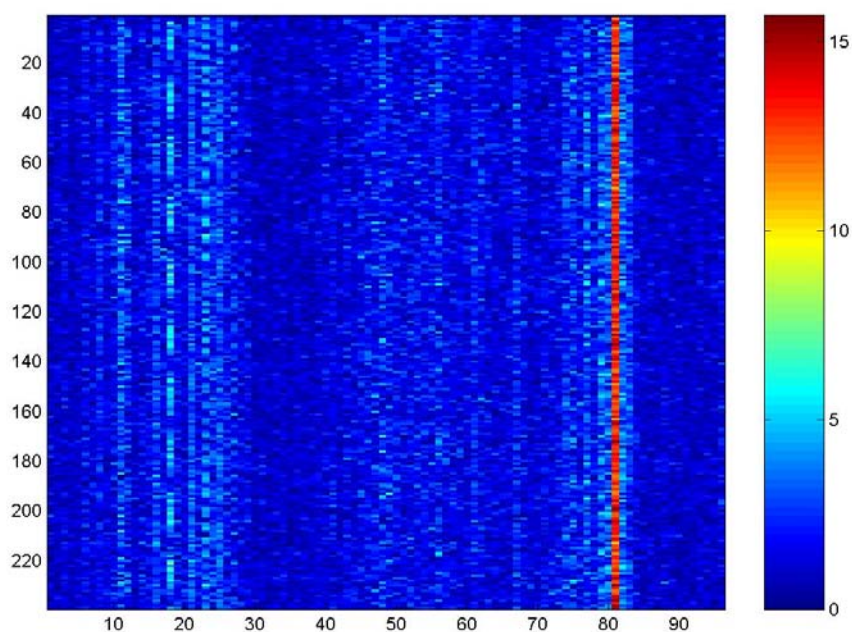


Figura 9- 39 20 minuti

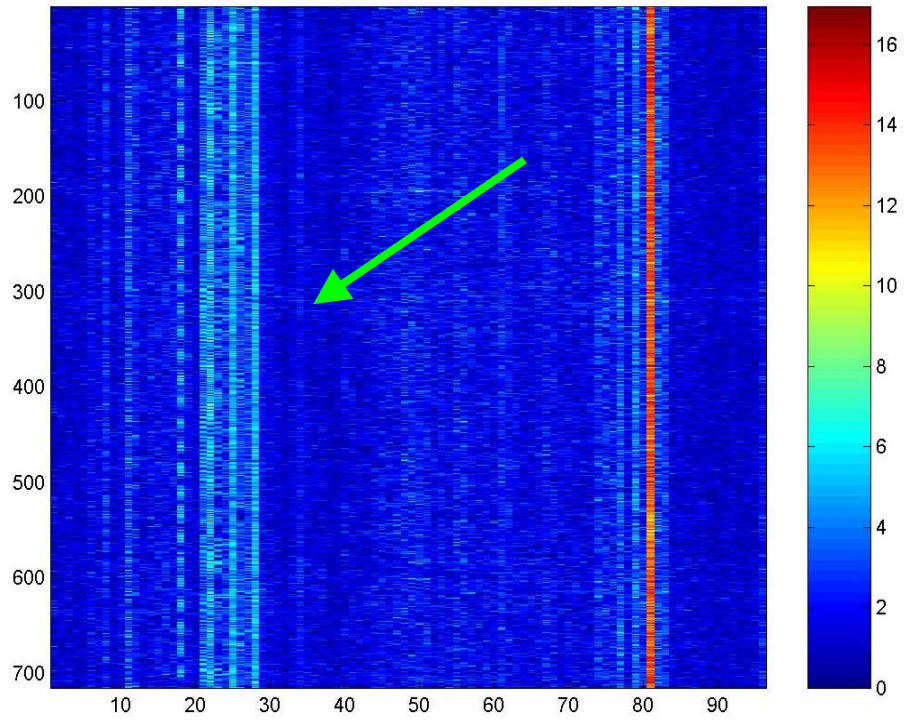


Figura 9- 40 250 secondi prima dell'arresto

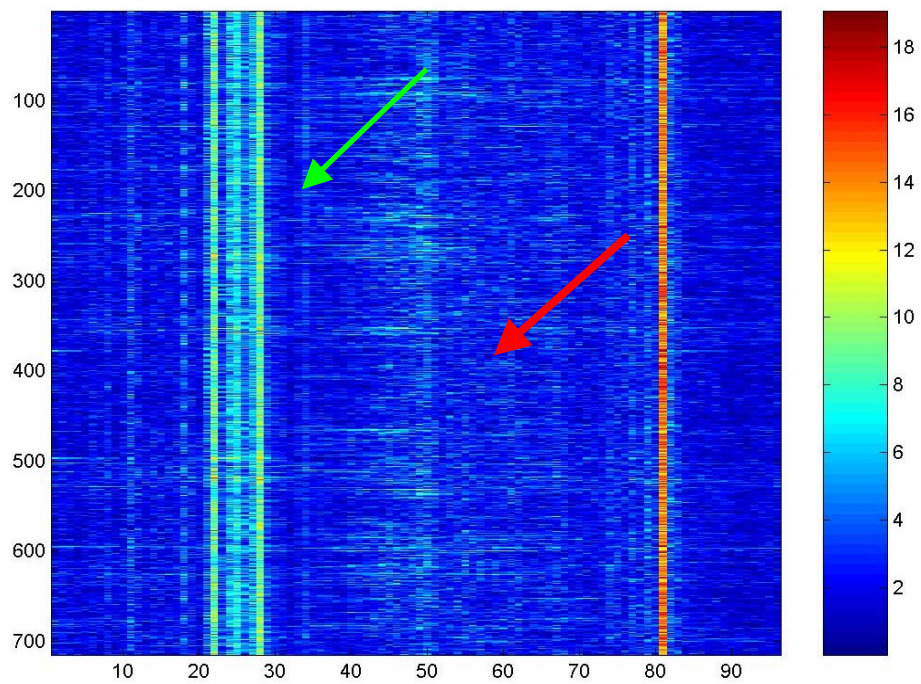


Figura 9- 41 100 secondi prima dell'arresto

2. l'accelerometro individua il danneggiamento, utilizzando la rappresentazione PSD, circa 250 secondi prima dell'arresto del banco.

In effetti dal confronto tra la situazione a 20 minuti e quella a 250 secondi dall'arresto, figure 9-42 e 9-43, l'attività nel range 20-30 e.o. si intensifica, come illustrato dalla freccia verde, a cui farà seguito un aumento dell'attività tra 40 e 60 e.o. come indicato con la freccia rossa in fig.9-44.

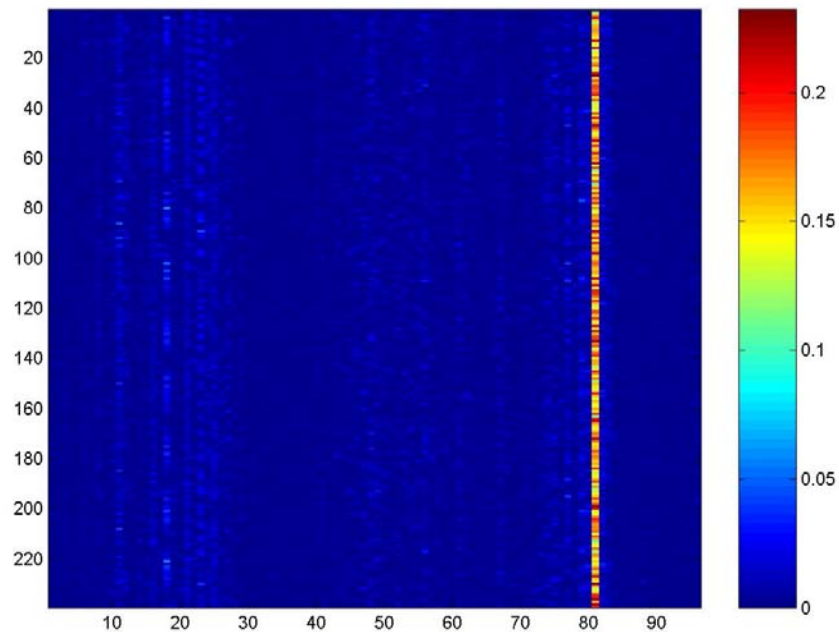


Figura 9- 42 20 minuti prima dell'arresto

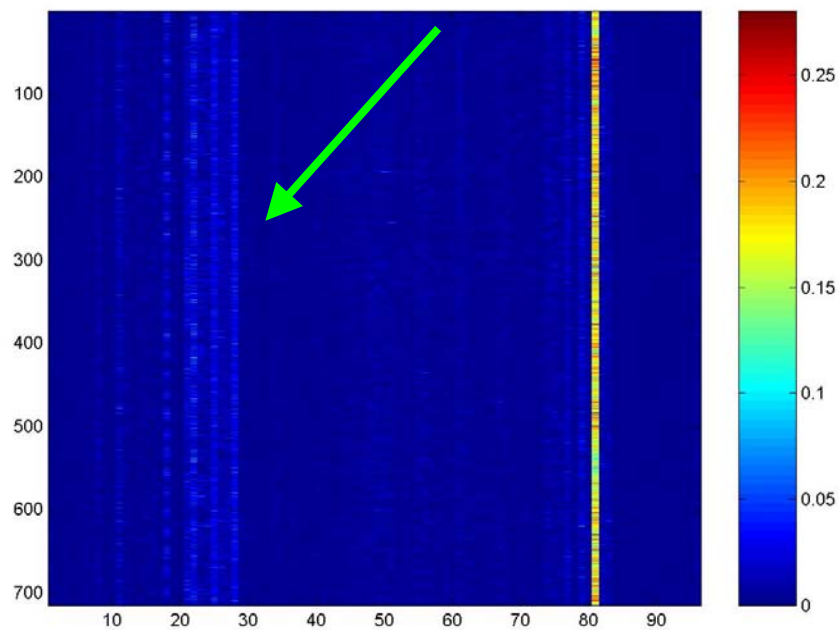


Figura 9- 43 250 secondi prima dell'arresto

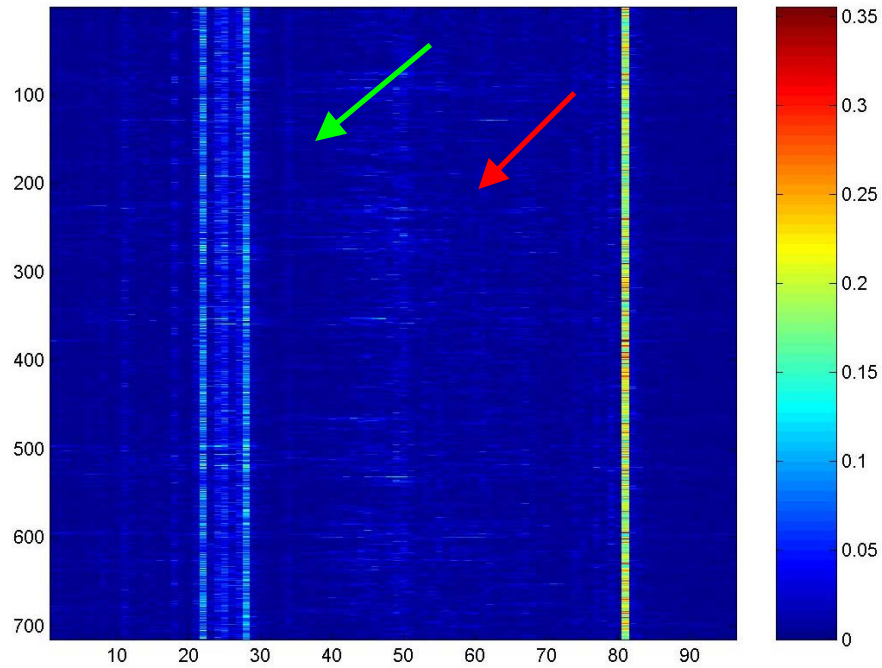


Figura 9- 44 100 secondi prima dell'arresto

3. il microfono individua il danneggiamento, utilizzando la rappresentazione FFT, circa 170 secondi prima dell'arresto del banco.
In effetti dal confronto tra la situazione a 20 minuti e quella a 170 secondi dall'arresto, figure 9-45 e 9-46, l'attività nel range 20-30 e.o. si intensifica, come illustrato dalla freccia verde.

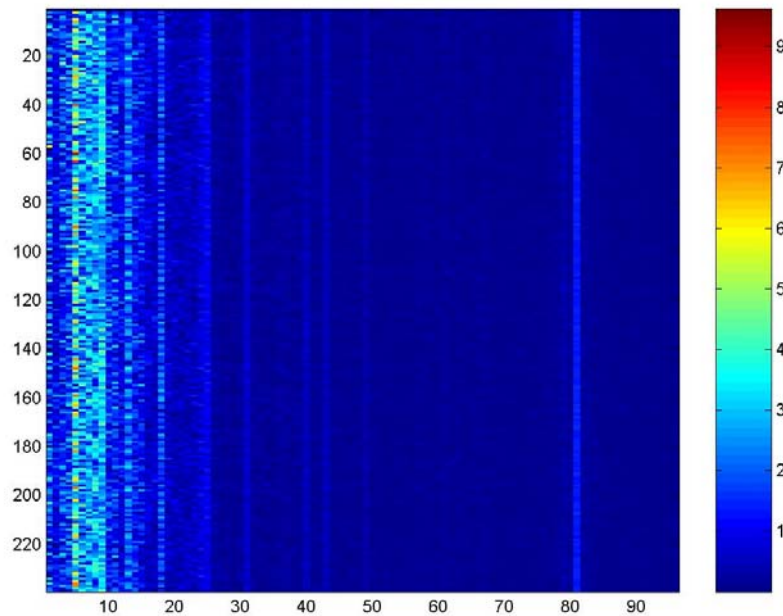


Figura 9- 45 20 minuti prima dell'arresto

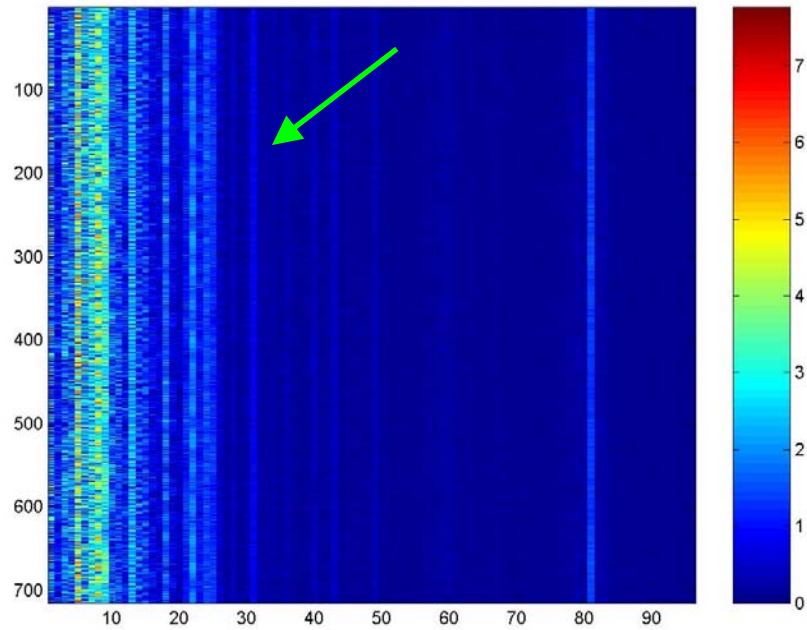


Figura 9- 46 170 secondi prima dell'arresto

4. il microfono individua il danneggiamento, utilizzando la rappresentazione PSD, circa 170 secondi prima dell'arresto del banco.

In effetti dal confronto tra la situazione a 20 minuti e quella a 170 secondi dall'arresto, figure 9-47 e 9-48, l'attività nel range 20-30 e.o. si intensifica, come illustrato dalla freccia verde.

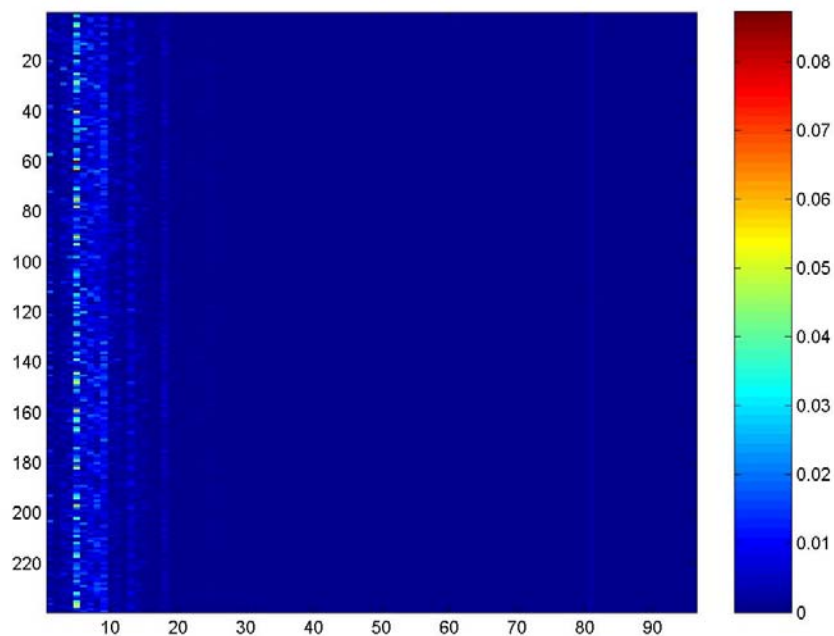


Figura 9- 47 20 minuti prima dell'arresto

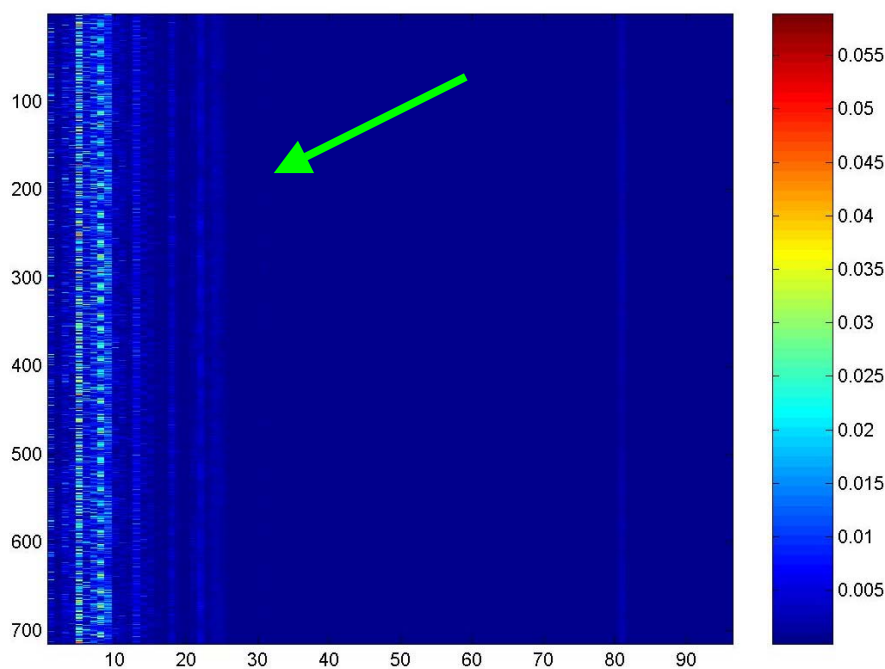


Figura 9- 48 170 secondi prima dell'arresto

Come si nota, pur riuscendo il microfono a segnalare la nascita del difetto, i risultati migliori sono ottenuti con l'accelerometro.

Questo è dovuto principalmente al fatto che non adottando particolari accorgimenti che riescano ad attenuare l'elevata attività a bassa frequenza, anche variazioni relativamente rilevanti nell'intervallo tra 20 e 30 e.o. sono poco percepibili in una rappresentazione che adotta scale cromatiche.

Al fine di superare tale limite, si è eliminata la zona tra 0 e 18 e.o., ed adottando una diversa scala cromatica (dal bianco al blu), i risultati ottenuti sono decisamente migliorati e tali da consentire una individuazione anticipata dell'evento critico, come illustrato dalle figure 9-49 e 9-50, per la rappresentazione PSD, e le figure 9-51 e 9-52, per la rappresentazione FFT, che mostrano la situazione, rispettivamente, a 20 e a 5 minuti dall'arresto.

In appendice G si è riportato l'andamento di tali diagrammi ad intervalli di un minuto, osservando che a 10 minuti dall'arresto del banco, si registra un leggero aumento dell'intensità nell'intorno dell'ordine 25, mai osservato dall'inizio della prova, quindi da ritenere associabile all'insorgere del danneggiamento.

Un tale accorgimento non fornisce risultati migliori per il segnale accelerometrico.

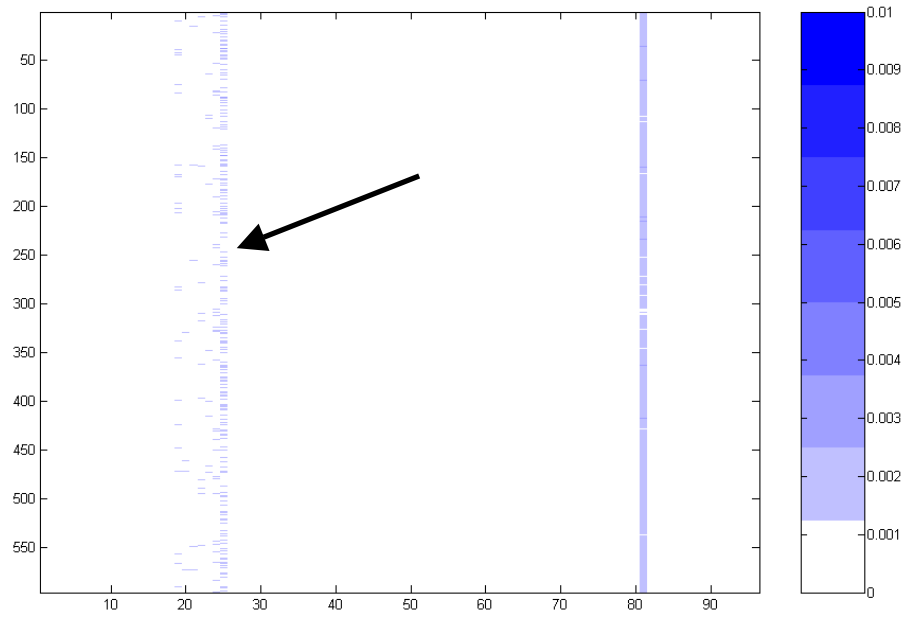


Figura 9- 49 20 minuti dall'arresto

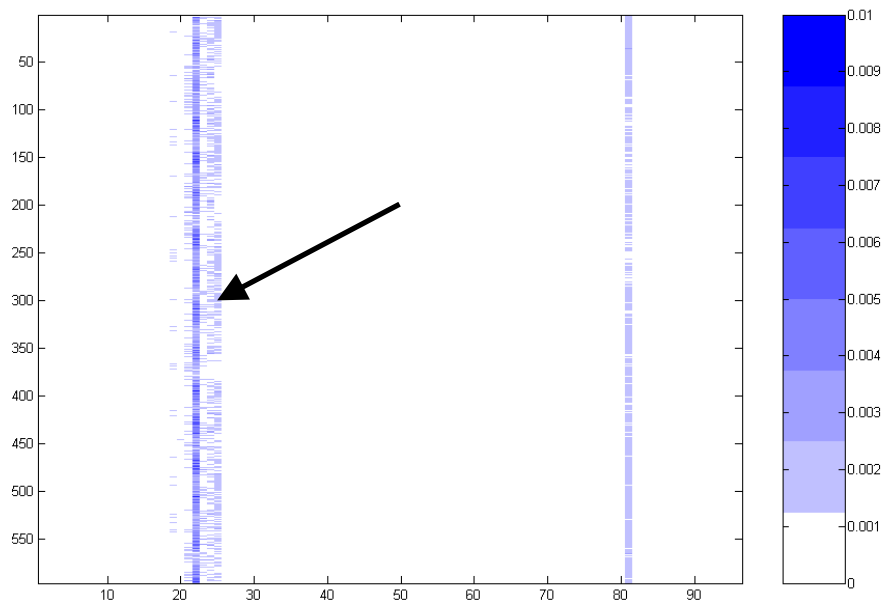


Figura 9- 50 50 minuti dall'arresto

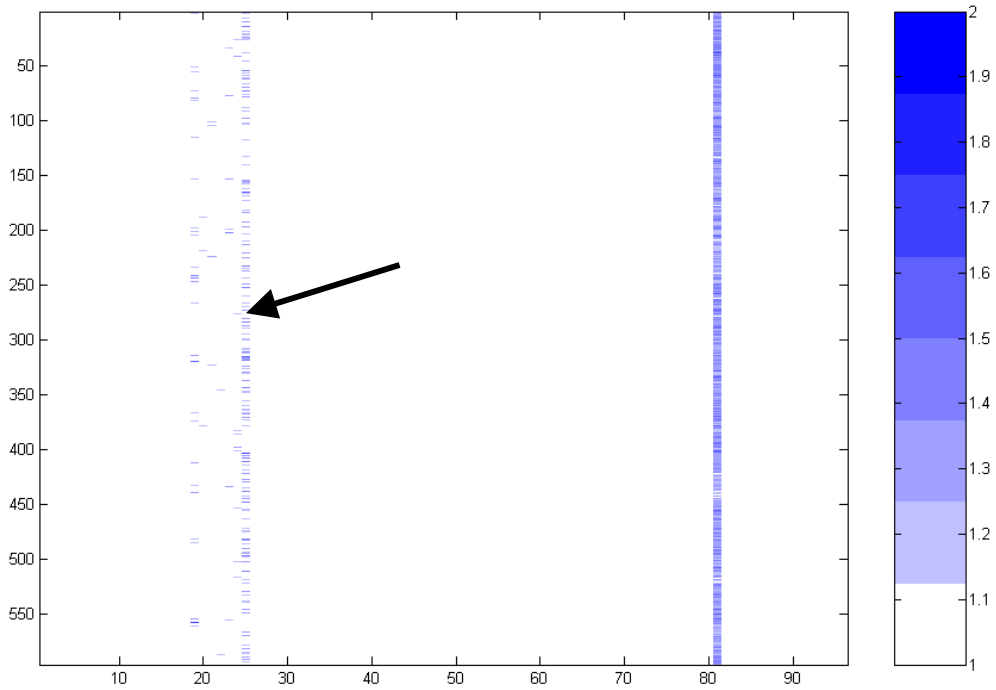


Figura 9- 51 20 minuti dall'arresto

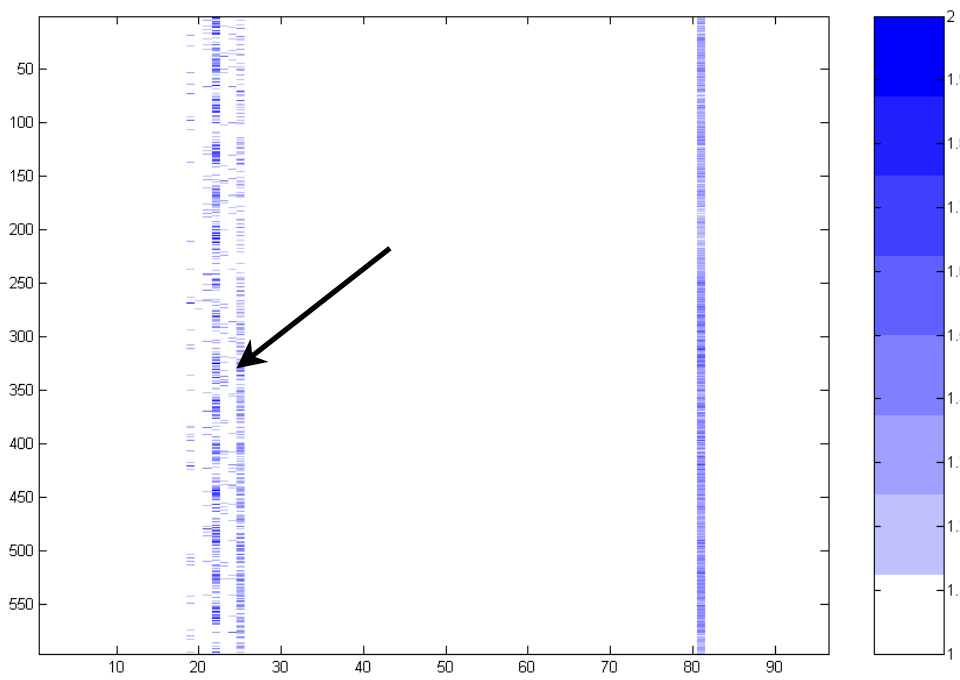


Figura 9- 52 5 minuti dall'arresto



9.5 Media Sincrona

Nella diagnostica degli ingranaggi, uno strumento estremamente capace di identificare il danneggiamento è la tecnica della media sincrona.

Il programma, attualmente in fase sperimentale, basato sui marcatori messo a punto in collaborazione con il DMA, ha permesso di costruire, con una buona approssimazione, la media sincrona relativa ai canali in esame.

La figura 9-53 mostra il confronto tra il segnale grezzo(raw signal), rilevato a 60 minuti, 30 minuti ed ad 1 minuto dall'arresto del banco, con la media sincrona, relativa agli stessi istanti.

Il segnale grezzo, tra i 60 e i 30 minuti, non presenta una sostanziale somiglianza, come invece si determina con la media sincrona.

Quando si verifica il danneggiamento del dente, il segnale grezzo segnala l'evento con un aumento dell'ampiezza delle oscillazioni (), mentre con la media sincrona è invece più netto il cambio di forma d'onda del segnale, oltre la sua ampiezza().

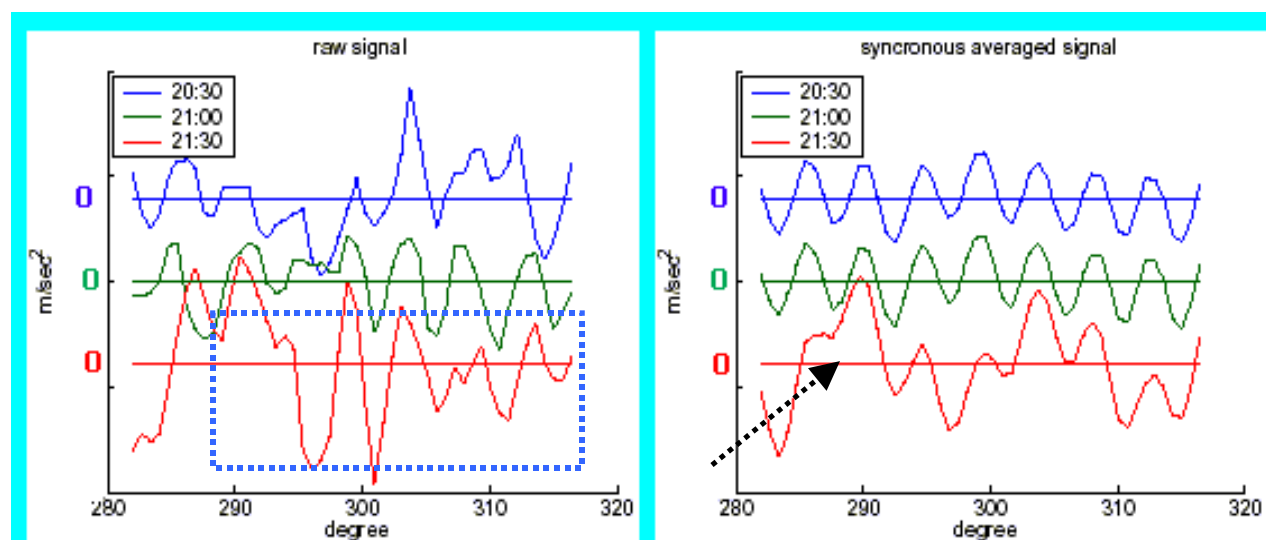


Figura 9- 53 Differenza tra segnale raw e segnale sincro [81]

Le figure successive mostrano l'alterazione subita, nei 20 minuti antecedenti l'arresto del banco, dal segnale sincro del microfono, corrispondente al canale 12, e dell'accelerometro2.

10 minuti prima dell'arresto, inizia a manifestarsi l'alterazione del media sincrona, rilevata sia dal microfono che dall'accelerometro 2.

Il valore in ascissa si riferisce ai Volt con cui i segnali, provenienti dai sensori, vengono percepiti dalla scheda di acquisizione.



Figura 9- 54 Alterazione dell'impronta digitale del microfono

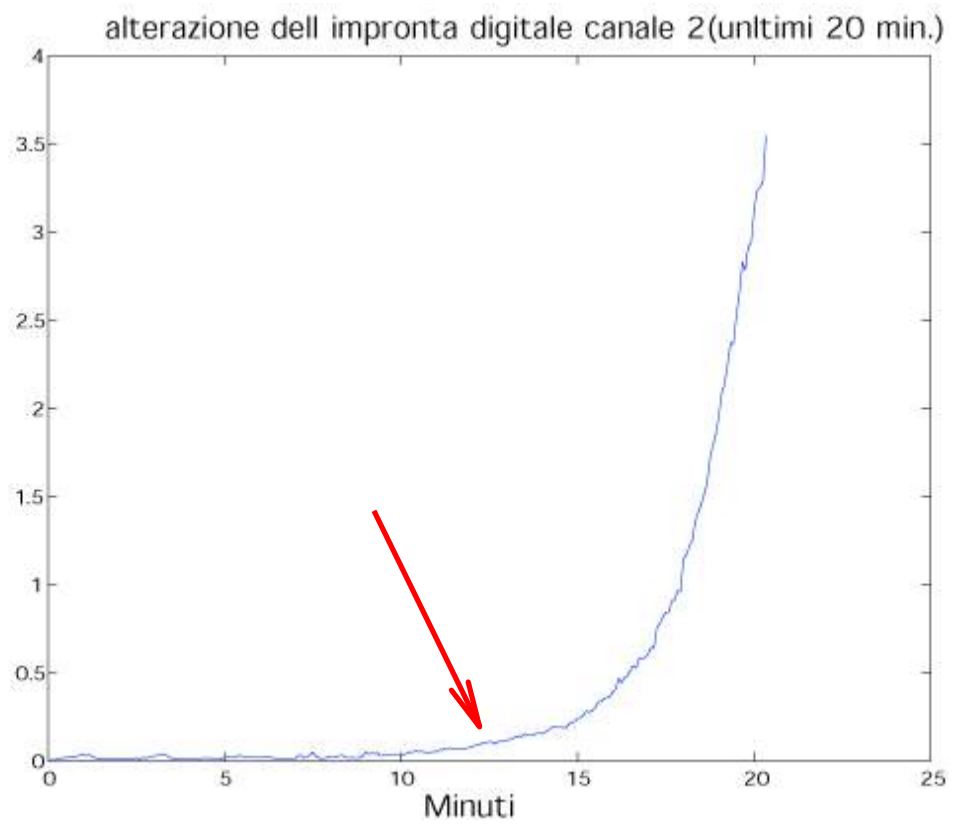


Figura 9- 55 Alterazione dell'impronta digitale dell'accelerometro 2