

Capitolo 5

Tecniche di analisi off-line

L'analisi dei dati registrati permette, non essendo limitata dalla velocità di calcolo, di ottenere risultati più accurati applicando le tecniche utilizzate in on-line e di utilizzare tecniche migliori, ma più pesanti dal punto di vista computazionale, come le rappresentazioni tempo-frequenza o la trasformata wavelet.

La presenza di difetti localizzati (una fessura), introduce una variazione di breve durata nel segnale, mentre difetti maggiormente distribuiti (imperfezioni geometriche ed usura) danno luogo a modifiche lente del segnale su un periodo di rivoluzione.

La natura non stazionaria del segnale suggerisce, dunque, l'uso di tecniche tempo-frequenza, che rendano possibile seguire l'evoluzione temporale del contenuto frequenziale del segnale. Inoltre si utilizzano le tecniche di analisi nel dominio del tempo, le quali richiedono un processo di sincronizzazione del segnale, che le rende estremamente efficaci nella diagnostica degli ingranaggi.

5.1 Analisi Tempo-Frequenza

Dall'osservazione che nel segnale è riconoscibile l'istante dell'ingranamento, è stato recentemente ideato e messo a punto presso il Dipartimento di Matematica Applicata dell'Università di Pisa un algoritmo che, costruendo una serie di marcatori sul segnale raw (grezzo), suddivide il segnale in tratti di lunghezza pari ad un giro di rivoluzione in funzione del n° di denti della la ruota in esame.

La figura 5-1 mostra come il segnale, apparentemente casuale, sia invece caratterizzato da una serie di picchi di piccola ampiezza associabili all'ingranamento dei denti.

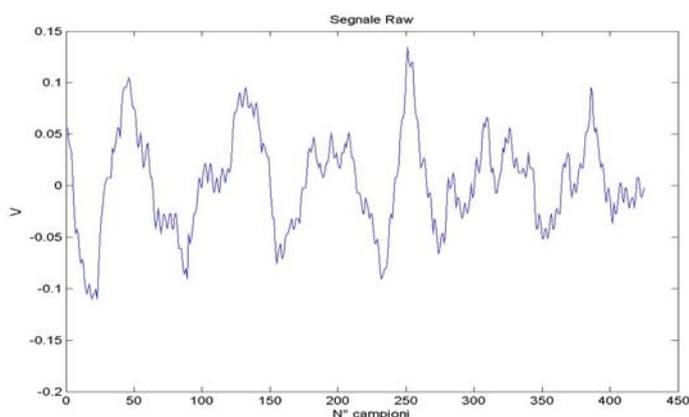


Figura 5- 1Esempio di segnale raw

L'individuazione dei marcatori si basa su:

- marker (n) = indice del campione finale della n-esima rivoluzione;
- $f(t)$ = segnale raw, con $t \in \{1, \dots, N\}$;
- $F(\omega) = \text{FFT}(f(t))$; $f_z = n^\circ$ di picchi per rivoluzione, 80 nel nostro caso;
- ω_m = indice del picco nella finestra FFT corrispondente a f_z ;
- $f = \omega_m / N$;
- $\phi = \arg(F(\omega_m))$;
- $f_{\text{mesh}}(t) = \cos(2\pi f t + \phi)$;
- $\text{marker}(n) = \omega_m \cdot \pi - \phi / 2 \cdot \pi f$;

Nella pagina successiva è riportato il diagramma di flusso con il quale opera l'algoritmo.

Il programma basato su tale algoritmo individua i picchi, l'uno dopo l'altro, costruendo un segnale "virtuale", figura 5-2, avente la stessa velocità istantanea, con il quale si riconoscono gli intervalli a rivoluzione completa.

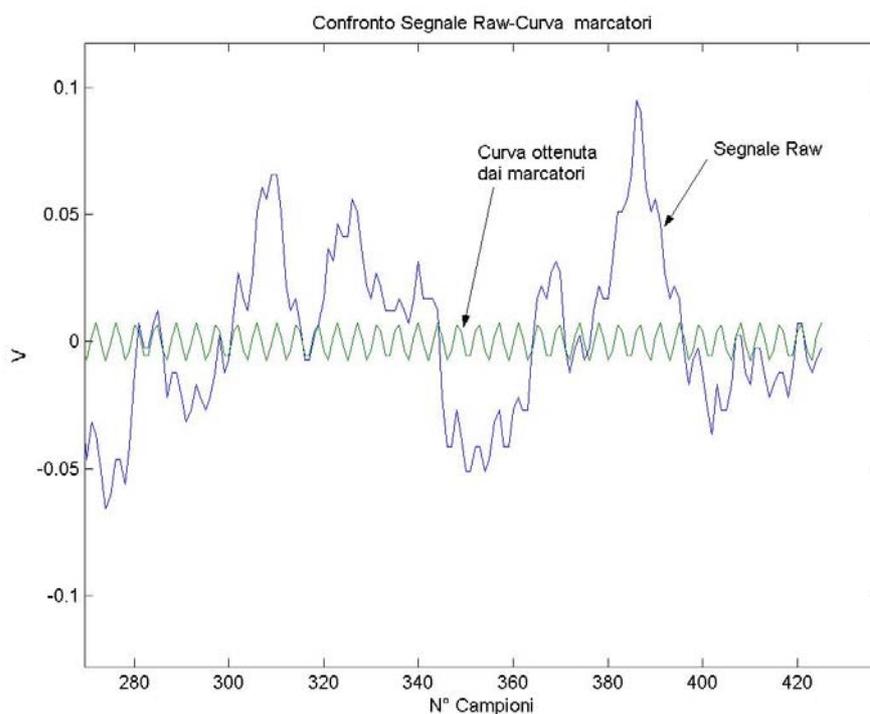


Figura 5- 2 Esempio di segnale "virtuale", costruito con i marcatori

Poter suddividere in tal modo il segnale permette di eseguire la FFT o la PSD ad ogni giro, e in questo modo di costruire una accettabile rappresentazione tempo-frequenza, ovviando al fatto che la velocità di un ingranaggio reale non è mai perfettamente costante.

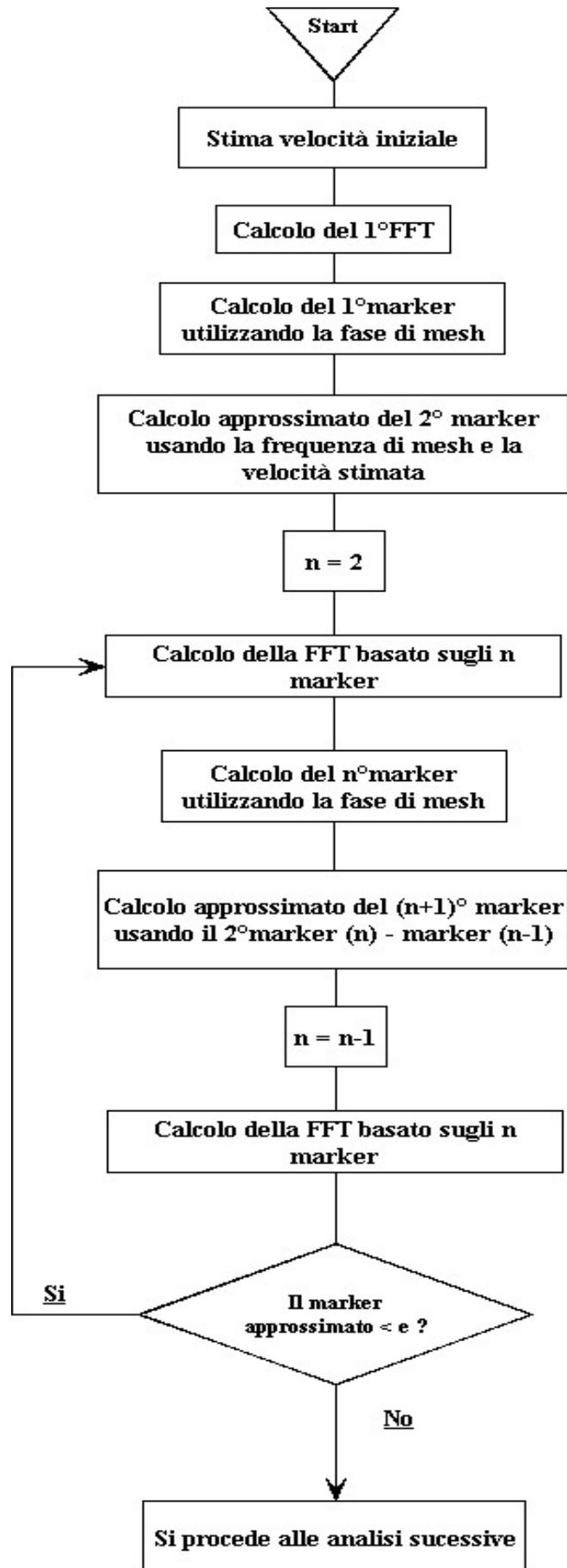


Figura 5- 3 Diagramma di flusso Marker

La rappresentazione adottata riporta sulle ascisse il parametro n , dato dal prodotto del n° di denti della ruota per N , numero intero, e sulle ordinate si ha l'e.o. ovvero l'ordine inteso come rapporto tra la frequenza attuale e la frequenza di rotazione, nel nostro caso, dell'albero test.

Per rappresentare l'intensità della componente frequenziale ad un dato istante si è adottato una scala cromatica.

Le figure successive mostrano il diagramma tempo-frequenza, nello stesso istante, del segnale microfonico in cui le frequenze sono rappresentate, rispettivamente, dalla FFT e dalla PSD.

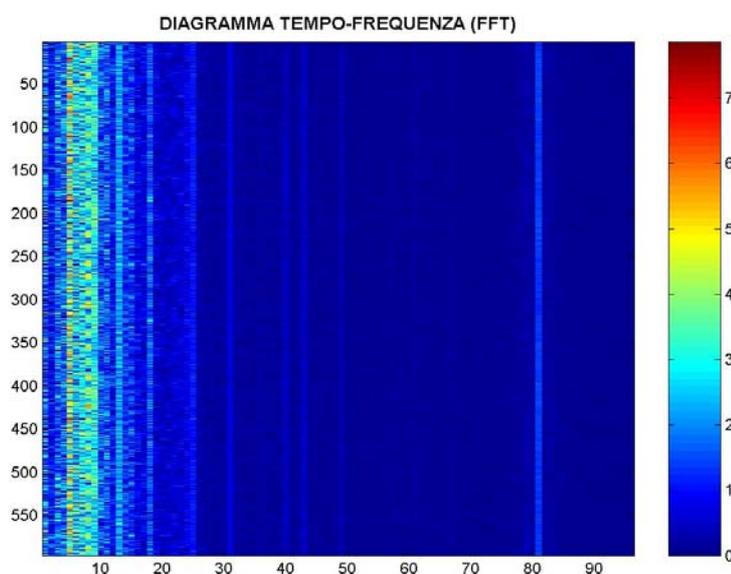


Figura 5- 4 diagramma tempo-frequenza (FFT)

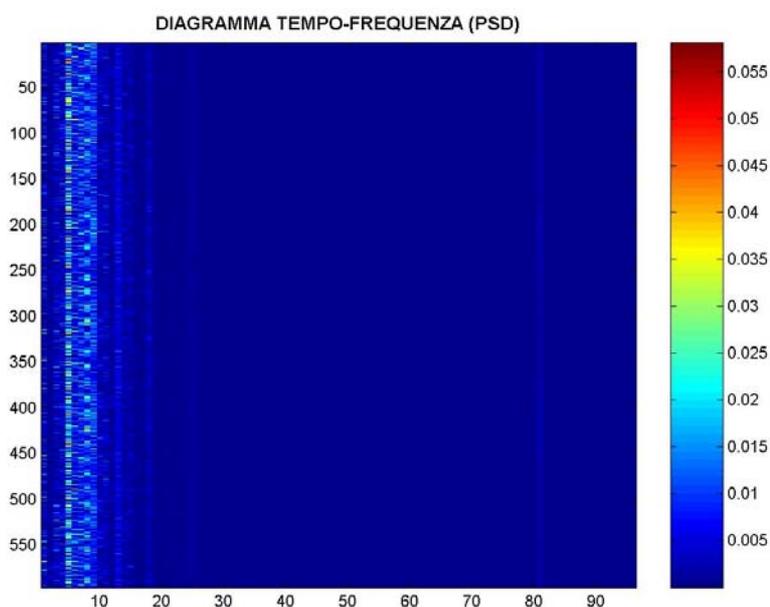


Figura 5- 5 diagramma tempo-frequenza (PSD)

5.2 Metodo della media sincrona

5.2.1 Introduzione

La media sincrona consiste in un processo di sincronizzazione del campionamento dei dati con la velocità di rotazione della ruota in esame e nella successiva operazione di media sull'insieme di dati prelevati.

L'operazione di media sincrona tende, all'aumentare del numero di campioni, ad annullare il contributo delle ruote a velocità diversa da quella in analisi, e mostra, nel dominio del tempo, il procedere dell'ingranamento per la durata di un giro e, nel dominio della frequenza, la f_g con le bande laterali relative alla velocità di rotazione della ruota in esame.

Per ricavare la media sincrona si esegue una media temporale di campioni successivi di un segnale periodico, aventi lunghezza T_0 , lunghezza diversa da quella del periodo fondamentale o dei suoi multipli.

Per definizione la Media temporale sincrona TSA di un segnale $x(t)$ vale:

$$\bar{y}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t + nT_R) \quad [5.1]$$

con T_R periodo di sincronizzazione ed N numero delle medie

Quando la lunghezza del campione è uguale al periodo fondamentale o ad un suo multiplo, la tecnica prende il nome di media sincrona ed i segmenti successivi di segnale risultano tutti in fase e la media stimata su qualsiasi n° di campioni risulta uguale al segnale originale.

Tale tecnica permette di eliminare l'influenza del rumore di sotto fondo all'aumentare del numero delle medie e soprattutto permette di evidenziare alcune componenti del segnale di frequenza uguale ad un valore prefissato o ad un suo multiplo.

Si tratta di una tecnica che prelevando campioni consecutivi, con la condizione che essi siano di lunghezza pari ad un multiplo intero del periodo della componente in esame, consente di evidenziarne eventuali variazioni.

5.2.2 Sincronizzazione del segnale

Le tecniche classiche per sincronizzare l'acquisizione dei dati in un banco prova ingranaggi prevedono l'utilizzo di tachimetri o di pick up montati in corrispondenza di uno degli alberi delle ruote dentate in esame.

Lo strumento adottato, se opportunamente tarato ad inizio prova, fornisce una serie di impulsi elettrici ad ogni giro di ruota.

Tali segnali impulsivi, inviati ad uno dei canali della scheda d'acquisizione vengono utilizzati come *trigger* di comando per far partire l'acquisizione dei dati.

Il difetto principale di questo processo di sincronizzazione è la necessità di utilizzare un ulteriore strumento e l'apertura di un canale di acquisizione dedicato al solo segnale tachimetrico.

Tutto ciò implica l'aumento della complessità del sistema di rilevazione e ne rallenta le capacità ponderali e di risoluzione in quanto, sebbene il segnale acquisito da tale canale sia costituito da 6 soli impulsi per giro, il dover dedicare un canale solo alla sua acquisizione, aumentando il n° di canali aperti, riduce la frequenza di campionamento del singolo canale.

Se, come succede negli organi rotanti a velocità non rigorosamente costante, l'intervallo tra due picchi successivi del segnale di riferimento non risulta costante, e quindi il numero di campioni e la loro posizione non rimane costante, allora l'effetto dovuto alla variazione della velocità di rotazione si traduce in una sincronizzazione non rappresentativa, dove anche 6 picchi per rivoluzione del segnale di posizione risultano inadeguati.

A riprova di quanto affermato si riporta la sovrapposizione dei segnali relativi a 6 diversi giri sincronizzati, sia per ruota integra che danneggiata fig.5-6 e 5-7 [68], con l'avvertenza che la figura seguente si riferisce ad una ruota che possiede una velocità sostanzialmente costante e bassa (rispetto alle condizioni che si registrano sul banco Renk, rappresentate in fig. 5-8).

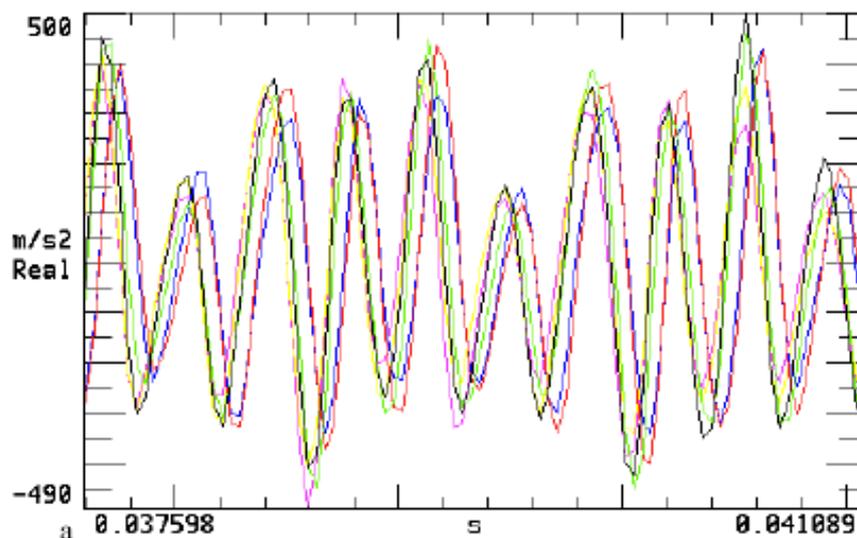


Figura 5- 6 [68]

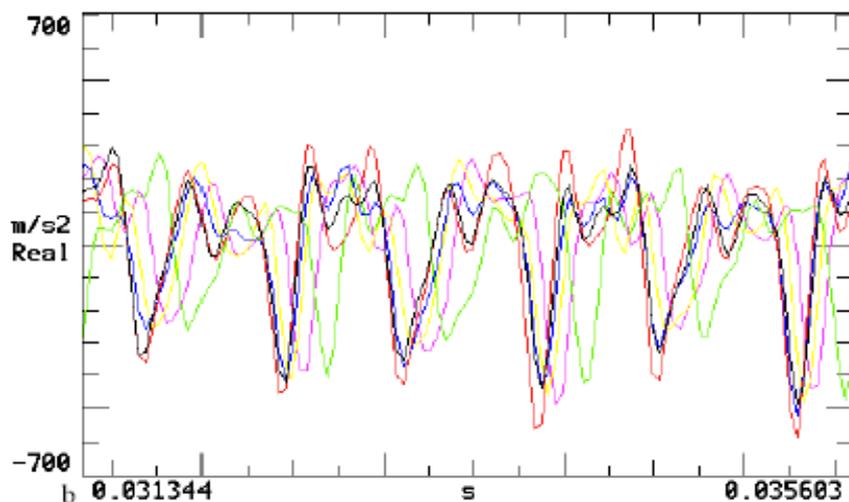


Figura 5- 7 [68]

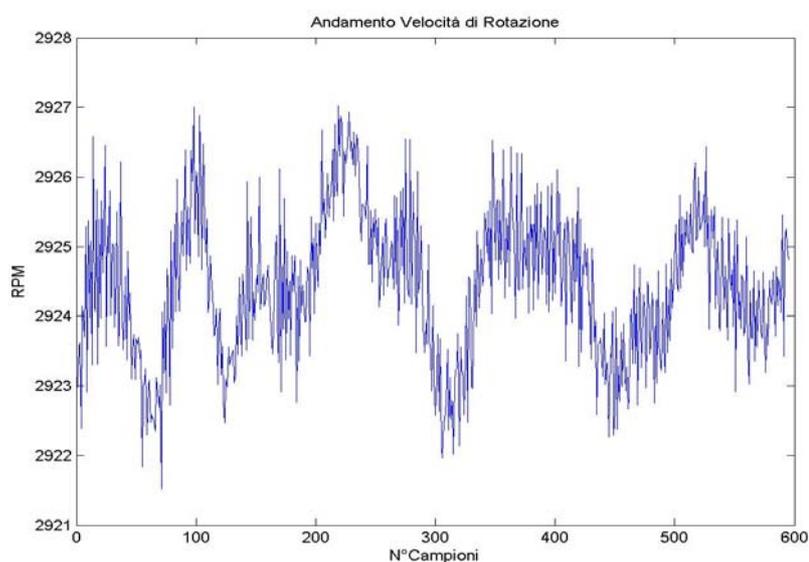


Figura 5- 8 Andamento della Velocità di rotazione in condizioni di prova delle ruote slave

La fig.5-9 mostra la discordanza che si ha tra il segnale relativo ad una rotazione della ruota (in rosso) e la TSA (in nero) effettuata mediante tachimetro sul segnale relativo a 28 rotazioni (28 è,nell'articolo da cui si sono estratte le figure 5-20 e 5-21 il n° dei denti della ruota in esame).

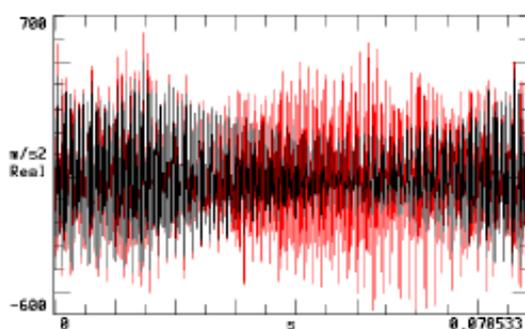


Figura 5- 9 Confronto tra segnale e TSA [68]

Si può concludere che un segnale tachimetrico ad un picco per rivoluzione fornisce una sincronizzazione corretta solo ad inizio e a fine giro, mentre con 6 picchi la sincronizzazione è corretta ogni 60° , come affermato nella pagina precedente.

L'algoritmo basato sul posizionamento di marcatori in punti precisi del segnale, ovvero in corrispondenza dell'istante dell'ingranamento, permette di trattare segnali periodici, in assenza di segnale associato al pick up, che, se presente, può risultare insufficiente soprattutto in quei casi in cui la velocità dell'elemento misurato varia sensibilmente tra due riferimenti successivi.

Quindi identificando un dato punto, nel tempo, ad ogni passo di ingranamento, è possibile ricostruire un segnale dotato di riferimento per passo operando sulla velocità controlli molto più accurati, ovvero da 1 a 80 volte, pari al numero di denti e di ottenere in tal modo una sincronizzazione del segnale appropriata per l'analisi dell'ingranaggio.

Sul banco Renk si è adottato un pick up che segnala elettricamente, ad ogni giro, il passaggio delle 6 teste di bulloni che serrano il tappo dell'albero sinistro slave veloce, con la particolarità di aver magnetizzato una di queste teste in modo che il pick up segnali un picco diverso ogni 60° da avere almeno un riferimento pari a 60° .

5.2.3 TSA

Nella figura 5-10 viene riportato il TSA relativo ad un difetto che passa da dimensioni ridotte a dimensioni maggiori. Come si può notare è già visibile, nell'intorno dei 150° , un segno del possibile difetto (come evidenziato dalle frecce).

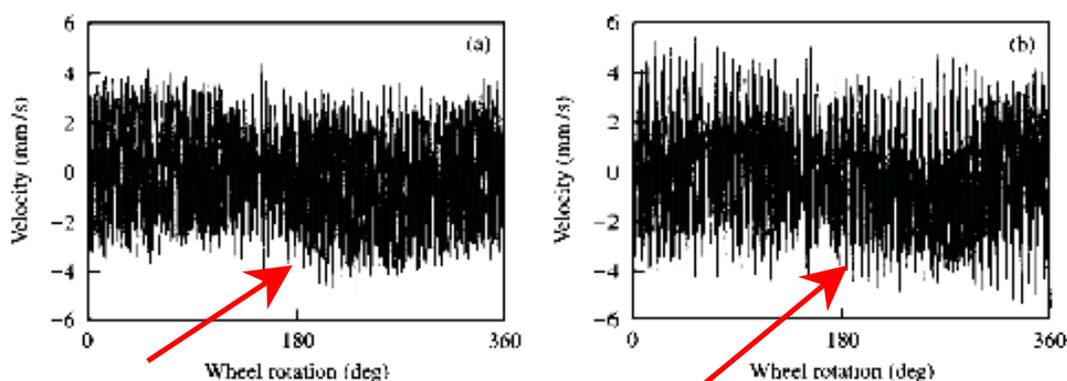


Figura 5- 10 TSA (DA[60]): a)DIMENSIONI PICCOLE;b)DIMENSIONI MAGGIORI

La successiva analisi spettrale, illustrata in fig.5-11, evidenzia un gran numero di picchi che non permettono una semplice e rapida analisi, se non per la rilevante attività sidebands.

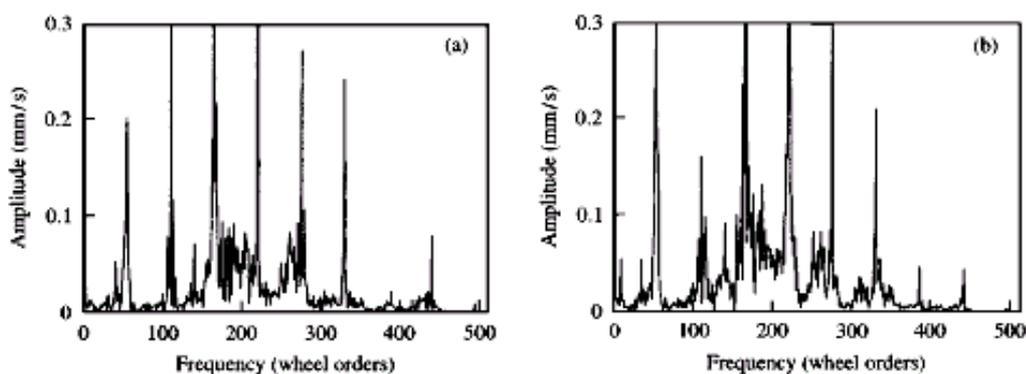


Figura 5- 11 SPETTRO DEI SEGNALI TSA (DA[60]):a)DIMENSIONI PICCOLE;b)DIMENSIONI MAGGIORI

Come accennato precedentemente, il segnale TSA, se utilizzato come punto di partenza per altri metodi, consente di ottenere risultati migliori, ma, affinché si possa procedere, occorre utilizzare specifici filtri passa-banda a seconda del metodo in esame.

5.3 Segnale Residuo (Residual signal)

Una ulteriore elaborazione del segnale TSA permette di ottenere un segnale che, comunemente, viene indicato “segnale residuo”(residual signal).

Si opera nel dominio spettrale un filtraggio stop-band dello spettro ottenuto dalla TSA.

Si eliminano la frequenza fondamentale della rotazione dell’albero e quella di ingranamento comprensiva delle sue armoniche, considerando che la teoria non specifica il numero esatto delle armoniche da sottrarre al TSA, ma illustra che non è necessario eliminarle tutte.

Nell’esempio seguente sono state rimosse solo tre armoniche della frequenza di ingranamento.

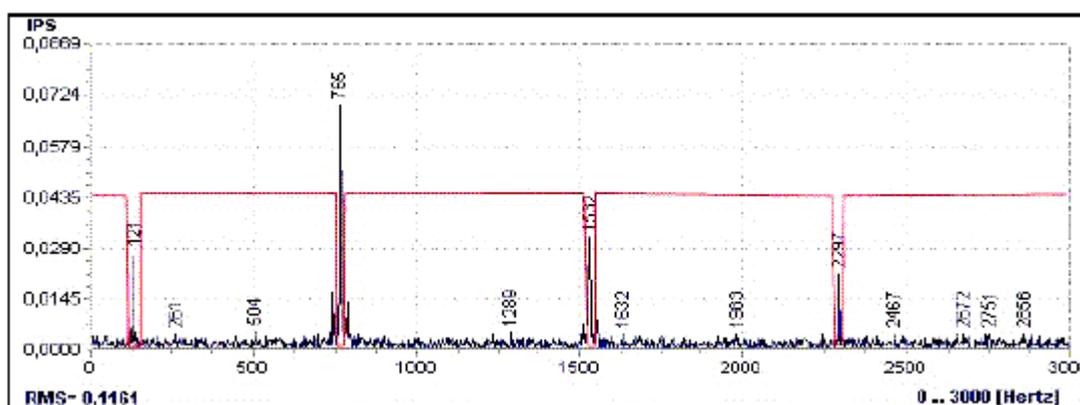


Figura 5- 12 ESEMPIO DI FILTRO PER LA REALIZZAZIONE DEL “SEGNALE RESIDUO” (DA [59])

In pratica è come se avessimo sottratto dal segnale TSA, $y(t)$, la parte $g(t)$ relativa alla $f_{g\text{test}}$ e alle sue armoniche, producendo il segnale residuo $r(t)$ definito come:

$$r(t) = y(t) - g(t) \quad [5.2]$$

La procedura prevede l'eliminazione delle componenti dallo spettro e successivamente richiede la trasformata inversa di Fourier, ricostruendo nel dominio del tempo, il segnale residuo $r(t)$.

Il segnale residuo, come mostrato nella figura 5-13 che riporta il segnale residuo relativo al segnale TSA mostrato nella figura 5-10, permette di individuare più semplicemente i possibili difetti che si generano negli ingranaggi.

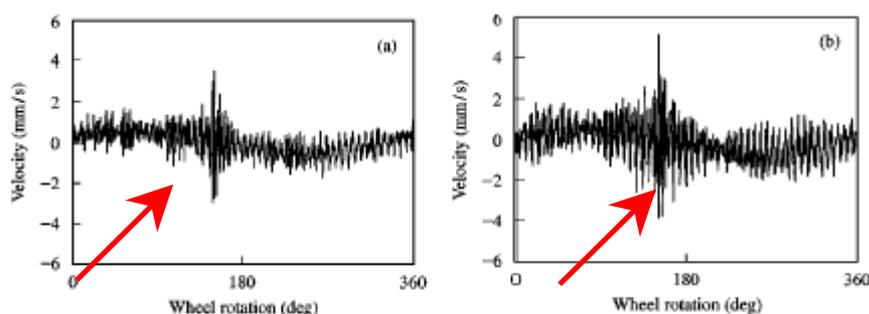
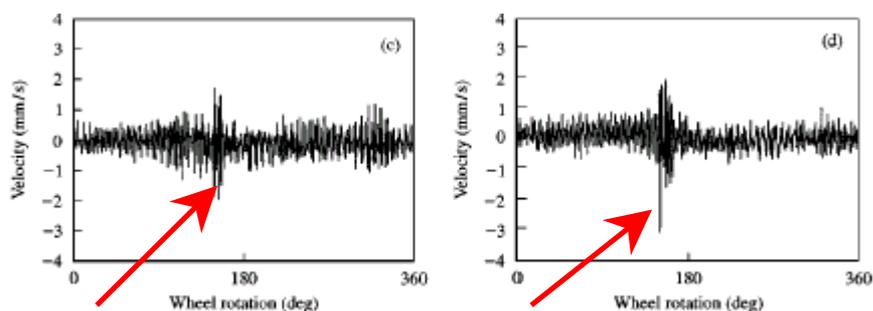


Figura 5- 13 SEGNALE RESIDUO (DA[60]): a)DIMENSIONI PICCOLE;b)DIMENSIONI MAGGIORI

Anche tale tipologia di analisi risente della posizione del sensore e delle dimensioni del difetto, come evidenziato dalla figura successiva che si riferisce al segnale acquisito, da un sensore posizionato in direzione diversa, sullo stesso ingranaggio.

Per piccole dimensioni del difetto, l'individuazione risulta leggermente più difficoltosa.



**Figura 5- 14 SEGNALE RESIDUO, DIVERSA DIREZIONE DEL SENSORE(DA[60]);
a)DIMENSIONI PICCOLE;b)DIMENSIONI MAGGIORI**

5.4 WAVELET

5.4.1 Introduzione

La WA è una tecnica di analisi a finestra con segmenti di dimensioni variabili che permette l'uso di lunghi intervalli temporali dove si desidera una maggior precisione nelle informazioni a bassa frequenza, e una regione temporale più piccola dove si vuole informazioni ad alta frequenza.

Questo è l'aspetto che maggiormente la differenzia dalle tecniche di analisi nel dominio del tempo,

nel dominio della frequenza e dalla stessa STFT, la quale, pur essendo una tecnica tempo-frequenza, è, però, caratterizzata da finestre temporali costanti, oltre al fatto che la WA è in grado di realizzare analisi locali, ovvero l'analisi di aree ristrette di un segnale più lungo.

5.4.2 DESCRIZIONE FISICA DELLA ANALISI WAVELET

La Wavelet è una forma d'onda di durata effettiva limitata che ha valor medio nullo, che si differenzia dalla forma delle onde sinusoidali, che sono alla base dell'analisi di Fourier, le quali non hanno una durata limitata, ma oscillano, tra un minimo ed un massimo, all'infinito. L'analisi di Fourier consiste nello scomporre un segnale in una serie di onde sinusoidali di varia frequenza.

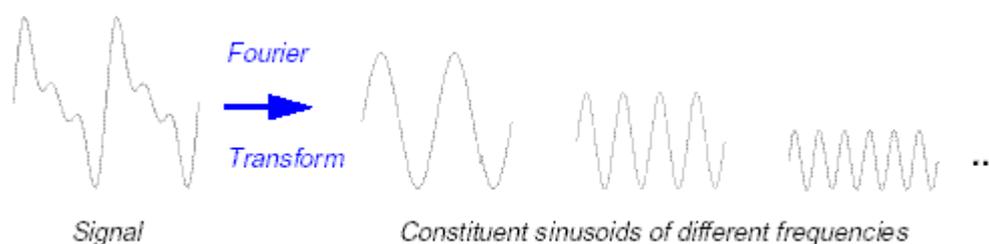


Figura 5- 1 (DA[65])

Allo stesso modo la WA consiste nello scomporre un segnale in una versione scalata e traslata di una originale Wavelet che prende il nome di wavelet madre (mother wavelet).

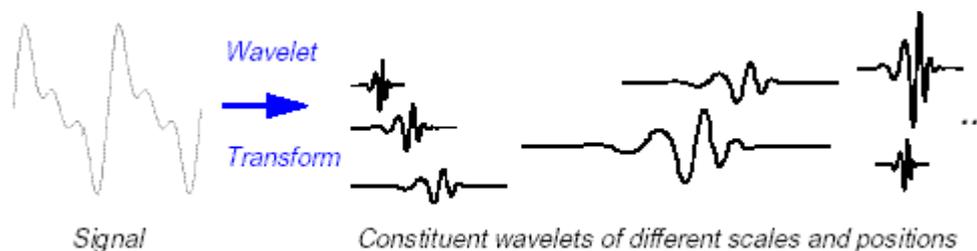


Figura 5- 2 (DA[65])

I segnali che presentano brusche variazioni sono più efficacemente analizzabili con una funzione wavelet piuttosto che con una funzione di tipo sinusoidale.

Nella diagnostica si utilizza la forma continua della analisi Wavelet, CWT (Transform Continue Wavelet), definita come la somma nel tempo del segnale $x(t)$, moltiplicato da una versione scalata e traslata della wavelet madre $\Psi(t)$:

$$CWT(\text{scala}, \text{posizione}) = CWT(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \Psi(a, b, t) dt \quad [5.3]$$

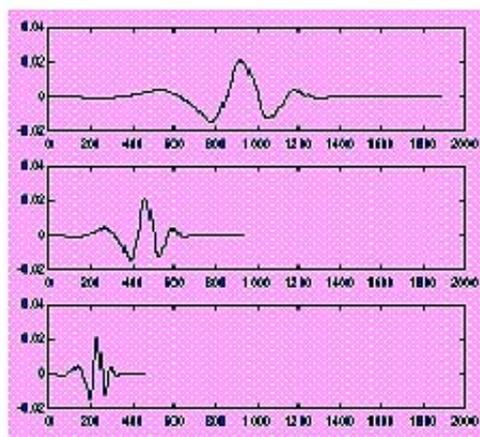
dove a e b sono rispettivamente il fattore di scala e il parametro di dilatazione o traslazione.

Il risultato della CWT è rappresentato dai coefficienti wavelets C , funzioni della scala e della posizione.

Moltiplicare ogni coefficiente C per l'appropriata wavelet scalata e traslata fornisce l'insieme delle wavelet che vanno a comporre il segnale originale.

È importante specificare cosa si intende quando parliamo di scalare e traslare una wavelet.

Scalare una wavelet significa allungarla (comprimerla), ovvero significa introdurre un fattore di scala a , il cui effetto è rappresentabile come segue:



$$f(t) = \psi(t) ; a = 1$$

$$f(t) = \psi(2t) ; a = \frac{1}{2}$$

$$f(t) = \psi(4t) ; a = \frac{1}{4}$$

Figura 5- 17 EFFETTO DI SCALA DI UNA WAVELET(DA[65])

Come si può osservare più è piccolo il fattore di scala più la wavelet risulta compressa, e ciò in particolare esprime la dipendenza del fattore di scala dalla frequenza.

Traslare una wavelet significa semplicemente ritardarla (anticiparla), ovvero matematicamente ritardare una funzione $f(t)$ con un parametro k significa applicare la funzione $f(t-k)$:

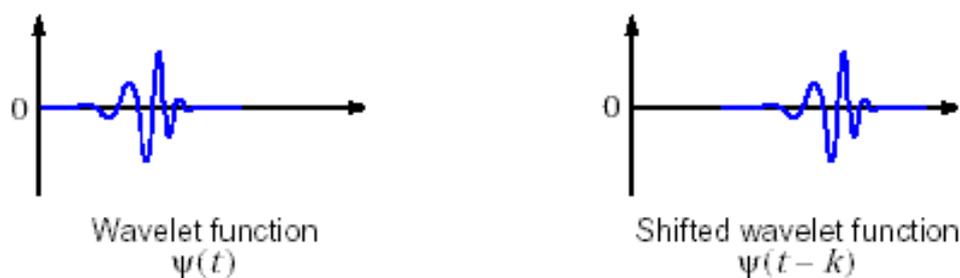


Figura 5- 18 EFFETTO DI TRASLAZIONE DI UNA WAVELET

Per creare una CWT occorre eseguire una procedura costituita da 5 passi:

- 1) Prendere una wavelet e compararla al segmento iniziale del segnale in esame.
- 2) Calcolare il coefficiente C , che rappresenta quanto la wavelet è approssimativamente correlata al tratto del segnale in esame, e più alto risulta il C , più il segnale e la wavelet risultano simili:

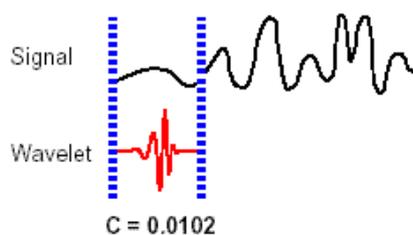


Figura 5- 19

- 3) Si trasla la wavelet a destra e si ripetono i punti 1-2 fino a che non si è coperto completamente il segnale:

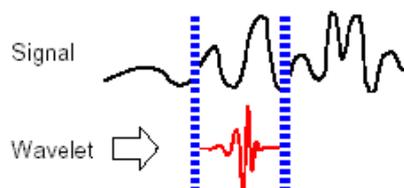


Figura 5- 20

- 4) Si scala la wavelet e si ripetono i punti 1-3

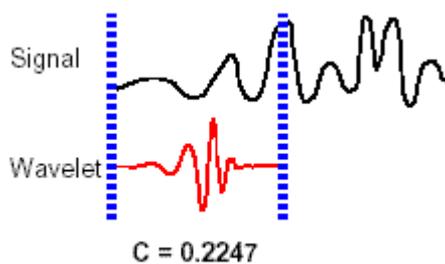


Figura 5- 21

- 5) Si ripetono tutti i passi da 1 a 4 per tutte le scale.

Eseguite tali operazioni, si avranno i coefficienti prodotti alle diverse scale da differenti sezioni del segnale e tali coefficienti sono il risultato della rappresentazione del segnale originale per mezzo delle wavelet.

Si può pensare di rappresentare tali coefficienti dando luogo ad un diagramma in cui l'asse x sia l'asse dei tempi, l'asse y rappresenti la scala o la frequenza e dove l'intensità del coefficiente C viene rappresentata per mezzo di una scala cromatica:

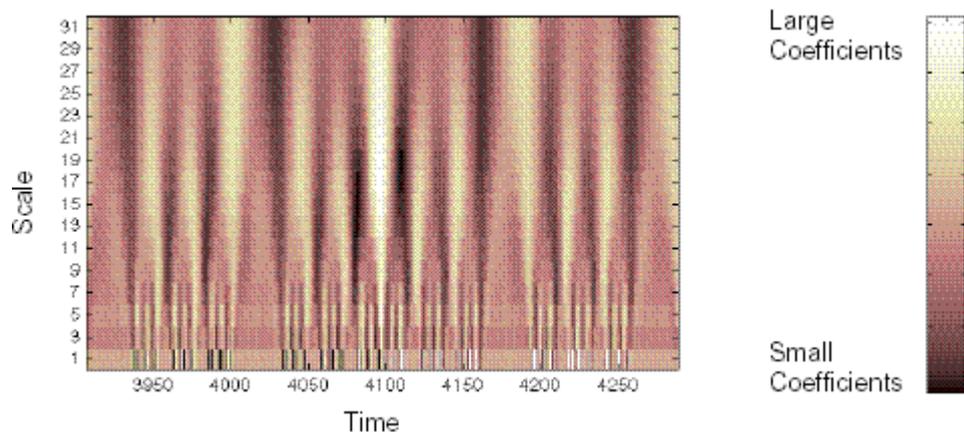


Figura 5- 22 Rappresentazione caratteristica di una wavelet (DA[65])

In pratica i coefficienti C della CWT riportati sul grafico sono la visualizzazione del segnale dal punto di vista scala-tempo.

La corrispondenza tra la scala a e la frequenza f segue le seguenti proprietà:

- bassa scala $a \Rightarrow$ wavelet compressa \Rightarrow dettagli che cambiano rapidamente \Rightarrow ALTA FREQUENZA

- alta scala $a \Rightarrow$ wavelet dilatata \Rightarrow cambiamenti limitati \Rightarrow BASSA FREQUENZA



Figura 5- 23 (DA[65])

Quando analizziamo il segnale, i dati che elaboriamo si riferiscono ovviamente ad un tempo finito, quindi parlare di CWT significa riferirsi ad un particolare set di scala e posizioni.

In particolare la CWT può operare su qualsiasi scala, da quella del segnale originale fino alla massima scala permessa dalla capacità computazionale.

La CWT è continua anche in termini di traslazione: durante il calcolo, la Wavelet analizzata viene traslata sopra il completo dominio del tempo.

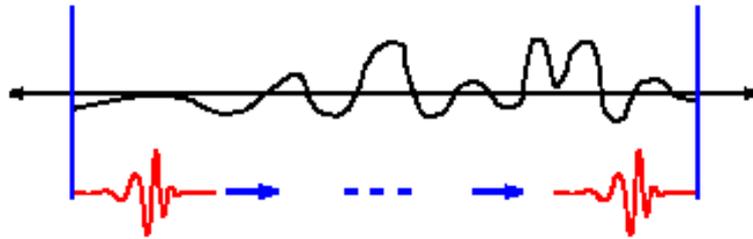


Figura 5- 24 (DA[65])

La CWT fornisce un buon mezzo per studiare come cambia il contenuto in frequenza con il tempo e conseguentemente come sia capace di individuare e localizzare i fenomeni di breve durata.

Il numero di famiglie di funzioni wavelets è piuttosto elevato, siano esse a valore complesso o a valore reale, quindi si presenta il problema di operare una scelta adeguata della famiglia di wavelets, in funzione dell'esigenza di rappresentazione.

In particolare, le wavelets che interessano maggiormente nella condition monitoring, sono quelle caratterizzate dalla proprietà che la diminuzione del fattore di scala a determina un aumento della frequenza di oscillazione, ma la durata delle oscillazioni diminuisce, cosicché ogni wavelet è contenuta nello stesso numero di cicli.

Tale proprietà rappresenta un notevole vantaggio nella risoluzione rispetto alla STFT in cui la finestra temporale resta sempre costante.

Nell'analisi CWT la larghezza della finestra nel dominio del tempo è proporzionale al fattore di scala a , mentre la larghezza di banda nel dominio delle frequenze è proporzionale ad $\frac{1}{a}$.

Quindi la CWT, nel range delle basse frequenze, ha un'ottima risoluzione nel dominio delle frequenze, mentre nel range delle alte frequenze, ha un'ottima risoluzione nel dominio del tempo.

I risultati della CWT vengono rappresentati graficamente nel piano scala-tempo, o anche nel piano frequenza –tempo, dato che la scala a è legata alla frequenza dalla relazione:

$$f = \frac{f_o}{a} \quad [5.4]$$

La wavelet può essere utilizzata con successo nell'individuazione di discontinuità, come salti o variazioni di pendenza, del segnale in esame, in quanto tali variazioni possono essere percepite nel dominio del tempo o in quello dello spazio.

Lo scopo di tale analisi è individuare:

- il luogo del cambiamento (spazio o tempo);
- il tipo di cambiamento;
- l'ampiezza del cambiamento.

Ed è proprio il carattere prettamente locale dell'analisi WA che si adatta alla condition monitoring.

5.4.3 DESCRIZIONE MATEMATICA DELLA ANALISI WAVELET

La WA è una trasformazione lineare che decompone un segnale temporale $x(t)$ in un insieme di funzioni elementari $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$, che prendono il nome di wavelets, funzioni locali del tempo, aventi un predeterminato contenuto in frequenza:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad [5.5]$$

Tali funzioni sono date dalla traslazione e dilatazione di una "mother wavelet" $\psi(t)$, dove la traslazione (o parametro di dilatazione temporale) b descrive la localizzazione temporale della wavelet, mentre la dilatazione (o parametro di scala) a , con $a > 0$, determina la larghezza o la scala della wavelet stessa.

La WA è definita come :

$$WA = W_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) \left(\frac{t-b}{a}\right) \quad [5.4]$$

dove la $\Psi_{a,b}^*(t)$ è il complesso coniugato di $\Psi_{a,b}(t)$ ed il fattore $\frac{1}{\sqrt{a}}$ viene usato per assicurare che l'energia delle wavelets scalate e traslate sia la stessa della mother wavelet.

Per scopi pratici, la mother wavelet $\psi(t)$ può essere definita come una funzione finestra, il che significa che

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)| dt < +\infty \quad [5.5]$$

e deve essere soddisfatta la condizione di ammissibilità

$$C_{\psi}(t) = \int_0^{\infty} \frac{|\Psi(f)|^2}{f} df < +\infty \quad [5.6]$$

dove $\Psi(f)$ è la trasformata di Fourier di $\psi(t)$.

La ricostruzione del segnale $x(t)$ per mezzo della trasformata wavelet è data da:

$$x(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} W_{a,b} \Psi_{a,b}(t) \left(\frac{1}{a^2} \right) \cdot da \cdot db \quad [5.7]$$

Il fattore a ha un centro e una larghezza della frequenza di banda che sono rispettivamente:

$$\frac{\omega_c}{a} \quad \text{e} \quad \frac{2\Delta}{a} \quad [5.8]$$

dove ω_c e Δ sono rispettivamente la frequenza centrale della banda e la larghezza di banda della mother wavelet.

L'analisi wavelet risente comunque del rumore di fondo e delle altre sorgenti vibratorie, quindi viene consigliato in letteratura di procedere ad operazioni sul segnale come la TSA ed il segnale residuo.

Tali operazioni ripulendo il segnale dall'eventuale rumore di fondo ed eliminando le componenti fondamentali e le armoniche di ingranamento, permettono alla WA di individuare e localizzare il difetto.