

Capitolo 19 - Un caso reale di riorganizzazione del servizio manutenzione. Le politiche di intervento: manutenzione predittiva

In questo capitolo verrà proposto un particolare esempio applicativo di manutenzione predittiva sui mandrini portamola delle macchine del gruppo macchine. Si tratta di una analisi vibrazionale condotta mediante uno strumento che fornisce una serie di informazioni sullo stato dei cuscinetti dei mandrini.

Sezioni:

19.1 - I mandrini portamola

19.2 - Analisi dell'anomalia

19.3 - La manutenzione predittiva sui mandrini portamola

19.4 - La politica dell'azienda riguardo i mandrini

19.5 - Confronto economico tra approccio tradizionale e innovativo

19.1 - I mandrini portamola

Per quanto riguarda il mandrino portamola, tutte le cinque macchine del gruppo macchine sono identiche. Il mandrino è composto da un albero metallico, una protezione esterna anch'essa metallica e una serie di 4 cuscinetti di alta precisione che, vincolati sulle apposite sedi dello shield esterno e dell'albero, consentono a quest'ultimo di ruotare ad elevate velocità (6000-9000 giri/min) con oscillazioni radiali massime consentite di 3-5 micron.

Il mandrino è costruito in modo tale per cui, nel momento in cui venisse smontato per controllarne lo stato e ispezionarne i cuscinetti questi ultimi verrebbero irrimediabilmente rovinati. Pertanto il congegno deve essere rismontato solo quando il suo ciclo di vita si è concluso, cioè i cuscinetti si sono deteriorati e si è manifestato apertamente il grippaggio.

A un lato dell'albero è montata una puleggia dentata per la trasmissione del moto, collegata ad un motore asincrono trifase da 4 kW di potenza che ha una velocità di rotazione tipica di 2850 giri/min a 50 Hz anch'esso dotato di puleggia dentata con numero di denti diverso da quella montata sull'albero; sul lato opposto, su di un mozzo conico, sono montate due mole con i relativi distanziatori, i settori di bilanciamento e il

dado di fissaggio. Il tutto è rigidamente ancorato ai supporti della macchina attraverso viti a brugola di vario diametro.

19.2 - Analisi dell'anomalia

I cuscinetti del mandrino sono sei, una coppia in configurazione Dorso-Dorso sul lato puleggia e una quaterna in configurazione Tandem-Faccia-Tandem sul lato mola. Il sistema è stato progettato per durare almeno 5000 ore lavorative ad una velocità di rotazione dell'albero di 8500 giri/min e con un carico radiale di 2800 N (280 kg circa). I cinque mandrini nel corso degli anni sono stati tutti revisionati più volte tuttavia le macchine lavorano a velocità diverse per sfruttare al meglio i diametri delle mole. Infatti si può operare con diametri variabili da 250 a 190 mm modificando il rapporto Z tra il numero di denti delle pulegge rispettivamente sull'albero e sul mandrino per mantenere costante la velocità tangenziale (ca. 80 m/s) passando da uno $Z=2,2$ per le macchine più lente (ca. 6300 giri/min, mola $\phi=250\text{mm}$) fino a $Z=3$ per quelle più veloci (ca. 8600 giri/min, mola $\phi=190\text{mm}$); infatti la relazione tra il numero di giri del mandrino N_a e quello del motore N_m vale:

$$N_a = N_m \times Z$$

Le macchine più lente procedono nella lavorazione finché la mola raggiunge i 190mm, dopodiché l'elemento viene sostituito con uno nuovo e quello usurato viene preparato per essere montato sulle macchine più veloci: si riesce così a sfruttare la singola mola più a lungo con notevole convenienza economica.

Il guasto ai cuscinetti si manifesta generalmente una volta l'anno su un solo mandrino causando notevoli tempi di fermo macchina (che si manifestano improvvisi e non programmabili), dovuti principalmente a due fattori:

- la mancanza di ricambi a magazzino
- l'impossibilità pratica di prevedere in anticipo la situazione di cedimento

Generalmente l'indisponibilità teorica per questa tipologia di guasto è mediamente di una settimana, e rappresenta la somma tra:

- il tempo medio di consegna dei cuscinetti di ricambio da parte del fornitore esterno
- il tempo di montaggio dei cuscinetti nuovi sull'albero
- il rodaggio e la reinstallazione del mandrino sulla macchina

I ritardi relativi allo smontaggio del mandrino e dei cuscinetti sono compresi nel tempo di riordino del materiale in quanto, nel momento in cui l'anomalia si verifica, la sua origine è chiara come la modalità di riparazione e quindi i cuscinetti vengono richiesti subito. Schematicamente i tempi sopra citati possono essere visti come:

Causale	Tempo
Rilevazione e diagnosi del guasto	1 ora
Riordino dei cuscinetti	3 giorni lavorativi
Montaggio dei nuovi cuscinetti	1 giorno lavorativo
Rodaggio	1 giorno lavorativo
Rimontaggio del mandrino	½giorno lavorativo

L'indisponibilità operativa della macchina vale quindi circa 50 ore.

Tra gli ultimi giorni di dicembre e la fine di marzo dell'anno successivo si è verificata una situazione anomala su una delle 5 macchine, poiché il mandrino portamola si è guastato, con grippaggio dei cuscinetti, per ben 3 volte nel periodo di tempo indicato. Nel primo dei tre guasti erano disponibili a magazzino i cuscinetti di ricambio, ma nei due successivi si è dovuto ricorrere al riordino del materiale; globalmente i costi sostenuti per le tre operazioni ammontano a:

Causale costo		Costo
Indisponibilità	50 ore/guasto X 3 guasti X 85.000 £/ora	12.750.000
Cuscinetti di ricambio (set di 6)	3 set X 800.000 £/set	2.400.000
Ore di riparazione	25 ore/guasto X 3 guasti X 33.000 £/ora	2.500.000
Totale	17.650.000	18.000.000

Nel caso attuale, in cui la macchina non è collo di bottiglia, la perdita per guasto vale circa 6 milioni di lire. Nel caso in cui lo fosse stata, i costi da sostenere sarebbero stati molto più pesanti a causa della mancata produzione; per la sola indisponibilità

operativa, in tal caso, la perdita economica sarebbe stata quantificabile in circa 60 milioni di lire per i tre guasti cioè mediamente 20 milioni di lire a guasto.

19.3 - La manutenzione predittiva sui mandrini portamola

Visto il notevole impatto sia sul piano economico che su quello dell'indisponibilità operativa causato da questo tipo di guasto si è pensato di predisporre un piano di ispezioni predittive atto a diagnosticare l'insorgenza del problema. La programmazione dei controlli viene effettuata manualmente con cadenza mensile ma la frequenza è modificabile a seconda delle esigenze e dei risultati dei controlli.

I guasti verificatisi sulla macchina sono, con molta probabilità, sia frutto di errori da parte del manutentore nel montaggio e nel rodaggio dei cuscinetti nuovi che dovuti all'utilizzo di cuscinetti e grasso lubrificante non conformi alle specifiche del costruttore; questi avvenimenti hanno rappresentato per la manutenzione un momento di grande incertezza su come gestire in futuro le operazioni di ripristino della funzionalità.

Lo strumento utilizzato per controllare lo stato dei cuscinetti è rappresentato da un sistema di analisi digitale di vibrazioni. Il punto di misurazione, che deve essere solidale col mandrino, è la brugola posteriore che fissa il mandrino al supporto della macchina e che è facilmente accessibile quando si apre la portina posteriore di ispezione: tutte le misure devono essere eseguite nello stesso punto onde garantire l'affidabilità della lettura. Eseguito quindi il percorso di controllo per le cinque macchine i dati acquisiti vengono riversati sul PC ed elaborati via software.

Le analisi principali scelte per il programma manutentivo sono state di due tipi:

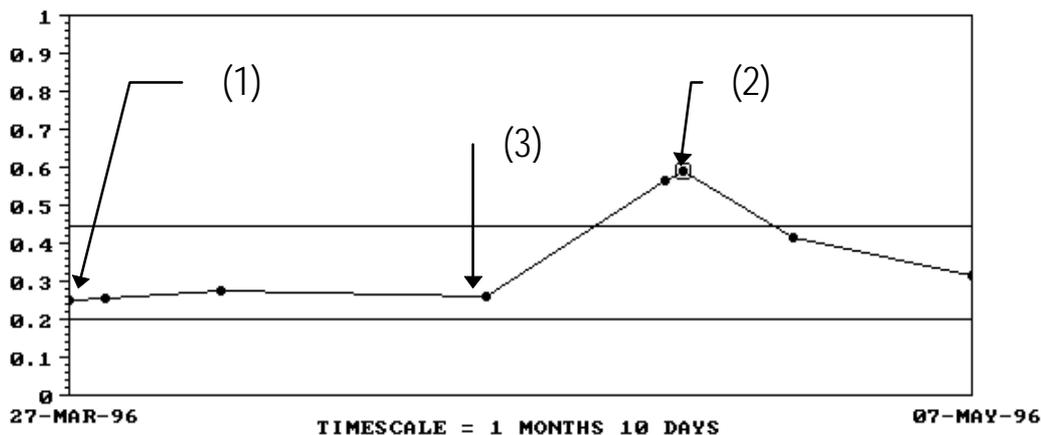
- analisi degli spettri, in cui si rapporta con diverse modalità di visualizzazione, l'ampiezza della vibrazione in funzione della sua frequenza e le relative variazioni tra due o più rilievi
- analisi della tendenza, nella quale, attraverso una dispersione di punti che rappresentano un valore di rumore si può tracciare una spezzata che può essere interpolata linearmente per controllare l'andamento nel futuro del soggetto controllato

Le misurazioni sono state eseguite su tutte le affilatrici di testa del gruppo macchine. Il risultato ottenuto è il seguente:

- avendo a disposizione più macchine uguali costruttivamente e nell'utilizzo che ne viene fatto è stato possibile definire dei limiti di banda in cui collocare le macchine in zona di sicurezza, un range in cui si è ipotizzato che le oscillazioni rilevate possano essere considerate nella norma
- le macchine hanno dato spettri differenti tra loro specie nelle zone a frequenza elevata (>1000 Hz), dove si localizzano le armoniche; nella zona a bassa frequenza (<1000 Hz), dove si localizzano i difetti tipici degli elementi del cuscinetto (anello interno, esterno ed elementi rotanti) la situazione è invece molto simile e i picchi sono più facilmente interpretabili
- è stato possibile discriminare l'effetto di eventuali sbilanciature della mola sullo spettro riportato dallo strumento (vedi oltre). In base a questo risultato è possibile stabilire quanto e dove la singola misura viene influenzata da disturbi dell'ambiente circostante il mandrino
- l'analisi della tendenza ha consentito di rilevare il comportamento anomalo di alcuni mandrini e quindi di intensificare le misurazioni per approfondire lo studio sulle cause di insorgenza della deviazione del comportamento dallo standard
- la pratica ripetuta nelle misurazioni da parte dei manutentori ha consentito loro di familiarizzare sia con lo strumento stesso che con il relativo software, ma soprattutto di considerarlo a tutti gli effetti come un valido aiuto sia nella stima di situazioni anomale altrimenti non rilevabili, che come termine di paragone quando si effettuano regolazioni meccaniche che hanno bisogno di essere confrontate con le letture precedenti per verificare la bontà dell'intervento.

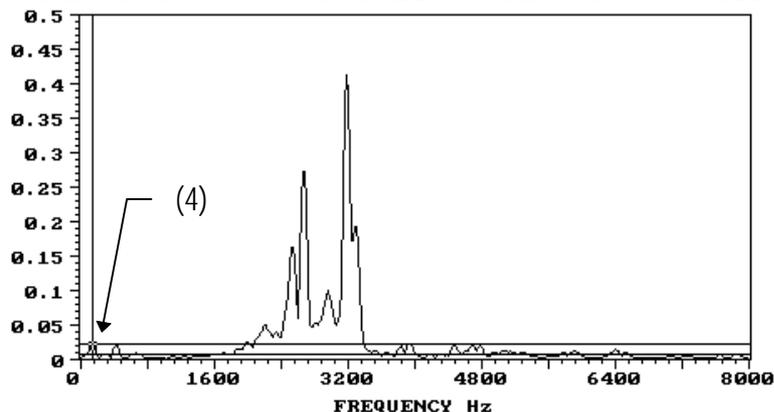
In particolare per la macchina 4 si sono avuti i seguenti risultati nella tendenza delle misurazioni:

POINT ID: MANDRINO MOLA 817 POINT DESC: brugola posteriore mandrino
 ALARM TYPE: LEVEL UNITS: G_s
 ALARM1: 0.2 ALARM2: 0.45 STD: 0.1426 MEAN: 0.3634
 DATE: 24-APR-96 17:40:32 VALUE: 0.589



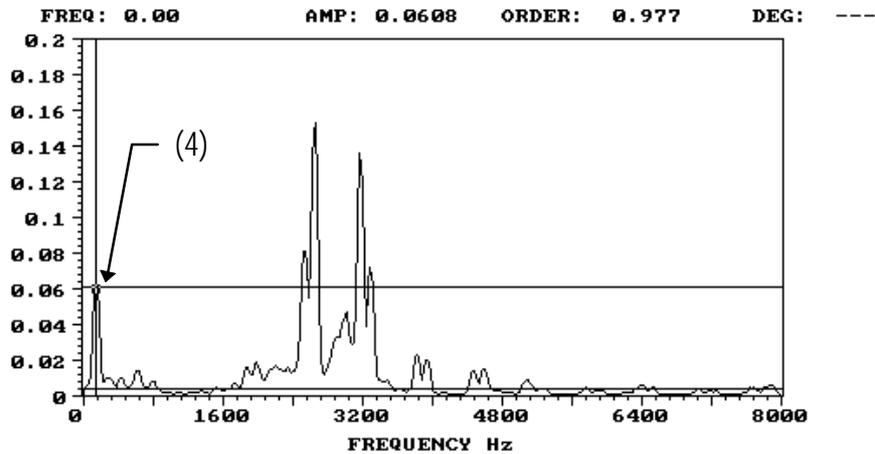
La prima misurazione (1) si riferisce al mandrino appena riparato e rodato a banco. Il punto contrassegnato (2) ed il comportamento in precedenza, hanno indotto in un primo tempo a credere che fosse in atto un fenomeno che potesse portare al guasto in tempi brevi. Il fenomeno è successivamente rientrato ma è stato seguito più da vicino e con misurazioni più frequenti. Benché il problema sembri svanito, poiché le misure sono state raccolte accuratamente, si rende necessario un controllo più frequente alla ricerca dei motivi che hanno provocato il picco. Un'ipotesi sulle motivazioni dello scostamento della tendenza può essere tentata con l'ausilio degli spettri relativi alle misurazioni. Di seguito sono riportati quelli relativi rispettivamente al secondo punto fuori range (2) e all'ultimo punto precedente che si trovava in range di sicurezza (3). Si notino i valori in ordinata:

POINT ID: MANDRINO MOLA 817 DESC: brugola posteriore mandrino
 WINDOW: FLAT TOP LINES: 400 AVER: 15 FREQ: 0 - 8000 Hz
 DETECT: RMS RPM: 8600 THRESHOLD: 0.0100 UNITS: G_s
 FREQ: 0.00 AMP: 0.0217 ORDER: 0.977 DEG: ---



(2)

POINT ID: MANDRINO MOLA 817 DESC: brugola posteriore mandrino
 WINDOW: FLAT TOP LINES: 400 AVER: 15 FREQ: 0 - 8000 Hz
 DETECT: RMS RPM: 8600 THRESHOLD: 0.0040 UNITS: Gs

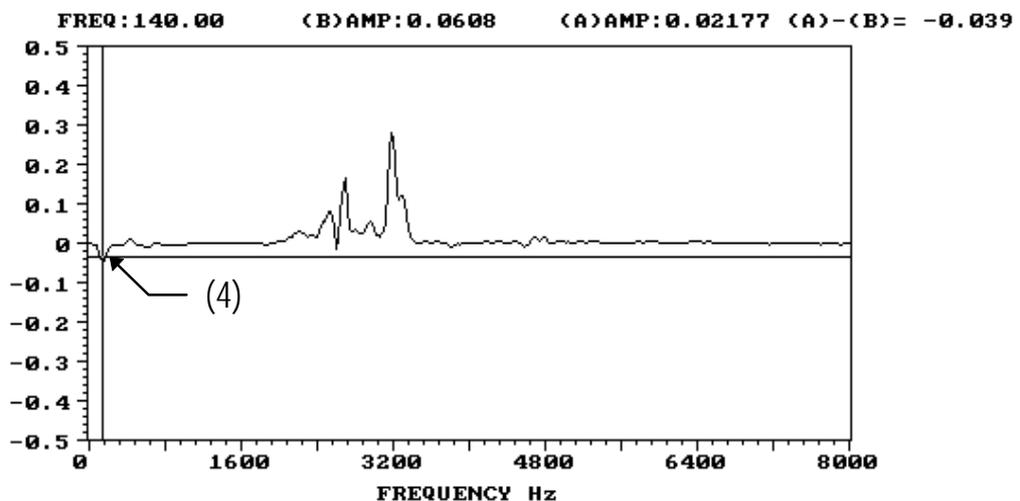


Per entrambi è stato evidenziato un particolare punto (4) il cui significato verrà chiarito in seguito.

Lo spettro *differenza* tra i due da cui ricavare informazioni di notevole importanza è il seguente:

DATE: 15-APR-96 19:42:58
 LINES: 400 TYPE: FFT
 HI FREQ: 8000 Hz

DATE: 24-APR-96 17:40:32
 LINES: 400 TYPE: FFT
 HI FREQ: 8000 Hz



L'analisi dei due spettri dovrebbe essere effettuata su due zone: quella ad alta frequenza e quella a bassa frequenza.

La zona con $f > 1600$ Hz negli spettri (2) e (3) presenta i picchi in corrispondenza delle medesime frequenze ma con ampiezze diverse, in alcuni punti fino al 200-300% del valore considerato “in range”. Tali picchi rappresentano le armoniche delle vibrazioni di base e la loro interpretazione risulta difficile se li si considera come elementi a sé stanti. Diversamente se gli stessi vengono paragonati tra loro, allora si riesce ad ottenere almeno un dato, cioè l’entità della differenza che è riportata nel grafico C: l’incremento del valore differenza può infatti indicare la presenza di fenomeni anomali in atto.

Nella zona con $f < 1600$ Hz, il punto (4) contrassegnato dal cursore si trova alla frequenza di 140 Hz e rappresenta una possibile sbilanciatura della mola. Questa ipotesi è suffragata dai dati relativi ad un sistema volvente su cuscinetti con velocità di rotazione di 8600 giri/min.

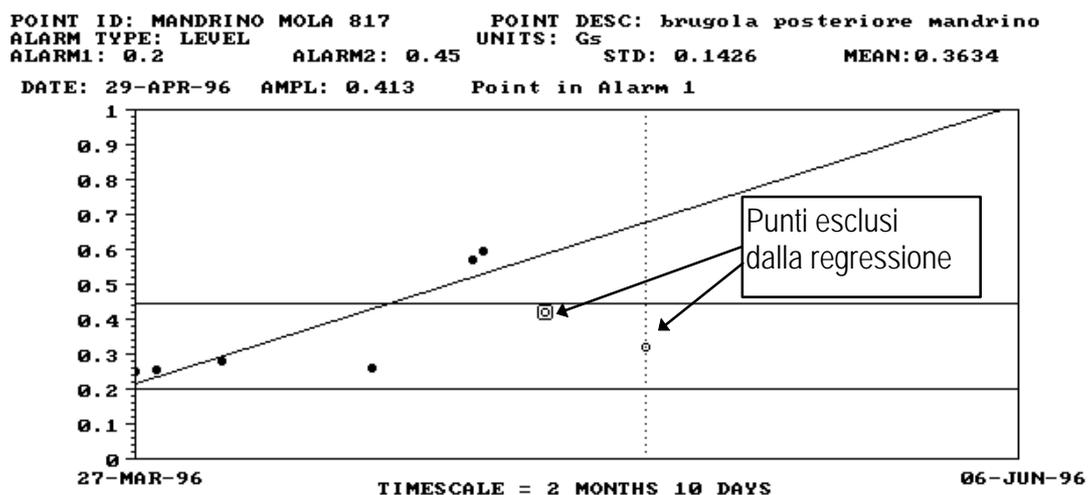
Bearing designation	: 6208
Pitch diameter [dm] (mm)	: 60
Rolling element diameter [DW] (mm)	: 11.90
Number of rolling elements [z]	: 13
Contact angle (degrees)	: 15.00
Inner ring speed (RPM)	: 8600.00
Bearing type code	: 1
Bearing type	: Deep groove ball
Outer, housing, diameter [D] (mm)	: 80
Inner, bore, diameter [d] (mm)	: 40
Number of rows	: 1
Inner ring defect frequency (Hz)	: 1110.15
Outer ring defect frequency (Hz)	: 753.18
Rolling element defect frequency (Hz)	: 696.17
Inner ring rotational speed (Hz)	: 143.33
Cage rotational speed (Hz)	: 57.94

Rolling element rotational speed (Hz) : 348.08

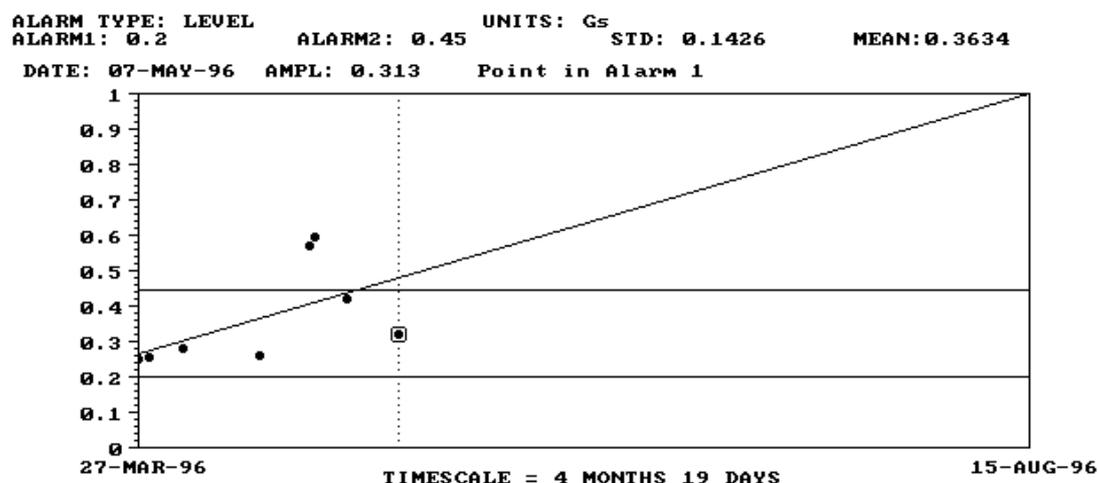
La Inner ring speed secondo il software vale 143 Hz ($8600_{\text{rpm}} / 60_{\text{sec/min}} = 143_{\text{giri/sec=Hz}}$), mentre il picco rilevato si trova a 140 Hz, con una differenza del tutto trascurabile. In tutti e tre gli spettri, A, B e C alle frequenze di difetto tipiche del cuscinetto modello 6208 (rispettivamente 1110 Hz per l'anello interno, 753 Hz per l'anello esterno e 696 Hz per le sfere) non si rilevano anomalie di sorta cioè nessun picco rilevante ma solo rumore di fondo.

È interessante analizzare l'influenza dei picchi vibrazionali misurati sul comportamento della tendenza proiettata nel futuro con una regressione lineare. Benché i dati in possesso siano realmente molto limitati è possibile effettuare una analisi qualitativa della situazione. Supponendo che si abbia un cedimento del mandrino, ovvero un grippaggio dei cuscinetti, per un valore di overall di 1G ($1G = 9.8 \text{ m/s}^2$, accelerazione di gravità), è possibile visualizzare la differenza tra il tempo previsto per il cedimento nel momento in cui è stato rilevato il picco (24 aprile) e nel momento dell'ultima misurazione effettuata (7 maggio).

Nel primo caso, qualora la tendenza fosse stata confermata, il cedimento era prevedibile nei 40 giorni successivi all'ultima misurazione utile (24 aprile), come visualizzato nel seguente grafico:



Con l'abbassamento dei valori di overall delle ultime due misurazioni il tempo stimato per il cedimento si alza a 100 giorni dal 7 maggio ed è prevedibile entro il 15 agosto¹:



L'importanza di questo dato è chiara se si deve programmare la fermata per riparazione o si debba decidere di ordinare il materiale di ricambio in previsione del guasto.

19.4 - La politica dell'azienda riguardo i mandrini

L'azienda non era più disposta a sostenere le spese per la riparazione dei mandrini e stava cercando ogni possibile via per ridurre le perdite sia sotto il profilo dell'indisponibilità che economiche.

L'accuratezza e l'affidabilità dimostrata dallo strumento nella rilevazione dei dati consente di muoversi su due linee di intervento:

- la prima, orientata a tenere in azienda un mandrino completamente revisionato e pronto per l'installazione, ricorrendo alla rigenerazione presso la casa madre di un vecchio mandrino in disuso
- la seconda, nel procedere con un programma di controlli preventivi, sulle condizioni generali della macchina (temperature e pressioni) e predittivi, con l'utilizzo del sistema digitale, mediante un piano di rilevazioni organizzato e gestito nelle date di esecuzione.

¹Il software non tiene chiaramente conto delle fermate per ferie o festività.

Il risultato ottenibile con la prima azione è quello di diminuire i costi di fermo macchina per indisponibilità da guasto, mentre con la seconda si è potuto disporre di un utile preallarme sul quale basare in anticipo la fermata programmata e lo spostamento della produzione secondo le esigenze.

19.5 - Confronto economico tra approccio tradizionale e innovativo

Il confronto tra i due metodi si può fare sia sul piano economico che su quello della disponibilità operativa come già in precedenza visto per i casi di manutenzione correttiva e preventiva. Nella consuntivazione dei costi correttivi in situazione di non collo di bottiglia la spesa unitaria per singolo guasto si aggira intorno a i 6 milioni di lire con una indisponibilità operativa di 50 ore e il problema di riallocare la produzione. Si possono individuare due modalità di guasto:

- guasto improvviso (non preannunciato): in tal caso avendo il mandrino di scorta a magazzino il resoconto diventa:

Causale costo		Costo a guasto
Indisponibilità	8 ² ore X 85.000 £/ora	700.000
Revisione mandrino		3.000.000
Immobilizzo mandrino	10% interesse annuo	300.000
Ore di riparazione	6 ore X 33.000 £/ora	200.000
Totale		4.200.000

Il risparmio è quantificabile in circa 2 milioni cioè pari circa al 30% della spesa tradizionalmente sostenuta, con un aumento della disponibilità di circa 40 ore per intervento.

- guasto previsto tramite sistema digitale: è possibile organizzare le risorse della Produzione e della Manutenzione in modo da ridurre ulteriormente i tempi morti:

Causale costo		Costo a intervento
Indisponibilità	programmata	0
Revisione mandrino		3.000.000
Immobilizzo mandrino	10% interesse annuo	300.000
Ore di riparazione	4 ³ ore X 33.000 £/ora	132.000
Totale	3.132.000	3.400.000

In questa seconda ipotesi la riduzione della perdita rispetto alla gestione tradizionale è del 40% circa con una mancata perdita di 2,5 milioni, una indisponibilità nulla e nessun problema di spostamento immediato del materiale in lavorazione. Rispetto al caso precedente di guasto improvviso la differenza economica di 800.000 lire rappresenta un ulteriore miglioramento del 20%.

Il vantaggio di questa seconda soluzione risiede soprattutto nella possibilità di organizzare l'intervento nei tempi e nei modi più opportuni grazie al preavviso dell'avaria, poiché l'efficienza di un servizio, oltre che dalla preparazione tecnica del personale, dipende anche dalla possibilità di gestire le risorse a propria disposizione senza dover rincorrere continuamente i fenomeni di guasto.

² aumentato a causa della possibilità di guasto notturno.

³ ridotto per programmazione dell'intervento.