

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Tecniche di *asset management* e monitoraggio vibrazionale *on-line*
applicate all'industria degli pneumatici**



Relatore

Prof. Giuseppe Quaglia

Correlatore

Ing. Giorgio Beato

Candidato

Giovanni Colucci

Aprile 2021

Tesi sponsorizzata da SKF Industrie S.p.A.



In collaborazione con Michelin Italia



Introduzione

Lo scopo dello studio consiste nella sperimentazione e proposta di nuove tecniche di monitoraggio dello stato di salute dei macchinari presenti presso lo stabilimento di produzione semi-finiti di Michelin Torino Stura in ottica Industria 4.0. Le tecniche di manutenzione predittiva applicate su macchinari ad albero rotante, ad oggi, permettono di aumentarne la disponibilità tecnica, riducendo i costi di manutenzione e lasciando all'operatore il solo compito a effettivo valore aggiunto. In collaborazione con l'area Vendite di SKF Italia, la quale si occupa di fornire servizi di ingegneria di manutenzione presso clienti appartenenti a diversi settori industriali, e con il supporto del *partnership* nel consorzio CIM4.0, che ha l'obiettivo di supporto alle aziende manifatturiere per la digitalizzazione dei propri processi in ottica Industria 4.0, è stato analizzato il caso specifico di un sito di produzione appartenente al settore pneumatici.

Dopo aver fornito una panoramica dello stato di avanzamento dell'Industria 4.0 in Italia, avviata dal piano nazionale del 2017 ed ormai sottoposta alle nuove misure del Piano Nazionale Transizione 4.0 di fine 2020, verrà presentata una lettura di come l'Ingegneria di Manutenzione può far uso delle tecnologie e metodologie innovative che tali iniziative hanno permesso di sviluppare.

La non conoscenza del sito, delle relative linee di produzione e parco macchine, hanno portato allo svolgimento di uno studio secondo la metodologia *SKF Client Needs Analysis (CNA)* e successiva analisi di criticità basata sull'indice sintetico di *OEE % (Overall Equipment Performance)*. Tali attività hanno permesso di descrivere a pieno il contesto in cui l'area Manutenzione del sito si trova ad operare, e selezionare una specifica area di intervento, motivandone la scelta.

Nell'area selezionata, la quale è costituita principalmente da estrusori a vite e mescolatori aperti di gomma, movimentati da annessi motori elettrici e motoriduttori, sono state implementate nuove sistemi di diagnostica dello stato di salute dei macchinari basati su dati vibrazionali. Per tale scopo, sono stati selezionati ed installati sui macchinari degli accelerometri piezoelettrici a cavo integrato e relative centraline multicanale per l'acquisizione continua dei dati, installando inoltre una rete *LAN* per l'invio dei dati verso *cloud*. Al fine di integrare i dati vibrazionali con i dati di processo delle macchine, è stato anche realizzato un collegamento per la comunicazione tra i sistemi di acquisizione ed i PLC di reparto.

In definitiva, il sistema così costituito ha permesso di acquisire dati sperimentali sui quali è stata svolta un'analisi vibrazionale spettrale mediante il *software* applicativo SKF *@plitude Observer*, individuando una serie di contenuti in frequenza dovuti alla natura delle macchine, ed osservando come essi variano al variare delle condizioni di velocità e di carico a cui il macchinario è sottoposto.

Sommario

Indice delle figure	III
Indice delle tabelle	VI
1. L'Industria 4.0 oggi e l'Ingegneria della Manutenzione	1
1.1 Nascita delle iniziative di Industria 4.0 e situazione attuale in Italia	1
1.1.1 Il caso italiano	4
1.2 Il Centro di Competenza CIM 4.0	6
1.3 L'azienda SKF, modello di <i>business</i> legato al concetto di <i>reliable rotation</i>	8
1.4 Come cambia l'Ingegneria di Manutenzione con l'Industria 4.0	11
2. Analisi della gestione della manutenzione e scelta area di intervento.....	14
2.1 Il sito di produzione di Michelin Torino	14
2.2 Il modello SKF AEO (<i>Asset Efficiency Optimization</i>)	17
2.2.1 Strategia	17
2.2.2 Identificazione	19
2.2.3 Controllo	19
2.2.4 Esecuzione	20
2.3 Il questionario SKF CNA (<i>Client Needs Analysis</i>)	20
2.3.1 Le domande del questionario CNA	23
2.3.2 Il questionario CNA per lo stabilimento di Michelin Torino	25
2.4 Analisi dell'andamento storico dei dati di <i>performance</i> dell'area manutenzione	32
2.4.1 L'indice di OEE (<i>Overall Equipment Effectivness</i>)	32
2.4.2 Analisi dell'indice di OEE % per lo stabilimento di Michelin Torino	34
2.4.3 Analisi dei dati di guasto	35
2.4.4 Analisi dei dati di rallentamento	37
2.4.5 Impatto della non conformità del prodotto e analisi tempo ciclo di produzione	39
2.5 Sintesi dei risultati.....	41
3. Tecnologie e metodi per acquisizione e analisi dei dati vibrazionali in ottica di Industria 4.0.....	43
3.1 La misura delle vibrazioni.....	43
3.2 Il monitoraggio stato di salute mediante analisi delle vibrazioni.....	49
3.2.1 Vibrazioni provenienti dall'ingranamento di ruote dentate	50
3.2.2 Vibrazioni provenienti dai cuscinetti a rotolamento	51
3.2.3 Impostazione soglie di allarme.....	53
3.3 L'accelerometro piezoelettrico: principio di funzionamento e tipologie costruttive ...	54

3.3.1	Accelerometro ICP (Integrated Circuit Piezoelectric).....	57
3.3.2	Tipologia di montaggio.....	58
3.4	Cenni sui sistemi di acquisizione dati	59
3.4.1	La conversione analogico-digitale	60
3.4.2	I sistemi di acquisizione dati, principali caratteristiche	62
3.4.3	I sistemi di monitoraggio vibrazionale, funzionalità specifiche	63
3.5	Architettura SKF @ptitude per l'acquisizione e monitoraggio dati da remoto	64
4.	Installazione dei dispositivi e predisposizione al monitoraggio da remoto dei dati..	66
4.1	Area di Alimentazione Gomma, installazione dispositivi di misura e acquisizione	66
4.1.1	Scelta ed installazione degli accelerometri	70
4.1.2	Installazione e collegamento delle centraline di acquisizione	73
4.2	Rete locale implementata per la comunicazione con PLC e trasmissione dati in cloud	75
4.2.1	Configurazione dispositivo di conversione protocollo	76
4.2.2	Trasmissione dati verso <i>cloud</i>	78
4.3	Creazione punti di misura e database su software applicativo	79
5.	Analisi dei dati sperimentali	83
5.1	Analisi spettri acquisiti	83
5.1.1	Area Estrusione Gomma	83
5.1.2	Area Mescolatore	87
5.2	Correlazione con i dati di processo	92
5.3	Studio di influenza sulla qualità della produzione	96
5.4	Considerazioni e sintesi risultati	98
	Conclusioni	100
	Appendice A	101
	Appendice B	104
	Appendice C	113
	Bibliografia	115

Indice delle figure

Figura 1 Presupposti chiave per l'implementazione di iniziative in ambito Industria 4.0. Fonte: Smit et al. (2016), Industry 4.0, ITRE.....	3
Figura 2 Enti ed aziende costituenti il gruppo CIM 4.0. In evidenza, SKF e Michelin, aziende partecipanti al progetto di tesi. Fonte: CIM40.com	7
Figura 3 Livelli di TRL su cui il CIM opera. Fonte: cim40.com	7
Figura 4 Sede SKF Solution Factory Italia a Moncalieri (To). Fonte: evolution.skf.com	8
Figura 5 Il concetto di economia circolare verso cui si dirige SKF. Fonte: SKF 2019 Annual Report.	10
Figura 6 Modello di economia circolare auspicato e ruolo delle ultime acquisizioni in tal senso. Fonte: SKF Annual Report 2019.	10
Figura 7 Evoluzione delle strategie di manutenzione attuate in ambito industriale. Fonte: A Guide to Asset Efficiency Optimization (2009)	12
Figura 8 Magazzino prodotti di Michelin Torino inaugurato nel 2020. Fonte: Techprincess.it.....	14
Figura 9 Struttura di uno pneumatico. Fonte: Michelin.com.....	15
Figura 10 Schema di funzionamento di una calandra di tipo S e sistema di controllo annesso dello spessore del tessuto. Fonte: Rubber products manufacturing technology, Marcel Dekker, Inc. (1994).....	16
Figura 11 Il modello SKF Asset Efficiency Optimization (AEO). Fonte: The Guide to Asset Efficiency Optimization for Improved Profitability, SKF Reliability Systems (2004).....	17
Figura 12 Esempio di matrice di criticità. Fonte: Redefining your maintenance strategy using the SKF RCM® process, SKF Group (2015).....	18
Figura 13 Percentuale (%) di domande senza risposta per mancata comprensione di oltre 1000 questionari SKF CNA. Fonte: Mapping Maintenance Maturity, Wayne G reed (2016)	21
Figura 14 Percentuale (%) di domande senza risposta per non applicabilità su oltre 1000 questionari SKF CNA. Fonte: Mapping Maintenance Maturity, Wayne G reed (2016).....	21
Figura 15 Percentuale (%) di domande senza risposta per mancanza di dati su oltre 1000 questionari SKF CNA. Fonte: Mapping Maintenance Maturity, Wayne G reed (2016).....	21
Figura 16 Categorie dei risultati ottenibili con il questionario CNA. Fonte: Mapping Maintenance Maturity, Wayne G reed (2016).....	22
Figura 17 Grafico complessivo risultati CNA per l'impianto in esame (score) confrontato con la media di settore (industry average).....	25
Figura 18 Grafico radar di confronto dei risultati CNA per la fase di Strategia.....	26
Figura 19 Grafico radar di confronto dei risultati CNA per la fase di Identificazione.....	27
Figura 20 Ore di attività di manutenzione realizzate nello stabilimento in esame nel periodo (Set 2019 - Set 2020) suddivise per categorie.....	28
Figura 21 Grafico radar di confronto dei risultati CNA per la fase di Controllo.	30
Figura 22 Grafico radar di confronto dei risultati CNA per la fase di Controllo.	31
Figura 23 Esempio di calcolo dell'indice OEE. Fonte: Robert M. Williamson (2006), Using Overall Equipment Effectiveness: The Metric and the Measures, Strategic Work Systems, Inc.	33
Figura 24 Andamento dell'indice di OEE per la linea calandra nel triennio 2018-2020	34
Figura 25 Andamento storico delle cause di perdita OEE % nel triennio 2018-2020 per lo stabilimento in esame	34
Figura 26 Tempo totale, da Gen 2018 a Set 2020, di mancata produzione sulla linea calandra. Dati estratti dal monitoraggio giornaliero effettuato dal personale di reparto.....	36
Figura 27 Diagramma di Pareto sul tempo di mancata produzione, nel periodo Gen 2018 – Set 2020 suddiviso per aree funzionali della linea. I dati derivano dal monitoraggio giornaliero effettuato dal personale di reparto.	37
Figura 28 Perdita di OEE % stimata per fermo macchina per le aree funzionali della linea calandra.	37
Figura 29 Cause di rallentamento elencate per codice imputato dai conduttori di linea. I dati sono complessivi nel periodo Gen 2018 – Set 2020 e sono stati estratti dal software di produzione e-ZP del reparto.	38
Figura 30 Tabella di imputazione dei codici di rallentamento per aree della linea di produzione.	38
Figura 31 Valore di mancato OEE % stimato per le varie aree funzionali della linea calandra causa rallentamenti	39
Figura 32 Tabella di imputazione delle aree di linea di produzione sulle principali cause di mancata qualità prodotto avvolto. Verde: nessun impatto, Giallo: medio impatto, Rosso: alto impatto.....	40
Figura 33 Fenomeni vibrazionali per diverse tipologie di corpi. Fonte: Fichera G., Misura delle vibrazioni.	44
Figura 34 Rappresentazione delle diverse misure in vibrazione per un segnale sinusoidale puro ed un segnale a diversi contributi in frequenza. Fonte: Fichera G., Misura delle vibrazioni.	46

Figura 35 Legame fra misure in spostamento, velocità ed accelerazione per una misura in vibrazione sinusoidale pura. Fonte: ISO 20816-11:2016, Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration.	47
Figura 36 Confronto fra misure in velocità ed accelerazione effettuate su un medesimo punto di misura su di un macchinario dell'area Alimentazione Gomma di Michelin Torino.	48
Figura 37 Frequenza di ingranamento misurata su di un riduttore del sito di Michelin Torino e sue armoniche.	50
Figura 38 Spettro in presenza di difetto localizzato o distribuito su ruote dentate. Fonte: Brüel & Kjær.	51
Figura 39 Esempio del monitoraggio nel tempo del valore di Overall su di un punto di misura di Michelin Torino	53
Figura 40 Modello SDOF massa-molla-smorzatore. Fonte: Fasana A., Marchesiello S (2006), Meccanica delle vibrazioni, CLUT.	54
Figura 41 FRF del sistema	55
Figura 42 Schema semplificato dell'effetto piezoelettrico diretto in un materiale piezo-ceramico. Fonte: Brüel & Kjær (1978), Piezoelectric accelerometer and vibration handbook, Brüel & Kjær, Denmark.	56
Figura 43 Catena di misura con alimentatore esterno o con alimentazione proveniente dal dispositivo di acquisizione. Fonte: Fichera G., Misura delle vibrazioni.	58
Figura 44 Schema costruttivo di un accelerometro ICP® a compressione. Fonte: MMF (2001), Piezoelectric Accelerometers, Theory and Application	58
Figura 45 Differenti tipologie di montaggio di un accelerometro. Fonte: SKF Vibration Sensors Catalog.	59
Figura 46 Elementi di un sistema DAQ moderno. Fonte: Dewesoft.	59
Figura 47 Conversione analogico digitale. Fonte: Dewesoft.	60
Figura 48 Confronto nella risoluzione di un segnale a 12,16,24 bit. Fonte: Dewesoft.	62
Figura 49 Architettura di SKF @ptitude Observer. Fonte: @ptitude Observer User Manual.	64
Figura 50 Dettaglio del cilindro che forza la gomma nell'impegno con la vite. Fonte: Rubber products manufacturing technology, Marcel Dekker, Inc. (1994).	67
Figura 51 Andamento storico dei valori misurati di temperatura e velocità sull'estrusore nell'area di alimentazione miscela di Michelin Torino.	68
Figura 52 Schema di un mescolatore aperto di gomma. La guida superiore consente di veicolare il punto di reimmissione della banda di gomma, la quale si accumula e si mescola prima di essere costretta al passaggio nell'interstizio tra i cilindri. Fonte: Rubber products manufacturing technology, Marcel Dekker, Inc. (1994).	69
Figura 53 Andamento storico dei valori misurati di velocità e temperatura sul mescolatore aperto di Michelin Torino. Con u (m/min) si intende la velocità periferica del cilindro anteriore mentre con T_{ant} e T_{post} si intende, rispettivamente, la temperatura misurata nel circuito di riscaldamento del cilindro anteriore e posteriore.	70
Figura 54 Schema di montaggio accelerometri sul motore relativo all'estrusore 1	71
Figura 55 Installazione di trasduttori SKF a base magnetica per misura vibrazioni in direzione radiale sul riduttore estrusore lato motore. Si noti anche, sulla destra, il circuito di riscaldamento che porta il fluido vettore all'interno del corpo della vite	72
Figura 56 Dettaglio di un accelerometro SKF CMSS 2200 con collegamento filettato per la misura delle vibrazioni in direzione radiale posizionato in corrispondenza dell'albero di uscita del cilindro anteriore del mescolatore.	72
Figura 57 Dettaglio del trasduttore di velocità di tipo induttivo installato in corrispondenza dell'albero veloce in ingresso del riduttore di giri del mescolatore di gomma. Si noti, in secondo piano, un accelerometro CMSS 2200 per la misura di vibrazione in senso radiale.	73
Figura 58 Centralina Imx-16 n.50 installata e alimentatore AC/DC all'interno della scatola protettiva IP 65. Si noti il collegamento ai canali analogici mediante intestazione BNC.	74
Figura 59 Schema di rete locale implementata.	75
Figura 60 Flusso dati dal campo verso i dispositivi di acquisizione. Si noti come, nel caso dell'area di mescolamento, sia stato possibile acquisire il riferimento in velocità mediante un trasduttore induttivo, mentre per l'area di estrusione sia stato acquisito mediante comunicazione con il PLC.	76
Figura 61 Impiego del driver integrato basato sull'importazione dei tag nativi su software Crimson 3.0 (destra) e abilitazione del dispositivo indicandone indirizzo IP e porta TCP (destra).	77
Figura 62 Creazione di un blocco slave associato agli indirizzi relativi al tag Exch_SKF creato per l'acquisizione dei dati su Crimson 3.0. Si noti l'indirizzo di partenza che risulta essere Exch_SKF[0].	77
Figura 63 Configurazione del dispositivo IMx-16 n.50 con protocollo di comunicazione Modbus TCP/IP. Si noti la specifica circa l'indirizzo IP del dispositivo all'interno della LAN.	77
Figura 64 Creazione di un gateway block in modalità master e associazione degli indirizzi in uscita di tipo holding registers (tipo 4).	78
Figura 65 Interfaccia di registrazione del dispositivo IMx-50 su software Observer.	79

Figura 66 Interfaccia di abilitazione canali analogici dei dispositivi IMx su software Observer. Si noti la spunta di abilitazione nell'alimentazione in corrente essendo il trasduttore di tipo ICP®.	80
Figura 67 Interfaccia grafica su Observer per l'inserimento dei dati di macchina del riduttore di giri estrusore di gomma. Si noti come sia necessario specificare il punto in cui la misura di riferimento in velocità viene effettuata (in alto a sinistra) al fine di calcolare automaticamente la cinematica del macchinario in funzione del numero di denti delle ruote. Nel caso del riduttore in quesitone, la misura era effettuata sull'albero veloce in ingresso.	82
Figura 68 Spettro nelle basse frequenze sulla misura 01RV sul motore AC con velocità di rotazione pari a 597 rpm	84
Figura 69 Spettro nelle basse frequenze sulla misura 01RV sul motore AC con velocità di rotazione pari a 658 rpm.	84
Figura 70 Spettro nelle alte frequenze sulla misura 01 RA del motore AC. Si evidenzia un picco causato dalla frequenza di commutazione dell'inverter a 3 kHz modulato da 2x la frequenza della tensione di ingresso al motore.	85
Figura 71 Spettro nelle alte frequenze sulla misura 01 RA del motore AC. Si evidenzia un picco causato dalla frequenza di commutazione dell'inverter a 3 kHz modulato dalla 2x la frequenza della tensione in ingresso al motore.....	85
Figura 72 Spettro in velocità sulla misura 03 RV sul riduttore di giri dell'estrusore di gomma a velocità 835 rpm. Il contenuto preponderante è quello dovuto all'ingranamento del pignone, evidenziato dal cursore viola..	86
Figura 73 Spettro in velocità sulla misura 03 RV sul riduttore di giri dell'estrusore di gomma a velocità 835 rpm. Il contenuto dovuto all'ingranamento aumenta all'aumentare della velocità di rotazione.	86
Figura 74 Contenuti in frequenza sulla misura 01 RV del riduttore di giri del mescolatore di gomma.....	87
Figura 75 Modulazione alla frequenza di rotazione dell'albero in ingresso sulla frequenza di ingranamento.	88
Figura 76 Modulazione alla frequenza di rotazione dell'albero sulla frequenza di raddrizzamento.....	88
Figura 77 Spettri relativi alla misura 03 RV in diverse condizioni di velocità di rotazione e carico.....	89
Figura 78 Spettro relativo alla misura 03 RV sul riduttore di giri del mescolatore di gomma.....	90
Figura 79 Zoom dello spettro relativo alla misura 03 RV in cui si evidenzia il comportamento crescente della seconda armonica della frequenza di ingranamento, modulata dalla frequenza di rotazione dell'albero.....	91
Figura 80 Spettro relativo alla misura 03 RV. Per tali velocità di rotazione, il contenuto della rotazione dell'albero veloce in ingresso al macchinario, che si trasmette sul punto di misura mediante la carcassa, diventa predominante.	91
Figura 81 Spettro e diagramma nel tempo di una misura in involuppo di tipo 3 sul punto di misura 03 del riduttore di giri mescolatore gomma.	92
Figura 82 Diagramma di dispersione relativo alla misura di vibrazione overall lato motore sui vari alberi del riduttore dell'estrusore di gomma.	93
Figura 83 Dati misurati di Overall sulla misura 03 RV del riduttore estrusore gomma parametrizzati in funzione del tipo di gomma lavorato.	94
Figura 84 Dati acquisiti sulla misura 01 RV effettuata sul riduttore di giri del mescolatore gomma.	95
Figura 85 Dati acquisiti sulla misura di vibrazioni e corrente assorbita sul punto di misura 09 RV.	95
Figura 86 Calcolo dei tempi ciclo di produzione per la sincronizzazione dei dati di qualità con i dati di vibrazione. Il tempo ciclo di trasporto del tessuto dal gruppo calandra verso la pedana di avvolgimento dipende dalla lunghezza l del prodotto e velocità v di avanzamento lineare della linea.....	97
Figura 87 Valore di Overall misurato sul punto 09 RV in funzione della qualità della gomma in termini di grumi. Confronto tra lavorazione standard e classifica R4.....	98

Indice delle tabelle

Tabella 1 Domande principali del questionario SKF CNA sottoposte al personale di manutenzione dello stabilimento	24
Tabella 2 Percentuale (rispetto al totale di 40) di risposte al questionario CNA per ogni categoria per lo stabilimento Michelin TST	26
Tabella 3 Risultati medi globali per le quattro aree del questionario CNA.....	26
Tabella 4 Filtri previsti dal metodo di Inviluppo SKF e relative bande in frequenza.	52
Tabella 5 Accelerometri impiegati per macchina e caratteristiche principali. Fonte: SKF Vibration Sensors Catalog.	71
Tabella 6 Dispositivi di acquisizione impiegati, macchine di riferimento e metodo di acquisizione misura in velocità.	74
Tabella 7 Dati per la configurazione indirizzi del dispositivo IMx 16 n. 50.....	79
Tabella 8 Parametri impostati su Observer per la misura di vibrazioni in accelerazione.....	81
Tabella 9 Parametri impostati su Observer per la misura di vibrazioni in velocità.....	81
Tabella 10 Parametri impostati su Observer per la misura di vibrazioni in inviluppo di tipo 3.....	81
Tabella 11 Condizioni di velocità e corrente assorbita dal motore nelle due misure	89
Tabella 12 Metodo di classificazione del prodotto avvolto.....	96
Tabella 13 Tempi ciclo della linea di lavorazione gomma.....	97

1. L'Industria 4.0 oggi e l'Ingegneria della Manutenzione

Nel presente capitolo verrà fornita un'analisi relativa alle iniziative di Industria 4.0 applicate al mondo dell'Ingegneria di Manutenzione. Per fare ciò, innanzitutto, verrà descritta la situazione nazionale attuale con le ultime direttive ministeriali emanate con il Piano Nazionale Transizione 4.0, e verrà presentata l'iniziativa CIM4.0 (*Competence Industry Manufacturing 4.0*), cui sia SKF, sponsor dell'attività di tesi, sia Michelin, sono *partners*. Attraverso il caso-esame di SKF, la quale fornisce servizi di consulenza tecnica in ambito di Ingegneria di Manutenzione ed ha supportato il lavoro specifico di tesi, verrà dunque discusso come l'Ingegneria di Manutenzione possa far uso delle nuove tecnologie sviluppate mediante le iniziative di Industria 4.0 per aumentare l'affidabilità dei beni di produzione in ambito industriale.

1.1 Nascita delle iniziative di Industria 4.0 e situazione attuale in Italia

Il termine "Industria 4.0" è stato coniato dal governo tedesco per racchiudere una serie di cambiamenti tecnologici volti al miglioramento dei processi produttivi, con il fine di individuare una serie di priorità nelle politiche di sviluppo nazionale atte a mantenere la competitività della Germania nel mercato mondiale [1]. Alcuni studi [2] evidenziano come l'origine di tali iniziative siano riscontrabili sin dal 2006, fino a che, nel 2012, il governo tedesco ha inserito l'Industria 4.0 come uno dei dieci progetti futuri facenti parte della strategia di sviluppo tecnologico (*High-Tech Strategy*) [3]. L'idea delle iniziative di Industria 4.0 è quella di consentire la creazione di una rete nella quale tutti i dispositivi presenti lungo il processo produttivo comunicano e scambiano informazioni. Ciò conduce ad una digitalizzazione del processo, fenomeno attraverso il quale viene creata una copia virtuale del processo fisico in atto su di una piattaforma virtuale, sulla quale è possibile predisporre delle logiche di controllo e miglioramento del processo. Uno dei concetti alla base delle iniziative di Industria 4.0 è quello della creazione di nuove tecnologie rivoluzionarie (*disruptive innovation*) le quali hanno portato ad una nuova Quarta Rivoluzione Industriale, la quale è dunque iniziata nel 2010 ed è ancora in atto [4].

Esistono, del resto, ulteriori definizioni delle iniziative attualmente in atto, le quali sono di seguito elencate [1]:

- *Internet of Things (Iot)*, la quale si riferisce a tutti i sistemi *IT (Information Technology)*, collegati a tutti i processi, sub-processi, reti di fornitori e consumatori; che comunicano e cooperano l'un l'altro e si interfacciano all'uomo. La comunicazione, dunque, può essere di tipo *C2C (between humans)*, *C2M (humans to machines)*, *M2M (machines to machines)*.
- *Internet of Services (IoS)*, la quale si riferisce a tutti i servizi esterni o demandati verso terzi che sono utilizzati lungo il processo di produzione e sono guidati da tecnologie di *Big Data* e *Cloud Computing*.

Come espresso nel report finale del 2013 da parte dell'alleanza tedesca per lo sviluppo economico-scientifico, l'industria 4.0 altro non è che l'applicazione in ambito produttivo delle tecnologie e metodologie riportate di sopra [5]. Come evidenzia Roblek, Mesko & Krapez [6],

del resto, potenzialmente ogni dispositivo tecnologico può essere collegato ad una rete, pertanto la sfida che ad oggi è rivolta ai produttori ambito *IT*, ma anche ai produttori tradizionali, è quella di progettare, o convertire, i propri prodotti/servizi affinché possano collegarsi ad una rete digitale per lo scambio di informazioni. In un articolo pubblicato su *Sensors & Transducers Journal* nel 2010, quando ancora il concetto di Industria 4.0 era agli albori, Yurish scrisse di come il mercato dei sensori *smart*, ovvero dotati di un'interfaccia di comunicazione con la rete locale, avrebbe osservato un sostanzioso incremento nelle vendite negli anni a venire, a causa degli sviluppi tecnologici raggiunti in ambito metrologico ed elettronico, ad esempio con le nuove tecnologie *MEMS (micro-electromechanical system)* [7].

In questo nuovo scenario di fabbrica interconnessa, ogni sensore fornisce dati su di una piattaforma virtuale nella quale ogni singola unità prodotta è controllata e classificata all'interno del processo produttivo, permettendo così la sua tracciabilità ma anche il controllo di un'altra serie di informazioni, come la qualità del prodotto. Tale livello di controllo della produzione permette, soprattutto nel caso di mercati caratterizzati da un forte livello di flessibilità, come il mercato *automotive*, di poter seguire il mercato mediante la capacità di realizzare cambi tipo di produzione in tempi ridotti [1]. I dati provenienti dal campo, del resto, possono anche non essere strettamente legati al prodotto in sé, come nel caso di informazioni inerenti allo stato di salute dei macchinari o allo stato di usura di un utensile.

È chiaro, allora, come la mole di dati da gestire diventi importante e ci si dirige verso il concetto di analisi di dati massivi (*big data analytics*). Nel report annuale del 2018 dedicato alla classifica delle aziende *leader* nel campo dell'innovazione, la società di consulenza *BCG (Boston Consulting Group)* evidenzia chiaramente come l'innovazione, ad oggi, si debba e si stia realizzando soprattutto nella direzione del digitale, delineando l'analisi di *big data* come lo strumento a maggior potenziale di crescita dell'ultimo lustro [8]. Tale strumento risulta di più facile utilizzo nel caso di aziende native digitali, e.g. aziende di *streaming on-line* come Netflix, la quale, nel bilancio di fine anno del 2016, specifica di come l'azienda *digital native* faccia uso dei servizi di elaborazione *big data* forniti da *Amazon Web Services (AWB)*, la quale, del resto, rappresenta anche una *competitor* nel settore dello *streaming online* [9]. Nel caso di aziende afferenti a diversi settori, come il settore industriale, invece, è la stessa BCG a specificare, in un articolo suppletivo, di come il processo di implementazione risulti maggiormente difficoltoso in quanto le aziende devono in qualche modo re-inventare e convertire i processi attualmente in atto, digitalizzandoli. Le aziende non native digitali, infatti, stanno riscontrando difficoltà nel processo di sviluppo verso il concetto di Industria 4.0 in quanto possiedono le capacità *hardware e software* per l'analisi dati ma il processo di implementazione e consolidamento di tali tecniche all'interno dei processi produttivi si trova ancora agli albori [10].

Le potenzialità, in termini di risultati, nell'implementazione delle nuove tecnologie digitali nel contesto industriale sono descritte nel report del 2016 per conto della Commissione Europea per l'Industria, Ricerca ed Energia [1]:

- Aumento dell'efficienza dei macchinari grazie alla manutenzione *just-in-time* e tempo di guasto quasi nullo;
- Realizzazione di produzione personalizzata e concentrata per mezzo di tecniche di *additive manufacturing*;
- Sicurezza dell'impianto grazie all'auto-diagnostica e correzione;

- Produzione ottimizzata grazie alla comunicazione dello stato di avanzamento del componente all'interno del ciclo produttivo;
- Industrializzazione digitale, grazie al test degli impianti in fase di progettazione, riducendo il numero di problematiche che insorgono nella fase di realizzazione effettiva dell'impianto stesso;
- Integrazione digitale *end-to-end* lungo l'intero ciclo produttivo;
- Integrazione verticale e fabbrica interconnessa (*networked manufacturing systems*).

Tali obiettivi, ovviamente, sono da intendere come progetti a lunga data (*macrorends*) o longterm trends, e sono gli autori dello stesso studio ad esplicitare come non sia possibile prevedere, ad oggi, quali saranno gli effettivi sviluppi e risultati di tali iniziative. Come espresso da Beltrametti et al., infatti, la Quarta Rivoluzione Industriale, se così la si vuole definire, è il primo caso in cui il fenomeno economico viene studiato e commentato in maniera massiva nello stesso intervallo temporale in cui si verifica. Nel caso delle precedenti Rivoluzioni Industriali, infatti, il fenomeno è stato studiato e descritto solo dagli studiosi della Storia dell'Economia in epoca postuma, quando ormai i cambiamenti erano consolidati ed erano ben chiari i risultati a cui si era giunti [11].

Ciò che è chiaro, del resto, è che le attività di Industria 4.0 non possono che nascere in contesti specifici in cui sono il concetto di digitalizzazione e, in generale, di innovazione digitale è già affermato ed è già stato intrapreso. Nel dettaglio, Smit et al. citano, nel medesimo *report* per la commissione europea [1], un'indagine sottoposta agli Stati Membri da parte di Bitkom, Vdma e Zvei nel 2013 [12] in cui è stato chiesto quali fossero i preconcetti che devono sussistere affinché possano essere sviluppate iniziative in ottica Industria 4.0.



Figura 1 Presupposti chiave per l'implementazione di iniziative in ambito Industria 4.0. Fonte: Smit et al. (2016), *Industry 4.0*, ITRE.

Tra tutte spicca la standardizzazione dei sistemi, piattaforme, interfacce ecc., la quale è fondamentale per permettere la comunicazione tra piattaforme digitali eterogenee. A tal fine, è fondamentale l'apertura da parte delle aziende produttrici e consumatrici di prodotti e servizi verso la collaborazione reciproca. Al secondo posto si evidenzia, invece, la necessità di una nuova organizzazione nella gestione del processo produttivo: dirigersi verso nuovi metodi di controllo della produzione comporta necessariamente una modifica delle figure responsabili del controllo produzione, qualità, logistica, affidabilità dei macchinari ecc., nonché comporta una modifica nelle conoscenze e competenze richieste, e tale aspetto deve essere chiaro ai *manager* aziendali.

1.1.1 Il caso italiano

“Sebbene l'Industria 4.0 possa avere un ruolo nel cambiare le dinamiche di competitività globale, come ciò possa accadere può variare a seconda dello stato membro in esame. Il contrasto maggiore è riscontrabile tra Italia e Germania, le due nazioni con dimensioni di aziende manifatturiere maggiori. [...] Nel caso dell'Italia, non è ancora chiaro agli autori come le iniziative di Industria 4.0 potranno adattarsi con la struttura industriale nazionale, caratterizzata da un'alta popolosità di piccole e medie imprese. In termini di prontezza alla risposta verso il mondo Industria 4.0, secondo Roland Berger, Germania, Svezia, Austria e Irlanda sono le aziende prime classificate [...]. Affinché l'Industria 4.0 possa garantire un miglioramento nella competitività industriale da parte dell'Europa, è necessario che vi siano delle trasformazioni anche nelle altre grandi realtà del continente (Italia, Francia, UK, Spagna, Olanda)”. Con queste parole la commissione europea si esprime, nel 2016, circa la situazione Industria 4.0 nel continente e, nello specifico, in Italia [1].

In effetti, il primo piano nazionale dedicato all'Industria 4.0 è arrivato nel 2017, con valenza triennale, ed è stato firmato dall'ex ministro dello Sviluppo Economico Carlo Calenda. Il Piano individua una serie di agevolazioni fiscali rivolte a tutte le aziende presenti sul territorio nazionale che volessero investire in tecnologie e conoscenza in ambito Industria 4.0. Ad esempio, esso prevede un bonus di Iperammortamento e Superammortamento su tutti gli acquisti effettuati dalle aziende rispettivamente per beni tradizionali e digitali, prevedendo rispettivamente una supervalutazione del 250% e 140% [13]. Inoltre, è previsto il Credito d'Imposta, attraverso il quale si cerca di supportare le aziende richiedenti un prestito bancario. Il MISE, del resto, oltre ad individuare 11 tecnologie abilitanti per il processo di trasformazione digitale ed illustrare le altre iniziative economiche nazionali intraprese nel resto del mondo, illustra come il contesto economico nazionale sia caratterizzato da [14]:

- Pochi grandi *player* privati industriali e ICT in grado di guidare la trasformazione della manifattura italiana;
- Alto numero di PMI (Piccole e Medie Imprese);
- Centri di ricerca e centri universitari di eccellenza, i quali sono l'elemento chiave verso la trasformazione digitale.

E di come il governo si assuma il compito di avere un ruolo di coordinamento e non dirigista.

Anche Beltrametti et al. nel medesimo anno (2017), evidenziano la scarsa presenza sul territorio nazionale di realtà che possano intendere le nuove tecnologie e possano in qualche modo guidare questo processo di trasformazione digitale. Inoltre, affermano che vi è il rischio che siano le aziende maggiormente sviluppate tecnologicamente ed economicamente a rispondere alle iniziative del governo, le quali sono le uniche che possono intendere le potenzialità a lungo termine delle iniziative e possono effettivamente beneficiare delle iniziative di iperammortamento e credito d'imposta. Il ruolo di coordinamento del governo, allora, deve essere tale da accompagnare le piccole realtà, per mezzo di processi di formazione, affinché si possa acquisire la giusta visione degli investimenti effettuabili, favorendo in tal senso la formazione dei lavoratori affinché acquisiscano competenze tecniche a riguardo. Soprattutto, vi è il bisogno di supportare il processo di trasferimento di conoscenza dai centri di eccellenza di Ricerca ed accademici verso il contesto industriale, sia verso le realtà aziendali di eccellenza che verso le aziende maggiormente in difficoltà nei confronti delle nuove misure economiche. Ciò è attuabile favorendo la nascita di *Digital Innovator Hub* e *Competence Center* che possano effettivamente lavorare in tal senso, creando degli ambienti in cui le aziende possano toccare con mano le soluzioni a cui è possibile giungere per mezzo delle moderne tecnologie digitali e possano in qualche modo assorbirle e riprodurle sui propri stabilimenti [11]. A tal proposito, si rimanda il lettore al cap. 1.2.

Ad oggi, il MISE ha deliberato un nuovo Piano Nazionale triennale, nominato Piano Nazionale Transizione 4.0, entrato in vigore con la legge di bilancio 2021 e valido fino al 2022 [15]. Esso si pone come obiettivi principali:

- Stimolare gli investimenti privati;
- Dare stabilità e certezze alle imprese con misure che hanno effetto da novembre 2020 a giugno 2023.

Le misure principali prevedono l'applicazione di un credito di imposta riguardante gli investimenti in:

- Beni materiali e immateriali non 4.0: 10% nel 2020 e 6% nel 2021;
- Beni materiali e immateriali 4.0: 50% nel 2021 per acquisto di beni materiali con spesa massima di 2,5 mln € e 40% nel 2022, mentre per l'acquisto di beni immateriali è previsto un credito del 20% fino ad un massimale di 1 mln €;
- Investimenti per il lavoro agile: 15 %;
- Ricerca e sviluppo: 20% fino ad un massimale di 4 mln €;
- Innovazione tecnologica: 10% fino ad un massimale di 2 mln €;
- Innovazione green e digitale: 15% fino ad un massimale di 2 mln €;
- Design e ideazione estetica: 10% fino ad un massimale di 2 mln €;
- Formazione 4.0.

Come evidenzia Fotina de IISole24Ore, di fatto il nuovo Piano vede una ri-modulazione delle spese a carico del Recovery Plan, seguendo le direttive europee che avevano chiesto al Governo italiano di incentivare e promuovere gli acquisti realmente rivolti verso la trasformazione

digitale. Le misure, inoltre, sono retroattive, ovvero avranno effetto sulle spese effettuate da novembre 2020. In tal senso, il bonus verso l'acquisto di beni tradizionali (ex-superammortamento) sarà valido nel 2020-2021 ma non nel 2022, tagliando così le spese verso i beni "a scarso impatto sull'innovazione" [16]. Di contro, i bonus previsti per investimenti in ambito digitale (ex-iperammortamento) sono stati aumentati, ad esempio con un incremento sul bonus per beni immateriale 4.0 da 15% a 20% ed incremento su R&S da 12% a 20% [15].

1.2 Il Centro di Competenza CIM 4.0

Il Piano Nazionale del 2017 ha dedicato particolare attenzione e sostegno economico per la nascita di *Competence Center* che potessero fungere da elemento di giunzione per le diverse realtà industriali ed accademiche. Nel dettaglio, si riportano di seguito l'elenco dei Centri Nazionali di Competenza ed Alta Formazione, e relativi soggetti a capofila del partenariato, nati dal 2018 e supportati dal MISE [17]:

- Politecnico di Torino – Manufacturing 4.0
- Politecnico di Milano – Made in Italy 4.0
- Alma Mater Studiorum Università di Bologna – BI-REX
- Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa – ARTES 4.0
- Università degli Studi di Padova - SMOACT
- Università degli Studi di Napoli "Federico II" – Industry 4.0
- Consiglio Nazionale delle Ricerche – START 4.0
- Università degli Studi di Roma "La Sapienza" – Cyber 4.0

All'interno del seguente contesto, dunque, nasce a Torino il *Competence Center* CIM4.0 (*Competence Industry Manufacturing 4.0*), il quale "intende essere un supporto strategico cooperativo per le imprese manifatturiere orientate alla digitalizzazione dei processi industriali nell'Ottica dell'Industria 4.0" [18]. Il CIM4.0 nasce dalla collaborazione tra due poli universitari, il Politecnico di Torino e l'Università di Torino, e 23 *partner* industriali, e si pone oggi come riferimento nazionale per il supporto per le aziende per l'innovazione tecnologica.

In tal senso, l'obiettivo del Centro di Competenza è quello di permettere il trasferimento tecnologico, ovvero di mettere in comunicazione le Università e le grandi aziende del territorio, depositari delle nuove tecniche e metodologie, verso le Piccole e Medie Imprese. In termini di Technology Readiness Level, concetto inventato dalla NASA negli anni '70 per valutare il livello di maturità raggiunto da una nuova tecnologia prima che essa possa essere immessa sul mercato, il CIM interviene negli ultimi livelli di sviluppo delle nuove tecnologie, come mostrato in Figura 3.



Figura 2 Enti ed aziende costituenti il gruppo CIM 4.0. In evidenza, SKF e Michelin, aziende partecipanti al progetto di tesi. Fonte: CIM40.com

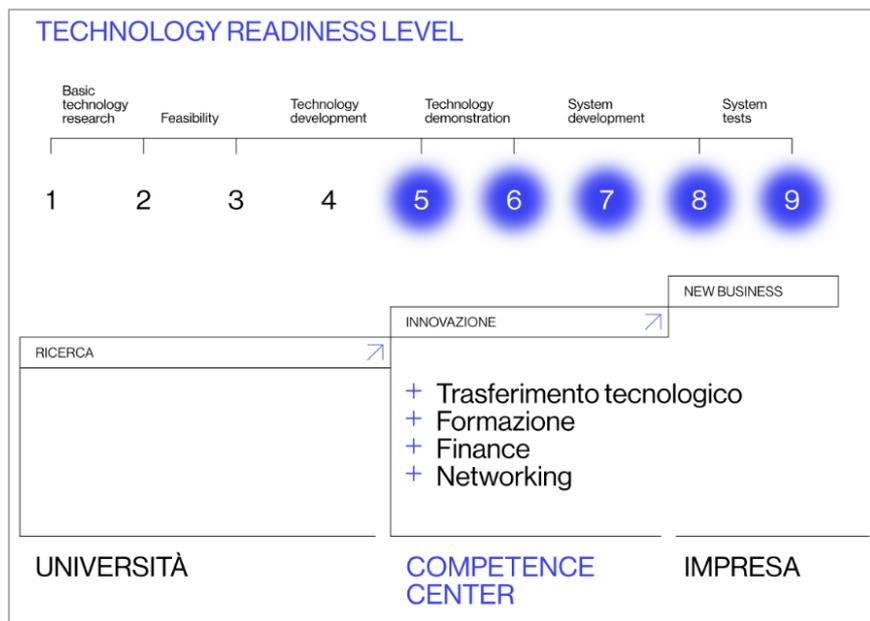


Figura 3 Livelli di TRL su cui il CIM opera. Fonte: cim40.com

Per il raggiungimento di tali obiettivi, il CIM opera mediante:

- Corsi di formazione personalizzati e verticali rispetto alle specifiche esigenze dell'azienda per l'ottenimento di competenze in ambito digitale. Nei corsi, i docenti sono sia universitari che dipendenti aziendali, i quali operano quotidianamente con le moderne tecnologie. I corsi sono di diverso livello e toccano sostanzialmente la fabbricazione additiva, *data science*, *cyber-security*, metodi e strumenti per la trasformazione digitale e tecniche di manutenzione predittiva [19] [20].
- Linee pilota, per la realizzazione delle quali il gruppo ha acquistato macchinari specifici al fine di permettere il *learn-by-doing* da parte delle aziende che si rivolgono al CIM ed in cui testare processi e prodotti prima dell'industrializzazione. Nel dettaglio, le linee pilota fino ad ora installate riguardano il mondo della manutenzione additiva e della fabbrica digitale [21].
- Finanziamento di progetti di ricerca ed industrializzazione in ambito digitale, con un totale investito di oltre 1,3 mln € [22].

1.3 L'azienda SKF, modello di *business* legato al concetto di *reliable rotation*

L'azienda svedese SKF fu fondata nel 1907 dall'ingegnere svedese Sven Wingquist, inventore del cuscinetto a doppia pista di sfere orientabile, ed altri colleghi. L'azienda ad oggi, è leader nella fornitura di prodotti e servizi legati al mondo dei cuscinetti meccanici, con sedi in oltre 130 paesi in tutto il mondo, un fatturato netto di oltre 7,4 mld € ed oltre 40 mila dipendenti distribuiti su 15 centri tecnici e 91 centri di produzione [23]. L'azienda opera, sostanzialmente, in un panorama vasto di settori industriali, tra cui si cita il settore *automotive*, *racing*, generazione energia, navale, aerospaziale, *pulp and paper*, chimico, petrolchimico, macchine utensili, ferroviario ecc.



Figura 4 Sede SKF Solution Factory Italia a Moncalieri (To). Fonte: evolution.skf.com

Per il mantenimento della *leadership* nel mercato, e con il *driver* di dirigersi verso il concetto di *reliable rotation*, l'azienda individua una serie di paradigmi sui quali investire nel futuro, soprattutto alla luce della nuova era della digitalizzazione [24]:

- Vendite digitali;
- Nuovi modelli di *business*;
- Innovazione;
- *World Class Manufacturing*;
- Investire nei lavoratori del domani nell'era del digitale;
- Economia circolare.

In particolare, l'azienda individua, nel report di fine anno 2019, due azioni che comporteranno una sostanziale variazione nelle dinamiche di vendita aziendali: la digitalizzazione e l'utilizzo di un modello di *business* prestazionale, detto *REP (Rotating Equipment Performance)* [24]. Tradizionalmente, la vendita di cuscinetti è stata basata su un modello transazionale, nel quale veniva pattuito con il cliente il prezzo unitario per cuscinetto. La nuova direzione, invece, è quella del modello prestazionale basato su canone *bonus/malus* variabile in funzione del raggiungimento/non raggiungimento dei *KPIs (Key Performance Indicators)* concordati con il cliente. Sebbene lo sviluppo del prodotto resti ancora alle basi del modello aziendale, allora, il rapporto con il cliente si basa ora su indicatori di *performance* (come la produttività delle macchine o il tempo di effettivo di vita di un cuscinetto) considerati rappresentativi della *performance* del cuscinetto. A tal fine, le nuove tecnologie fungono proprio da fattori abilitanti per l'implementazione del nuovo modello: "digitalizzare" un cuscinetto in ottica Industria 4.0 significa misurarne la condizione di lavoro in termini di vibrazioni, temperatura e stato di lubrificazione, integrando tali dati con il sistema di gestione del cliente il quale riesce così ad avere un controllo continuo della salute dei propri beni rotanti.

Al fine di procedere in questa direzione, l'azienda ha investito per la realizzazione di una gamma di prodotti innovativi 4.0 al fine del monitoraggio stato di salute dei cuscinetti. Si cita, ad esempio, il dispositivo di acquisizione multicanale Imx-16 plus, del resto utilizzato anche nel cuore delle attività di tesi. Le proiezioni per il futuro di tale concetto, che viene anche definito come *reliable rotation*, sono molto confortanti, con un numero stimato di cuscinetti "connessi" entro il 2030 pari a 150 milioni di unità.

Un approccio di questo tipo, oltre a cambiare le dinamiche di vendita e di rapporto con il cliente, modifica anche l'impatto del prodotto sull'ambiente. Controllare lo stato di salute del cuscinetto, infatti, ne permette una sostituzione mirata ed ottimizzata, ovvero cambio il cuscinetto solo quando è danneggiato e cambio solo il cuscinetto danneggiato; ed analoghe dinamiche possono essere estese sul discorso di lubrificazione. L'azienda è così propensa a dirigersi verso politiche di economia circolare, nella quale si riduce il consumo incontrollato di beni e si minimizza lo scarto mediante ri-condizionamento dei beni esistenti.



Figura 5 Il concetto di economia circolare verso cui si dirige SKF. Fonte: SKF 2019 Annual Report.

Per tale scopo, nel solo 2019 l'azienda svedese ha acquisito tre aziende che potessero asservire per il modello *REP* [24]:

- *RecondOil*: la quale ha lo scopo di filtrare e rigenerare l'olio industriale, cosicché possa essere utilizzato e, di conseguenza, venduto diverse volte;
- *Presenso*: la quale sviluppa modelli di Intelligenza Artificiale per la manutenzione predittiva. L'aumento esponenziale di cuscinetti monitorati, infatti, porta ad una mole massiva di dati che devono essere pre-elaborati e condizionati al fine di far lasciare all'operatore lo studio dei soli dati di allarme;
- FAS: la quale ha sviluppato GoPlant, un'app per operazione di ispezione e *data collecting* per applicazioni industriali.

In Figura 6, in definitiva, si riporta il modello di economia circolare auspicato, completo della presenza delle ultime acquisizioni e basato su un modello di rapporto con il cliente di tipo prestazionale.

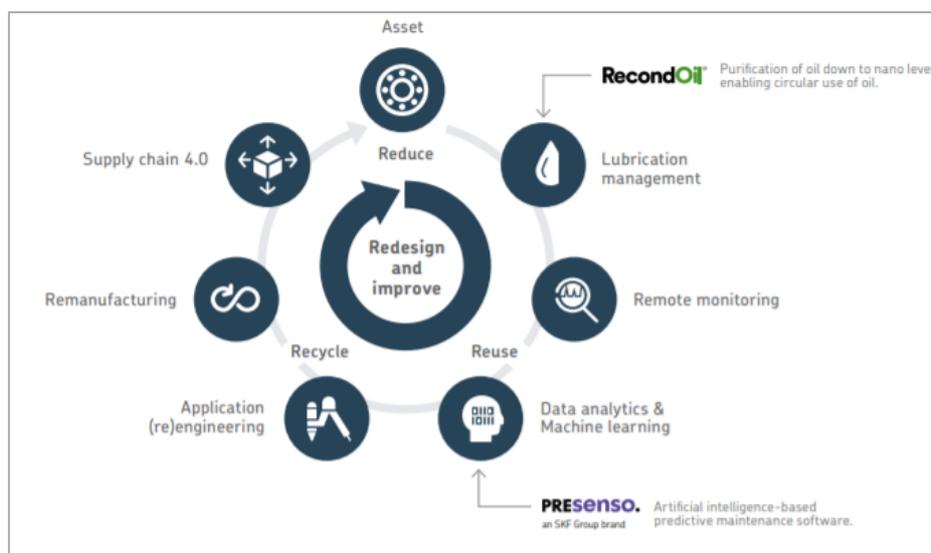


Figura 6 Modello di economia circolare auspicato e ruolo delle ultime acquisizioni in tal senso. Fonte: SKF Annual Report 2019.

1.4 Come cambia l'Ingegneria di Manutenzione con l'Industria 4.0

Sebbene sia già stata nominata, nel corso del capitolo, le potenzialità che sono auspicabili per le attività di manutenzione grazie alle nuove tecnologie abilitanti, si vuole infine fornire un'ottica organica delle sfide attuali che si pongono ai detentori degli impianti di produzione ed ai fornitori di servizi. A tal fine, verranno utilizzati come spunti alcuni interessanti articoli pubblicati sulla rivista *Manutenzione ed Asset Management*, organo di comunicazione ufficiale di AIMAN (Associazione Italiana Manutentori), riferimento nazionale per l'Ingegneria di Manutenzione.

Il ruolo della Manutenzione ha sicuramente subito un processo storico di evoluzione nel corso dei secoli, durante il quale ha assunto non soltanto un ruolo tecnico fondamentale per il mantenimento degli impianti ma anche un ruolo culturale e sociale, che vede nell'atto stesso di preservare e mantenere un bene una delle prerogative fondamentali per lo sviluppo di un'economia sostenibile. Cattaneo & Furlanetto [25], infatti, riprendendo una riflessione di Meadows sul ruolo sociale della Manutenzione, evidenziano come essa possa essere vista come "l'organo regolatore del processo di sviluppo" che, se incontrollato, "porterebbe l'economia sul lastrico". La manutenzione, inizialmente nata con lo scopo di ripristinare le funzionalità di beni deteriorati e/o usurati ad un costo inferiore rispetto a quello previsto in caso di totale sostituzione, diventa un fattore chiave per lo sviluppo industriale sotto la Prima Rivoluzione Industriale, durante la quale la figura del manutentore viene strettamente legata alla sua abilità e manualità di riparazione. A seguito dello sviluppo in ambito aerospaziale e nucleare, del resto, la manutenzione finisce per inglobare al suo interno una serie di scienze e tecniche che la rendono una disciplina trasversale, in cui sono richieste non soltanto competenze tecniche ma anche gestionali e manageriali.

In tal senso, le strategie manutentive si sono evolute nel tempo come esposto di seguito in Figura 7, passando da attività di manutenzione reattiva *RTF (Run To Failure)* non pianificata verso attività di manutenzione pianificata preventiva *PM (Preventive Maintenance)*, manutenzione predittiva e correttiva *PRM (Proactive Reliability Maintenance)* fino alle attività di auto-manutenzione in cui il conduttore del bene di produzione viene responsabilizzato per il mantenimento delle corrette condizioni di funzionamento. Tale approccio è stato introdotto con la metodologia *Total Productive Maintenance (TPM)* di origine giapponese, volta a coinvolgere l'operatore nel processo di creazione di valore [26].

Fino agli anni '60 dello scorso secolo, la manutenzione correttiva era largamente diffusa, demandando così all'area manutenzione, da sempre vista unicamente come un centro di costo per l'azienda, ad attività di riparazioni non pianificate (*firefighting*). Nel corso degli anni successivi vennero implementate strategie di manutenzione via via più evolute: negli anni '70 molti stabilimenti implementarono tecniche di manutenzione preventiva, mentre gli anni '80-'90 videro la nascita di tecniche predittive con implementazione di relativi strumenti di misura e *software* dedicati.

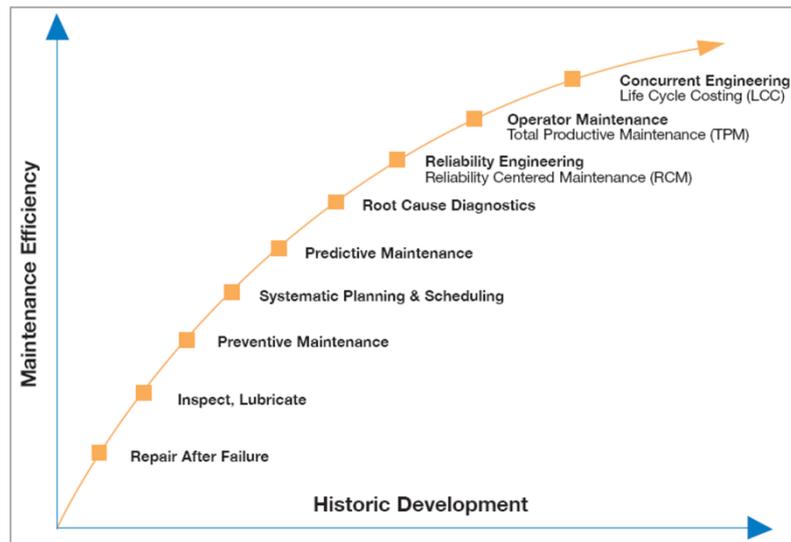


Figura 7 Evoluzione delle strategie di manutenzione attuate in ambito industriale. Fonte: *A Guide to Asset Efficiency Optimization* (2009)

Il prof. Marco Macchi, in un articolo dedicato all’evoluzione storica della Manutenzione, sottolinea anch’egli gli aspetti sopraccitati, aggiungendo come gli ultimi sviluppi in tal senso vedono la nascita di attività di tele-manutenzione, con centri di servizio che operano in remoto a supporto degli *asset* critici del cliente. Per tale scopo, le moderne tecnologie digitali forniscono un fattore abilitante, le quali diventano la spinta per la proposta di nuove attività di manutenzione basate sull’utilizzo di sensori sempre più *smart* e intelligenti (si veda quanto citato nel cap. 1.1). In ogni caso, sia che la direzione sia quella della nascita di nuove piattaforme in cui i gestori degli impianti ed i fornitori dei servizi cooperano per il mantenimento delle funzionalità dei beni di produzione, oppure nel caso di “semplice” evoluzione delle attività di manutenzione, in cui l’operatore viene supportato dalle tecnologie digitali per la gestione dei dati macchina lasciando ad egli il solo lavoro a valore aggiunto; il prof. Macchi evidenzia come vi debba necessariamente essere una visione a lungo termine, per seguire le evoluzioni che le nuove tecnologie porteranno sul mondo industriale e, soprattutto, di come esse si adegueranno alle esigenze degli utilizzatori [27].

Le moderne tecnologie, dunque, come nel caso della tele-manutenzione, permettono ai fornitori di servizi di evolvere il proprio modello di *business*, basandosi ora su modelli prestazionali in cui il cliente “paga” in funzione alle *performance* del bene acquistato (Saccani & Adrodegari [28]). In realtà, tale aspetto è già stato ampiamente discusso nel cap. precedente, poiché la stessa *SKF* sta evolvendo il proprio modello di *business* spostando l’attenzione verso un modello circolare in cui il ciclo vita del cuscinetto è monitorato costantemente grazie all’utilizzo congiunto di diverse tecnologie abilitanti.

Tale osservazione ci porta così al centro di un concetto che lo stesso Macchi espone in un diverso articolo, ovvero quello legato al paradigma Industria 4.0 ed ai concetti chiave per la sua implementazione del mondo dell’Ingegneria di Manutenzione [29]. Non soltanto le iniziative economiche nazionali hanno cercato di incentivare l’acquisto, da parte delle aziende, di beni materiali ed immateriali 4.0 (si veda il cap. 1.1.1) ma anche l’attuale condizione pandemica mondiale COVID-19 ha incentivato la corsa verso l’acquisto di dispositivi che potessero digitalizzare le attività di manutenzione come controllo remoto, miglior controllo dei dati e manutenzione predittiva [30]. Diventa allora importante capire quali siano i concetti chiave per una corretta implementazione delle tecnologie, che è fondamentale per un utilizzo ottimale e

concreto dell'attuale potenza di calcolo sviluppata e disponibile a cifre modeste. Nel caso di *CBM (Condition Based Maintenance)*, ad esempio, rappresenta un fattore chiave l'acquisizione di una mole quanto più completa ed eterogenea di dati provenienti dal macchinario, al fine di poter caratterizzare a pieno le condizioni di lavoro e di carico, le quali influenzano l'usura e malfunzionamento dei componenti meccanici. Tale aspetto, oltre ad essere citato, verrà applicato nel corso del cap. 5, in cui si studieranno i dati di vibrazione sui macchinari ad albero rotante al variare delle condizioni cinematiche e di carico. Inoltre, al fine di impostare degli algoritmi di analisi dati ottimizzati, è importante conoscere il processo fisico che si sta mettendo sotto controllo, il che implica non soltanto conoscere il processo produttivo studiato ma anche la tipologia di macchinario adibito a tale scopo. Anche tale aspetto sarà fondamentale nell'analisi vibrazionale svolta, per la quale è stato fondamentale descrivere il processo (cap. 4.1) ed acquisire una serie di dati di targa e schemi di complessivo relativi ai macchinari selezionati (riportati in Appendice A).

2. Analisi della gestione della manutenzione e scelta area di intervento

Al fine di descrivere in maniera efficace e sintetica le condizioni in cui opera l'area manutenzione dello stabilimento di Michelin Torino Stura, è stata realizzata un'analisi della gestione delle attività di manutenzione. Essa ha permesso di oggettivare, mediante l'uso di dati ed indici, la necessità di implementazione di tecniche, nuove per lo stabilimento in esame, di monitoraggio delle condizioni di salute dei macchinari presenti sulla linea di produzione. In primo luogo, verrà descritta l'attività di questionario *SKF Client Needs Analysis* svolta ed il modello *Asset Efficiency Optimization* su cui il questionario stesso si basa. Infine, verrà presentata un'analisi di criticità realizzata sui beni di produzione presenti, volta a identificare l'area specifica di intervento, la quale si è basata principalmente sull'indice sintetico *OEE %*.

2.1 Il sito di produzione di Michelin Torino

Le attività specifiche di tesi si sono dunque concentrate su di un sito di produzione di Michelin, presente a Torino Stura. L'azienda multinazionale francese, fondata in Francia a fine 1800 e che conta ad oggi oltre 100 mila dipendenti distribuiti in oltre 170 paesi, è presente in Italia con tre siti industriali a Cuneo, Alessandria e Torino, con sede legale a Torino e direzione commerciale a Milano. L'azienda, nel dettaglio, è presente all'interno del consorzio CIM 4.0 precedentemente presentato nel cap. 1.2.



Figura 8 Magazzino prodotti di Michelin Torino inaugurato nel 2020. Fonte: Techprincess.it

Lo stabilimento produttivo di Torino, nel dettaglio, è demandato alla produzione di tessuti calandrati di gomma nei quali due strati sottili di materiale, precedentemente lavorato, vengono accoppiati con un tessuto interstiziale composto da fili in materiale plastico (Nylon, Rayon) o tessuto metallico. Al fine di comprendere l'utilità di tali prodotti semi-finiti per la produzione

di uno pneumatico, si riporta di seguito la Figura 9, in cui è visibile una sezione di pneumatico in cui sono evidenziate le differenti parti di cui è composto [31]:

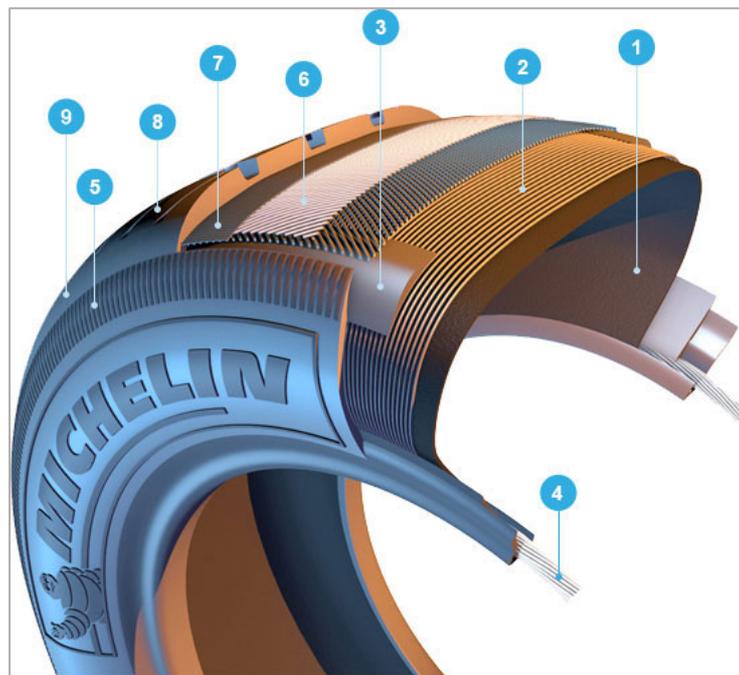


Figura 9 Struttura di uno pneumatico. Fonte: Michelin.com

In buona sostanza, la struttura è composta da:

- Rivestimento interno (1) in gomma sintetica;
- Carcassa (2) composta da fibre sintetiche che assicurano resistenza e solidità, supportando la forza di pressione interna;
- Spalla e fianchi (3 e 5), dove la spalla è costituita da bande di gomma molto resistenti che permettono allo pneumatico di resistere alle ingenti forze a cui è sottoposto soprattutto in fase di curva e frenata. Il fianco, invece, collega il tallone al battistrada ed è utilizzato per riportare tutte le informazioni utili;
- Tallone (4), costituito da dei cerchietti metallici che assicurano lo pneumatico al cerchio;
- Pacco cintura (6 e 7), composto da strati di tessuto metallico sovrapposti in maniera incrociata in modo da offrire solidità allo pneumatico e scongiurare la sua centrifugazione;
- Battistrada (8 e 9), composto principalmente da gomma, è l'elemento in contatto con l'asfalto, e deve pertanto resistere ad usura, calore ed abrasioni, fornendo al tempo stesso aderenza al suolo.

I materiali semilavorati di Torino Stura, dunque, servono per comporre la carcassa ed il pacco cintura dello pneumatico. La macchina al cuore della lavorazione è una calandra di tipo S, il cui schema è riassunto in Figura 10.

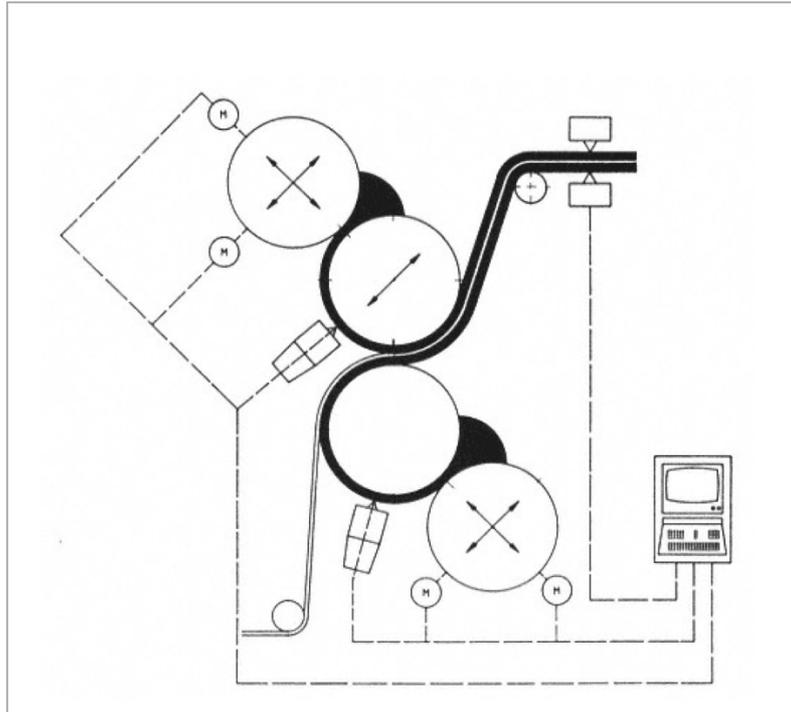


Figura 10 Schema di funzionamento di una calandra di tipo S e sistema di controllo annesso dello spessore del tessuto. Fonte: *Rubber products manufacturing technology*, Marcel Dekker, Inc. (1994).

Sostanzialmente, quattro cilindri lavorano contemporaneamente per:

- Lavorare, amalgamare e assottigliare la gomma che viene depositata in corrispondenza degli interstizi tra coppia di cilindri superiore e inferiore;
- Accoppiare la gomma così assottigliata, la quale resta incollata ai cilindri centrali, con un materiale interstiziale.

Al fine della lavorazione, sono necessari tre circuiti ausiliari di movimentazione e alimentazione dei prodotti:

- Circuito di alimentazione gomma, tenuto a movimentare, pre-lavorare e preriscaldare la miscela di gomma che viene poi depositata in corrispondenza degli interstizi dei cilindri. A tal proposito, per conoscere nel dettaglio il processo di alimentazione gomma, si rimanda il lettore al cap. 4.1;
- Circuito di alimentazione materiale tessile/metallico. La calandra, per sua natura costruttiva, è in grado di accoppiare la gomma sia con fili plastici che metallici, ma è in grado di compiere una sola lavorazione per volta. Per tale motivo, la linea è equipaggiata di due diversi circuiti che apportano i fili verso la calandra, ed è previsto un opportuno sistema di cambio tipologia di produzione a seconda del materiale lavorato.
- Sistema di evacuazione tessuto calandrato, il quale si occupa di movimentare il tessuto in uscita per poi avvolgerlo e confezionarlo opportunamente.

2.2 Il modello SKF AEO (Asset Efficiency Optimization)

L'analisi di gestione della manutenzione dello stabilimento di Michelin Torino Stura è stata effettuata sulla base del modello SKF "Asset Efficiency Optimization (AEO)" [32], creato da SKF al fine di "aumentare l'efficienza e l'efficacia delle attività di manutenzione finalizzate al raggiungimento degli obiettivi aziendali individuati" [33]. Di seguito, in Figura 11, è riportata una schematizzazione del modello AEO. Il modello è rappresentabile mediante un diagramma di flusso che descrive una metodologia di miglioramento sistematico delle pratiche di manutenzione dei beni di produzione (*asset*) dello stabilimento. È possibile individuare, all'interno del diagramma, le quattro aree (*layer*) di Strategia, Identificazione, Controllo ed Esecuzione.

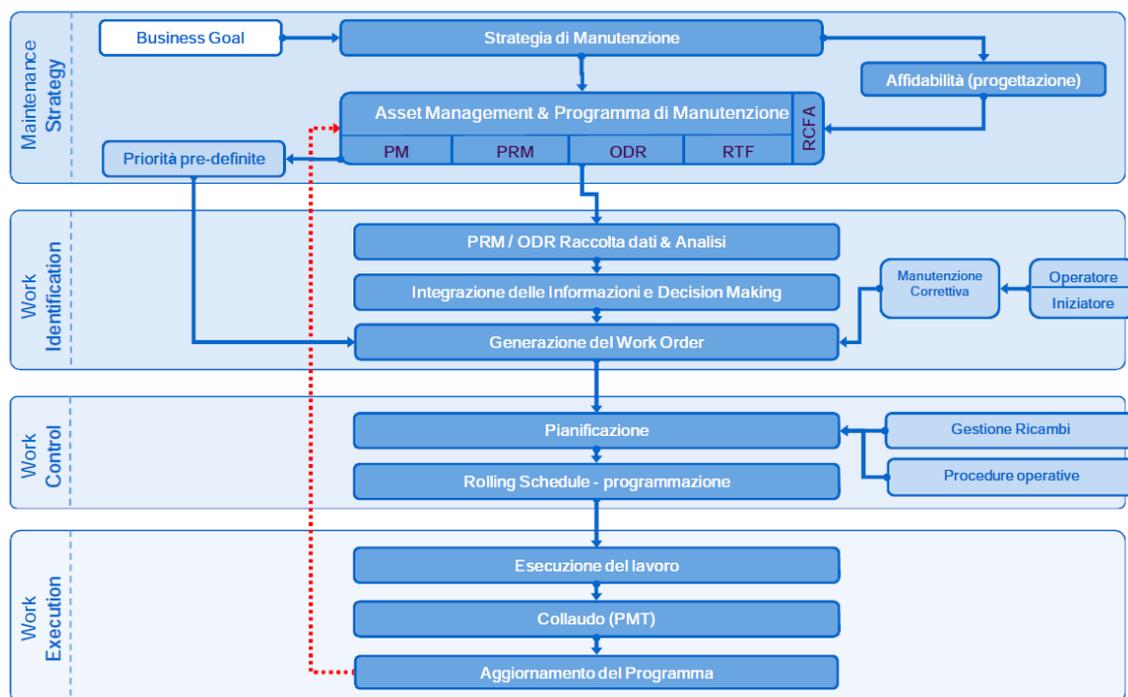


Figura 11 Il modello SKF Asset Efficiency Optimization (AEO). Fonte: The Guide to Asset Efficiency Optimization for Improved Profitability, SKF Reliability Systems (2004)

2.2.1 Strategia

L'area di Strategia, avente come dato di ingresso primario la serie di obiettivi aziendali individuati (*business goals*), è volta a determinare il piano di manutenzione alla base delle attività future.

Il piano di manutenzione relativo al singolo bene di produzione è stabilito a valle di una serie di valutazioni volte a misurare l'impatto di un eventuale guasto del bene stesso su una serie di aspetti considerati critici per l'azienda, quali l'eventuale perdita di produzione, l'eventuale perdita di qualità e conformità del prodotto, il costo di manutenzione, l'effetto del guasto sulla sicurezza del personale o sull'ambiente ecc. Tale studio, in ambito manutentivo, prende il nome di analisi di criticità [34], e porta a definire dei piani di manutenzione tanto più evoluti e

tecnologicamente avanzati quanto più il bene è ritenuto critico per uno o più fattori. L'analisi di criticità è "essenzialmente un'analisi *FMECA* a livello di sistema [...]. Di norma, solo il 30-40 % dei componenti totali risultano essere critici. Il processo permette, a chi effettua l'analisi, di elencare i vari modi di guasto per un componente specifico al fine di identificarne gli effetti a livello di impianto. Se il componente è ritenuto critico, si procede con identificare le cause di guasto correlate ed i piani di manutenzione attuabili. I componenti [...] che sono identificati come non critici vengono analizzati solo in secondo luogo" [34]. Di seguito, è riportato un esempio di matrice di criticità.

CONSEQUENCE DESCRIPTION			
CRITICAL	HEALTH / SAFETY	FINANCIAL IMPACT	ENVIRONMENTAL IMPACT
YES	S-1 Fatalities Long term health impact on public	F-1 Greater than \$1M impact	E-1 Major plant-wide emergency response Major cleanup for months / years Potential widespread, long-term, significant adverse effects on the environment (including soil and groundwater) or a large community
YES	S-2 Disabling injury Lost time injury	F-2 \$0.5M to \$1M impact	E-2 Unit emergency response Significant cleanup for weeks / months Potential localized, medium-term, significant adverse effects on the environment (including soil and groundwater) or a small community
MAYBE	S-3 Medical aid injury Restricted work	F-3 \$100K to \$0.5M impact	E-3 Local emergency response Cleanup for days / weeks Potential short-term, minor adverse effects on the environment (including soil and groundwater) or a few members of the public
NO	S-4 First aid	F-4 Less than \$100K impact	E-4 Confined to close proximity Inconsequential or no adverse effects

Figura 12 Esempio di matrice di criticità. Fonte: *Redefining your maintenance strategy using the SKF RCM® process, SKF Group (2015)*

È bene precisare che gli impatti da analizzare nella matrice di criticità, così come le relative scale dei valori, devono essere in linea con il contesto operativo aziendale. Una conoscenza incompleta dei beni presenti nello stabilimento, o la mancanza di un'analisi di criticità, può portare ad un inefficiente utilizzo del capitale a disposizione dell'area manutenzione [33], ad esempio implementando tecniche dispendiose, economicamente e tecnologicamente, su beni di produzione non critici.

Al fine di intercettare adeguatamente l'eventuale malfunzionamento di un bene di produzione critico, possono essere effettuati degli studi di supporto alla definizione dei piani di manutenzione, tra i quali si ricorda l'analisi *FMECA* [26]. L'analisi *FMECA* (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*) è una procedura di analisi volta a scomporre un bene nelle sue sub-entità, secondo un principio di scomposizione di tipo funzionale, ed una successiva analisi di guasto delle sub-entità stesse. Tale analisi porta al calcolo, per ogni modo di guasto individuato, di un indice detto *RPN* (*Risk Priority Number*), il quale permette di dare una valutazione quantitativa del rischio del guasto. L'indice *RPN*, nelle pubblicazioni di ambito *SAE* (*Society of Automotive Engineers*), è valutato come segue:

$$RPN = O * S * D \quad (2.1)$$

con

O: *Occurrence*, ovvero la probabilità di accadimento del guasto;
S: *Severity*, misura della gravità di accadimento del guasto;
D: *Detectability*, misura la facilità (o difficoltà) nel misurare l'insorgere del guasto;

Definita la scala dei tre fattori, è possibile procedere con la discussione dei modi di guasto dei singoli componenti, assegnazione del valore per i tre fattori e successivo calcolo dell'indice di rischio *RPN*. Analogamente a quanto avviene all'analisi di criticità effettuata a livello di sistema, l'analisi *FMECA* è un utile strumento di supporto allo studio dei modi e cause di guasto del singolo componente e alla definizione di adeguati piani di manutenzione.

2.2.2 Identificazione

Una volta definiti i piani di manutenzione, si passa alla fase successiva di Identificazione, la quale termina con la generazione degli ordini di lavoro (*OdL* o *Work Order*) per le attività di manutenzione. I piani di manutenzione possono essere registrati in un sistema *software* di gestione operativa delle attività di manutenzione (*CMMS*, *Computer Maintenance Management System*), il quale permette di [26]:

- Generare automaticamente gli ordini di lavoro degli interventi di manutenzione preventiva o predittiva (anche detta preventiva su condizione) in base al parametro scatenante (*timer*, ore di funzionamento, segnale di allarme monitorato);
- Aprire una richiesta di lavoro, da parte del personale di produzione o di manutenzione, per un intervento di manutenzione a guasto o straordinario;
- Autorizzare la richiesta di intervento (area di integrazione delle informazioni e *decision making*), preventivandone i costi ed attribuendoli ai relativi centri di costo;
- Programmare l'attività di manutenzione, monitorando il tempo previsto ed effettivo;
- Chiudere l'ordine di lavoro con l'inserimento di dati aggiuntivi da parte dell'esecutore (dettagli del guasto rilevato, eventuali interventi aggiuntivi).

Nel corso della fase di Identificazione, è opportuno definire la categoria ed il livello di competenze richieste per lo svolgimento del lavoro.

2.2.3 Controllo

La fase di controllo riguarda la programmazione e schedulazione del lavoro.

Per attività di programmazione si intendono tutte le attività volte alla preparazione del lavoro di manutenzione. Nel dettaglio, si intende l'individuazione ed il recupero dei pezzi di ricambio necessari, la descrizione delle attività previste, la stima del *budget* e del tempo di intervento. Maggiori sono le informazioni che vengono riportate all'interno di un ordine di lavoro, maggiori saranno i dati a disposizione in fase di analisi e aggiornamento dei piani di manutenzione.

L'orizzonte di programmazione delle attività è strettamente legato alle strategie di manutenzione attuate: se non si misurano le condizioni operative del bene (es. mediante ronde

ispettive, misure termografiche), è probabile che l'orizzonte di programmazione sia molto limitato, in quanto il guasto o malfunzionamento avverrà in maniera imprevista.

Le attività da realizzare durante un lavoro programmato di manutenzione possono essere elencate e descritte mediante l'uso di procedure standard (*SJP, Standard Job Plans*). Ciò permette di avere una stima del tempo di intervento e delle abilità necessarie allo svolgimento dei lavori.

2.2.4 Esecuzione

L'ultima fase del modello *AEO* descrive le attività di esecuzione e controllo dei lavori e, infine, la fase di aggiornamento dei piani di manutenzione.

L'esecuzione dei lavori di manutenzione può portare all'inserimento, all'interno dell'ordine di lavoro, di descrizioni aggiuntive (es. cosa è stato realmente svolto ed in quanto tempo, qual è stata la causa di guasto, cosa è stato scoperto durante una ronda ispettiva ecc.), e l'effettiva accettazione dei lavori svolti può essere demandata alle figure dei supervisor, i quali verificano che quanto fatto è in linea con gli *standard* di accettazione (es. collaudi).

La revisione dei piani di manutenzione, come già accennato, coincide con la fase finale del modello, ed è da intendersi come un'attività sistematica e re-iterativa, in linea con il principio di miglioramento continuo. Essa è volta a valutare l'effettiva efficacia, da parte dei piani attualmente in uso, nel raggiungimento degli obiettivi aziendali prefissati nella fase di Strategia. Si precisa come, dunque, sia di fondamentale importanza il tracciamento dei dati di manutenzione (ad esempio lo storico guasti su *software CMMS* con tempo di intervento e costo di riparazione).

2.3 Il questionario *SKF CNA (Client Needs Analysis)*

Il questionario *CNA* [35] è costituito da quaranta domande *standard* (dieci per ogni area del modello), ed ha il fine di misurare e valutare, mediante dati oggettivi, la condizione attuale in cui opera la manutenzione dello stabilimento in esame. Ogni questionario *CNA* realizzato viene memorizzato in un *database SKF*, permettendo così di confrontare i risultati di diverse aziende dello stesso settore o sub-settore. In tal modo, si contestualizza la condizione dell'azienda in esame, permettendo un paragone con una media di settore (*industry average*) o con l'azienda che ha ottenuto il miglior punteggio (*best in class*).

Nello svolgimento del questionario, è possibile che il personale incaricato di rappresentare l'azienda non comprenda le domande poste, oppure che il personale che fa le domande non riesca ad essere sufficientemente esplicativo. Nell'immagine di seguito, è riportata la percentuale di risposte non date a causa di mancata comprensione della domanda in oltre 1000 questionari *CNA* svolti [35].

AEO Main Facet	Not Understood
Maintenance Strategy	0.14
Work Identification	0.15
Work Control	0.11
Work Execution	0.09
Total, all facets	0.49

Figura 13 Percentuale (%) di domande senza risposta per mancata comprensione di oltre 1000 questionari SKF CNA. Fonte: *Mapping Maintenance Maturity, Wayne G reed (2016)*

È facile notare come la percentuale complessiva di risposte non date per mancata comprensione risulta essere molto bassa (circa 0.5 %).

Inoltre, è possibile che una o più domande non siano applicabili al contesto aziendale specifico (es. mancato utilizzo di un determinato strumento per diverse metodologie aziendali). Di seguito, è riportata la percentuale di risposte non date, in oltre 1000 questionari CNA, in quanto la domanda non è applicabile alla specifica azienda.

AEO Main Facet	Not Applicable
Maintenance Strategy	0.47
Work Identification	1.40
Work Control	0.90
Work Execution	0.80
Total, all facets	3.57

Figura 14 Percentuale (%) di domande senza risposta per non applicabilità su oltre 1000 questionari SKF CNA. Fonte: *Mapping Maintenance Maturity, Wayne G reed (2016)*

Logicamente, la mancanza di risposta può essere dovuta anche ad una mancanza di dati, ovvero non esistono dati che possano giustificare una possibile compilazione del questionario. Nella seguente Figura 15 è riportata la % di domande senza risposta per le quattro del modello AEO in oltre 1000 CNA.

AEO Main Facet	Not Applicable
Maintenance Strategy	0.47
Work Identification	1.40
Work Control	0.90
Work Execution	0.80
Total, all facets	3.57

Figura 15 Percentuale (%) di domande senza risposta per mancanza di dati su oltre 1000 questionari SKF CNA. Fonte: *Mapping Maintenance Maturity, Wayne G reed (2016)*

Una volta svolto il questionario, i dati vengono inseriti nello strumento *SKF Client Needs Analysis – Asset Management*, il quale rapporta i risultati ottenuti con la media di settore, classificandoli nelle categorie descritte con la seguente figura.

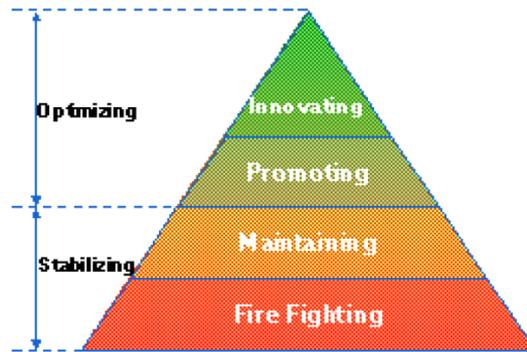


Figura 16 *Categorie dei risultati ottenibili con il questionario CNA. Fonte: Mapping Maintenance Maturity, Wayne G reed (2016)*

Le risposte categorizzate come *fire-fighting* o *maintaining* rappresentano una difficoltà, da parte dell'azienda, a seguire le pratiche utilizzate dalla media di settore; mentre le risposte di tipo *promoting* o *innovating* rappresentano dei punti di forza rispetto alla media di settore stessa. Le categorie sono, dunque, rappresentate in forma piramidale per esprimere il livello di maturità raggiunta dall'azienda nelle varie aree esaminate.

2.3.1 Le domande del questionario CNA

Di seguito verranno presentate le 40 domande principali contenute nel questionario CNA. Si precisa come, nel foglio di lavoro del questionario, siano presenti una serie di domande secondarie facoltative che possono essere utili ad approfondire la domanda principale sottoposta nel caso in cui lo si ritenga necessario. Le risposte alle domande secondarie sono perlopiù espresse in termini assoluti e non percentuali (es: fatturato annuo dello stabilimento, oppure valore del magazzino di manutenzione).

1	Costo totale annuo di manutenzione vs valore <i>ERV</i> ¹ dell'impianto (%).
2	Disponibilità ² dell'impianto (%).
3	Costo totale annuo di manutenzione vs fatturato annuo dello stabilimento (%).
4	Valore di magazzino di manutenzione vs valore <i>ERV</i> dell'impianto (%).
5	Ore di manutenzione pianificate vs ore di manutenzione totali (pianificate e non) (%).
6	Numero di beni registrati nell' <i>asset register</i> ³ di manutenzione vs numero di beni totali (%).
7	Numero di livelli in cui l' <i>asset register</i> di manutenzione è strutturato.
8	Percentuale dei beni di produzione sottoposti ad un'analisi di criticità (%).
9	Percentuale dei lavori di manutenzione pianificata basati su un processo di analisi tecnica <i>standard</i> (es <i>FMEA</i>) (%).
10	Percentuale di eventi, definiti "significativi" per la manutenzione, sottoposti ad analisi <i>RCFA</i> ⁴ (%).
11	Percentuale di lavori di manutenzione coperti da relativi ordini di lavoro (%).
12	Percentuale di risultati, derivanti da tecniche di manutenzione predittiva, effettivamente efficaci nel prevenire l'insorgenza di un malfunzionamento (%).
13	Numero di tipologie di ordini di lavoro (es: preventiva, predittiva, formazione, guasto ecc.).
14	Percentuale di raccomandazioni, derivanti da tecniche di manutenzione predittiva, supervisionate ed approvate previa attuazione (%).
15	Numero di componenti realmente ispezionati durante ronde ispettive vs totale componenti da ispezionare presenti sul modulo <i>check-list</i> della ronda.
16	Numero di interventi di manutenzione preventiva realizzati dai conduttori macchina (%).

¹ *ERV* sta per *Estimated Replacement Value* e corrisponde al costo di investimento stimato per rimpiazzare uno specifico bene (o impianto). Il rapporto del costo totale annuo di manutenzione sul valore *ERV* dell'impianto rappresenta un indice finanziario di manutenzione molto utilizzato. Fonte: [60].

² Definita come segue: $Disponibilità = \frac{\text{Ore di produzione effettive}}{(\text{Ore di produzione effettive} + \text{ore di fermo produzione non previste})}$.

³ Un *asset register* è "una lista di tutti i beni presenti in uno specifico ambiente di lavoro, comprensiva di informazioni sui beni stessi come il produttore, venditore, modello, specifiche ecc. In ambito manutentivo, tale termine è impiegato per riferirsi ad un elenco strutturato dello stabilimento e dei macchinari in una specifica ubicazione" [61]

⁴ *RCFA* sta per *Root Cause Failure Analysis*, ovvero corrisponde a dei metodi *standard* di analisi delle cause radice di apparizione di un guasto o di un malfunzionamento. Un esempio di metodo di analisi *RCFA* è il metodo dei "5 perché" tipico della metodologia *TPM* [26].

17	Numero di ordini di lavoro sottoposti ad un criterio quantitativo di definizione di priorità (%).
18	Numero di modifiche o miglioramenti, apportati ai beni di produzione, segnalate al personale di produzione (%).
19	Numero di ordini di lavoro completi, in fase di pianificazione, di informazioni come: origine, autorizzazione, componenti necessari, <i>budget</i> (%).
20	Numero di ordini di lavoro che descrivono le abilità specifiche per lo svolgimento del lavoro (%).
21	Ore di manutenzione pianificata schedulata <i>vs</i> ore di manutenzione pianificata realmente svolte (%).
22	Numero di pianificatori delle attività di manutenzione <i>vs</i> numero totale di manutentori.
23	Orizzonte temporale di schedulazione delle attività routinarie di manutenzione.
24	Ore di attività di manutenzione preventiva effettuate <i>vs</i> schedulate (%).
25	Ore di attività di manutenzione predittiva effettuate <i>vs</i> schedulate (%).
26	Costo totale annuo di manutenzione <i>vs budget</i> previsto (%).
27	Numero di beni di produzione con un elenco <i>BOM</i> ⁵ aggiornato che riporta codice di magazzino, numero di pezzi stoccati, posizione ecc. (%).
28	Numero di lavori di manutenzione svolti coperti da una procedura standard (<i>SJP</i>) (%).
29	Tempo di ritardo medio, misurato e gestito, di realizzazione dei lavori di manutenzione.
30	Ore di straordinario effettuate in un mese <i>vs</i> totale ore lavorate dal personale di manutenzione (%).
31	Numero di ordini di lavoro chiusi con inserimento di informazioni aggiuntive (es: raccomandazioni derivanti da ronde ispettive, cause di guasto ecc.) (%).
32	Numero di ordini di lavoro chiusi con il valore di costo effettivo (costo della manodopera e pezzi di ricambio) di intervento e tempo effettivo (%).
33	Tempo di contatto (<i>wrench time</i>) medio degli interventi di manutenzione ⁶
34	Numero di ore annuali di formazione del personale di manutenzione <i>vs</i> totale ore annuali lavorate (%).
35	Numero di supervisor dei lavori presenti <i>vs</i> numero totale di manutentori (%).
36	Numero di qualifiche del personale di manutenzione utilizzate (es: meccanico, strumentista ecc.).
37	Percentuale dei lavori di manutenzione annuali sottoposti a procedure <i>standard</i> di accettazione (es: collaudi) (%)
38	Percentuale dei lavori di manutenzione annuali sottoposti a interventi di ri-lavorazione (%).
39	Numero di piani di manutenzione correttivi (a guasto) revisionati in un anno (%).
40	Numero di piani di manutenzione preventivi e predittivi revisionati in un anno (%).

Tabella 1 Domande principali del questionario SKF CNA sottoposte al personale di manutenzione dello stabilimento

⁵ In ambito manutentivo, *BOM* sta per *Bill Of Materials*, ovvero la “lista completa dei componenti di un macchinario. [...] L’utilizzo di una *BOM* di manutenzione permette di identificare con esattezza il punto in cui il lavoro di manutenzione deve essere svolto” [62]

⁶ Per “tempo di contatto” si intende la porzione del tempo totale di realizzazione dell’intervento in cui il personale di manutenzione effettua del lavoro con valore aggiunto. I ritardi causati dalla diagnostica post-guasto, oppure quelli causati da un ritardo nel recuperare i pezzi di ricambio, sono esempi di intervalli temporali in cui la manutenzione non apporta un valore aggiunto all’intervento di manutenzione.

2.3.2 Il questionario CNA per lo stabilimento di Michelin Torino

Di seguito sono riportati e descritti i risultati del questionario CNA per lo stabilimento di Michelin Torino. I risultati sono stati inseriti nello strumento *software per CNA* di SKF per l'elaborazione di valori comparabili con la media di settore, ovvero il risultato del singolo stabilimento è convertito in un valore percentuale in cui il massimo (100%) corrisponde alla miglior pratica attuabile in quello specifico settore di appartenenza.

In Figura 17 sono riassunti i risultati complessivi del questionario in un grafico di tipo *radar*. In Tabella 2 è riportata la percentuale di risposte per ognuna delle sette categorie del questionario. Il dato più evidente risulta essere l'alta percentuale di risposte (35 % del totale) di categoria "assente / non misurato". Si noti, inoltre, come il 7,5 % dei risultati (3 risposte) rientrano nella categoria "non compreso", mentre non vi sono risposte nella categoria "non applicabile".

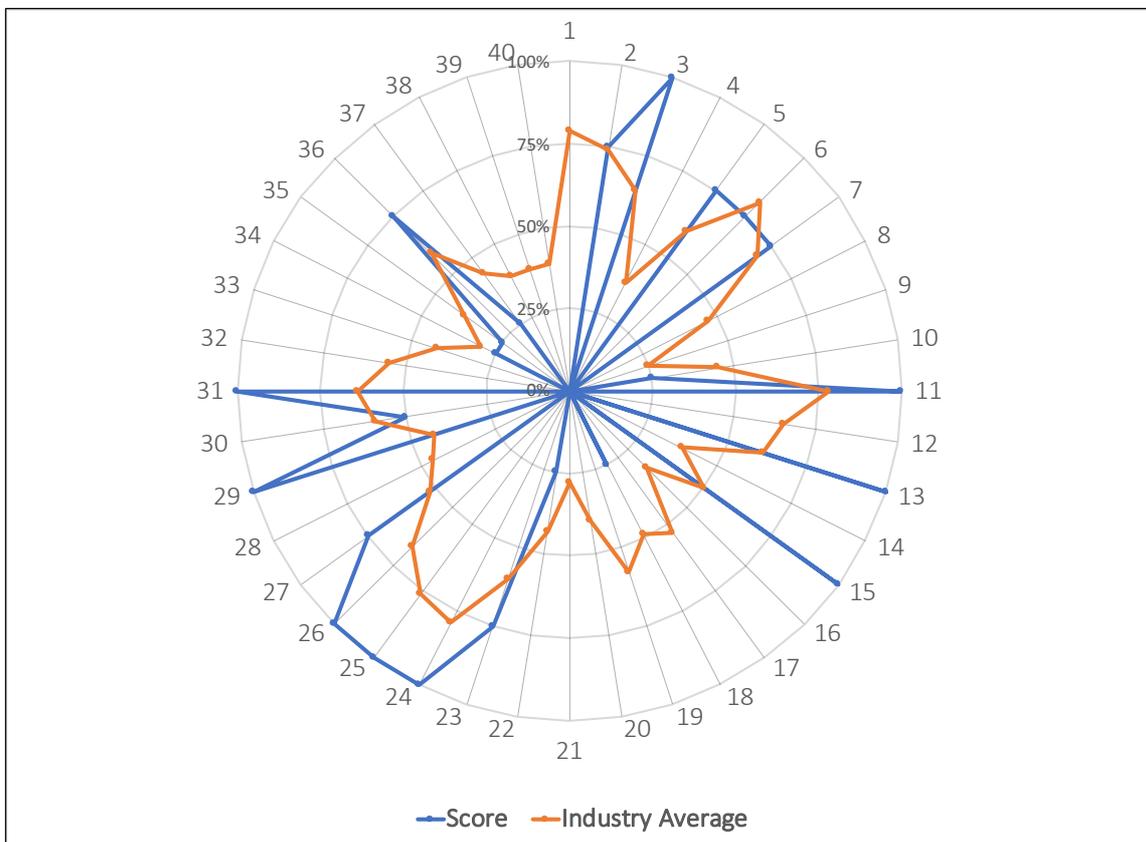


Figura 17 Grafico complessivo risultati CNA per l'impianto in esame (score) confrontato con la media di settore (industry average).

Main facet / maturity	Adventive	Fighting	Maintaining	Promoting	Innovating	Not applicable	Not understood	Totals facet
Maintenance strategy	7.5	0.5	0	10.0	2.5	0	2.5	25.0
Work identification	12.5	1.5	0	0	7.5	0	2.5	25.0
Work control	2.5	2.5	2.5	5.0	10.0	0	2.5	25.0
Work execution	13.5	1.5	0	2.5	2.5	0	0	25.0
Subtotals per choice of response	35.0	5.0	2.5	17.5	22.5	0.0	7.5	100.0

Tabella 2 Percentuale (rispetto al totale di 40) di risposte al questionario CNA per ogni categoria per lo stabilimento Michelin TST

Come è possibile notare nella seguente Tabella 3, l'area di Controllo presenta dei risultati medi globali maggiori della media industriale di 8.9 punti percentuali, mentre l'area di Strategia è in negativo di soli 0.7 punti percentuali. Le restanti aree di Identificazione ed Esecuzione presentano dei risultati ben al di sotto della media di settore, con una differenza, rispettivamente, di 21.7 e 20.6 punti percentuali; valori influenzati dall'assenza di risposta a 5 domande per ogni area.

Area di analisi	Michelin Torino	Media di settore
Strategia	42.5 %	43.5 %
Identificazione	32.5 %	54.2 %
Controllo	62.5 %	53.6 %
Esecuzione	25.0 %	45.6 %

Tabella 3 Risultati medi globali per le quattro aree del questionario CNA.

In Figura 18 è riportato il grafico *radar*, relativo all'area di Strategia, che confronta lo stabilimento in esame con la media di settore (*industry average*) e lo stabilimento, appartenente allo stesso segmento industriale, che ha realizzato il miglior punteggio complessivo (*best in class*).

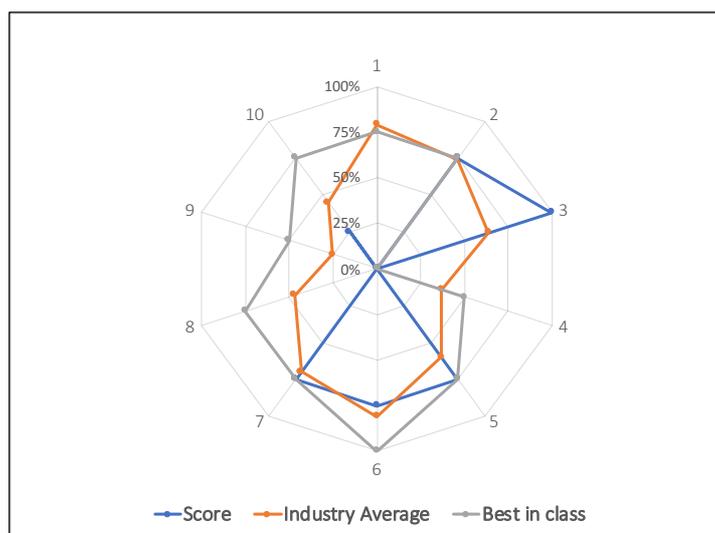


Figura 18 Grafico radar di confronto dei risultati CNA per la fase di Strategia.

Le risposte alle domande n.1 e 4 sono nulle in quanto il valore di *ERV* non è stato fornito (*absent*), sebbene il costo annuo di manutenzione sia stato pari a 1,2 mln € per l'anno 2019, mentre il valore stimato del magazzino pezzi di ricambio ammonta a 1,1 mln € (aggiornato a ottobre 2020). Anche la risposta alla domanda n.8 è assente, in quanto non viene effettuata un'analisi di criticità su nessun bene in funzione nello stabilimento. Gli *standard* aziendali imposti, infatti, prevedono un'analisi relativa alla disponibilità dei pezzi di ricambio presenti in magazzino.

La disponibilità dell'impianto (domanda n. 2) è pari all'88% (valutata nel periodo Gen-Ago 2020) ed è in linea con la media. Il rapporto tra tempo di intervento di manutenzione pianificata vs non pianificata (domanda n. 5), valutato negli ultimi 12 mesi, è anche esso in linea con la media di settore: 5039 *h* di manutenzione non pianificata vs 12818 *h* complessive. L'indice di costo di manutenzione vs. fatturato (domanda n. 3) è pari alla migliore pratica attuabile, con un fatturato stimato di 110 mln € vs un *budget* annuale pari a 1,2 mln €.

La conoscenza, da parte dell'area manutenzione, dei beni è descritta con le domande n. 6 e 7, le quali indicano una conoscenza dei beni di stabilimento, ed un numero di livelli del registro beni, in linea con la media di settore. Il 75% dei beni di produzione, infatti, sono registrati *nell'asset register*, il quale è caratterizzato da 6 livelli di cui l'ultimo rappresenta il livello componente.

La risposta alla domanda n. 9, relativa ad analisi standard come la *FMEA*, è nulla in quanto non compresa dal reparto (tipo *not understood*); mentre l'utilizzo di tecniche di ricerca delle cause radice dei guasti/malfunzionamenti (domanda n.10) risulta essere al di sotto della media in quanto viene realizzata solo a seguito di un guasto che vada ad interrompere la produzione della linea per un intervallo temporale sufficientemente lungo (> 4 *h*). In tal caso, si interviene con metodi di approccio al problema standardizzati per Michelin e, qualora il problema sia attribuito ad un guasto di un macchinario, si procede alla ricerca delle cause mediante l'applicazione del metodo dei 5 *perché* [26] (5 *why*) tipico della metodologia *TPM* per l'analisi routinaria dei problemi.

Nella figura seguente (Figura 19) vengono riportati i risultati del questionario relativi all'area di Identificazione.



Figura 19 Grafico radar di confronto dei risultati CNA per la fase di Identificazione.

La percentuale stimata di lavori di manutenzione coperti da relativo ordine di lavoro (domanda n. 11) è pari al 100%, il che corrisponde alla migliore pratica attuabile. Analogo discorso per la domanda n. 13, relativa alle tipologie di attività utilizzate per la registrazione di un ordine di lavoro, di seguito elencate:

- X: Conduzione impianti, assistenza alla produzione;
- T: Attività tecnico amministrative;
- S: Sistemica;
- I: Ispezione;
- F: Formazione;
- E. Manutenzione pianificata;
- D: Guasto (manutenzione non pianificata);
- C2: Cambio dimensione programmata;
- C1: Cambio dimensione non programmata.

Si noti come siano presenti due voci relative alle attività di cambio dimensione in quanto l'area di manutenzione partecipa alle attività di sostituzione e settaggio tipiche di un cambio tipo di produzione. Le attività sistematiche sono attività di manutenzione preventiva inserite all'interno del *software CMMS* utilizzato, pertanto sono automaticamente generate dal *software* stesso con intervalli fissi. Le attività di manutenzione pianificata, invece, sono interventi di ripristino delle condizioni operative *standard* della macchina (ad esempio un intervento ispettivo può portare alla realizzazione di un successivo intervento di manutenzione pianificata). Di seguito sono riportate le ore di intervento per ogni categoria, estratte da *software CMMS*, valutate su di un periodo di 12 mesi (settembre 2019 – settembre 2020). Come è possibile notare dal grafico stesso, le tipologie maggiormente utilizzate sono 7. Nel dettaglio, tutte le attività di cambio tipologia di produzione sono registrate come non programmate.

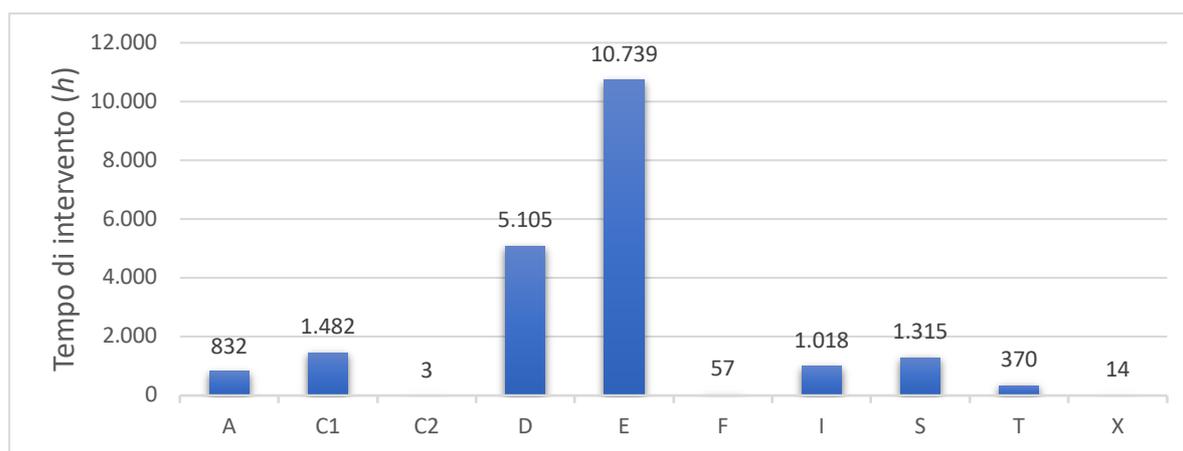


Figura 20 Ore di attività di manutenzione realizzate nello stabilimento in esame nel periodo (Set 2019 - Set 2020) suddivise per categorie.

Tornando al questionario CNA, la domanda n. 15 relativa al rispetto delle ronde giornaliere da parte del personale di manutenzione corrisponde alla migliore pratica attuabile. L'area

manutenzione, infatti, monitora giornalmente il livello di completamento delle *check-list* mediante le quali le suddette ronde sono strutturate.

Le restanti domande del questionario presentano scarsi risultati, in quanto esse sono segnate come nulle nel grafico *spider chart*, eccetto che per la domanda n. 18 circa la percentuale di modifiche/miglioramenti dei beni di produzione che vengono comunicate agli utilizzatori dei beni stessi (meno del 40%).

Nel dettaglio, la domanda n. 12 circa l'efficacia delle attività di manutenzione predittiva risulta di tipologia (*not understood*). Per lo stabilimento in esame, tali tipologie di intervento sono principalmente costituite da ronde ispettive senza ausilio di strumenti dedicati di diagnosi, quali termocamere o sistemi di misura delle vibrazioni. Gli interventi di analisi vibrazionale e ferrografie per il controllo olii lubrificanti sono realizzati con cadenza annuale da parte di ditte esterne; mentre gli interventi di analisi termografica vengono realizzati con analoga cadenza da parte del personale interno di manutenzione dotato della relativa abilitazione UNI-ISO 9712. Si sottolinea, dunque, come non vi sia uno strumento di supporto decisionale alle raccomandazioni derivanti dagli interventi di manutenzione predittiva (domanda n. 14). Le suddette raccomandazioni, dunque, non vengono supervisionate ed approvate prima della relativa implementazione.

Inoltre, non vi sono interventi di auto-manutenzione assegnati ai conduttori dei beni di produzione (domanda n. 16). Per quanto concerne l'organizzazione delle attività di manutenzione secondo un criterio *standard* di valutazione delle priorità (domanda n. 17), gli *standard* aziendali prevedono l'assegnazione di un indice ad ogni attività svolta. Tale indice, volto a descrivere il fine per cui l'attività stessa viene realizzata, può assumere i seguenti valori:

- 1 – Sicurezza ed Ambiente. Attività di manutenzione volte a garantire gli *standard* di sicurezza previsti. Rientrano in tali attività i controlli del corretto funzionamento degli organi di sicurezza e le verifiche circa l'assenza di rischi incidenti, inquinamento o incendio;
- 2 – Qualità. Attività di manutenzione volte a garantire il rispetto degli *standard* di qualità previsti. Rientrano in tali attività le verifiche circa il corretto funzionamento dei dispositivi atti a garantire il mantenimento dei corretti parametri di processo ed i controlli circa la conformità geometrica della macchina;
- 3 – Perennità e disponibilità. Interventi atti a garantire la perennità dei beni di produzione dello stabilimento.

Ciò fornisce una guida, per il personale di manutenzione, nella programmazione delle attività settimanali (la scadenza di un piano di manutenzione di tipo 1 porta irrimediabilmente ad un fermo impianto) ma non vi è una effettiva valutazione sistematica della priorità.

Per quanto concerne la domanda n. 19, la relativa risposta è nulla in quanto gli interventi di manutenzione vengono programmati e schedulati senza il calcolo di un *budget* stimato. Analogo discorso per la domanda n. 20, in quanto viene individuata la sola tipologia generica di manutentore adeguato allo svolgimento dei lavori (meccanico, elettrico ecc.), e non le esatte abilità richieste.

Nella Figura 21 di seguito, sono ora riportati i risultati del questionario relativi all'area di Controllo, riguardante la programmazione e schedulazione dei lavori di manutenzione. Per quanto concerne la domanda n. 21, non vi è un monitoraggio del tempo effettivo *vs.* stimato dei lavori in quanto vi è uno scarso impiego della relativa funzionalità, presente su *software CMMS*, di inserimento manuale del tempo di intervento.

Il numero di pianificatori dei lavori (domanda n. 22) ammonta a 2 unità, contro 15 unità delegate alle attività operative.

L'orizzonte di schedulazione dei lavori (domanda n. 23) ammonta a 2 settimane, tenendo presente che i ritmi *standard* di produzione prevedono 24 h lavorative al giorno (3 turni da 8h) per 5 giorni a settimana. Nel fine-settimana, dunque, la produzione è ferma ed è possibile svolgere le attività di manutenzione previste, la cui realizzazione, dunque, viene programmata nella prima finestra disponibile o in quella immediatamente successiva.



Figura 21 Grafico radar di confronto dei risultati CNA per la fase di Controllo.

Per quanto concerne il rispetto delle scadenze delle attività di manutenzione previste (domanda n. 24 e 25), le direttive aziendali prevedono il monitoraggio di un indicatore descrittivo del numero di attività realizzate entro i tempi e le tolleranze previste. Ciò viene effettuato in quanto la scadenza di un intervento programmato di tipologia 1 porta inevitabilmente al fermo produzione, mentre la scadenza di un intervento di tipo 2 porta al coinvolgimento dell'area di Garanzia Qualità dello stabilimento, che valuta se vi siano ancora le corrette condizioni per poter procedere con la produzione oppure è necessario un intervento immediato. Tale attività di controllo e monitoraggio rappresenta la migliore pratica attuabile nel sub-segmento di riferimento.

Per quanto riguarda il rispetto del *budget* complessivo di manutenzione (domanda n. 26), è prevista una spesa annuale di 1,2 mln €, con una deviazione tra *budget previsto* e spesa reale di circa il 2%, constatando un ottimo controllo dei costi globali (risposta da migliore pratica attuabile per il sub-segmento di riferimento).

Il tasso di registrazione dei codici dei pezzi di ricambio a magazzino mediante una lista *BOM* (domanda n. 27) è pari al 75%, con circa 3200 codici complessivi. Ogni componente è etichettato come segue:

- Sigla di *Zone ID – Country Stock – Site Stock* (es: EUR – IT – TST);
- *Master Local Code*: che identifica univocamente il pezzo di ricambio mediante una sigla;

- *Master Description* (es: cuscinetto a sfere rigido) con informazioni aggiuntive che caratterizzano il componente (es: diametro esterno e larghezza);
- *Master Manufacturers References* che riporta il costruttore (o i costruttori) di riferimento;
- *Store min e max*, permettendo di evidenziare situazioni di rottura di *stock* (numero di pezzi a magazzino minore del livello minimo) o di *overstock*;
- *Dynamic Value*, che fornisce il valore stimato, nella valuta locale, nel pezzo a magazzino.

Per quanto riguarda la famiglia “Cuscinetti”, sono registrati circa 170 codici per un valore complessivo di stock pari a 1,4% il valore medio annuale totale di magazzino pezzi di ricambio.

La risposta alla domanda n. 28, relativa al tasso di impiego di procedure *SJP* per la realizzazione dei lavori, è di tipo *absent* in quanto le direttive aziendali prevedono l’utilizzo di “gamme *standard* di operazioni”, le quali possono essere direttamente registrate sul *software CMMS* e richiamate in fase di programmazione dell’attività, ma il relativo impiego non è quantificato e monitorato.

Il tempo medio di ritardo nei lavori di manutenzione (domanda n. 29) stimato è minore a 3 settimane, valutato alla luce della tolleranza temporale concessa per l’esecuzione dei lavori. Il monte ore settimanale di straordinario (domanda n. 30) è monitorato, da parte del responsabile di manutenzione, con l’obiettivo di mantenerlo al di sotto di un valore obiettivo, ed il relativo valore risulta in linea con il sub-segmento di riferimento.

In Figura 22, riportata di seguito, è possibile visualizzare i risultati relativi all’ultima area di Esecuzione del questionario *CNA*.

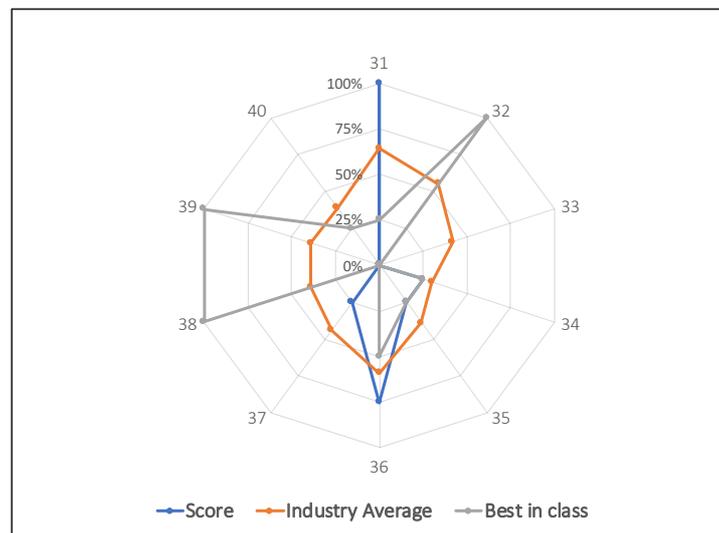


Figura 22 Grafico radar di confronto dei risultati CNA per la fase di Controllo.

Le risposte date dal personale dello stabilimento in esame, così come le risposte date da parte del personale dello stabilimento risultato *best in class* del segmento di riferimento, risultano essere piuttosto scarse (5 domande di categoria *absent* per lo stabilimento Michelin).

Per quanto riguarda la percentuale di ordini di lavoro chiusi con descrizione completa (domanda n. 31), tale valore è stato stimato utilizzando i dati estratti da *software CMMS*, con

un valore stimato pari all'85%, corrispondente alla migliore pratica attuabile per il sub-segno in esame.

La percentuale di ordini di lavoro chiusi con descrizioni dettagliate su costo stimato vs. effettivo (domanda n. 32) è nulla in quanto non vi è monitoraggio, su nessun ordine di lavoro generato, del *budget* in fase di programmazione dei lavori, e nemmeno esiste una valutazione del costo effettivo in fase di chiusura. Analogo discorso può essere esteso al monitoraggio del tempo di contatto (domanda n. 33). Il mancato monitoraggio del tempo di contatto non consente di valutare, di fatto, i ritardi dovuti alla diagnosi di un guasto o malfunzionamento, o i ritardi dovuti all'approvvigionamento del pezzo di ricambio, i quali costituiscono degli intervalli temporali a mancato valore aggiunto per l'intervento di riparazione in esame.

Il monte ore annuale dedicato alle attività di formazione del personale (domanda n. 34) stimato è pari a 10h per ogni unità operativa, valore in linea con la media di settore. Per quanto concerne la domanda n. 35, vi sono 2 supervisor dei lavori vs 15 unità operative, suddivise nelle tre categorie di "manutentore meccanico", "manutentore elettrico" ed "esperto automatismi" (domanda n. 36), sebbene non esistano sottocategorie descrittive il livello di abilità raggiunto dal personale.

La percentuale di lavori aventi uno *standard* di accettazione e/o collaudo è inferiore al 40% (domanda n. 37), in quanto le attività di collaudo realizzate sono perlopiù relative agli interventi di riparazione sui motori elettrici presenti nello stabilimento. Non essendoci uno *standard* di accettazione sulla maggior parte dei lavori, non è possibile stimare la percentuale di interventi valutati come "non consoni" e, pertanto, soggetti a rilavorazioni (domanda n. 38).

Le domande n.39 e 40 riguardano le modifiche e migliorie periodiche dei piani di manutenzione esistenti. Esse, dunque, si riferiscono alla fase conclusiva del modello *SKF AEO*, che descrive il processo di miglioramento continuo delle attività, sono il frutto ed il risultato di quanto viene effettuato e monitorato nelle quattro aree del modello, come il monitoraggio dei costi e tempi di intervento, il valore di *MTBF* o del tasso di guasto. La risposta a tali domande è nulla in quanto non è noto in che misura esse vengano svolte.

2.4 Analisi dell'andamento storico dei dati di *performance* dell'area manutenzione

Al fine di definire un criterio oggettivo di scelta dell'area di intervento, ed al fine di definire la tipologia stessa di intervento da effettuare, sono stati estratti ed analizzati i dati principali di valutazione della *performance* dell'area di Manutenzione, i quali hanno permesso, di fatto, di realizzare un'analisi di criticità sui beni di produzione dello stabilimento in esame.

2.4.1 L'indice di *OEE* (*Overall Equipment Effectiveness*)

L'indice di *OEE* è stato coniato, nel 1982, da Seiichi Nakajima, ed è considerato uno dei pilastri della metodologia *TPM* (*Total Productive Maintenance*) [36]. Esso viene utilizzato per monitorare l'efficacia produttiva di un singolo bene o di una linea di produzione nel tempo, eviscerandone le cause di perdita [37]. La definizione dell'indice di *OEE* è la seguente:

$$OEE \% = \text{Disponibilità \%} * \text{Tasso di Performance \%} * \text{Indice di Qualità \%} \quad (2.2)$$

$$\text{Disponibilità \%} = \frac{\text{Tempo effettivo di produzione}}{\text{Totale tempo disponibile}} * 100$$

$$\text{Tasso di Performance \%} = \frac{\text{Tasso di produzione effettivo}}{\text{Tasso di produzione di progetto}} * 100$$

$$\text{Indice di Qualità \%} = \frac{\text{Totale unità prod.} - \text{Unità non conformi prod.}}{\text{Totale unità prodotte}} * 100$$

L'indice, dunque, individua tre macro-cause di perdita produzione, e ne visualizza gli effetti in un unico valore sintetico, al fine di aumentare l'efficacia produttiva del bene o della linea di produzione. Di fatto, l'indice confronta tre grandezze adimensionali derivanti da tre grandezze diverse: tempo, unità prodotte per unità di tempo e numero di unità prodotte. In Figura 23 è riportato uno schema descrivente la metodologia di calcolo dell'indice OEE, per il quale il Tasso di Performance e l'Indice di Qualità vengono tradotti in un tempo equivalente di mancata produzione. Si precisa come, il valore di Totale tempo disponibile (*Gross Available Time*), che costituisce la base di calcolo dell'indice, possa assumere valori diversi a seconda del tipo di monitoraggio effettuato (es. base giornaliera, mensile, annua). Inoltre, nel computo del Tempo effettivo di Produzione (*Net Operating Time*) vengono considerate sia le perdite per fermate programmate che quelle per fermate non programmate.

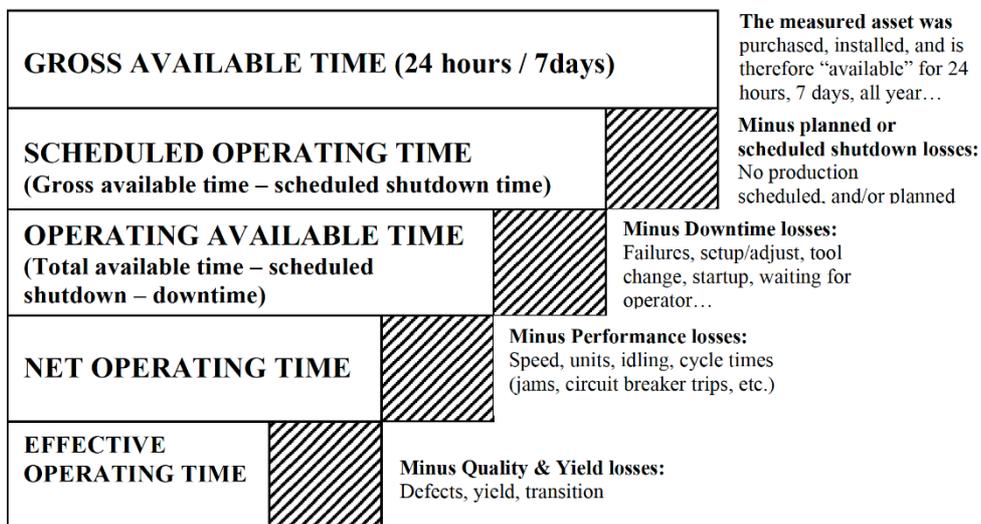


Figura 23 Esempio di calcolo dell'indice OEE. Fonte: Robert M. Williamson (2006), *Using Overall Equipment Effectiveness: The Metric and the Measures*, Strategic Work Systems, Inc.

La sola visualizzazione del valore globale di OEE, inoltre, potrebbe trarre in inganno, in quanto l'indice potrebbe globalmente aumentare anche a fronte di una drastica riduzione di uno dei tre valori, la cui riduzione potrebbe avere un alto impatto sull'economia globale dello stabilimento. Basti pensare a cosa accadrebbe se vi fosse un deciso incremento della capacità produttiva ma con un calo nella qualità del prodotto fornito al cliente. Come riportato dallo stesso Williamson, del resto, l'indice non è stato concepito per un confronto tra diversi

macchinari o, perfino, tra diversi stabilimenti, ma può essere utilizzato per confrontare beni simili, in condizioni operative simili e con simile *output* di produzione.

2.4.2 Analisi dell'indice di OEE % per lo stabilimento di Michelin Torino

L'indice di OEE % viene monitorato e discusso giornalmente al fine di valutare le *performance* produttive dello stabilimento. Sebbene il sito stesso, inoltre, sia composto da diverse aree, brevemente descritte nel capitolo 1.4, gli studi svolti si sono soffermati solo sulla linea calandra, in quanto essa risulta essere la linea a maggior impatto sul fatturato annuo, deve sottostare a ritmi maggiormente stringenti di produzione e su tale linea vengono effettuate il 70% delle ore totali annuali di intervento di manutenzione.

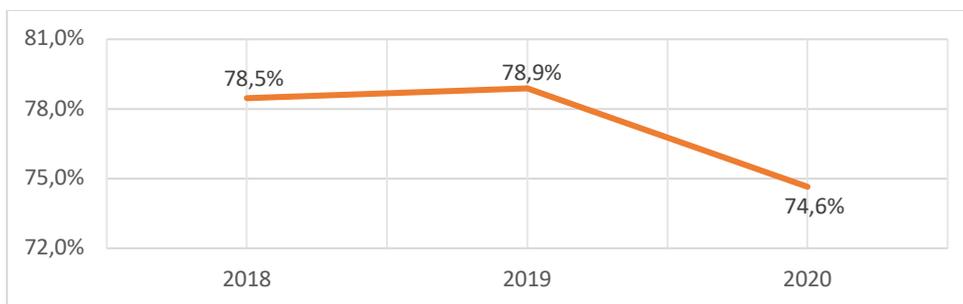


Figura 24 Andamento dell'indice di OEE per la linea calandra nel triennio 2018-2020

Nella seguente Figura 25 è riportato l'andamento storico delle cause di perdita di OEE % per lo stesso intervallo temporale, le quali assumono valori piuttosto costanti nel tempo. Le cause sono codificate secondo le direttive aziendali che forniscono indicazioni circa il calcolo dell'indice.

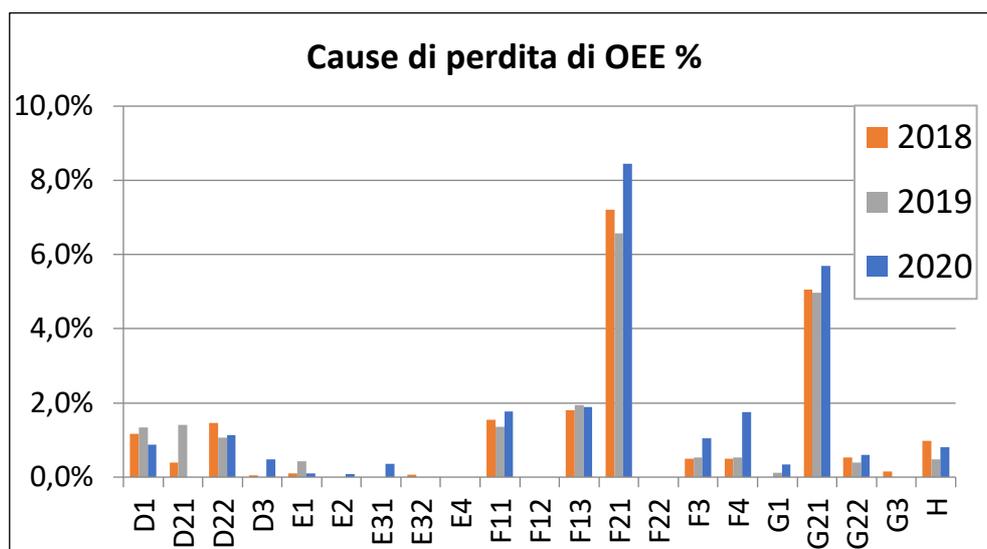


Figura 25 Andamento storico delle cause di perdita OEE % nel triennio 2018-2020 per lo stabilimento in esame

Di seguito una spiegazione sintetica delle sigle con maggior impatto sulla perdita *OEE %*:

- D1: Arresto pianificato per operazioni di *tuning* sui macchinari (es: preparazione per operazione di test su nuovi prodotti);
- D21: Arresto pianificato per interventi di modifica dei macchinari;
- D22: Arresto pianificato per interventi di manutenzione preventiva;
- F11: Perdita di produzione per mancato rispetto degli *standard* di qualità del prodotto;
- F13: Arresto non pianificato per guasto macchina;
- F21: Arresto (pianificato o meno) per cambio produzione (es: tempo di modifica e/o regolazione dei beni di produzione);
- G21: Perdita di produzione per rallentamento calcolata come differenza fra il tempo-ciclo nominale e reale di produzione;
- H: Perdita di produzione, per mancato rispetto degli *standard* di qualità del prodotto, registrata come scarto in linea. La differenza con il codice F11 sta nel fatto che il prodotto non continua il normale ciclo di produzione per essere poi sottoposto ad una classifica, bensì viene scartato lungo la linea di produzione in una fase intermedia.

Le cause preponderanti di impatto sull'indice, dunque, sono legate ai cambi serie (F21), ai fermi macchina causa guasto (F13), mancata qualità del prodotto (F11 e H) e rallentamenti (G21). Gli studi successivi, dunque, si sono concentrati sul fornire una stima della perdita di *OEE %* non soltanto per cause ma anche per aree di impianto, al fine di poterne valutare la relativa criticità. Sebbene la causa F21 costituisca la causa preponderante di perdita *OEE %*, del resto, esso è principalmente legato al tempo tecno-manuale necessario agli operatori ad effettuare le opportune sostituzioni sulla linea. Pertanto, non essendo possibile fornire delle migliorie mediante tecniche di monitoraggio sullo stato di salute dei macchinari, tale impatto è stato trascurato.

2.4.3 Analisi dei dati di guasto

Al fine di valutare l'impatto sull'indice *OEE %* delle fermate per guasto macchina, le quali rientrano nella famiglia delle fermate non pianificate, sono stati estratti tre diverse tipologie di dati:

- Interventi di manutenzione a guasto registrati su *software CMMS* di reparto;
- Tempo di arresto linea imputato manualmente, dai conduttori della linea stessa, su *software* di gestione della produzione *e-ZP*;
- Dati di monitoraggio giornaliero del personale responsabile dell'area Manutenzione, il quale imputa le fermate di linea alle diverse cause possibili, una delle quali è il fermo linea per riparazione macchina (*depannage*).

I dati effettivamente utilizzati per l'analisi sono stati quelli di monitoraggio giornaliero, ciò poiché:

- I dati presenti su *software CMMS* non riportano dei dati fedeli circa il tempo di intervento, come precedentemente spiegato nel paragrafo 2.3.2, nello specifico nella descrizione della risposta data alla domanda n. 21. Inoltre, non è nemmeno possibile comprendere se il guasto abbia effettivamente interrotto la linea (qualora il guasto non influisse sul fermo linea, non vi sarebbero effetti sull'indice *OEE %*).
- I dati da *software e-ZP*, essendo imputati manualmente dai conduttori della linea, non sempre riportano dei dati fedeli circa la causa di arresto.

I dati di monitoraggio giornaliero, di fatto, sono costruiti confrontando i dati *CMMS* con quelli *e-ZP*, e possono anche coinvolgere lo specifico manutentore di reparto che ha svolto l'intervento qualora vi siano dubbi ulteriori circa le cause del guasto. Di seguito, in Figura 26, sono riportati i dati di monitoraggio giornaliero nel periodo Gen 2018 – Set 2020. Il tempo di cambio serie risulta essere, come in Figura 24, la causa preponderante di perdita *performance* sulla linea, per un totale di 50000 ore complessive sul triennio. A differenza dei dati annuali sull'indice *OEE %*, è possibile notare come siano evidenziati anche gli impatti dovuti alla mancata applicazione del corretto modo operatorio. In tale computo sono inclusi tutti gli eventi di perdita produzione dovuti al non-rispetto, da parte del personale di reparto, degli *standard* previsti per la conduzione della linea, il cui effetto risulta confrontabile con la mancata produzione per prodotto non conforme.

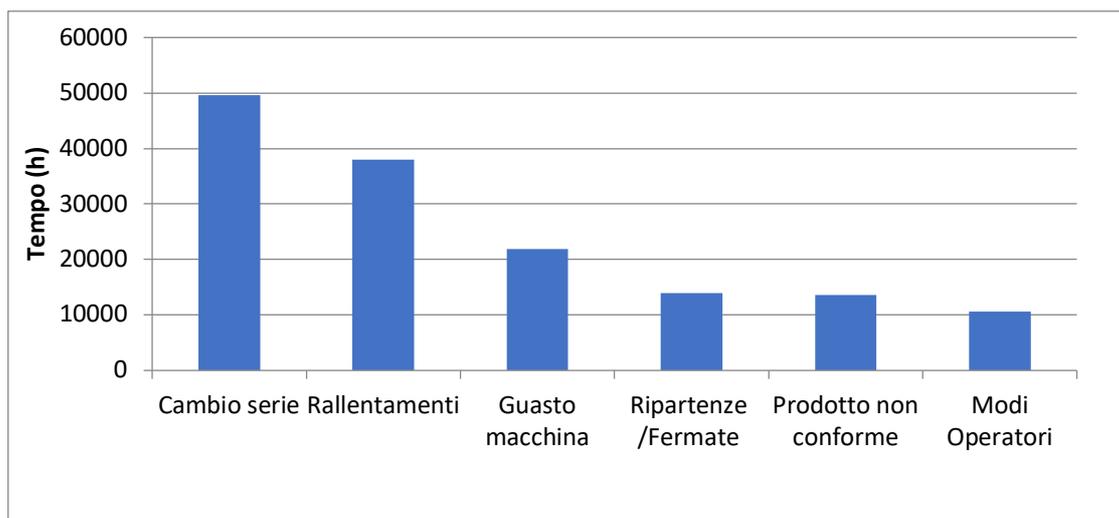


Figura 26 Tempo totale, da Gen 2018 a Set 2020, di mancata produzione sulla linea calandra. Dati estratti dal monitoraggio giornaliero effettuato dal personale di reparto.

In Figura 27, riportata di seguito, è presentato un diagramma di Pareto⁷ relativo alle ore di mancata produzione suddiviso per aree funzionali della linea di produzione. È possibile leggere i dati relativi alle 11 aree individuate più una voce relativa ai fermi linea dovute a cause non univocamente attribuibili ad un'area specifica (*différentes*).

⁷ Il diagramma di Pareto, che porta il nome dell'omonimo economista italiano, è costruito ordinando le cause che hanno incidenza su di un determinato fenomeno in ordine decrescente, e rappresentandole mediante delle barre. Inoltre, è presente sullo stesso grafico una curva, detta curva cumulativa, la quale somma il peso % delle singole cause sul fenomeno [63].

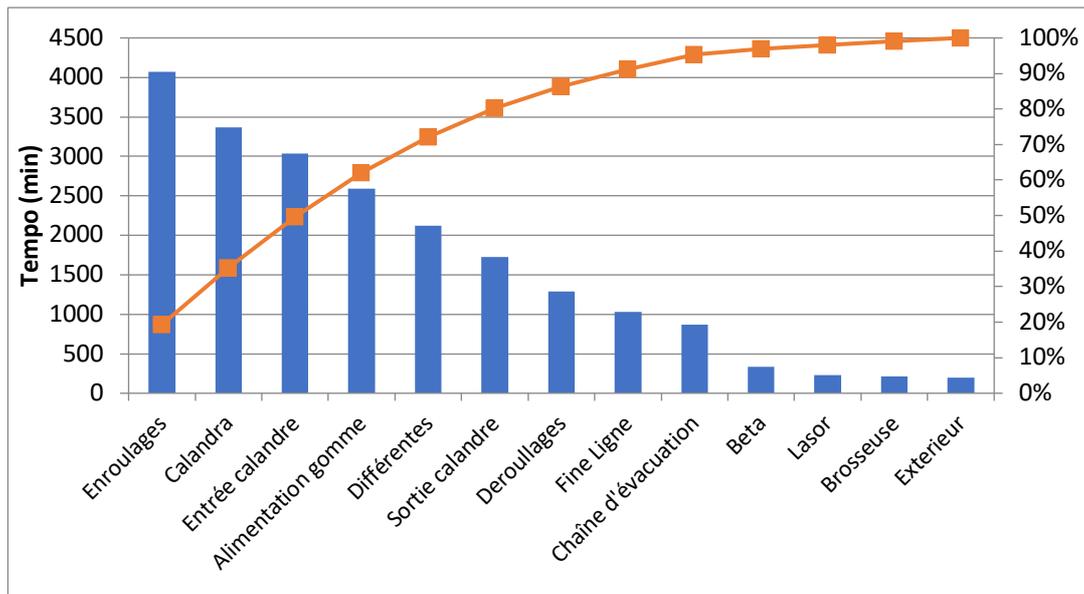


Figura 27 Diagramma di Pareto sul tempo di mancata produzione, nel periodo Gen 2018 – Set 2020 suddiviso per aree funzionali della linea. I dati derivano dal monitoraggio giornaliero effettuato dal personale di reparto.

I risultati individuano 5 aree critiche per il fermo impianto, le quali causano l'80% di fermate non pianificate per guasto macchina per un totale di circa 300 ore nel triennio. Di seguito il valore di perdita di *OEE* % stimato:

Area	Perdita OEE stimata per fermo macchina %
Avvolgimento	0,36%
Calandra	0,30%
Alimentazione gomma	0,23%
Ingresso calandra	0,27%
Uscita calandra	0,15%

Figura 28 Perdita di *OEE* % stimata per fermo macchina per le aree funzionali della linea calandra.

2.4.4 Analisi dei dati di rallentamento

Per quanto concerne i dati storici relativi alla perdita di *OEE* % causa rallentamenti, sono stati estratti i dati di produzione dal *software e-ZP*. Analogamente a quanto avviene per i dati di guasto, su tale sistema i conduttori della linea attribuiscono manualmente la causa di rallentamento mediante una serie di codici di rallentamento previsti, identificati univocamente mediante un numero (es: codice 55 relativo a PL1 in difetto tecnico). I dati estratti sono relativi allo stesso periodo (Gen 2018 – Set 2020), permettendo di estrarre il tempo totale di rallentamento per un totale di 95 codici di rallentamento previsti. Di questi, solo 22 codici sono responsabili dell'80% del tempo totale di rallentamento. Nella seguente Figura 29, sono presentati i dati relativi solo a tale aliquota di codici di rallentamento, con il corrispettivo valore di mancato *OEE* % stimato.

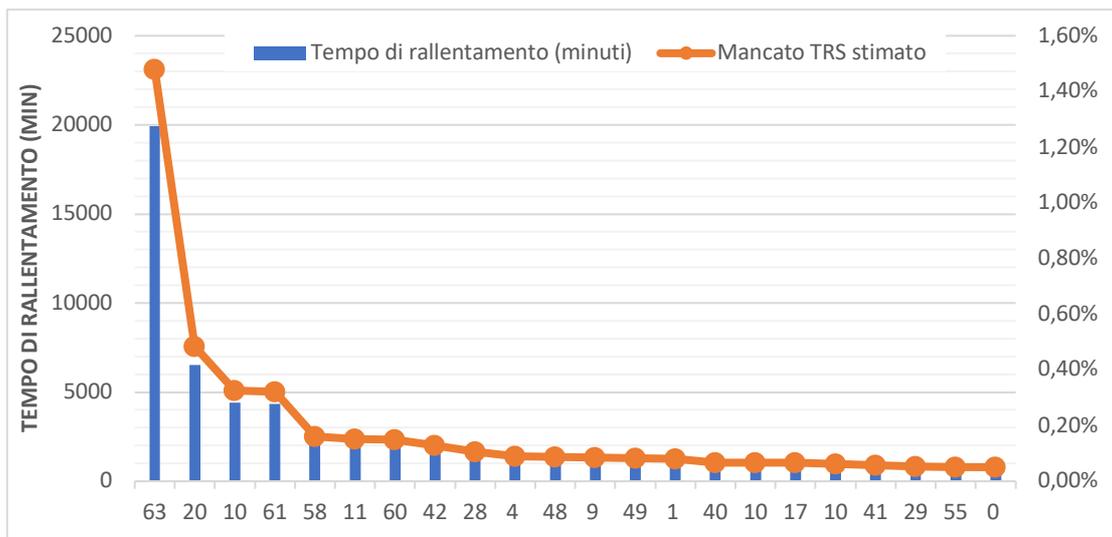


Figura 29 Cause di rallentamento elencate per codice imputato dai conduttori di linea. I dati sono complessivi nel periodo Gen 2018 – Set 2020 e sono stati estratti dal software di produzione e-ZP del reparto.

A tal punto, è stato necessario attribuire ogni causa di rallentamento alla relativa area di reparto. Tale attività è stata realizzata mediante una tabella di imputazione presentata ai conduttori della linea, nella quale era stata suddivisa la linea stessa secondo il medesimo criterio utilizzato nei dati di monitoraggio giornaliero. Come è possibile visualizzare in Figura 30 di seguito, nella quale è presentata la tabella utilizzata, molti codici non erano strettamente legati ad un guasto o malfunzionamento del macchinario, e, pertanto, sono segnati nella colonna *exterieur*. Inoltre, per molti codici non era possibile attribuire univocamente la causa del rallentamento ad una specifica area della linea. In via cautelativa nei confronti dei risultati presentati, l'attribuzione della perdita di *OEE %* stimata è stata effettuata solo qualora il codice di rallentamento fosse stato univocamente attribuibile ad un'unica area della linea.

	Derouillages	Entrée calandre	Calandra	Sortie calandre	Beta	Enroulages	Chaîne d'évacuation	Fine ligne	Alimentation gomme	Brosseuse	Lasor	Exterieur
63												■
20	■											
10												■
61												■
58	■	■	■	■		■		■	■			■
11						■						■
60						■						■
42												■
28												■
4						■						■
48						■			■			■
9							■					■
49						■			■			■
1						■						■
40				■								■
10										■		■
17	■											■
10								■				■
41												■
29												■
55									■			■
0						■						■

	Attribuibile ad una sola area
	Attribuibile a diverse aree

Figura 30 Tabella di imputazione dei codici di rallentamento per aree della linea di produzione.

Attraverso tale metodo, è stato possibile attribuire, all'area di *Avvolgimento (Enroulages)* 3 codici rallentamento, mentre all'area *Deroulages* sono stati attribuiti due codici, tra cui il secondo codice per impatto sull'indice *OEE %*. Un caso particolare rappresenta l'area di Alimentazione Gomma, per la quale è stato possibile attribuire un solo codice contro tre codici non univocamente attribuibili solo ai macchinari (colonna *exterieur*). Di seguito una tabella riassuntiva dei valori di mancato *OEE %* stimato.

Area	Perdita OEE stimata per rallentamento %
Avvolgimento	0,32%
Calandra	0%
Alimentazione gomma	0,05%
Ingresso calandra	0%
Uscita calandra	0%

Figura 31 Valore di mancato *OEE %* stimato per le varie aree funzionali della linea calandra causa rallentamenti

2.4.5 Impatto della non conformità del prodotto e analisi tempo ciclo di produzione

In ultima analisi, è stato valutato l'impatto di ogni area funzionale della linea calandra sul mancato rispetto degli *standard* di qualità previsti, e, quindi, sull'indice di *OEE %*. Come specificato nel paragrafo 2.4.2, tali impatti rientrano nel computo dell'indice mediante due valori, identificati con le sigle H e F11. Di seguito sono riportate le modalità attraverso le quali la mancata conformità del prodotto vengono monitorate nel reparto:

- Nel caso di scarto in linea (H), il prodotto viene scartato prima ancora di essere avvolto. Il *software* di gestione della produzione *e-ZP* registra l'orario e peso dell'avvenuto scarto;
- Nel caso di mancata conformità del prodotto avvolto (F11), esso è etichettato mediante un codice che ne classifica la qualità costituito da una lettera ed un numero (es: D10). La lettera individua la tipologia di prodotto (es: i prodotti di tipo D possono essere spediti direttamente al cliente senza ulteriori rilavorazioni) mentre il numero identifica la tipologia di difetto che caratterizza la bobina di prodotto (es: con il numero 10 sono identificati i grumi di gomma presenti sul tessuto).

In entrambi i casi, non è possibile comprendere se la causa del difetto sia dovuto ad un problema di livello macchina o altro (es: mancata applicazione del corretto modo operatorio da parte del personale di produzione). Dunque, non è stato possibile quantificare l'impatto di ogni area di produzione sull'indice *OEE %*. Si è proceduto, dunque, alla compilazione di una tabella di imputazione che potesse dare una stima semi-quantitativa, mediante l'utilizzo dei tre colori rosso giallo e verde, dell'impatto delle aree di produzione sulla qualità del prodotto avvolto.

DIFETTO / MACCHINA	Derouillages	Entrée calandre	Calandra	Sortie calandre	Beta	Enroulages	Chaîne d'évacuation	Fine ligne	Alimentation gomme	Brosseuse	Lasor
GRUMI	Verde	Verde	Giallo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Rosso	Verde	Verde
MANCANZA CALANDRAGGIO	Verde	Giallo	Rosso	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Rosso	Verde	Verde
PESO NON CONFORME	Giallo	Verde	Rosso	Verde	Giallo	Verde	Verde	Verde	Rosso	Verde	Verde
SCARTO FILO / APERTURA	Giallo	Giallo	Rosso	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
PEZZA DECENTRATA	Rosso	Verde	Giallo	Giallo	Verde	Rosso	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
COLLANTE A CRUDO	Verde	Verde	Rosso	Giallo	Verde	Verde	Verde	Verde	Rosso	Giallo	Verde
MANCANZA POLITENATRICE	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Rosso	Verde	Verde	Verde	Verde

Figura 32 Tabella di imputazione delle aree di linea di produzione sulle principali cause di mancata qualità prodotto avvolto. Verde: nessun impatto, Giallo: medio impatto, Rosso: alto impatto.

Come è possibile leggere in Figura 32, le aree di maggior impatto sono l'area Calandra, la quale ha un forte impatto su 4 codici difetto e medio impatto su due codici, e l'area di Alimentazione Gomma, con alto impatto su 4 codici.

Infine, è stata svolta un'indagine sui tempi ciclo di lavorazione, per individuare le aree maggiormente influenti sul tempo ciclo di produzione di una unità di prodotto finito. Il tempo di avvolgimento di una bobina è calcolabile attraverso la seguente formula:

$$t_{ciclo\ di\ produzione}(s) = \frac{l(m)}{v\left(\frac{m}{s}\right)} \quad (2.3)$$

dove

l : lunghezza del tessuto da avvolgere nella bobina di prodotto finito

v : velocità di avanzamento del tessuto lungo la linea di produzione

L'unico modo per variare tale valore consiste nel variare v , in quanto l è fissata dagli *standard* previsti sul prodotto. I limiti su v sono i seguenti:

- Presso l'area di *Enroulages*, nella quale il prodotto finito viene avvolto in bobine, è previsto un tempo tecno-manuale minimo al fine dell'espletamento della lavorazione. Il tempo ciclo di produzione, dunque, è limitato inferiormente dal valore *tecnico manuale minimo enroulages*, dunque il valore di v non può essere aumentato oltre tale soglia. Inoltre, se:

$$t_{tecnico\ manuale\ minimo\ enroulages} < t_{ciclo\ di\ produzione} < t_{tecnico\ manuale\ medio\ enroulages}$$

si crea una situazione critica nella quale qualsiasi ritardo, da parte degli operatori, si trasforma in un ritardo sul tempo ciclo di produzione. Nel mese di settembre 2020, è stato misurato che il 26% della produzione in m^2 è rientrata in tale casistica.

- Nella restante casistica, dunque per circa il 74% della produzione in m^2 , l'area di *enroulages* non presenta criticità per la produzione. Tuttavia, un aumento di v porta all'insorgenza di mancata qualità da parte del prodotto, ad esempio l'insorgenza di grumi di gomma sul tessuto.

In definitiva, l'analisi dei tempi ciclo porta a concludere come vi siano dei limiti produttivi strettamente legati alla non conformità del prodotto. Sebbene non sia possibile visualizzare tale impatto nell'andamento dell'indice di *OEE %*, un aumento della velocità di avanzamento della linea porterebbe direttamente, qualora l'area di *enroulages* non fosse critica come sopra descritto, ad un aumento della produzione.

2.5 Sintesi dei risultati

Nel corso del presente capitolo, è stata fornita una descrizione complessiva dello stabilimento di Michelin Torino, cercando di evidenziare, attraverso indici e grafici, quali fossero le criticità dello stabilimento, soprattutto in ambito manutentivo. Tale attività è stata effettuata per individuare, in primo luogo, una tipologia di lavoro che potesse risultare efficace al miglioramento delle *performance* di stabilimento, ed in secondo luogo al fine di stabilire quali dovessero essere le metodologie e le tecnologie di riferimento.

Innanzitutto, è stato presentato il sito di produzione nel suo insieme, fornendo una breve panoramica delle diverse aree di produzione e delle tipologie di prodotti lavorati. Negli studi successivi, dunque, ci si è concentrati maggiormente sulla linea calandra dello stabilimento, in quanto responsabile della maggiore fetta di produzione e fatturato annuo, sulla quale l'area di manutenzione converge il 70% del tempo di intervento totale annuale.

Successivamente, è stato presentato il questionario di valutazione delle attività di manutenzione *SKF CNA*, il quale si basa sul modello *SKF Asset Efficiency Optimization*. Tale analisi ha evidenziato una buona conoscenza, da parte del settore manutenzione, dei beni presenti nel sito, una totale tracciabilità degli interventi effettuati mediante registrazione su *software* di supporto alle attività di manutenzione (*CMMS*), un ottimo controllo dei costi complessivi annuali ed un livello di disponibilità tecnica in linea con la media di settore. D'altronde, è stata appurata la mancanza di un monitoraggio di tempi e costi sul singolo intervento, che non permette di valutare l'efficacia dei piani di manutenzione esistenti; i quali sono risultati prevalentemente costituiti da interventi di manutenzione preventiva o ispettiva. È possibile, dunque, cogliere la mancanza di innovative tecniche di diagnostica dello stato di salute dei macchinari, supportate e giustificate da un'analisi di criticità che ne potesse oggettivare l'implementazione.

Il passo successivo, dunque, è stata la realizzazione di un'analisi di criticità basata sullo studio dell'andamento storico dell'indice di *OEE %*, e le relative cause di perdita di *performance* della linea calandra, nel periodo Gen 2018 - Set 2020. L'analisi dei dati di guasto ha permesso di individuare le cinque aree responsabili di una perdita complessiva di *OEE %* di 1,31 % causa interventi di manutenzione non pianificati. Inoltre, l'analisi dei dati storici di rallentamento ha permesso di stimare un'ulteriore perdita di *OEE %*, causa guasto o malfunzionamento macchinari, pari a 0,4 %. Infine, è stato evidenziato come i fenomeni di mancato rispetto degli *standard* di qualità previsti da parte del prodotto, oltre ad inficiare l'indice di *OEE %* per circa due punti percentuali, portino anche a dei limiti sulla velocità di avanzamento del prodotto e, dunque, alla capacità produttiva della linea stessa.

In conclusione, l'area critica individuata è stata quella di Alimentazione Gomma, con una perdita di *OEE %* stimata, causa guasto, pari a 0,23 %. La mancanza di tecniche di manutenzione predittiva, inoltre, fanno sì che l'eventuale guasto, ed il relativo tempo di diagnosi, creino dei fermi di produzione imprevedibili che possono inficiare sulla consegna del prodotto finito entro i tempi previsti.

Le successive attività svolte hanno dunque riguardato l'installazione di accelerometri sui macchinari ad albero rotante presenti nell'area al fine di implementare tecniche di *Condition monitoring* basate sull'analisi vibrazionale.

3. Tecnologie e metodi per acquisizione e analisi dei dati vibrazionali in ottica di Industria 4.0

La tipologia di studi proposti, al fine di migliorare la strategia manutentiva e di controllo qualità della linea di produzione, hanno riguardato l'acquisizione e successiva elaborazione di dati vibrazionali e di processo provenienti dai macchinari ad albero rotante dell'area di Alimentazione Gomma del sito. Nel presente capitolo, verranno dunque illustrate:

- Le metodologie, attualmente indicate dalla letteratura di riferimento, per la misura e analisi dei fenomeni vibratorii di macchinari ad albero rotante;
- Le tecnologie per la misura ed acquisizione dati;
- L'architettura di immagazzinamento ed elaborazione dati *SKF @plitude* per il controllo remoto.

Al fine di fornire un utile riferimento su quanto svolto nelle specifiche attività di tesi, verrà posta una particolare attenzione sulla strumentazione e tecnologie impiegate.

3.1 La misura delle vibrazioni

La vibrazione meccanica è un fenomeno caratterizzato dall'oscillazione di un corpo intorno ad una posizione di riferimento. Tale fenomeno può essere:

- Stocastico, qualora esso fosse casuale (*random*) e potesse essere descritto solamente mediante leggi statistiche;
- Deterministico, qualora esso fosse generato da specifiche sollecitazioni meccaniche, ad esempio lo sbilanciamento di un albero rotante o l'ingranamento di due ruote dentate.

La condizione vibrazionale di un corpo, in genere, è il risultato della somma dei fenomeni sopra citati, sebbene si possano trattare i fenomeni stocastici come disturbi aggiuntivi ai fenomeni deterministici [38].

La misura delle vibrazioni è impiegata, in ambito industriale, per il monitoraggio dello stato di salute dei macchinari e diagnostica dei guasti. Nella sua forma più semplice, essa può essere impiegata per misurare il livello globale di vibrazione dei macchinari nel tempo, al fine di generare un segnale di avvertimento qualora tale valore esca al di fuori dei valori accettati. Maggiori informazioni possono però essere dedotte effettuando uno studio in frequenza del dato vibrazionale acquisito, il quale può fornire ulteriori informazioni circa la causa dell'aumento del livello vibrazionale e può, dunque, segnalare una condizione di guasto incipiente [39].

La misura e l'analisi dei fenomeni vibratorii di macchinari ad albero rotante è regolata da specifiche norme di riferimento, tra cui la norma ISO 20816, la quale fornisce indicazioni specifiche su come la misura delle vibrazioni, effettuata su macchinari come turbine a gas o vapore, turbocompressori o motoriduttori, possa fornire un efficace indice descrittivo delle condizioni di salute dei macchinari stessi.

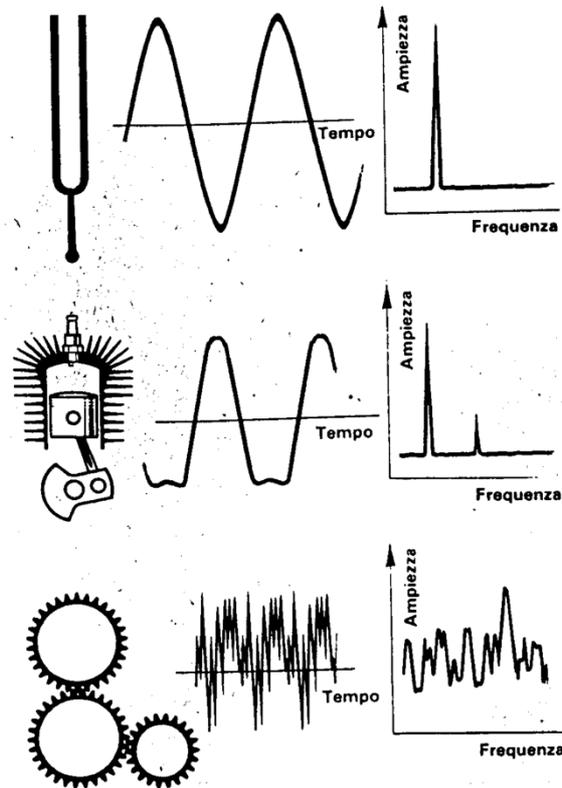


Figura 33 Fenomeni vibrazionali per diverse tipologie di corpi. Fonte: Fichera G., Misura delle vibrazioni.

La misura della vibrazione può essere effettuata mediante la misura di tre differenti grandezze [40]:

- Spostamento (μm);
- Velocità ($\frac{mm}{s}$);
- Accelerazione ($\frac{mm}{s^2}$);

La scelta della grandezza misurata dipende sostanzialmente dall'intervallo in frequenza in cui è possibile misurare il fenomeno desiderato. È possibile estrarre, inoltre, degli indicatori sintetici, utili qualora si volesse monitorare nel tempo il livello di vibrazione del corpo:

- picco ($0 - p$), equivalente al valore massimo della grandezza misurata;
- picco – picco (*peak-to-peak*), equivalente alla differenza tra il valore massimo e minimo della grandezza misurata;
- valor medio efficace (*Root Mean Square* o *RMS*), ovvero il valore medio quadratico del segnale. Per definizione, per un segnale continuo, esso è calcolato come segue:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (3.1)$$

dove:

$x(t)$: grandezza misurata in funzione del tempo

T : periodo del segnale

Il valore RMS di un segnale armonico sinusoidale puro, ovvero costituito da un unico contributo in frequenza, assume il seguente valore:

$$x(t) = x_p \sin(\omega t)$$

$$RMS = \frac{x_p}{\sqrt{2}} \quad (3.2)$$

dove:

x_p : valore di picco della grandezza misurata

Il valore RMS è direttamente collegato al contenuto energetico della vibrazione [40] e la stessa norma ISO 20816 descrive la misura in velocità RMS come la misura maggiormente impiegata per caratterizzare la risposta vibrazionale di un gran numero di tipologie di macchinari.

- valore medio (*average*), misurato come:

$$Avg = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (3.3)$$

dove:

$x(t)$: grandezza misurata in funzione del tempo

T : periodo del segnale

In Figura 34, di seguito, sono illustrati graficamente i vari valori elencati per un segnale sinusoidale puro e per un segnale a diversi contributi in frequenza.

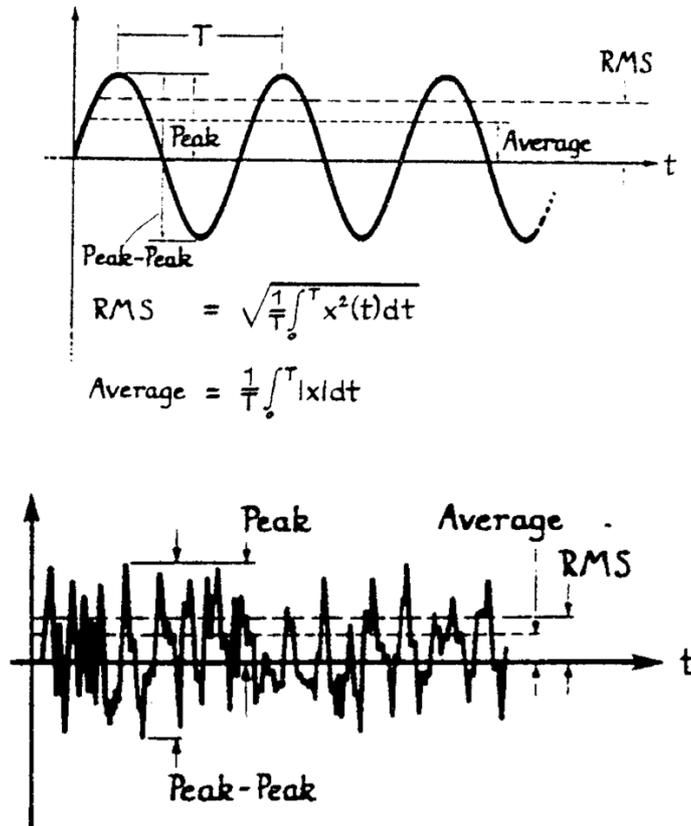
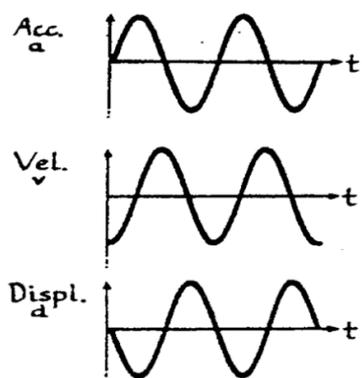


Figura 34 Rappresentazione delle diverse misure in vibrazione per un segnale sinusoidale puro ed un segnale a diversi contributi in frequenza. Fonte: Fichera G., Misura delle vibrazioni.

Per quanto concerne la scelta della grandezza fisica da misurare, come già accennato precedentemente, essa è legata al *range* di frequenza nel quale è possibile visualizzare i fenomeni vibratorii desiderati. La stessa norma ISO specifica di utilizzare un intervallo sufficientemente ampio al fine di non perdere contributi vibrazionali in alta frequenza. Per quanto concerne la conversione fra due diverse misure in vibrazione, essa è possibile solo nel caso di segnale sinusoidale puro, ovvero con un singolo contributo in frequenza. Con riferimento ad un segnale sinusoidale puro, le relazioni fra le varie ampiezze sono le seguenti [38]:



$$a(t) = a_{peak} \sin(\omega t) \quad (3.4)$$

$$v_{peak} = \frac{a_{peak}}{\omega} = \frac{a_{peak}}{2\pi f}$$

$$d_{peak} = \frac{a_{peak}}{\omega^2} = \frac{a_{peak}}{4\pi^2 f^2}$$

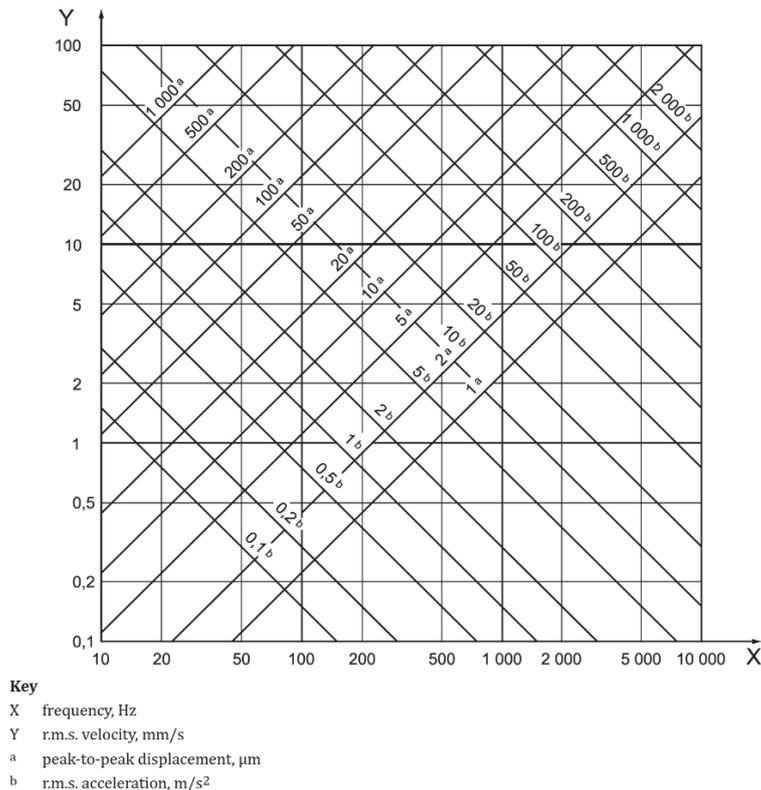


Figura 35 Legame fra misure in spostamento, velocità ed accelerazione per una misura in vibrazione sinusoidale pura. Fonte: ISO 20816-11:2016, Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration.

A titolo esplicativo, in Figura 35 è presentato un diagramma con il quale è possibile convertire agevolmente una misura in velocità (mm/s rms) in accelerazione ($\text{mm/s}^2 \text{ rms}$) e spostamento ($\mu\text{m PtP}$). Il grafico mostra chiaramente come, mantenendo un valore misurato in velocità costante all'aumentare della frequenza di riferimento, il relativo valore di spostamento diminuisce mentre il valore in accelerazione aumenta. Ciò spiega l'impiego di misure in spostamento qualora si volessero studiare fenomeni vibratorii in bassa frequenza ($<10 \text{ Hz}$) e l'impiego di misure in accelerazione per lo studio di fenomeni vibratorii in alta frequenza ($>1 \text{ kHz}$).

In Figura 36, di seguito, è riportato un confronto tra due misure, in velocità ed in accelerazione, realizzate su un medesimo punto di misura su di un macchinario presente nello stabilimento di Michelin Torino, nel dominio delle frequenze. Le misure in velocità in bassa frequenza ($<100 \text{ Hz}$) sono messe maggiormente in rilievo rispetto a quanto misurato in accelerazione (vedi picco a 24 Hz). Nell'intervallo intermedio di frequenze, i picchi sono misurati in maniera analoga sia in accelerazione che in velocità (vedi picchi a 300 e 409 Hz). Infine, per frequenze $>500 \text{ Hz}$, i picchi in velocità sono attenuati rispetto ai relativi picchi in accelerazione.

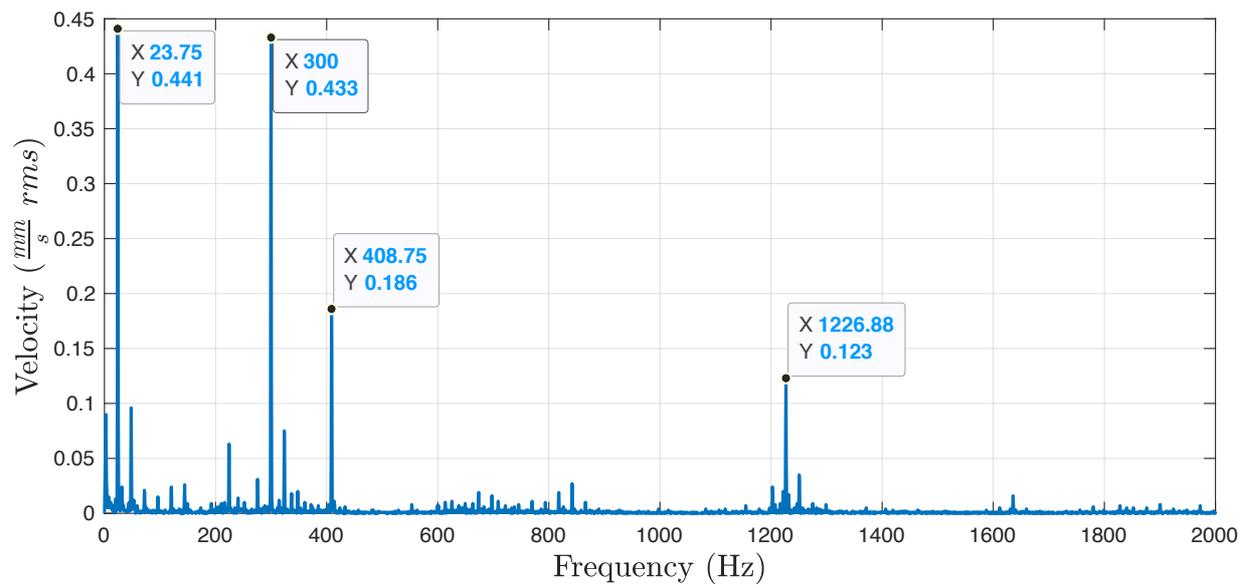
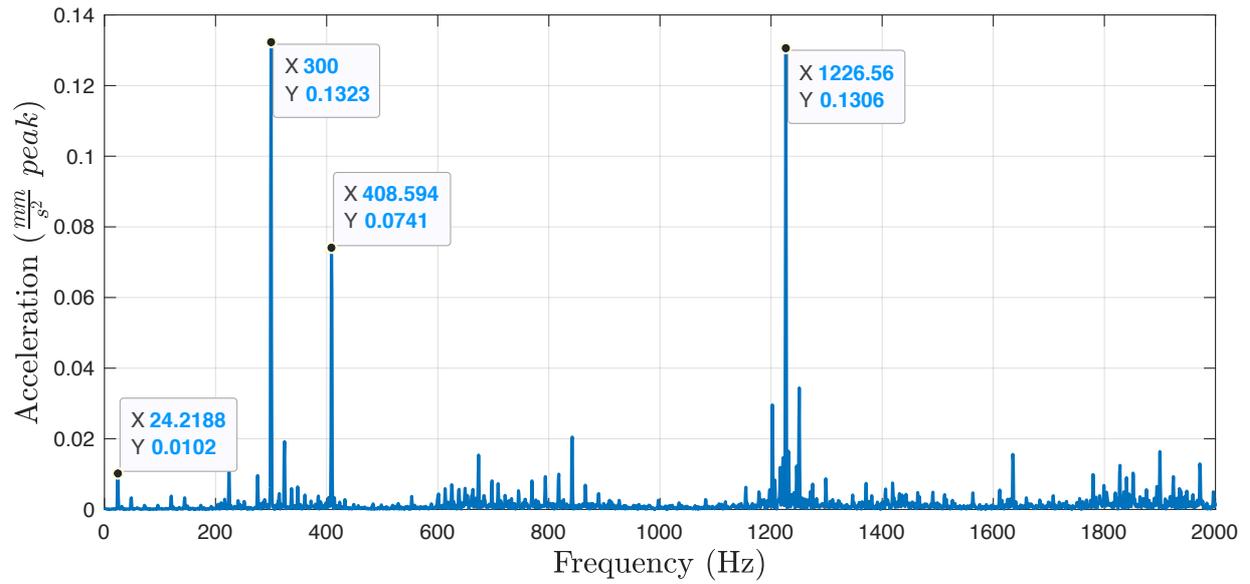


Figura 36 Confronto fra misure in velocità ed accelerazione effettuate su un medesimo punto di misura su di un macchinario dell'area Alimentazione Gomma di Michelin Torino.

3.2 Il monitoraggio stato di salute mediante analisi delle vibrazioni

L'acquisizione ed analisi delle misure in vibrazione rappresenta una tecnica di *Condition Monitoring* applicata a macchinari ad albero rotante (pompe, ventilatori, turbine, riduttori ecc.) in quanto una condizione di guasto incipiente causa fenomeni vibratorii a specifiche frequenze. È chiaro, allora, che i metodi di analisi vibrazionale devono necessariamente prevedere la conoscenza del macchinario in esame, al fine di poter effettuare delle diagnosi basate sulla letteratura di riferimento che spieghi il perché un dato guasto (es: disallineamento) comporta la presenza di determinati contenuti in frequenza. Di seguito, si elencano i principali segnali provenienti da macchinari ad albero rotante dovuti a malfunzionamenti. Quanto riportato di seguito ha come riferimento il testo *Vibration-based Condition Monitoring* di R.B. Randall [41]. In primo luogo, verranno elencati i fenomeni a bassa frequenza (*Low Shaft Orders*) per poi approfondire le vibrazioni provenienti dalle ruote dentate e cuscinetti.

- Sbilanciamento: esso è presente quando il centro di massa dell'albero non coincide con il centro di rotazione dello stesso. Principalmente, esso provoca vibrazioni in senso radiale, soprattutto quando l'albero è sufficientemente corto, mentre provoca deboli vibrazioni in senso assiale. Se il sistema di supporto (cuscinetti) è sufficientemente rigido, l'ampiezza di vibrazione scala con il quadrato della velocità di rotazione, mostrando un andamento parabolico. In generale, però, l'ampiezza di vibrazione misurata in senso orizzontale o verticale è diversa, e ciò a causa della diversa rigidità dei cuscinetti nei due sensi. La frequenza caratteristica del difetto è pari a:

$$f = f_{ss} \quad (3.5)$$

dove f_{ss} rappresenta la frequenza di rotazione dell'albero (*shaft speed*). In generale, in una condizione di sbilanciamento sono anche presenti le armoniche di tale contributo (2x, 3x ecc.) .

- Disallineamento: presente in condizioni in cui l'albero è supportato mediante tre o più supporti, ad esempio nel caso di accoppiamento tra due macchine mediante giunto di trasmissione. Il disallineamento può essere di tipo parallelo, quando gli assi dei due alberi collegati sono paralleli ma non coincidenti, o angolare, nel caso in cui gli assi formano un angolo. In una condizione reale, entrambe le componenti sono presenti, pertanto il disallineamento complessivo è somma di un disallineamento parallelo ed angolare. Una condizione di disallineamento tende ad essere evidenziata dalle armoniche della f_{ss} , in particolar modo essa tende a produrre un alto contributo nella 2x.
- Albero danneggiato: causata dalla presenza di una cricca sull'albero. A seconda del comportamento dell'apertura della cricca durante la rotazione dell'albero, essa può causare contributi diversi sulla vibrazione misurata. Nel caso di una cricca permanentemente aperta, essa causa dei picchi con frequenza f_{ss} e 2X, rendendo di fatto difficile la distinzione rispetto alle condizioni di sbilanciamento e/o disallineamento. Un utile riferimento, allora, può essere il monitoraggio anche della fase del segnale, in quanto l'orientamento della cricca è in genere diverso rispetto a quella dello sbilanciamento, pertanto può avvenire una diminuzione del contributo in ampiezza alla f_{ss} soprattutto nelle fasi di prima propagazione della cricca. Nel caso di una cricca che si apre e chiude

periodicamente durante la rotazione (*breathing crack*) a causa della forza peso, essa causa un netto contributo alla 3x la f_{ss} , rendendo più facile la diagnosi rispetto a quanto sopra.

3.2.1 Vibrazioni provenienti dall'ingranamento di ruote dentate

L'ingranamento reale di due ruote dentate provoca fenomeni vibratori causati dalla presenza di un errore di trasmissione (*meshing error* o *transmission error*) causato dalla deformazione del dente sotto carico. Nella fase iniziale di ingranamento di una coppia di denti, allora, la coppia adiacente che supporta il carico si trova in una condizione di deformazione, causando un errore geometrico nell'ingranamento dei denti che stanno entrando in presa. Tale condizione può essere minimizzata mediante l'asportazione di materiale nell'area del dente prossima al raggio di testa (*tip relief*), smussando il profilo e rendendolo maggiormente propenso ad un ingranamento ottimale e silenzioso. Poiché la deformazione del dente dipende dal carico trasmesso, del resto, il *tip relief* può essere ottimale solo per una specifica condizione di carico. L'inevitabile urto nella fase iniziale di ingranamento porta ad una vibrazione ad una frequenza caratteristica, detta frequenza di ingranamento f_{gw} , pari a:

$$f_{gw} = z * f_{ss} \quad (3.6)$$

Dove z è il numero di denti della ruota. Tale contributo, inoltre, è modulato dalla f_{ss} , ovvero si osserva in genere un picco alla f_{gw} (e armoniche) con bande laterali alla $\pm f_{ss}$ (ed armoniche). È abbastanza facile osservare, del resto, che la frequenza di ingranamento non varia a prescindere che essa sia misurata sulla ruota motrice o condotta, a causa della dipendenza del rapporto di trasmissione dal numero di denti stesso delle ruote. In generale, è possibile osservare anche le armoniche della frequenza di ingranamento (1x, 2x e così via) sebbene l'ampiezza delle stesse vada via via diminuendo, soprattutto nel caso di ruote dentate elicoidali. A titolo esplicativo, di seguito è presentato lo spettro di una misura in velocità effettuata in Michelin Torino su di un riduttore di giri. È possibile visualizzare la frequenza di ingranamento e le sue armoniche ($f_{ss} = 24.9 \text{ Hz}$, $z = 17$). In particolare, è ben visibile la modulazione sulla 3x.

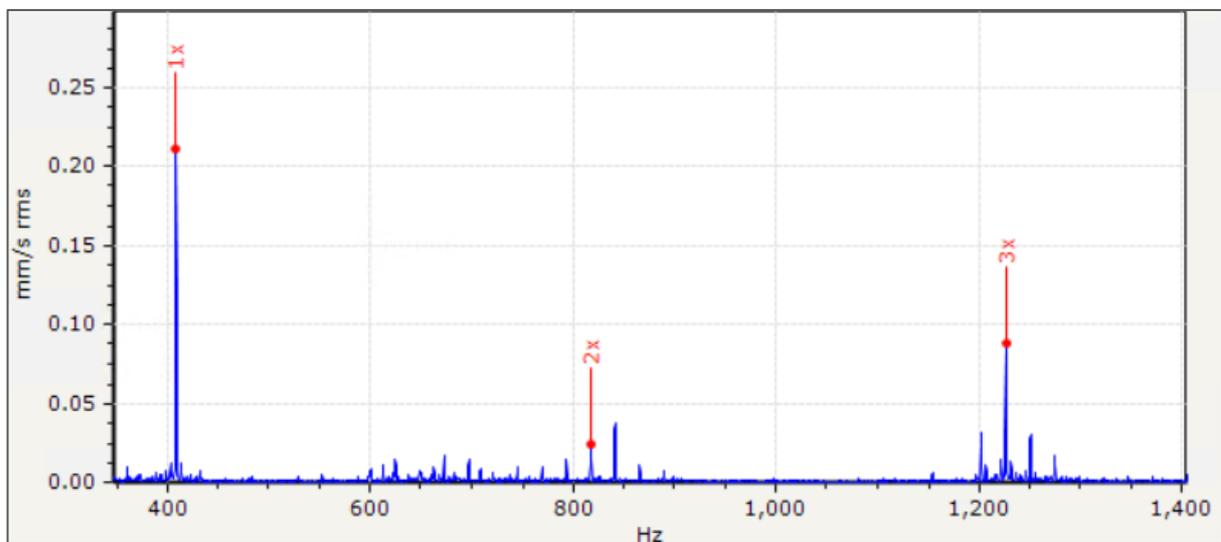


Figura 37 Frequenza di ingranamento misurata su di un riduttore del sito di Michelin Torino e sue armoniche.

Il profilo dei fianchi del dente, inoltre, si usura durante l'utilizzo, a causa dello strisciamento specifico che sussiste tra i fianchi di una coppia di denti, il quale si annulla solo in corrispondenza del raggio primitivo delle due ruote. Una condizione di inizio usura del fianco dei denti provoca un incremento nel contenuto a $2x$ la f_{gw} , mentre la condizione di usura avanzata provoca un incremento di tutte le armoniche nonché la fondamentale.

Una situazione di danneggiamento distribuito, come la condizione di usura citata di sopra, provoca, in genere, un incremento delle prime armoniche della frequenza di ingranamento e relative bande laterali, portando ad uno spettro caratterizzato da pochi picchi ben evidenziati. Nel caso di difetto localizzato, invece, come una cricca nel dente o usura del fianco per *pitting*, esso provoca un'eccitazione sul dente di tipo impulsivo, portando all'apparizione di contenuti in frequenza anche nelle alte armoniche della frequenza di ingranamento (Figura 38).

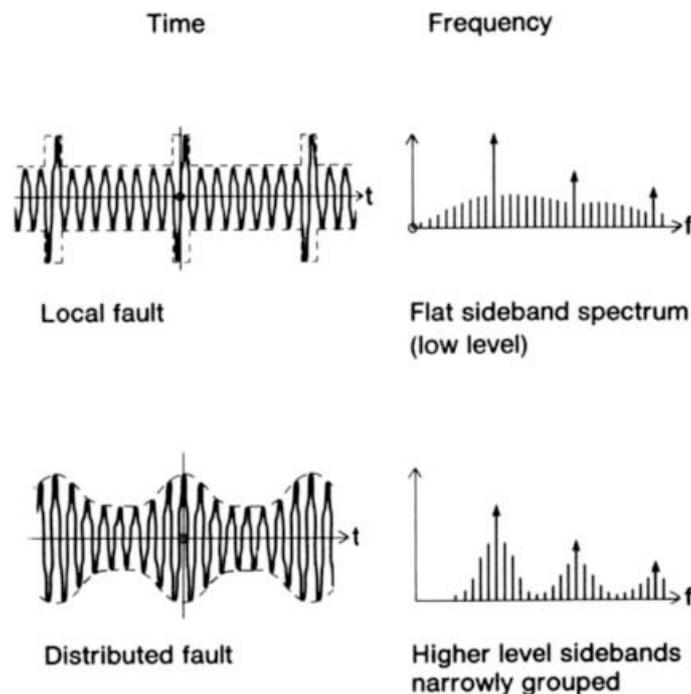


Figura 38 Spettro in presenza di difetto localizzato o distribuito su ruote dentate. Fonte: Brüel & Kjær.

3.2.2 Vibrazioni provenienti dai cuscinetti a rotolamento

Come afferma Randall, la rottura di un cuscinetto è una delle cause più comuni per il guasto di un macchinario ad albero rotante, pertanto il monitoraggio delle loro condizioni diventa fondamentale nelle applicazioni di *Condition monitoring*. Le cause principali di guasto di un cuscinetto sono [42]:

- Errata lubrificazione o lubrificante contaminato;
- Carichi superiori a quelli previsti;
- Errato montaggio;
- Errata lavorazione sede su albero o carcassa;

- Passaggio di corrente attraverso il cuscinetto;
- Ecc.

Inizialmente, il danneggiamento del cuscinetto porta alla formazione di una cricca immediatamente sotto la superficie del cuscinetto, la quale poi propaga fino a giungere in superficie. In tale condizione, l'elemento volvente che transita sulla cricca provoca l'asportazione di materiale ed un conseguente aumento delle dimensioni della cricca stessa, in un fenomeno denominato *spalling*. Quando ciò accade, il segnale di vibrazione acquisito è di tipo impulsivo, il che provoca un eccitamento di una vasta serie di armoniche delle frequenze di risonanza della struttura che sussiste tra il cuscinetto e l'elemento di misura [40]. Studiando la cinematica del cuscinetto assumendo un contatto di puro rotolamento tra il corpo volvente e le piste, è possibile ricavare le frequenze caratteristiche di danneggiamento sono le seguenti:

$$\text{Frequenza di passaggio delle sfere sulla pista esterna} \quad BPF0 = \frac{n f_{ss}}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\phi \right) \quad (3.7)$$

$$\text{Frequenza di passaggio delle sfere sulla pista interna} \quad BRFI = \frac{n f_{ss}}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos\phi \right) \quad (3.8)$$

$$\text{Frequenza di gabbia} \quad FTF = \frac{f_{ss}}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\phi \right) \quad (3.9)$$

$$\text{Frequenza di rotazione del corpo volvente} \quad BSF = \frac{D}{2d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos\phi \right)^2 \right) \quad (3.10)$$

Con f_{ss} la velocità di rotazione dell'albero, n il numero di copri volventi, d e D rispettivamente il diametro interno ed esterno del cuscinetto e ϕ l'angolo di contatto (l'angolo di carico nel piano radiale). Soprattutto nelle fasi iniziali di danneggiamento, il contributo in frequenza derivante da esso tende ad essere coperto nello spettro dagli altri fattori misurati. Pertanto, è di uso comune lo studio dei danneggiamenti dei cuscinetti nelle alte frequenze, dove i contributi sono maggiormente visibili in quanto non mascherati, ed è pertanto possibile diagnosticare una condizione di guasto in una fase ancora prematura. Una delle metodologie attuabili in tal senso è quella proposta da SKF, denominata Inviluppo in Accelerazione [42]. Essa consiste in un filtro passa-banda che isola i contributi ad alte frequenze, sommando le armoniche delle frequenze fondamentali di difetto. Il risultato del metodo è uno spettro in cui l'ampiezza di vibrazione è misurata in $g E$ (dove E sta per *Envelope*) ed i picchi riportati sono ottenuti come somma di tutte le armoniche individuate nell'alto range di frequenza studiato. Le tecniche di Inviluppo si classificano in base al tipo di filtro impiegato, ovvero in base al range di frequenza studiato. Va da sé che tanto più ci si sposta nelle alte frequenze e tanto più si vuole anticipare il guasto, mentre tanto più si usa un basso filtro e tanto più esso sarà efficace in condizione di guasto incipiente, nella quale il segnale inizia ad essere preponderante anche nelle basse frequenze. In Tabella 4 di seguito sono riportati i 4 filtri previsti e relative bande.

Filtro	Frequenza
1	5 Hz -100 Hz
2	50 Hz-1 kHz
3	500 Hz -10 kHz
4	5 kHz - 40 kHz

Tabella 4 Filtri previsti dal metodo di Inviluppo SKF e relative bande in frequenza.

3.2.3 Impostazione soglie di allarme

Qualora si volesse automatizzare il processo di analisi dei dati, soprattutto in presenza di un numero elevato di punti di misura monitorati, è possibile impostare delle soglie di allarme automatiche che possano avvertire in caso di superamento dei valori rispetto a quelli ammessi. Per fare ciò, è necessario selezionare il tipo di valore da mettere sotto controllo, il quale può corrispondere all'ampiezza della vibrazione ad una data frequenza oppure può abbracciare un *range* maggiormente ampio di frequenze fino a coincidere con l'intero intervallo misurato. Va da sé che quanto più si utilizza un intervallo ristretto e tanto più si ha conoscenza degli spettri del macchinario osservato, e pertanto si vuole concentrare lo studio su uno specifico fenomeno (es: il monitoraggio di una frequenza di ingranamento piuttosto che una frequenza di difetto dei cuscinetti).

È possibile, ad esempio, confrontare il livello di vibrazione del macchinario con delle tabelle *standard* date dalla normativa 20816, le quali classificano le tipologie di macchinario in funzione della taglia e del tipo di montaggio e riportano delle soglie di vibrazione globale entro la quale la vibrazione è considerata "accettabile" o meno [40].

In alternativa, è possibile monitorare il *trend* di vibrazione, ovvero l'andamento nel tempo del livello vibrazionale, per verificare se ci siano o meno delle derive nel tempo. Il valore di *trend* misurato corrisponde con l'*overall*, ovvero l'energia di vibrazione contenuta all'interno della banda in frequenza selezionata. Su tale *trend* è possibile impostare delle soglie di preallarme ed allarme, basate sui dati storici osservati oppure dei valori presi da letteratura in funzione del tipo di macchina e taglia.

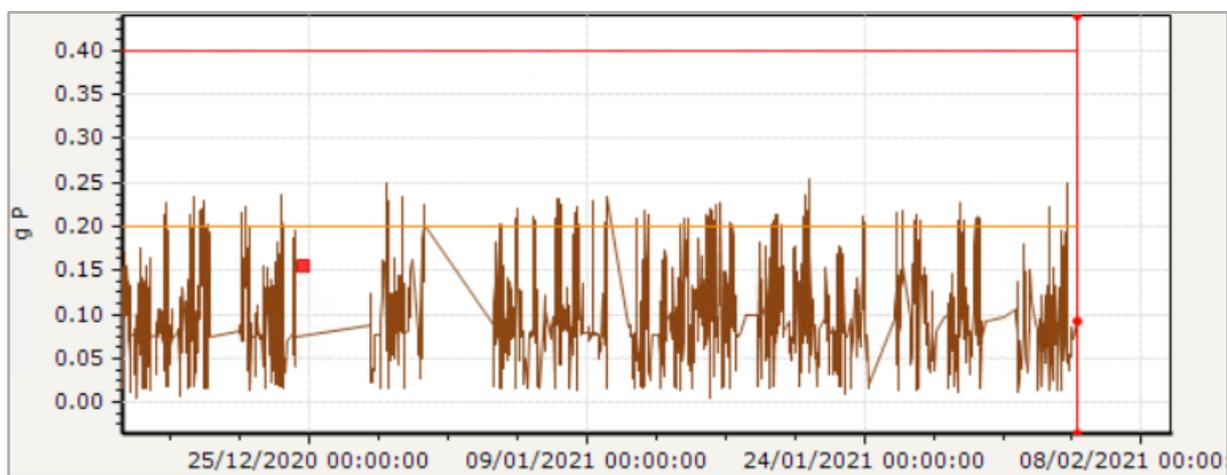


Figura 39 Esempio del monitoraggio nel tempo del valore di Overall su di un punto di misura di Michelin Torino

Le soglie di allarme, qualora impostate su di una base dati storica acquisita sul macchinario, possono anche essere espresse in funzione di un dato di velocità o di processo (es: carico assorbito). In tal caso, è prima necessario studiare i dati sperimentali per osservare come la condizione di velocità o di processo vada a cambiare il livello di vibrazione del macchinario.

In aggiunta, al fine di scongiurare picchi nel *trend* causati dall'apparizione di contenuti in frequenza non strettamente legati ai fenomeni fisici osservati (es: temporaneo aumento delle vibrazioni di fondo provenienti dal basamento del macchinario dovute al passaggio di un organo

di movimentazione) è possibile utilizzare strumenti come la media esponenziale, la quale registra il valore di *overall* nell'istante t_i in funzione del valore realmente misurato $m_i =$ ed in funzione del valore registrato $x_{i-1} =$ all'istante t_{i-1} come segue:

$$x_i = m_i(1 - k) + x_{i-1} k \quad (3.11)$$

Dove k è il valore esponenziale scelto.

3.3 L'accelerometro piezoelettrico: principio di funzionamento e tipologie costruttive

Gli accelerometri piezoelettrici sono dispositivi largamente impiegati per la misura delle vibrazioni. Il loro vasto impiego è giustificato da un comportamento lineare per un *range* dinamico elevato, mantenimento di accuratezza al variare delle condizioni ambientali di temperatura e umidità, e assenza di parti mobili, il che le rende particolarmente durature. Inoltre, essendo sensori attivi, non richiedono di un'alimentazione esterna. Tuttavia, non è possibile misurare accelerazioni statiche o con contenuto in frequenza <1 Hz [39].

In Figura 40, di seguito, è illustrato il modello *SDOF* (*Single Degree Of Freedom*) massa-molla-smorzatore che descrive il principio di funzionamento del dispositivo [43]. Con $y(t)$ è indicato lo spostamento della base del sistema a cui è collegata la massa m , con $x(t)$ è indicato lo spostamento della massa m rispetto alla condizione di equilibrio statico.

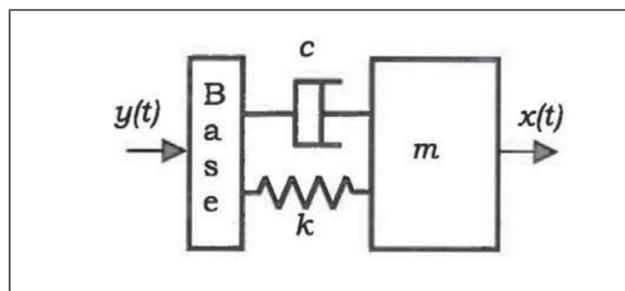


Figura 40 Modello SDOF massa-molla-smorzatore. Fonte: Fasana A., Marchesiello S (2006), *Meccanica delle vibrazioni*, CLUT.

Studiando il diagramma di corpo libero del sistema, è possibile scrivere l'equazione del moto:

$$z = x - y \quad (3.12)$$

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = -m\ddot{y} \quad (3.13)$$

La quale è un'equazione differenziale del secondo ordine, lineare, a coefficienti costanti e non omogenea. Volendo studiare la risposta in frequenza del sistema sottoposto all'eccitazione armonica $y(t) = y_0 e^{j\Omega t}$, la soluzione del sistema sarà del tipo $z(t) = Z e^{j\Omega t} = A e^{j(\Omega t + \varphi)}$, in quanto Z è, in genere, un numero complesso con ampiezza A e fase φ . Sostituendo la soluzione nell'equazione del moto si ricava:

$$A = y_0 \frac{r^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad \tan(\varphi) = -\frac{2\xi r}{1-r^2} \quad (3.14)$$

con:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

pulsazione naturale o propria del sistema

$$c_{cr} = 2\sqrt{km}$$

coefficiente di smorzamento critico

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}}$$

fattore di smorzamento del sistema. Il valore di ξ indica se il sistema è *sottosmorzato* ($\xi < 1$), *sovrasmorzato* ($\xi > 1$) o *criticamente smorzato* ($\xi = 1$).

$$r = \frac{\Omega}{\omega_n}$$

parametro adimensionale di frequenza

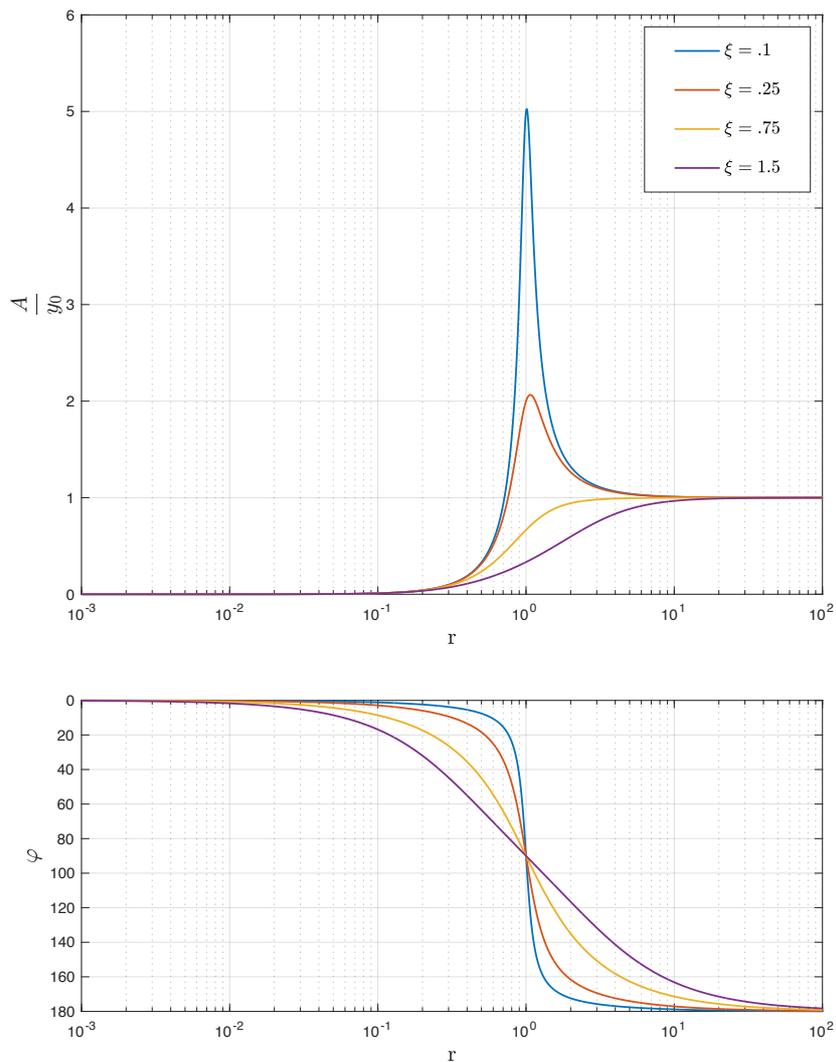


Figura 41 FRF del sistema

In Figura 41, si riporta dunque la funzione di risposta in frequenza (*FRF*) del sistema in funzione dei termini di guadagno in ampiezza $\frac{A}{y_0}$ e ritardo di fase $\phi = -\varphi = \text{atan}\left(\frac{2\xi r}{1-r^2}\right)$.

Per $r \gg 1$ (*area sismografica*) $A \rightarrow y_0$, ovvero lo spostamento relativo ha stessa ampiezza dello spostamento della base ma in *controfase* ($\varphi \rightarrow 180^\circ$). Lo spostamento assoluto della massa m tende dunque a 0.

Per $r \ll 1$, $A \rightarrow \frac{\Omega^2 y_0}{\omega_0^2}$, ovvero l'ampiezza in accelerazione relativa è proporzionale all'ampiezza di accelerazione della base, mentre il ritardo di fase φ tende a 0. Gli accelerometri sono dispositivi che lavorano in tale condizione, pertanto, per avere una banda passante sufficientemente elevata, sono caratterizzati da un valore di ω_0 elevato. Tuttavia, ciò rende difficoltosa la misura di A , la quale scala con il quadrato della pulsazione propria del sistema [38]. È possibile ovviare a tale problema riformulando l'equazione del moto del sistema:

$$m\ddot{z} + m\dot{z} = -kz - c\dot{z} \quad (3.15)$$

Dove il termine a destra dell'uguale rappresenta la risultante R della forza elastica e viscosa agente sulla massa m . Pertanto, poiché per $r \ll 1$ l'accelerazione relativa della massa m è trascurabile, è possibile scrivere:

$$\ddot{y} = \frac{-kz - c\dot{z}}{m} - \ddot{z} \approx \frac{F}{m} \quad (3.16)$$

A tal punto, sfruttando le capacità di materiali piezoelettrici, è possibile convertire la forza F in una differenza di potenziale. La piezoelettricità, infatti, è la capacità di un materiale di tradurre una deformazione meccanica in una tensione elettrica indotta (effetto piezoelettrico diretto) e viceversa (effetto piezoelettrico inverso).

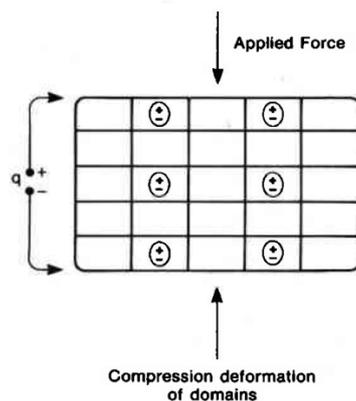


Figura 42 Schema semplificato dell'effetto piezoelettrico diretto in un materiale piezo-ceramico. Fonte: Brüel & Kjær (1978), *Piezoelectric accelerometer and vibration handbook*, Brüel & Kjær, Denmark.

Come mostrato in Figura 42, l'applicazione di una forza di compressione sul cristallo porta alla nascita di cariche elettriche di segno opposto sulle due facce di applicazione del carico,

pertanto la sensibilità di un sensore piezoelettrico è misurata in pC/N . La formazione di due cariche elettriche di segno opposto porta il cristallo a comportarsi come un condensatore, pertanto vale la seguente relazione:

$$Q = d_{ij}F = CV \quad (3.17)$$

con

d_{ij}	Costante dielettrica
$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$	Capacità del condensatore
$\epsilon_{0,r}$	Costante dielettrica. 0 = vuoto , r = cristallo
S	Area delle due facce
d	Distanza fra le facce

In definitiva, è possibile scrivere:

$$V = d_{ij} \frac{F}{C} = d_{ij} \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon_r S} m\ddot{y} \quad (3.18)$$

Qualora si considerasse come *output* la differenza di potenziale piezoelettrica, la sensibilità dello strumento è misurata in mV/ms^{-2} oppure mV/g . Le soluzioni costruttive attualmente in commercio si classificano anche in funzione della tipologia di sollecitazione alla quale il cristallo è sottoposto. Tra di esse si ricorda la tipologia a compressione, compressione inversa, a taglio, flessionale. Le capacità piezoelettriche del cristallo, del resto, limitano inferiormente la sensibilità del sistema, il quale in genere non riesce a misurare segnali dinamici con contenuto in frequenza inferiore a 0.1 Hz.

3.3.1 Accelerometro ICP (Integrated Circuit Piezoelectric)⁸

Essendo la sensibilità di un sensore piezoelettrico misurabile in pC/ms^{-2} , è necessario inserire nella catena di misura un preamplificatore del segnale che lo renda leggibile da un qualsiasi dispositivo di acquisizione. Vi sono, tuttavia, delle limitazioni sulla lunghezza del cavo che collega il dispositivo al preamplificatore, al fine di avere un rapporto segnale-rumore sufficientemente elevato⁹. Ciò ha portato alla nascita di accelerometri ICP®, nei quali il condizionamento del segnale viene realizzato da un circuito elettronico presente all'interno del corpo stesso del dispositivo. In uscita dallo strumento, dunque, è possibile leggere un segnale in tensione normalizzato (es 10 V cc). La catena di misura può presentare un alimentatore

⁸ Il marchio ICP è registrato da PCB Electronics Inc.

⁹ Il *signal-to-noise ratio* può essere misurato come $SNR_{dB} = \log_{10} \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$ dove P è la potenza elettrica del segnale.

esterno oppure è direttamente possibile alimentare l'accelerometro tramite il dispositivo di acquisizione. In Figura 43 è presentato uno schema delle due differenti catene di misura.

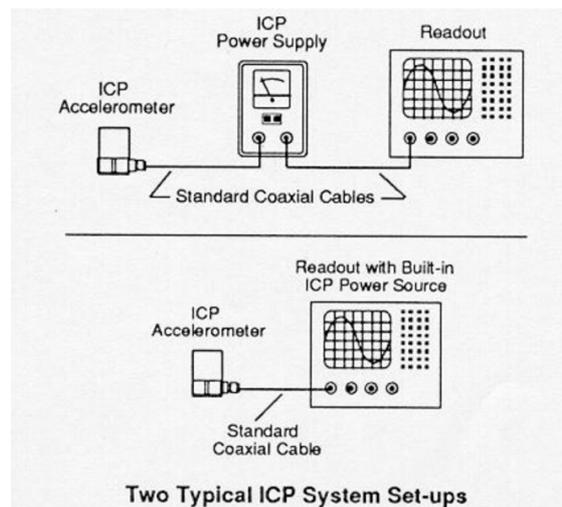


Figura 43 Catena di misura con alimentatore esterno o con alimentazione proveniente dal dispositivo di acquisizione. Fonte: Fichera G., *Misura delle vibrazioni*.

In Figura 44 è illustrato lo schema costruttivo di un accelerometro *ICP*® con sollecitazione a compressione con collegamento mediante cavo co-assiale [44].

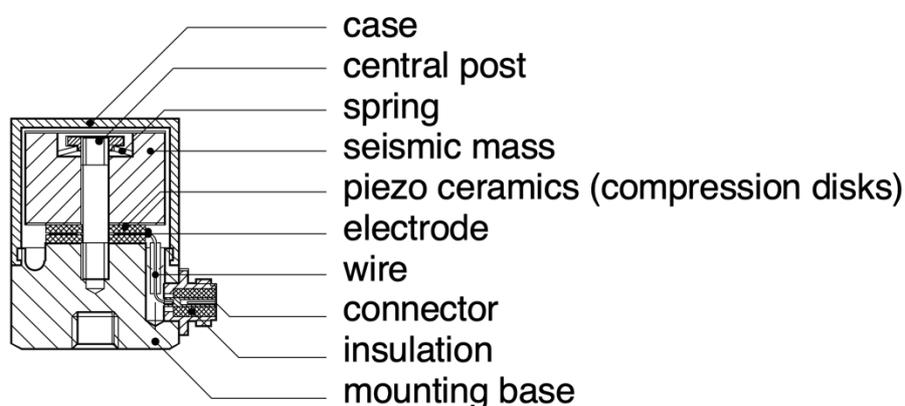


Figura 44 Schema costruttivo di un accelerometro *ICP*® a compressione. Fonte: MMF (2001), *Piezoelectric Accelerometers, Theory and Application*

3.3.2 Tipologia di montaggio

La caratteristica di un accelerometro, oltre ad essere inficiata dalle capacità piezoelettriche del cristallo, le quali non consentono la lettura di accelerazioni statiche (in genere inferiori a 0.1Hz), è influenzato anche dalla tipologia di montaggio attraverso il quale esso viene collegato al macchinario che si vuole monitorare. In Figura 45, di seguito, sono illustrate le diverse tipologie di accoppiamento al macchinario, la quali influiscono sulla caratteristica dinamica del dispositivo andando, di fatto, a limitarne il campo utile di frequenza [45].

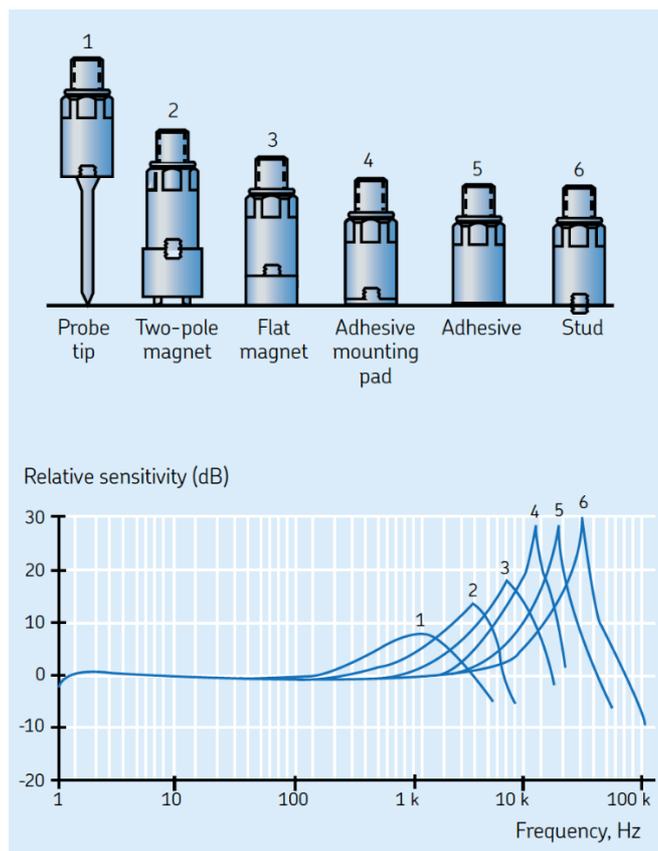


Figura 45 *Differenti tipologie di montaggio di un accelerometro. Fonte: SKF Vibration Sensors Catalog.*

3.4 Cenni sui sistemi di acquisizione dati

Un sistema di acquisizione dati, o *data acquisition system (DAQ)*, è composto da tutti quei dispositivi volti alla misura, elaborazione e immagazzinamento di dati di diversa natura (vibrazione, pressione, temperatura) provenienti dal campo.

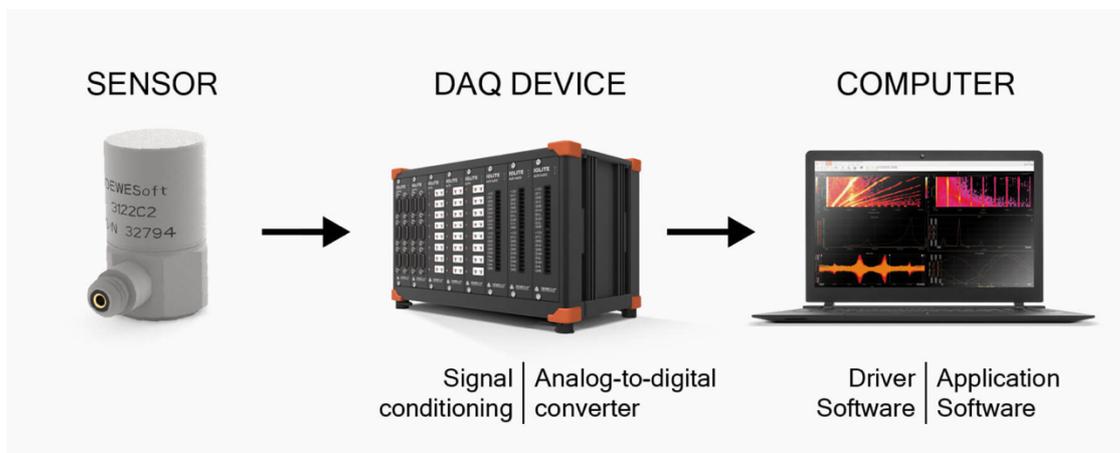


Figura 46 *Elementi di un sistema DAQ moderno. Fonte: Dewesoft.*

Il primo elemento della catena di misura è il trasduttore, il quale permette la misura del fenomeno fisico di interesse e relativa conversione della grandezza misurata in un segnale elettrico. Come già anticipato, le operazioni di amplificazione, filtraggio e standardizzazione del segnale sono demandate ad un dispositivo di condizionamento, il quale può essere integrato nel trasduttore stesso o può essere esterno ad esso (vedi cap. 3.3).

3.4.1 La conversione analogico-digitale

Il dispositivo di acquisizione *DAQ* si occupa da interfaccia tra il campo e l'esterno, acquisendo il segnale elettrico in ingresso e convertendolo in un segnale digitale da poter poi elaborare.

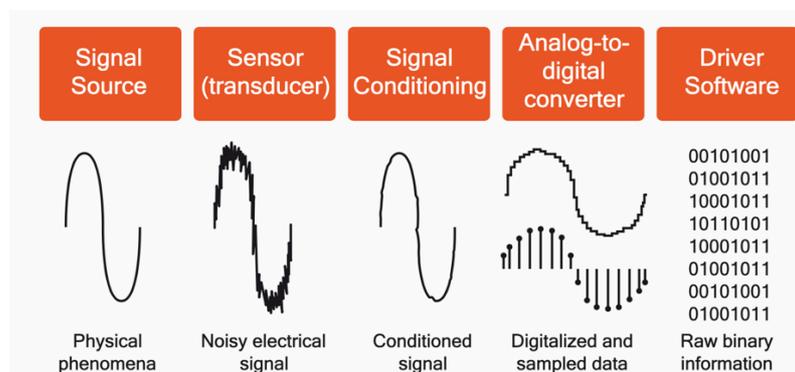


Figura 47 Conversione analogico digitale. Fonte: Dewesoft

Il processo di conversione analogico-digitale (*A/D Conversion* o *ADC*) prevede le tre fasi di [46]:

- **Campionamento:** discretizzazione del segnale analogico nel tempo. Viene effettuato mediante il dispositivo *sample and hold (S/H)*, il quale campiona il segnale analogico e lo mantiene per un determinato intervallo di tempo. L'intervallo temporale fra due campioni è detto tempo di campionamento (*sampling rate*), altrimenti conosciuto mediante il suo valore inverso, detto frequenza di campionamento f_s . Per rispettare il teorema del campionamento di Nyquist-Shannon:

$$f_s \geq 2 * f_{max} \quad (3.19)$$

Dove f_{max} rappresenta il massimo contenuto in frequenza che si vuole acquisire. Ciò comporta un filtraggio del segnale mediante filtri *anti-aliasing (AAF)* previo campionamento, i quali, di fatto, si comportano come dei filtri passa-basso; tagliando il contenuto in frequenza del segnale superiore ad un dato valore.

Ad esempio, la casa produttrice Dewesoft indica un valore di f_s pari a [47]:

$$f_s = 2.56 * f_{max} \quad (3.20)$$

ovvero:

$$f_{max} = 40\% * f_s$$

- Quantizzazione: discretizzazione del segnale nel suo campo di variazione. Definito FS il fondoscala del segnale, l'intervallo I di variazione vale:

$$I = [0; FS] \quad \text{Campo di misura unipolare}$$

$$I = [-FS; FS] \quad \text{Campo di misura bipolare}$$

Definito n il numero di intervalli di quantizzazione, l'ampiezza e di ciascun intervallo varrà:

$$e = \frac{FS}{N} \quad \text{Campo di misura unipolare}$$

$$e = 2 * \frac{FS}{N} \quad \text{Campo di misura bipolare}$$

E l'errore massimo di quantizzazione sarà pari a $\pm e/2$. Una volta fissato il valore di FS (ad esempio il convertitore riceve un segnale elettrico normalizzato in tensione di 0-10 V), un valore maggiore di N comporta una maggiore risoluzione nella quantizzazione del segnale (Figura 48). Dato m il numero di bit con cui opera il convertitore, il valore di N vale:

$$N = 2^m - 1$$

- Codifica: traduzione del valore in una parola (word) in codice binario. Il numero di bit dipende dall'architettura del convertitore. Secondo il produttore Dewesoft, ad oggi i dispositivi di bassa fascia, atti alla conversione del segnale, operano su 12 bit; mentre un valore di 16 bit è considerato sufficiente per un'acquisizione ad accuratezza discreta. Per l'acquisizione di segnali dinamici, invece, lo *standard* è pari a 24 bit.

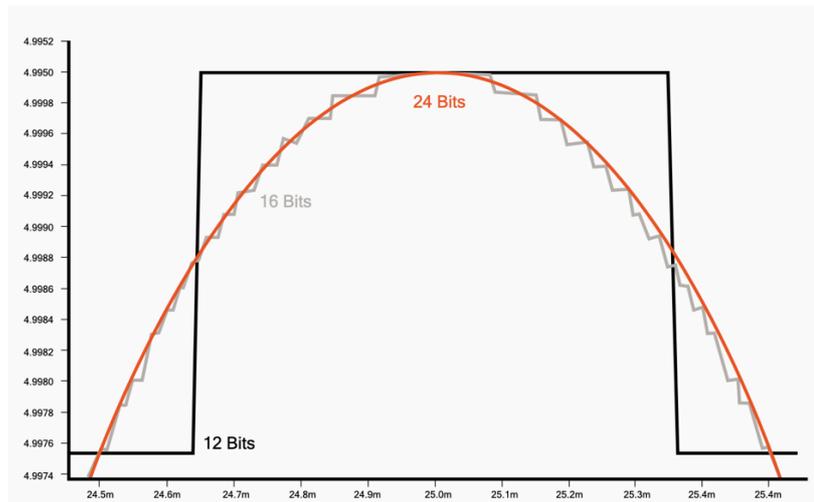


Figura 48 Confronto nella risoluzione di un segnale a 12,16,24 bit. Fonte: Dewesoft.

3.4.2 I sistemi di acquisizione dati, principali caratteristiche

La scelta di un moderno dispositivo di acquisizione dati dipende, in buona sostanza, dalle seguenti caratteristiche [48]:

- Numero di segnali da acquisire;
- Tipologia di segnali da acquisire;
- Banda del segnale a spettro più ampio;
- Entità della più piccola variazione che si vuole rilevare;
- Numero di eventuali segnali in uscita comandabili;
- Velocità di trasferimento dati.

Il numero di segnali da acquisire si ripercuote, di fatto, nella scelta di un dispositivo di acquisizione con un numero maggiore di canali, i quali possono essere digitali o analogici a seconda della tipologia di dato da acquisire (es: n canali analogici per misure in vibrazione ed m canali digitali per misure di velocità di rotazione per mezzo di un trasduttore tachimetrico).

La misura di segnali dinamici con contenuti ad alte frequenze, del resto, porta alla selezione di dispositivi in grado di campionare il segnale ad una frequenza f_s sufficientemente elevata, come illustrato nel cap. 3.4.1. Nel caso dei dispositivi di monitoraggio *online SKF IMx*, ad esempio, la frequenza massima di campionamento è pari a circa 100 kHz [49]. I dispositivi multicanale più economici ricorrono all'utilizzo di un multiplexer per acquisire n segnali con un singolo convertitore A/D . Tale dispositivo si comporta come un selettore multiplo, che collega via via un segnale diverso al convertitore. Tale soluzione non permette l'acquisizione sincrona dei segnali, pertanto è accettabile fintantoché lo sfasamento temporale introdotto non è significativo per lo studio del fenomeno in questione. Nel campo dell'analisi modale di una struttura meccanica, ad esempio, ciò non è possibile in quanto le frequenze proprie del sistema possono assumere valori relativamente elevati.

La risoluzione del dispositivo di acquisizione, come già accennato nel cap. 3.4.1, dipende dal fondo scala del segnale di input e dal numero di bit del dispositivo. Aumentare la risoluzione della misura, dunque, comporta la scelta di un dispositivo di acquisizione a maggior numero di bit.

I sistemi di acquisizione, inoltre, sono eventualmente dotati di uscite analogiche e/o digitali qualora le operazioni di monitoraggio dati dovessero portare alla generazione di segnali di *output* verso attuatori, segnalatori ottici, acustici ecc.

Infine, il dispositivo potrebbe essere inserito all'interno di una rete locale atta alla comunicazione dei segnali, ad esempio per la comunicazione con un elaboratore, un *monitor*, un *router* 4G per la trasmissione dei dati in *cloud* ecc. A tal fine, è necessario conoscere la tipologia di collegamento fisico presente sul dispositivo (es: collegamento seriale *RS 485*, *USB*, *Ethernet*) ed i relativi protocolli di comunicazione previsti (es: *Profibus*, *Modbus*).

3.4.3 I sistemi di monitoraggio vibrazionale, funzionalità specifiche

I sistemi atti al monitoraggio *on-line* dei dati vibrazionali provenienti dal campo possono presentare funzionalità aggiuntive rispetto a quanto presentato nel precedente capitolo. In particolare, i sistemi di monitoraggio SKF IMx a 8 o 16 canali prevedono [49]:

- La memorizzazione dei dati all'interno di una memoria locale (4 GB), in modo da non perdere informazioni qualora non vi fosse comunicazione verso il *database* esterno. Tale funzionalità può essere sfruttata sia in caso di emergenza che per il monitoraggio nel tempo dei macchinari senza un collegamento continuo con il *database*, ovvero si prevede un *download* periodico dei dati dal sistema locale.
- L'elaborazione mediante metodi *Digital Fourier Transform (DFT)* per la visualizzazione nel dominio delle frequenze. Nel caso di comunicazione verso un *database* esterno, del resto, tale funzionalità aumenta la mole di dati trasmessa, pertanto è buona pratica acquisire soltanto il segnale dinamico ed applicare i metodi *DTF* mediante *software* applicativo.
- La comunicazione verso *database* esterno mediante *SIM 4G*, oppure la possibilità di comunicare verso un *router* mediante collegamento fisico *Ethernet* o *Wi-Fi*.
- La possibilità di lavorare in modalità *stand alone*, con generazione automatica di allarmi sullo stato di salute dei macchinari, ad esempio inviando i segnali di allarme a dei segnalatori visivi o su *app*.
- L'utilizzo dello stesso canale per la generazione di più punti di misura (fino a 80 punti di misura attivi per un dispositivo a 8 canali analogici).
- La possibilità di diagnosticare automaticamente la mancata comunicazione con un trasduttore (*cable fault*).
- Il poter configurare il dispositivo mediante collegamento seriale o mediante *app* da telefono.

3.5 Architettura SKF @ptitude per l'acquisizione e monitoraggio dati da remoto

Un servizio di *Condition monitoring* basato sull'acquisizione ed invio dati *on-line* permette di avere un monitoraggio continuo dello stato di salute del macchinario basato sui valori di soglia precedentemente impostati. A livello *hardware*, l'insieme delle apparecchiature adibite alla misura ed invio dati verso *cloud* è stato descritto ed investigato nel precedente paragrafo. Nel presente capitolo, allora, verrà illustrato come è possibile acquisire, memorizzare ed elaborare i dati di vibrazione al fine di renderli visualizzabili ed analizzabili da un operatore. La struttura *SKF* per il monitoraggio *on-line* appartiene alla famiglia di servizi @ptitude, la quale fornisce principalmente due piattaforme per l'analisi vibrazionale: @ptitude Analyst e @ptitude Observer [50], le quali presentano minime differenze ma la cui struttura di base è pressappoco invariata. Il servizio di monitoraggio @ptitude si basa su architettura *TCP/IP* per la comunicazione con le centraline *SKF* di acquisizione dati. Lo schema concettuale del flusso dati è descritto nella seguente Figura 49 [51].

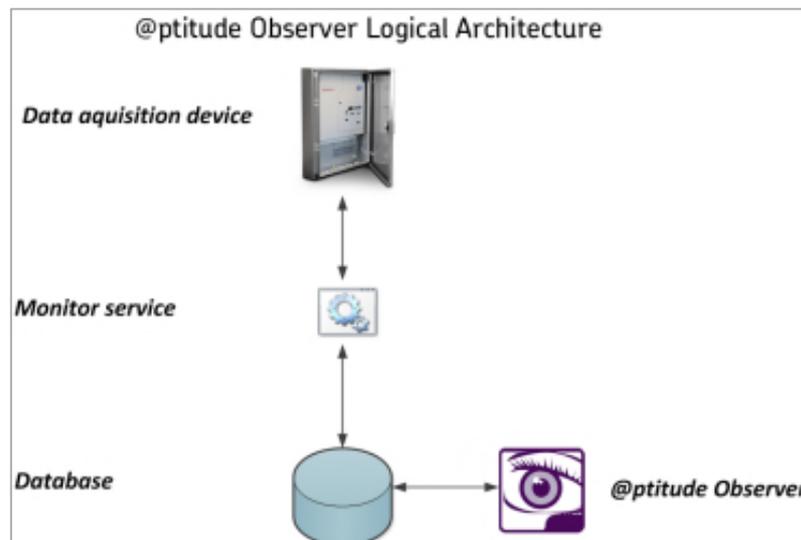


Figura 49 Architettura di SKF @ptitude Observer. Fonte: @ptitude Observer User Manual.

L'architettura si basa su tre diversi servizi:

- @ptitude Observer: è il *software* di interfaccia grafica con l'operatore, attraverso il quale registrare le nuove centraline ed i trasduttori ad esse associate, visualizzare i dati vibrazionali in varie forme (*trend*, spettro, segnale nel tempo, diagramma di *Bode* ecc), impostare le soglie di allarma in maniera automatica o semi-automatica, registrare i dati delle macchine monitorate ecc. Il sistema integra, inoltre, diversi servizi di diagnostica specifica, come il *gear inspector* per la diagnosi di malfunzionamenti di una ruota dentata o il diagramma delle orbite per lo studio delle orbite di rotazione di un albero. Si rimanda il lettore al cap. 4.3, nel quale sono state riportate delle videate circa le varie funzionalità utilizzate per lo svolgimento del lavoro di tesi.

- *Database*: rappresenta il servizio prettamente demandato all'immagazzinamento dati. L'architettura @ptitude, nello specifico, si basa sulla piattaforma *DBS (Database management System) Microsoft SQL*.
- *Monitor Service*: rappresenta il servizio *software* demandato alla comunicazione da/verso i sistemi di acquisizione presenti sul campo. Affinché esso possa funzionare, è necessaria una comunicazione internet tra la centralina (mediante *router* esterno o slot interna per *sim*). Il servizio *monitor* è sempre attivo, anche quando *Observer* è spento, e si occupa dello smistamento dei dati acquisiti verso il *database*. Qualora la comunicazione tra centralina e *Monitor* fosse interrotta, la centralina immagazzina i dati nel proprio *buffer* interno fino a nuova comunicazione con il servizio *Monitor*.

È bene precisare che i tre servizi non devono necessariamente essere installati sul medesimo pc, bensì possono essere dislocati su *server* differenti, sebbene debba esistere una comunicazione internet tra i diversi dispositivi.

La registrazione dei dati di macchina su *Observer* mediante la funzionalità *Machine Parts*, inoltre, permette di calcolare automaticamente le frequenze caratteristiche di accadimento dei difetti/guasti (es: frequenze di ingranamento, frequenze di difetto sui cuscinetti ecc.).

4. Installazione dei dispositivi e predisposizione al monitoraggio da remoto dei dati

Alla luce dei risultati presentati nei precedenti capitoli, è stato predisposto ed installato un sistema di acquisizione dati vibrazionali e di processo per il monitoraggio da remoto dei macchinari di produzione presso Michelin Torino.

Oltre a fornire una breve spiegazione dell'area d'azione, dello scopo a cui è demandata e della tipologia di macchinari presenti; verrà documentata la fase di installazione e configurazione sul campo dei singoli dispositivi presenti all'interno della rete locale. A tal punto, verrà descritta la fase di creazione del *database* su *software* applicativo *SKF Observer*, sul quale è stato inserito lo schema macchina di quanto monitorato e sono stati configurati i punti di misura a partire dal singolo *canale* di *input* proveniente dalle diverse centraline.

4.1 Area di Alimentazione Gomma, installazione dispositivi di misura e acquisizione

L'area di intervento selezionata è demandata alla lavorazione preliminare della miscela di gomma necessaria al processo di calandratura, la quale arriva in *box* di contenimento sotto forma di fogli impilati dalla precedente area di produzione miscela. Prima di poter utilizzare il materiale grezzo per la lavorazione, infatti, esso deve essere preriscaldato e plastificato ad una temperatura di circa 80-100 °C al fine di eliminare la memoria di forma che caratterizza le mescole di gomma. L'azione contemporanea di mescolamento e riscaldamento permette di mantenere lo spessore desiderato del tessuto dopo che esso viene lavorato nella calandra, e permette di ottenere una superficie liscia e priva di difetti [52].

Dei tappeti di movimentazione, a tal punto, richiamano il materiale, che si trova a temperatura ambiente, da tali *box* allocati in specifiche postazioni di carico; e conducono il materiale alla tramoggia di ingresso di un estrusore a vite (*cold feed extrusion*). Tale tipologia di macchinario è un'evoluzione dei precedenti estrusori in cui la gomma veniva precedentemente riscaldata mediante rulli mescolatori (*hot feed extrusion*), ed è stata implementata verso la metà del secolo scorso ('50-'60). Le principali differenze sono:

- Snellimento della linea di lavorazione con eliminazione dei rulli di preriscaldamento;
- Riduzione del personale demandato alla lavorazione, in quanto gli estrusori a freddo utilizzano sistemi automatici di movimentazione, come nel caso di Michelin Torino;
- Aumento del rapporto diametro-lunghezza della vite per assicurare che la miscela, che si trova ora a temperatura ambiente in ingresso, abbia una temperatura uniforme all'uscita della testa di estrusione;
- Creazione di canali interni alla carcassa ed alla vite per il riscaldamento della gomma mediante un fluido vettore. Nel caso di Michelin Torino, oltre ad un circuito demandato al riscaldamento della vite, sono presenti due canali di riscaldamento della carcassa, di cui la prima si trova in corrispondenza dell'ingresso della gomma nella tramoggia mentre la seconda è relativa alla fase di trasporto della gomma verso la testa di estrusione. Tale

suddivisione permette un controllo migliore del processo attraverso l'impiego di trasduttori di temperatura dell'acqua nei diversi circuiti di riscaldamento;

- Impiego di un cilindro rotante, post-tramoggia, che ruota in verso opposto rispetto alla vite (*feed cylinder*). Il sistema siffatto forza la gomma ad impegnarsi con i filetti della vite (Figura 50), e ciò causa un'elevata forza di pressione sul cilindro, anche in luce della alta viscosità del materiale in ingresso.
- Aumento della potenza di comando richiesta, essendo ora aumentata la viscosità del materiale (es: per una vite dal diametro di 150 mm si è passati da 35 a 60 kW circa);

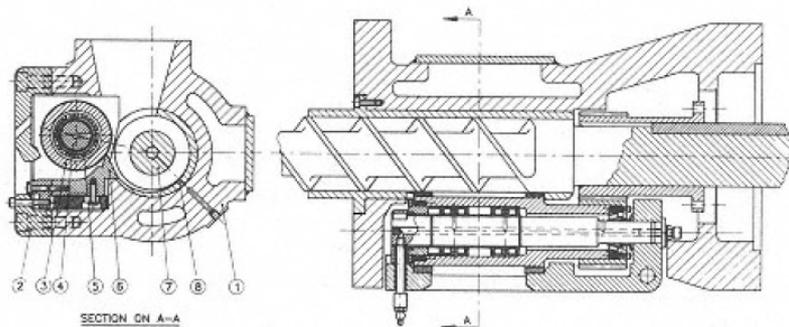


Figura 50 Dettaglio del cilindro che forza la gomma nell'impegno con la vite. Fonte: *Rubber products manufacturing technology*, Marcel Dekker, Inc. (1994).

In Figura 51, di seguito, sono riportati i dati sperimentali di temperatura misurata nei condotti di riscaldamento della macchina, acquisiti mediante il sistema installato, durante una fase di partenza di produzione. Con *PA* è indicato il primo circuito di riscaldamento che la miscela incontra durante la lavorazione, mentre con *camicia* è indicata l'area successiva. Come è possibile visualizzare, la fase di partenza prevede un aumento a gradini della velocità di rotazione della vite fino al raggiungimento della velocità *standard* per il processo di 12 rpm. La fase di partenza, infatti, risulta particolarmente critica in quanto non vi è un completo riempimento di gomma nel corpo macchina e vi è difficoltà nel raggiungimento delle temperature ottimali per la lavorazione. Durante una fase iniziale, detta di riempimento, la velocità della vite viene mantenuta a 6 rpm e si aumenta la temperatura nei circuiti di riscaldamento per agevolare il riempimento del corpo vite. Una volta appurato il riempimento del macchinario, si aumenta la velocità di rotazione fino al raggiungimento della velocità *standard* di produzione (in questo caso circa 12 rpm) e vengono abbassate le temperature al valore *standard*.

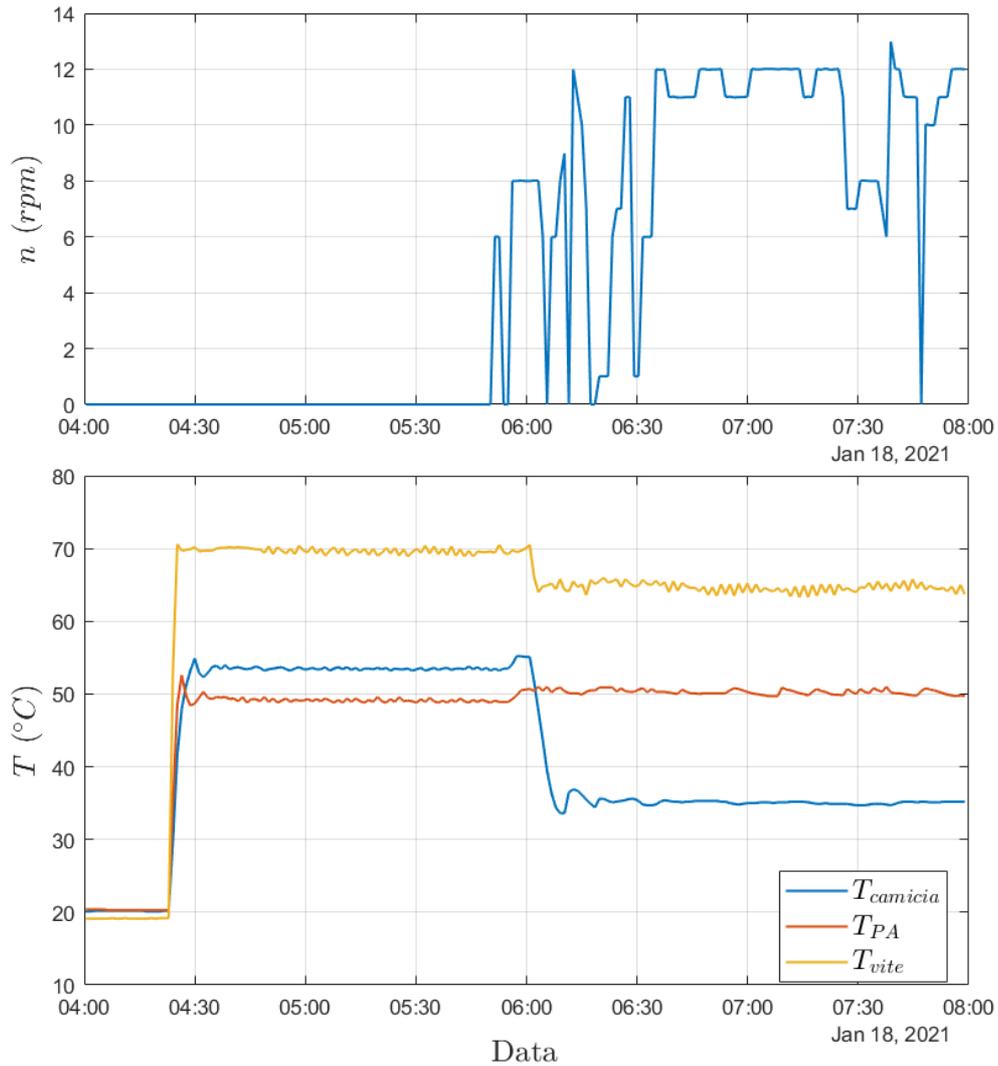


Figura 51 Andamento storico dei valori misurati di temperatura e velocità sull'estrusore nell'area di alimentazione mescola di Michelin Torino.

Nello stabilimento sono presenti due estrusori (estrusore 1 e 2) i quali lavorano in parallelo e depositano le bande di gomma lavorata sul medesimo tappeto di movimentazione che è poi diretto al mescolatore. Per entrambi i macchinari, la trasmissione del moto avviene mediante un riduttore di giri ad assi paralleli con 3 stadi di riduzione, mentre l'azionamento è demandato ad un motore elettrico *AC* trifase dotato di *inverter* con una potenza di targa di 685 kW ad una velocità di rotazione di 1489 rpm . Si rimanda il lettore all'Appendice A in cui sono inseriti i disegni di complessivo nonché i dati di targa dei macchinari.

Il risultato di tale processo di estrusione sono delle bande di gomma semilavorata e riscaldata che vengono così condotte, per mezzo di tappeti di movimentazione di lunghezza complessiva pari a circa 20 m , ad un mescolatore aperto di gomma, che risulta essere il secondo macchinario presente nell'area di intervento. L'obiettivo principale del mescolatore di gomma è quello di rendere il composto omogeneo, per ottenere delle bande di spessore e larghezza voluta che vengono infine condotte ai rulli della calandra. Il macchinario è composto da due cilindri, rotanti con verso opposto, posti orizzontalmente di fianco l'un l'altro, i quali sono riscaldati mediante canali interni in cui scorre un fluido vettore. Il materiale, depositato dai tappeti in

corrispondenza dell'interstizio che sussiste tra i fianchi dei cilindri, viene agganciato al corpo rotante anteriore, essendo così costretto a seguirlo durante il moto. Così facendo, la gomma subisce un processo ciclico di mescolamento e assottigliamento, con l'obiettivo di rendere il composto omogeneo ed a temperatura uniforme. Un cilindro ausiliario (*stockblender*), posto verticalmente sopra rispetto ai due cilindri principali, recupera delle bande di gomma in condizione di lavorazione intermedia, consentendone un temporaneo raffreddamento e permettendo una lavorazione migliore grazie al continuo capovolgimento della banda a causa della sua re-immissione [52]. Come detto sopra, il materiale proveniente dall'estrusore viene depositato in corrispondenza del bordo destro del macchinario, dopodiché esso scorre verso sinistra durante la rotazione e viene prelevato per l'alimentazione della calandra in corrispondenza del bordo sinistro per mezzo di coltelli rotanti posti a contatto con la mescola. In Figura 52, di seguito, è riportato uno schema di un mescolatore aperto.

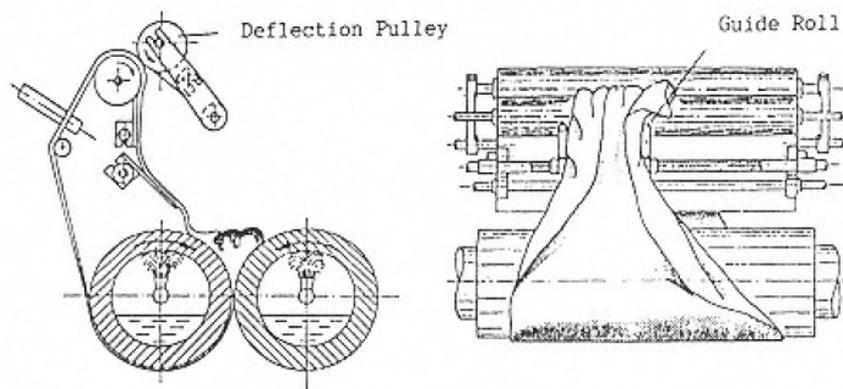


Figura 52 Schema di un mescolatore aperto di gomma. La guida superiore consente di veicolare il punto di re-immissione della banda di gomma, la quale si accumula e si mescola prima di essere costretta al passaggio nell'interstizio tra i cilindri. Fonte: *Rubber products manufacturing technology*, Marcel Dekker, Inc. (1994).

In Figura 53, di seguito, è riportato l'andamento storico dei dati sperimentali di velocità e temperatura in condizione di avvio lavorazione (*start-up*). Con u (m/min) si intende la velocità periferica del cilindro anteriore ottenuta come prodotto tra la velocità angolare ed il raggio del cilindro. Innanzitutto, è possibile notare un certo ritardo nella partenza rispetto a quanto accade nell'estrusore, in quanto il mescolatore deve attendere l'arrivo del materiale che deve passare prima nell'estrusore e poi essere trasportato sui tappeti di movimentazione. La temperatura nel circuito di riscaldamento del corpo posteriore è mantenuta sempre superiore a quella del corpo anteriore (circa $5\text{ }^{\circ}\text{C}$) per garantire che la mescola si incolli al corpo rotante anteriore, che risulterà più freddo. Una volta avviata la produzione, la temperatura nei circuiti viene aumentata, da parte degli operatori, per garantire una corretta lavorazione e mescolamento del materiale.

La richiesta di potenza meccanica del macchinario viene soddisfatta da un motore *DC*, con potenza di targa di 253 kW ad una velocità di rotazione di 1510 rpm , collegato ad un riduttore di giri ad assi paralleli con 4 stadi di riduzione e due alberi in uscita. Si rimanda alla lettura dell'Appendice A in cui è riportato il disegno di complessivo del riduttore, in particolare con indicazione del numero di denti e modello di cuscinetti.

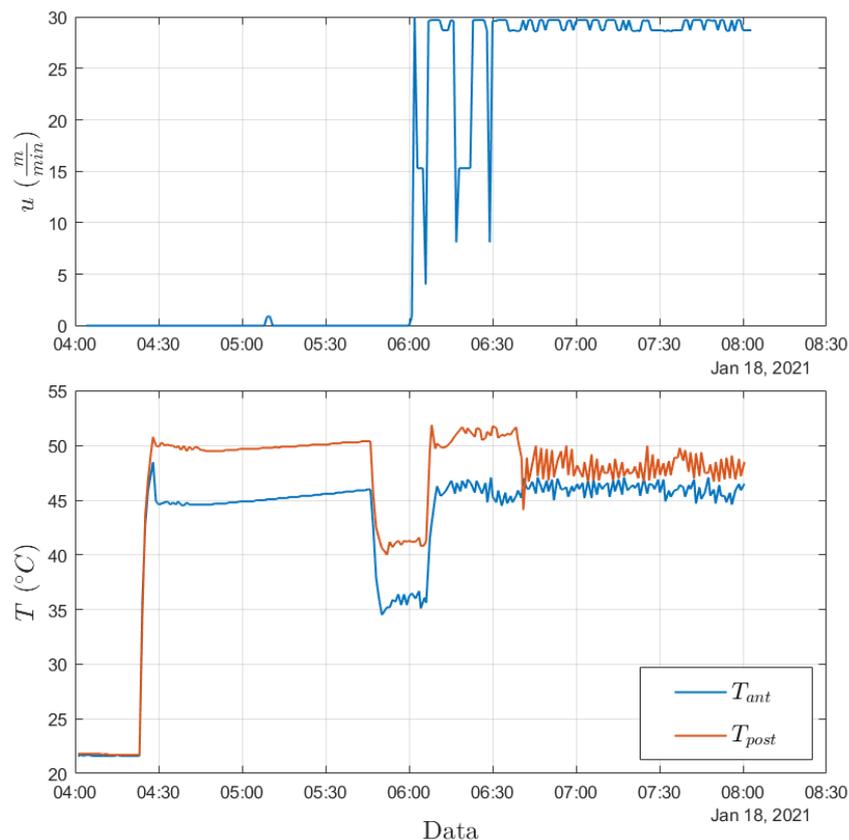


Figura 53 Andamento storico dei valori misurati di velocità e temperatura sul mescolatore aperto di Michelin Torino. Con u (m/min) si intende la velocità periferica del cilindro anteriore mentre con T_{ant} e T_{post} si intende, rispettivamente, la temperatura misurata nel circuito di riscaldamento del cilindro anteriore e posteriore.

4.1.1 Scelta ed installazione degli accelerometri

Al fine di mostrare le potenzialità di un sistema di monitoraggio vibrazionale su di un parco macchine quanto più ampio possibile, le macchine sensorizzate sono state:

- Motore relativo all'estrusore 1;
- Riduttore di giri relativo all'estrusore 1;
- Riduttore di giri relativo al mescolatore di gomma;

Gli accelerometri impiegati sono di tipo piezoelettrico a cavo integrato ICP® con sensibilità nominale di 100 mV/g. Per quanto concerne il motore estrusore 1 e riduttore mescolatore, erano stati precedentemente installati degli accelerometri con collegamento filettato, mentre sul riduttore dell'estrusore sono stati installati nuovi accelerometri con collegamento a base magnetica a due contatti (vedi Figura 45). Nella Tabella 5, riportata di seguito, sono riassunte le informazioni relative al modello di accelerometro, caratteristiche dinamiche principali e

tipologia di montaggio per ogni macchinario sensorizzato. Si rimanda alla lettura dell'Appendice B in cui sono riportati i dati di catalogo essenziali sui trasduttori impiegati.

Macchina	Modello	Sensibilità nominale	Range di frequenza	Montaggio
Motore Estrusore 1	SKF CMSS 2200	100 mV/g	± 3 dB : 0.7 Hz – 10 kHz	Collegamento filettato
Riduttore Estrusore 1	SKF CMSS WIND-100-10	100 mV/g	± 3 dB : 0.5 Hz – 10 kHz	Base magnetica a due contatti
Riduttore Mescolatore	SKF CMSS 2200	100 mV/g	± 3 dB : 0.7 Hz – 10 kHz	Collegamento filettato

Tabella 5 Accelerometri impiegati per macchina e caratteristiche principali. Fonte: SKF Vibration Sensors Catalog.

Per quanto concerne il criterio di scelta dei punti di misura, essa ha seguito le indicazioni *standard* per il monitoraggio di macchinari ad albero rotante, le quali prevedono di installare un accelerometro per la misura di vibrazione in senso radiale sulla superficie esterna della carcassa della macchina in corrispondenza della sede di ogni cuscinetto; e, in aggiunta, di installare un trasduttore di misura assiale, sempre sulla superficie esterna della carcassa, in prossimità di ogni albero in ingresso e uscita. A titolo di esempio, si riporta di seguito uno schema indicante i punti di misura relativi al motore dell'estrusore 1, dove è possibile individuare due accelerometri di misura radiale in prossimità delle sedi dei cuscinetti ed uno per la misura assiale in prossimità dell'uscita dell'albero.

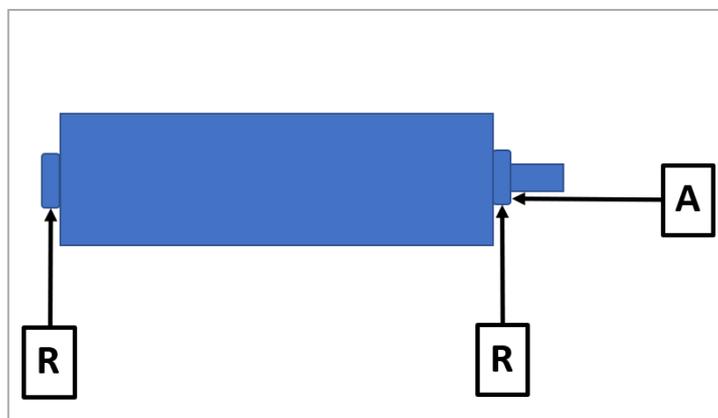


Figura 54 Schema di montaggio accelerometri sul motore relativo all'estrusore 1

Per quanto concerne la scelta dei punti di misura sui due riduttori, del resto, il criterio seguito è stato analogo, sebbene esso vada poi confrontato con l'effettiva accessibilità dei punti di misura selezionati. Nel caso del punto corrispondente al cuscinetto reggisplinta dell'albero di uscita del riduttore estrusore 1, ad esempio, la misura non è stata effettuata in quanto la sede del cuscinetto era interna alla carcassa, pertanto l'assenza di continuità non garantiva la trasmissione delle vibrazioni. Si rimanda alla lettura dell'Appendice A nella quale sono indicati tutti i punti di misura sui disegni di complessivo dei riduttori.

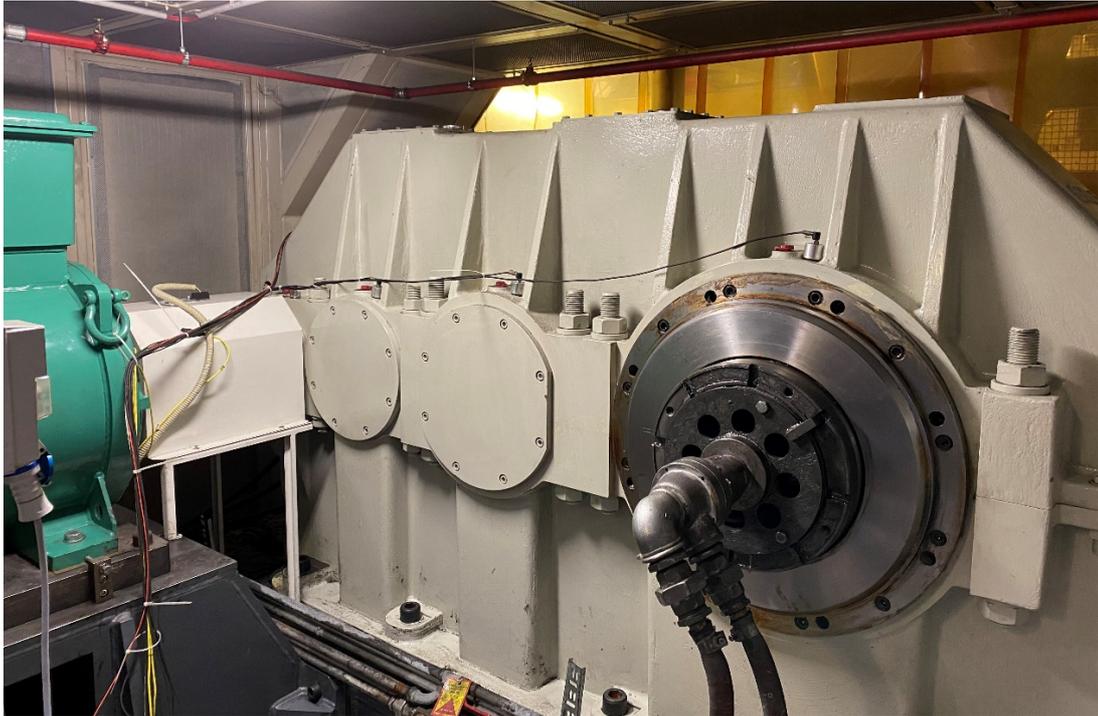


Figura 55 *Installazione di trasduttori SKF a base magnetica per misura vibrazioni in direzione radiale sul riduttore estrusore lato motore. Si noti anche, sulla destra, il circuito di riscaldamento che porta il fluido vettore all'interno del corpo della vite*

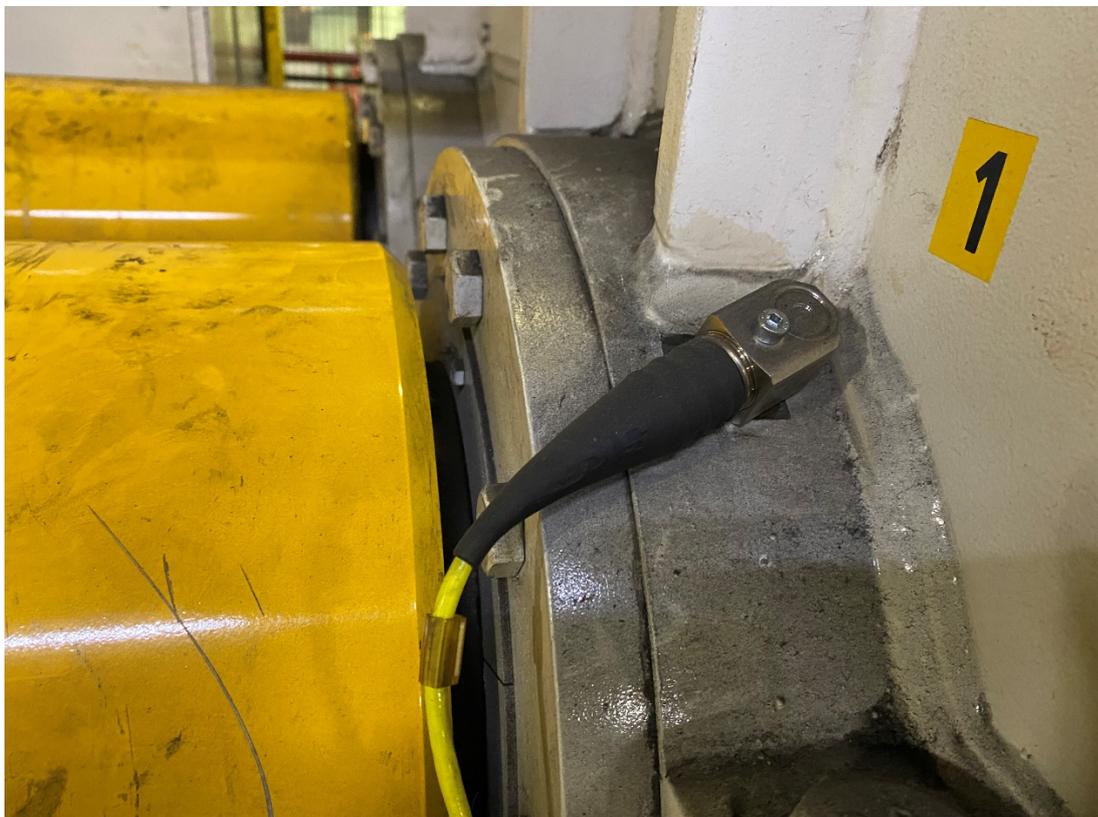


Figura 56 *Dettaglio di un accelerometro SKF CMSS 2200 con collegamento filettato per la misura delle vibrazioni in direzione radiale posizionato in corrispondenza dell'albero di uscita del cilindro anteriore del mescolatore.*

4.1.2 Installazione e collegamento delle centraline di acquisizione

Mediante l'impiego di cavi coassiali a schermatura singola di lunghezza pari a 10 m, a tal punto, sono stati collegati i segnali in vibrazione provenienti dal campo alle centraline di acquisizione. I dispositivi impiegati sono di tipo *SKF IMx*, già citati nel cap. 3.4.3, nati per il monitoraggio vibrazionale nel settore eolico e poi impiegate anche in ambito industriale. In Appendice B è riportato un estratto dal *datasheet* del dispositivo. A causa del numero di canali acquisiti, è stato necessario l'impiego di tre diversi dispositivi di acquisizione. Nel caso dei dispositivi demandati all'acquisizione dei segnali provenienti dal mescolatore, è stato impiegato un trasduttore di velocità induttivo per la misura della velocità di rotazione dell'albero veloce in ingresso al riduttore. Tale trasduttore, alimentato dalla centralina stessa, consegna in *output* un segnale digitale, acquisito da entrambi i dispositivi relativi al mescolatore mediante la realizzazione di un ponte elettrico. Per la misura della velocità di rotazione dell'albero in ingresso del riduttore dell'estrusore 1, invece, esso è stato acquisito mediante collegamento al *PLC* di reparto, come verrà illustrato nel cap. 4.2, relativo alla realizzazione della rete locale e comunicazione con *PLC* per acquisizione dei dati di processo.

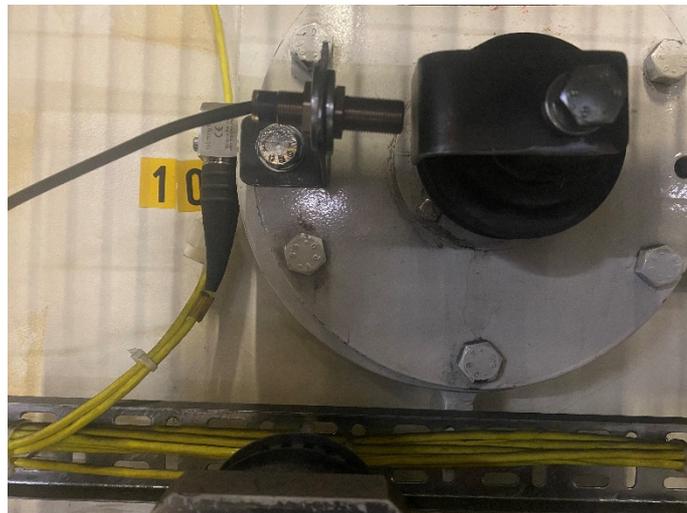


Figura 57 Dettaglio del trasduttore di velocità di tipo induttivo installato in corrispondenza dell'albero veloce in ingresso del riduttore di giri del mescolatore di gomma. Si noti, in secondo piano, un accelerometro *CMSS 2200* per la misura di vibrazione in senso radiale.

In Tabella 6, di seguito, è riportata una tabella riassuntiva in cui è indicato il modello relativo ad ogni centralina, il numero di canali acquisiti e la macchina da cui essi provenivano. I due modelli impiegati sono sostanzialmente simili, il numero che accompagna il modello identifica il numero di canali analogici acquisibili, mentre la versione *plus* identifica la presenza di uno *slot* per inserimento di *sim* in modo da poter comunicare con il *cloud* senza l'impiego di un *router* esterno. Il *number ID* (o *DAD*) è un numero che permette al *software* applicativo *SKF @ptitude Observer* di identificare univocamente la centralina. Si rimanda il lettore ai successivi paragrafi, nei quali verrà illustrata la fase di predisposizione del *software* all'acquisizione e immagazzinamento dati. Le centraline n. 51 e 52 erano state precedentemente installate, ma non impiegate per l'acquisizione dati, per cui i canali analogici sono stati collegati direttamente agli ingressi delle centraline; mentre la n. 50 è stata aggiunta in seno alle attività specifiche di tesi ed il collegamento è stato effettuato mediante intestazione *BNC* dei cavi (vedi Figura 58).

Dispositivo	ID	Macchina	N. canali analogici acquisiti	Input velocità di rotazione
IMx-16 plus	50	Motore + riduttore di giri estrusore 1	12	Da PLC di reparto
IMx-8	51	Riduttore di giri mescolatore	8	Trasduttore di velocità induttivo
IMx-8	52	Riduttore di giri mescolatore	4	Trasduttore di velocità induttivo

Tabella 6 Dispositivi di acquisizione impiegati, macchine di riferimento e metodo di acquisizione misura in velocità.

I dispositivi sono stati inseriti all'interno di un involucro con grado di protezione *IP (International Protocol) 65*, ovvero completamente protetto da polveri e protetto contro i getti d'acqua con lancia da tutte le direzioni [53], all'interno del quale è stata montata una guida *DIN* per il fissaggio della centralina ed eventuali dispositivi aggiuntivi. L'alimentazione è stata fornita mediante alimentatore *AC/DC* Mean Well MDR-60-24 che aveva in *input* una tensione *AC* di 220 V ed in *output* una tensione *DC* di 24 V (vedi Figura 58).

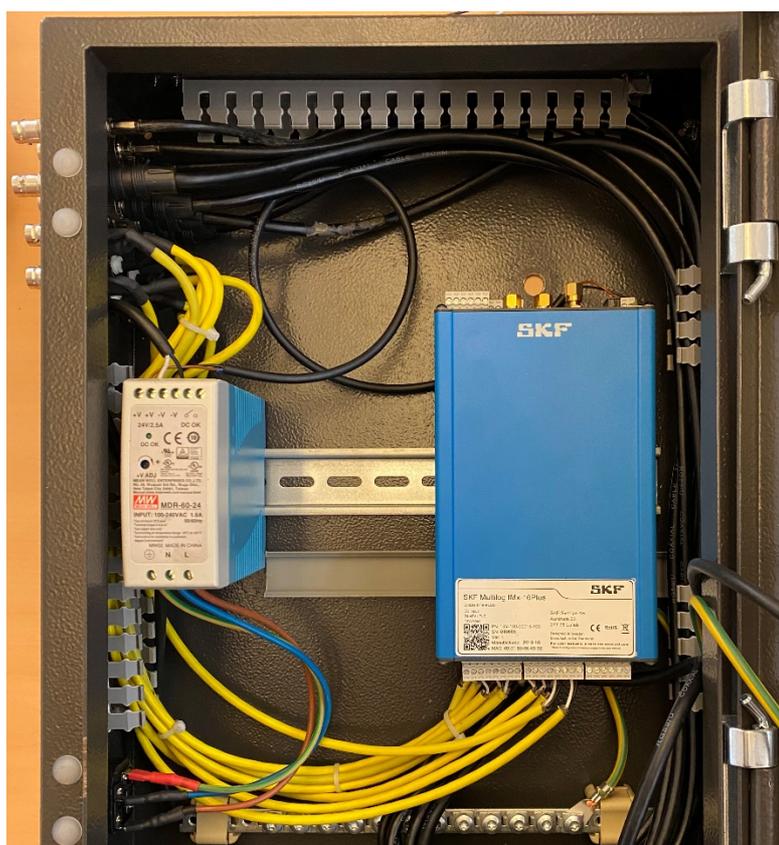


Figura 58 Centralina Imx-16 n.50 installata e alimentatore AC/DC all'interno della scatola protettiva IP 65. Si noti il collegamento ai canali analogici mediante intestazione BNC.

Si rimanda all'Appendice C in cui è dettagliata la corrispondenza tra punti di misura e canali analogici in ingresso alle centraline, nonché i canali digitali per la misura della velocità di rotazione.

4.2 Rete locale implementata per la comunicazione con *PLC* e trasmissione dati in *cloud*

La necessità di comunicazione con i *PLC* di reparto, i quali permettono l'acquisizione, da parte delle centraline di acquisizione, dei dati di processo già monitorati per la produzione, così come la necessità di trasmissione verso un *cloud* di immagazzinamento per il controllo in remoto, ha portato alla realizzazione di una rete locale in cui i diversi dispositivi comunicano. Di seguito (Figura 59), è riportato uno schema concettuale della rete *LAN* locale. I segnali analogici provenienti dai trasduttori sono stati rappresentati mediante linea continua, mentre i segnali di rete con linea tratteggiata. È possibile individuare:

- Gli accelerometri, collegati direttamente alle centraline;
- Le centraline *SKF IMx*, che comunicano con la rete mediante protocollo *Modbus TCP/IP*;
- Un *PLC* Allen-Bradley di reparto che, mediante scheda di rete, comunica con la rete locale attraverso una porta *Ethernet*, secondo protocollo di comunicazione *Ethernet/IP*;
- Un dispositivo di conversione protocollo di comunicazione *Red Lion DSPSX*, necessario per permettere il flusso dei dati da *PLC* di reparto verso le centraline *SKF IMx*;
- Uno *Switch Ethernet*, in quanto il *router* era dotato di sole tre porte di collegamento;
- Un *router* 4G demandato alla comunicazione dei dati verso il *cloud*;

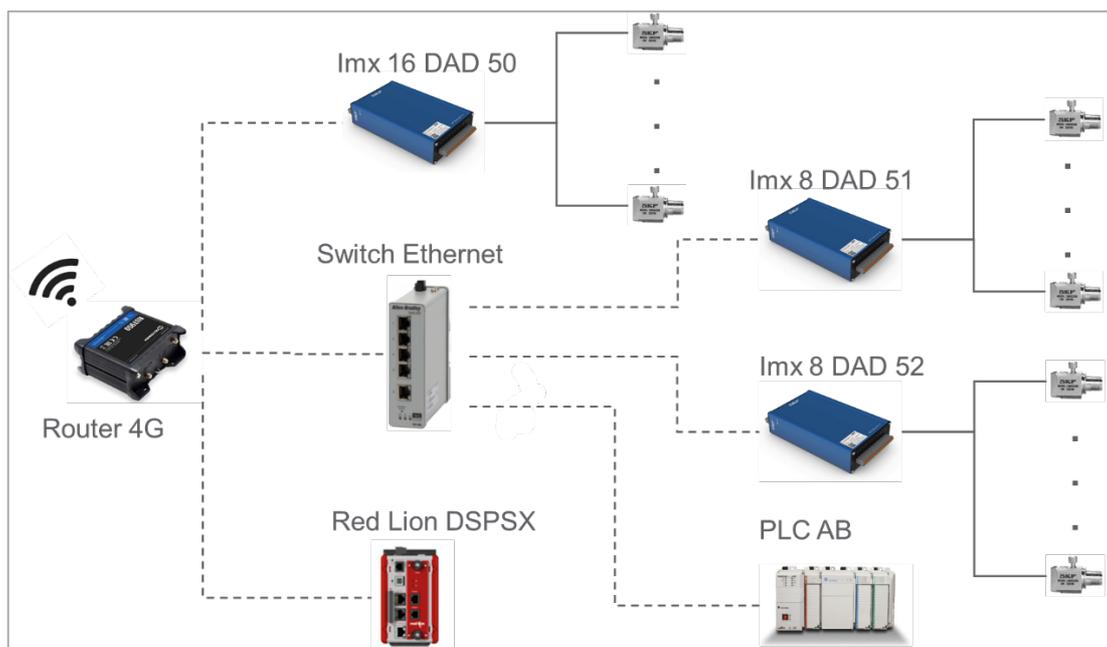


Figura 59 Schema di rete locale implementata.

Il flusso di dati, nonché l'elenco degli stessi, è schematizzato di seguito in Figura 60. Si rimanda il lettore all'Appendice C in cui sono elencati i singoli dati acquisiti, unità di misura e relativi canali in ingresso nei tre dispositivi IMx.

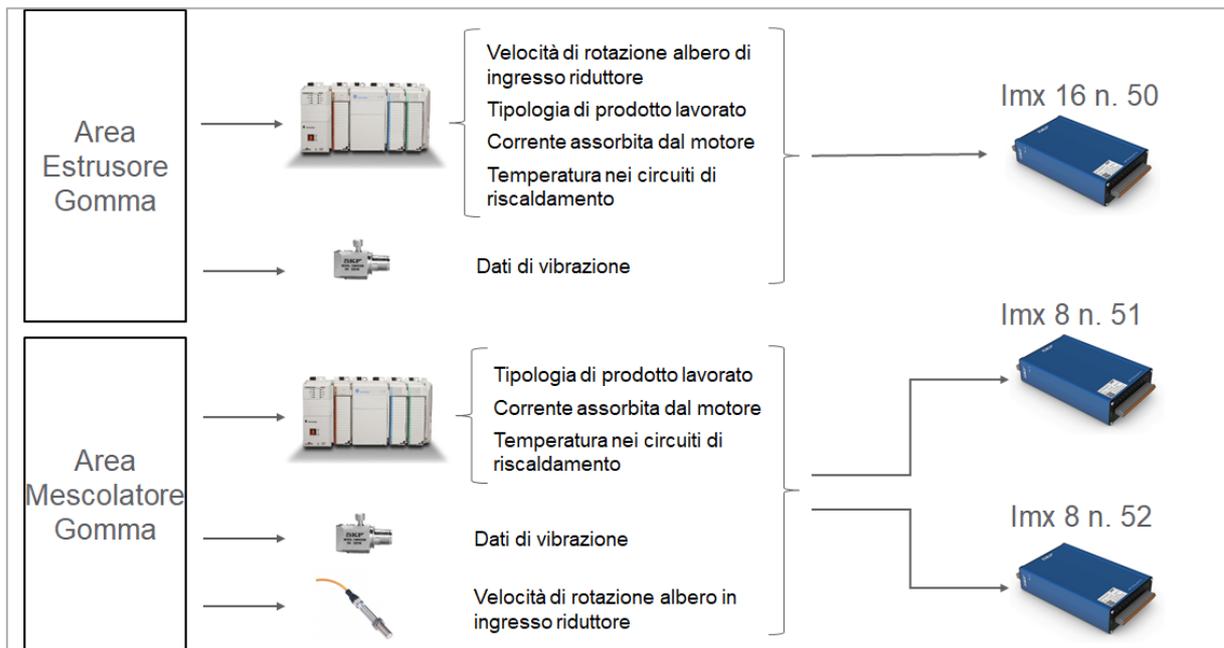


Figura 60 Flusso dati dal campo verso i dispositivi di acquisizione. Si noti come, nel caso dell'area di mescolamento, sia stato possibile acquisire il riferimento in velocità mediante un trasduttore induttivo, mentre per l'area di estrusione sia stato acquisito mediante comunicazione con il PLC.

4.2.1 Configurazione dispositivo di conversione protocollo

Il dispositivo demandato all'acquisizione e successiva trasmissione dei dati verso *cloud* è la centralina *SKF IMx*, sia per quanto concerne i dati in vibrazione che i dati di processo. Non essendovi la possibilità di comunicazione, da parte del *PLC*, mediante protocollo *Modbus*, è stato necessario l'impiego di un convertitore di protocollo che realizzasse un ponte nel flusso dei dati da *PLC* verso le centraline. Il dispositivo impiegato è un modello *Red Lion DSPSX*, si rimanda il lettore all'Appendice B per le principali caratteristiche tecniche.

Per fare ciò, è stato richiesto ai tecnici di reparto di programmare il *PLC* in modo da predisporre gli *output* corrispondenti ai dati di processo richiesti creando un *tag* di riferimento. A tal punto, è stato programmato il dispositivo di conversione *Red Lion DSPSX* mediante *software Crimson 3.0*, il quale permette di importare direttamente il file *RsLogix 5000 Import/Export File (*.L5K)* contenente le informazioni relative ai *tag* generati ed abilitando il dispositivo indicandone indirizzo *IP* e porta *TCP* (Figura 61).

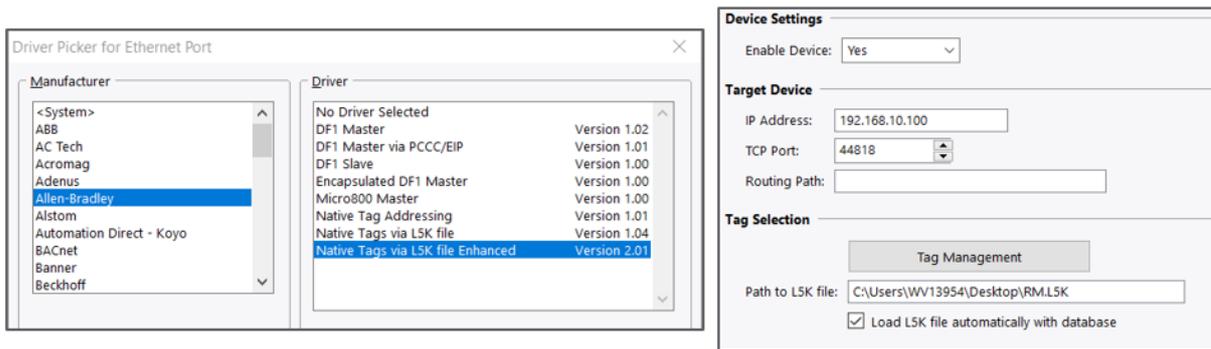


Figura 61 Impiego del driver integrato basato sull'importazione dei tag nativi su software Crimson 3.0 (destra) e abilitazione del dispositivo indicandone indirizzo IP e porta TCP (destra).

Il passo successivo è stato creare un blocco (*gateway block*) *slave*, in modo da associare ad ogni parola contenuta nel *tag* un indirizzo di ingresso al dispositivo *DSPSX* (Figura 62).

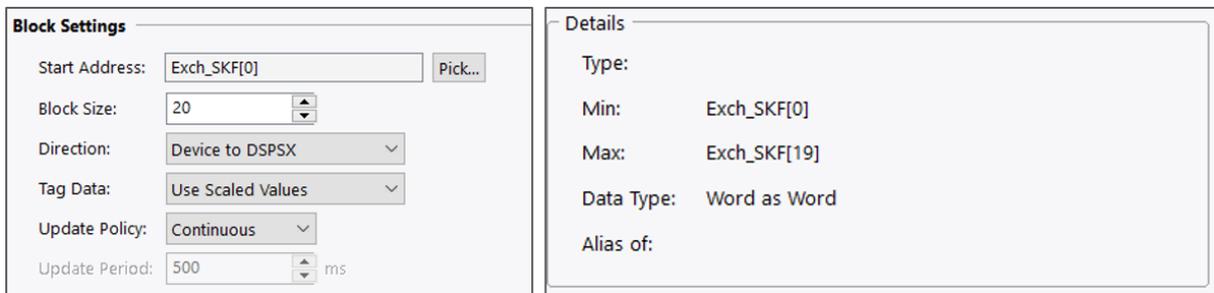


Figura 62 Creazione di un blocco *slave* associato agli indirizzi relativi al tag *Exch_SKF* creato per l'acquisizione dei dati su Crimson 3.0. Si noti l'indirizzo di partenza che risulta essere *Exch_SKF[0]*.

Il passaggio conclusivo è stato configurare l'invio dei dati verso le centraline *IMx*, configurandole ed abilitandole analogamente a quanto fatto per il *PLC AB*, ma in tal caso il *driver* impiegato sfruttava il protocollo *Modbus TCP/IP* in cui il dispositivo *DSPSX* era configurato come *master* e le centraline *IMx* come *slave*. Si noti come sia stato necessario specificare l'indirizzo *Modbus slave* per la comunicazione con il convertitore *Red Lion*. All'interno di una rete di comunicazione mediante protocollo *Modbus*, infatti, ogni dispositivo necessita di un indirizzo univoco.

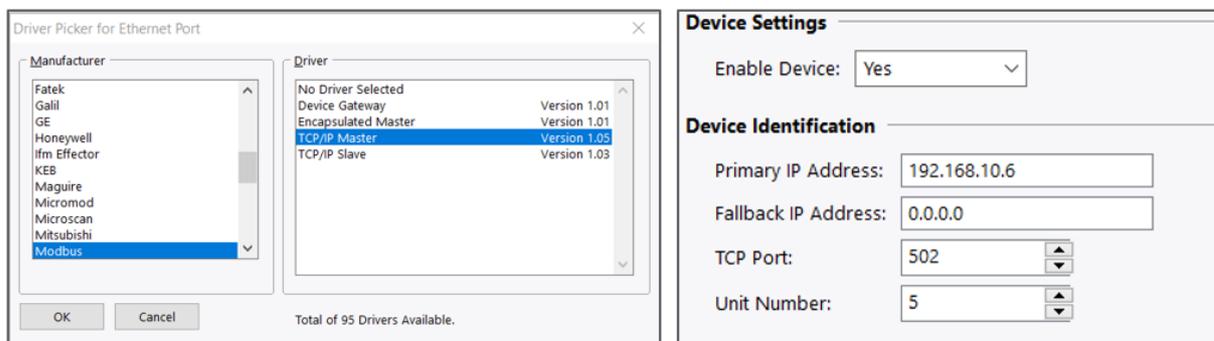


Figura 63 Configurazione del dispositivo *IMx-16 n.50* con protocollo di comunicazione *Modbus TCP/IP*. Si noti la specifica circa l'indirizzo IP del dispositivo all'interno della LAN.

Gli indirizzi in uscita, di tipo *holding registers*, sono stati associati agli indirizzi di ingresso, realizzando di fatto la conversione di protocollo e la predisposizione all'acquisizione dei dati da parte delle centraline *IMx*, impostate in modalità *slave* (Figura 64). Ad esempio, l'indirizzo in *output* 40001 era associato all'indirizzo in *input* *Exch_SKF[0]* e così via.

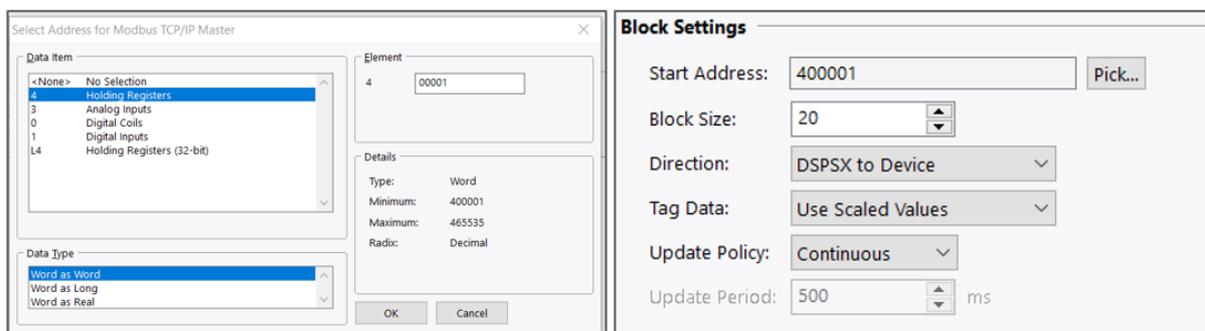


Figura 64 Creazione di un gateway block in modalità master e associazione degli indirizzi in uscita di tipo *holding registers* (tipo 4).

Si rimanda il lettore all'Appendice C, in cui è inserita una tabella contenente la corrispondenza tra ogni indirizzo in *input* e *output* per le diverse centraline *IMx*, con annessa descrizione circa il dato trasmesso e relativa unità di misura.

4.2.2 Trasmissione dati verso *cloud*

La presenza di un *router 4G* all'interno della rete *LAN* ha permesso alle centraline *IMx* di comunicare con il servizio *SKF Monitor* il quale gestisce il flusso di dati da/verso le centraline, allocato su di un *server online*. Il dispositivo impiegato era un modello Teltonika RUT950 di cui si riassumono in le caratteristiche tecniche salienti in Appendice B.

È stato necessario, a tal punto, configurare i dispositivi mediante porta di programmazione e *software SKF Online Device Configurator*, specificandone gli indirizzi attraverso cui individuarle all'interno della rete *LAN*, e specificando gli indirizzi verso cui essi dovessero puntare nonché la porta di comunicazione abilitata sul servizio *Monitor*. Di seguito (Tabella 7), è riassunta una tabella riassuntiva dei parametri impostati per il dispositivo *IMx-16 n. 50*. Si noti come l'indirizzo di *gateway* corrisponda a quello impostato sul *router 4G*. Il protocollo *DHCP* è disabilitato in quanto l'indirizzo del dispositivo nella rete locale resta invariato nel tempo. L'indirizzo *IP* del dispositivo è il medesimo impostato su *Crimson 3.0* (Figura 63).

Identity	50
IP Number	192.168.10.6
Subnet mask	255.255.255.0
Gateway	192.168.10.1
Server IP	34.250.30.3
Port	10252
DHCP	Disabled

4.3 Creazione punti di misura e *database* su *software* applicativo

Per la fase successiva di analisi, è stato necessario configurare il sistema adibito alla memorizzazione ed elaborazione dati mediante *software SKF @ptitude Observer* versione 12.1. Si rimanda il lettore al cap. 3.5 in cui è stato sintetizzata l'architettura di gestione e immagazzinamento dati che sfrutta l'interazione tra *Microsoft SQL*, *SKF Monitor Service* ed *Observer* stesso. Come descritto precedentemente, le centraline IMx vanno configurate al fine di predisporre l'invio dati verso il *cloud*, ma bisogna anche registrarle ed abilitarle su *Observer*. Nella Figura 65, di seguito, è riportata l'interfaccia *GUI* in cui è stata registrata ed abilitata la centralina IMx-16 n.50. L'indirizzo *slave*, ovviamente, corrisponde con quello registrato su *Crimson 3.0*, come si vede in Figura 63. Attraverso la finestra di *data import*, invece, si abilitano i canali di *input* selezionati, come specificato in Appendice C.

Figura 65 Interfaccia di registrazione del dispositivo IMx-50 su *software Observer*.

Analogamente, sono stati abilitati i canali che raccolgono i dati provenienti dai trasduttori, come illustrato in Figura 66, indicando soprattutto il numero del canale, i parametri della caratteristica statica dello strumento (*sensitivity* ed *offset*) ed abilitando l'alimentazione in corrente (*ICP current feed*).

A tal punto, è stato creato il *database* configurando i punti di misura di tipo *dynamic*, nel caso di misure di vibrazione, *speed*, nel caso di velocità di rotazione, o *process* nel caso di variabili di processo. Il sistema differenzia le misure in velocità in quanto esse possono poi essere date come riferimento per l'analisi degli spettri (ad esempio, per il calcolo di una frequenza di ingranamento). La creazione di un punto di misura prevede l'assegnazione di:

- Un dispositivo IMx di riferimento da cui acquisire informazioni;
- Il canale di acquisizione, sia esso derivante dagli ingressi fisici esistenti sul dispositivo o da comunicazione *Modbus*;
- Il periodo temporale ogni quanto registrare la misura nel *database*.

Inoltre, i punti di misura relativi alla medesima centralina IMx possono essere acquisiti simultaneamente mediante la creazione di un gruppo simultaneo (*measurement group*). Tale funzionalità è stata sfruttata, creando tre differenti gruppi di misura per le tre centraline, al fine di avere informazioni simultanee circa il livello di vibrazione del macchinario nonché la sua condizione operativa, in funzione dei parametri di processo precedentemente elencati in Figura 60. I gruppi di misura sono stati impostati al fine di immagazzinare il valore di *trend* ogni minuto, mentre le misure dinamiche nel tempo (relative alle sole vibrazioni) è stata memorizzata ogni quattro ore. Nell'immissione di misure in vibrazione all'interno di un gruppo simultaneo, esse possono essere solo di un tipo (es: sole misure in accelerazione). Pertanto, si è scelto di effettuare le misure simultanee in velocità in quanto i fenomeni vibrazionali caratteristici dei macchinari monitorati, i quali dovevano essere correlati ai dati di processo acquisiti, insorgevano in un intervallo di frequenza relativamente basso (fino a 1 kHz). Inoltre, come specificato nel cap. 3.1, tale misura è segnalata dalle normative di riferimento come quella di maggior impiego nel monitoraggio di macchinari industriali ad organo rotante.

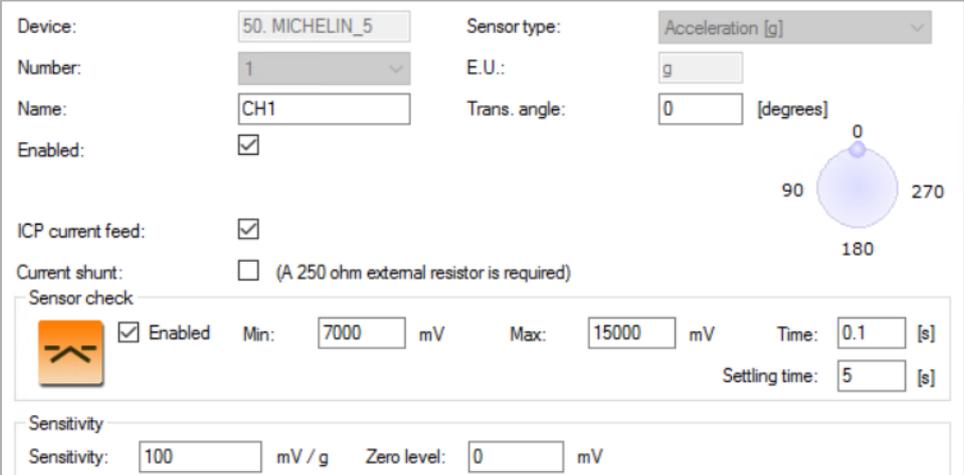


Figura 66 Interfaccia di abilitazione canali analogici dei dispositivi IMx su software *Observer*. Si noti la spunta di abilitazione nell'alimentazione in corrente essendo il trasduttore di tipo ICP®.

Per quanto riguarda le misure in vibrazione, nel dettaglio, esse sono state effettuate in accelerazione, velocità ed inviluppo di tipo 3 su tutti i punti di misura radiali evidenziati nel cap. 4.1.1. Sui punti di misura assiali, invece, è stata impostata la sola misura in velocità, in quanto tali punti vengono in genere impiegati per la diagnostica di problemi nel giunto di collegamento, i quali insorgono in intervalli in frequenza relativamente bassi, pertanto non è necessaria la misura in accelerazione. Nelle successive tabelle (Tabella 8, Tabella 9 e Tabella 10) sono specificati i parametri essenziali per la misura delle vibrazioni impostati su *Observer*. Si noti come gli intervalli di acquisizione delle misure in velocità coincidano con quelli specificati per i gruppi simultanei. Si rimanda il lettore al cap. 3.2 in cui sono descritti nel dettaglio i parametri specificati di seguito.

Intervallo in frequenza	0 – 5 kHz
Numero di linee	6400
Limite inferiore in frequenza	0 Hz
Tipo di dato memorizzato	<i>Time waveform</i>
Scala	0 - Picco
Media esponenziale	50 %
Intervallo di memorizzazione <i>trend</i>	30 minuti
Intervallo di memorizzazione spettro	6 ore

Tabella 8 Parametri impostati su Observer per la misura di vibrazioni in accelerazione.

Intervallo in frequenza	0 – 1 kHz
Numero di linee	6400
Limite inferiore in frequenza	5 Hz
Tipo di dato memorizzato	<i>Time waveform</i>
Scala	<i>rms</i>
Media esponenziale	0 %
Intervallo di memorizzazione <i>trend</i>	1 minuto
Intervallo di memorizzazione spettro	4 ore

Tabella 9 Parametri impostati su Observer per la misura di vibrazioni in velocità.

Intervallo in frequenza	0 – 1 kHz
Numero di linee	3200
Limite inferiore in frequenza	0 Hz
Tipo di dato memorizzato	<i>Time waveform</i>
Scala	0 - Picco
Media esponenziale	50 %
Intervallo di memorizzazione <i>trend</i>	1 ora
Intervallo di memorizzazione spettro	12 ore

Tabella 10 Parametri impostati su Observer per la misura di vibrazioni in inviluppo di tipo 3.

Si noti come l'intervallo in frequenza delle misure in accelerazione risulti essere più ampio, come giustificato nel cap. 3.1. La sola memorizzazione della misura nel tempo, del resto, agevola il processo di invio dei dati, lasciando poi al *software* la parte di elaborazione e applicazione dei metodi di *FFT* (*Fast Fourier Transform*).

Al fine di agevolare il processo di lettura degli spettri acquisiti, infine, sono stati inseriti tutti i punti di misura attinenti al medesimo macchinario all'interno di un gruppo macchina (*machine group*) del quale sono stati specificati i dati fondamentali per l'analisi (es: specifiche cuscinetti, numero di barre rotoriche del motore, numero di denti delle ruote dentate ecc.). Tale operazione

è stata effettuata mediante un'interfaccia grafica dedicata, di cui si riporta un esempio relativo al riduttore di giri dell'estrusore di gomma in Figura 67.

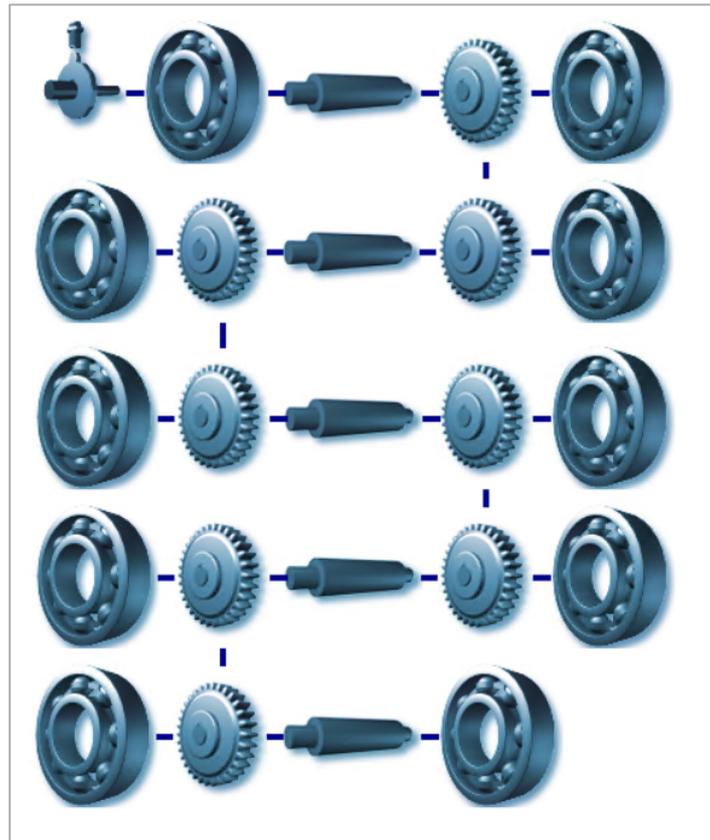


Figura 67 *Interfaccia grafica su Observer per l'inserimento dei dati di macchina del riduttore di giri estrusore di gomma. Si noti come sia necessario specificare il punto in cui la misura di riferimento in velocità viene effettuata (in alto a sinistra) al fine di calcolare automaticamente la cinematica del macchinario in funzione del numero di denti delle ruote. Nel caso del riduttore in quesitone, la misura era effettuata sull'albero veloce in ingresso.*

5. Analisi dei dati sperimentali

Attraverso l'architettura descritta nel precedente capitolo, sono stati acquisiti dati di vibrazione e di processo per un periodo di quattro settimane, al fine di ottenere una distribuzione completa di informazioni al variare delle condizioni operative dei macchinari situati nell'area di Alimentazione Gomma.

Applicando le metodologie descritte nel cap. 3.1 e seguenti, sono stati analizzati gli spettri dei dati ottenuti, evidenziandone i contenuti in frequenza caratteristici della tipologia di macchinari in esame. Inoltre, con l'obiettivo di effettuare una configurazione ottimale dei livelli di preallarme ed allarme per future segnalazioni, verrà descritto il comportamento di tali contenuti in funzione della condizione operativa del macchinario, descrivibile in termini di velocità di rotazione, tipologia di prodotto lavorato ecc.

Vista l'assenza di un controllo continuo del processo, come descritto nel cap. 2.4, verrà effettuato un ulteriore studio volto a valutare la possibile correlazione statistica tra il livello vibrazionale del macchinario e l'insorgenza di difetti di qualità sul prodotto finito. Per fare ciò, i dati di vibrazione provenienti dal campo sono stati integrati con i dati di produzione circa la qualità e conformità del prodotto lavorato, per comprendere se fosse possibile prevedere l'insorgenza di difetti mediante la misura delle vibrazioni degli organi rotanti che lavorano la gomma.

5.1 Analisi spettri acquisiti

Nei risultati di seguito riportati, verrà specificato il macchinario di riferimento, nonché un codice alfanumerico, composto da:

- Un numero relativo al punto di misura preso in considerazione, si riporta al cap. 4.1.1 in cui sono stati documentati tutti i punti di misura utilizzati;
- Una lettera, R o A, per misure di vibrazione in senso radiale o assiale;
- Una sigla, A, V o E3, per misure in accelerazione, velocità o involuppo di tipo 3.

A titolo esplicativo, una misura sul riduttore dell'estrusore gomma 03 RA indica una misura relativa al punto 03 in senso radiale effettuata in accelerazione. Si rimanda il lettore al cap. 3.1 in cui sono stati approfonditi i metodi di misura delle vibrazioni.

5.1.1 Area Estrusione Gomma

Viene di seguito riportato uno spettro relativo al motore AC sulla misura 01 RV. Nel dettaglio, lo *zoom* nelle basse frequenze evidenzia un contenuto in frequenza alla velocità di rotazione dell'albero (picco in rosso) nonché della sua prima armonica (picco in viola) il cui contenuto è crescente rispetto alla fondamentale. Tale comportamento, in genere, è dovuto ad un disallineamento nel giunto di collegamento con il riduttore [41]. Inoltre, è presente un picco (in

verde) a frequenza pari a 20x la frequenza di rotazione dell'albero. A conferma della dipendenza di tale contenuto dalla velocità di rotazione del macchinario, si riporta la medesima misura acquisita a diversa velocità di rotazione (Figura 69). Il contenuto derivante dalla velocità di rotazione dell'albero (1x e 2x) aumenta a seguito dell'aumento nella velocità di rotazione.

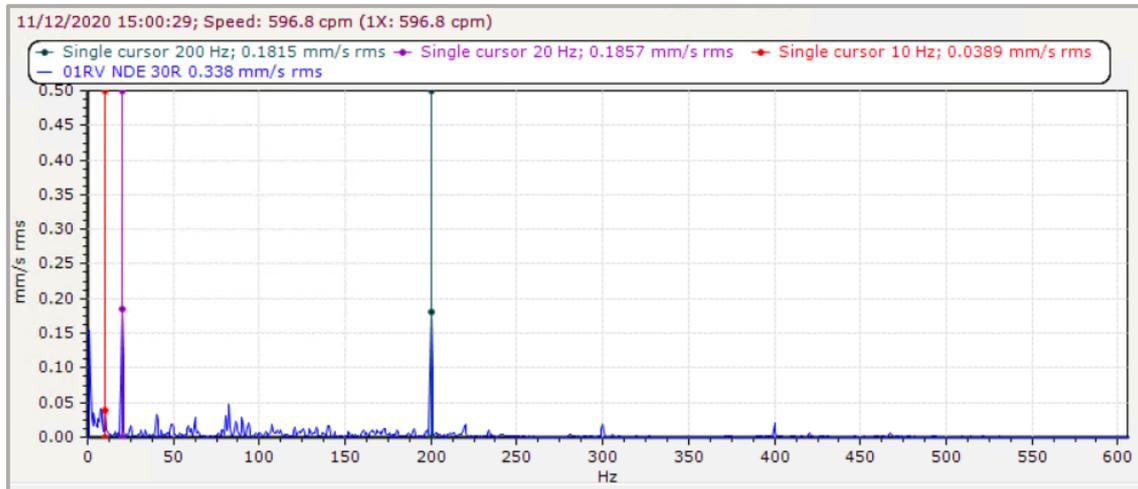


Figura 68 Spettro nelle basse frequenze sulla misura 01RV sul motore AC con velocità di rotazione pari a 597 rpm.

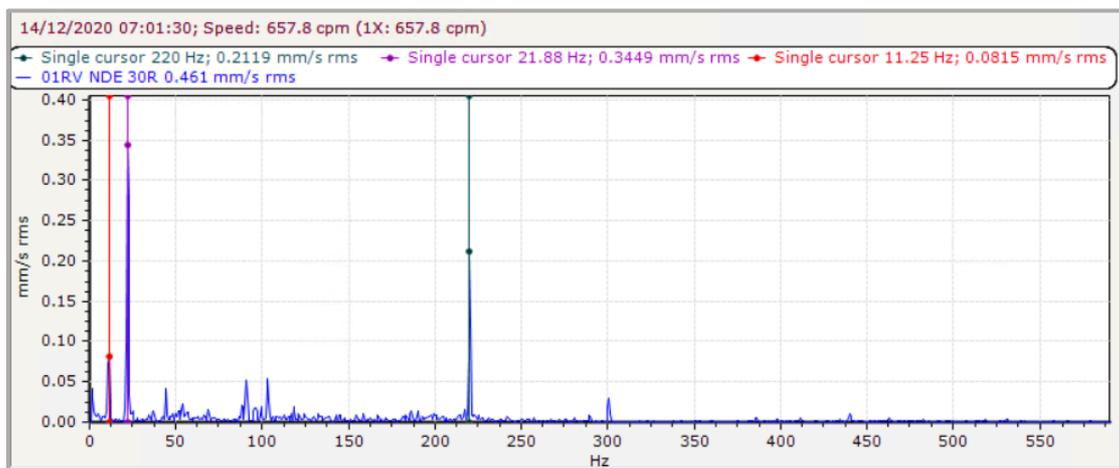


Figura 69 Spettro nelle basse frequenze sulla misura 01RV sul motore AC con velocità di rotazione pari a 658 rpm.

Viene di seguito riportato uno spettro nelle alte frequenze sul medesimo punto di misura ma in accelerazione (01 RA). Si evince un contenuto in frequenza con fondamentale pari a circa 3 kHz con bande laterali di 41 Hz. Tale contenuto è causato dall'inverter del motore AC, il quale presenta una frequenza di commutazione dei semiconduttori (*carrier frequency*) pari a 3 kHz, mentre la modulazione è una 2x la pseudo-frequenza di linea. Tale comportamento è tipico dei motori AC con VFD (*Variable Frequency Drives*) con bassa frequenza di commutazione i quali, in genere, risultano anche più rumorosi ma presentano meno perdite [54].

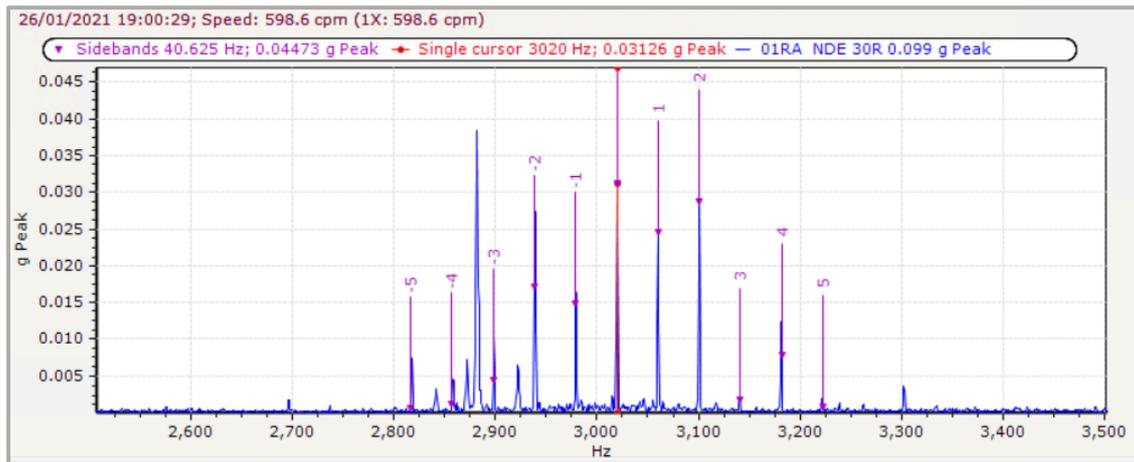


Figura 70 Spettro nelle alte frequenze sulla misura 01 RA del motore AC. Si evidenzia un picco causato dalla frequenza di commutazione dell'inverter a 3 kHz modulato da 2x la frequenza della tensione di ingresso al motore.

A conferma di quanto sopra, si riporta un ulteriore spettro acquisito a diversa velocità di rotazione del motore (Figura 71). A meno della frequenza di *slip*, la frequenza della tensione in ingresso al motore vale:

$$f = n * p \quad (5.1)$$

con

n : velocità di rotazione dell'albero (Hz)

p : numero di coppie polari

Nel caso in esame, il motore presenta 2 coppie polari, pertanto la pseudo-frequenza di linea vale circa 20 Hz per una velocità di 600 rpm e circa 12 Hz per una velocità di 360 rpm.

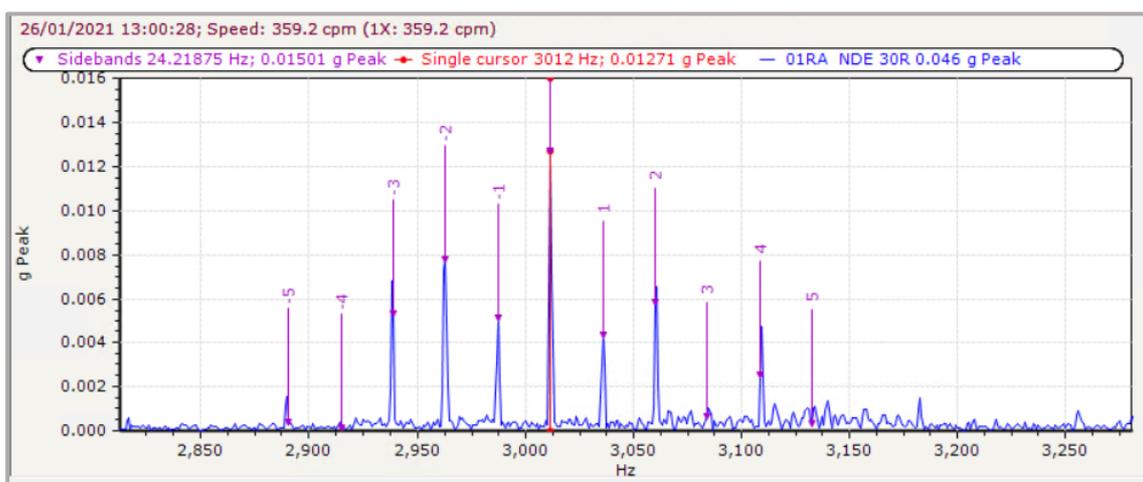


Figura 71 Spettro nelle alte frequenze sulla misura 01 RA del motore AC. Si evidenzia un picco causato dalla frequenza di commutazione dell'inverter a 3 kHz modulato dalla 2x la frequenza della tensione in ingresso al motore.

In Figura 72, di seguito, è mostrato uno spettro relativo alla misura 03 RV effettuata sul riduttore di giri dell'estrusore. Si evidenzia un minimo contenuto alla 1x la frequenza di rotazione dell'albero, dopodiché il contenuto prevalente è causato dalla 20x la frequenza di rotazione ed armoniche, evidenziate in viola. Tale contenuto è dovuto all'ingranamento del pignone calettato sull'albero. A conferma di ciò, si riporta in Figura 73 uno spettro relativo a velocità di rotazione diverse.

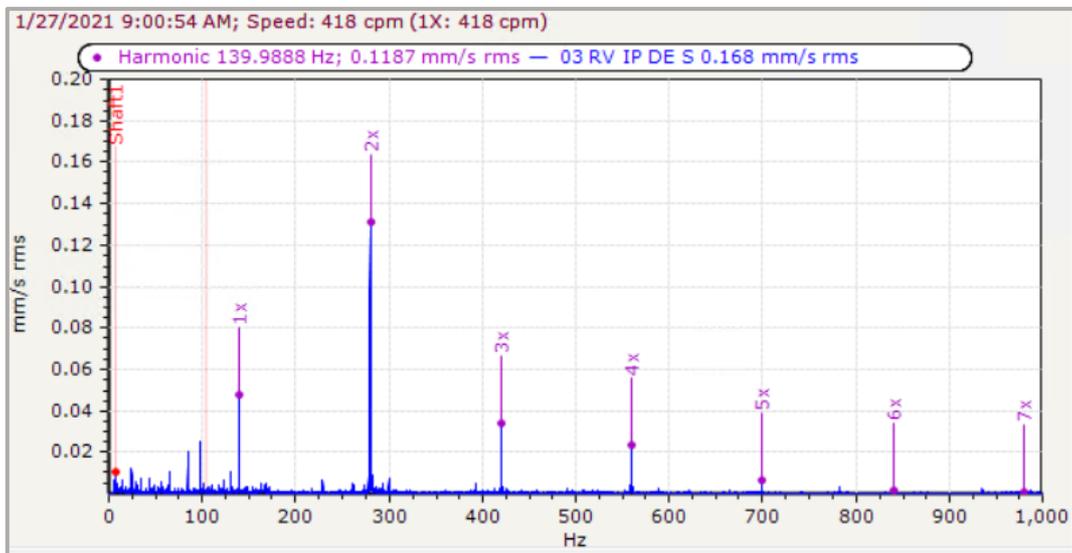


Figura 72 Spettro in velocità sulla misura 03 RV sul riduttore di giri dell'estrusore di gomma a velocità 835 rpm. Il contenuto preponderante è quello dovuto all'ingranamento del pignone, evidenziato dal cursore viola.

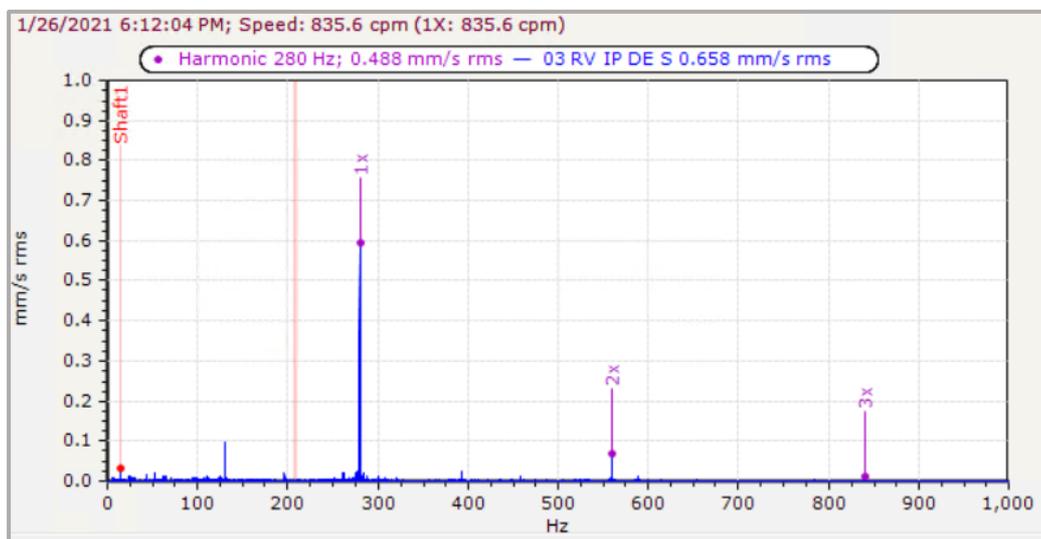


Figura 73 Spettro in velocità sulla misura 03 RV sul riduttore di giri dell'estrusore di gomma a velocità 835 rpm. Il contenuto dovuto all'ingranamento aumenta all'aumentare della velocità di rotazione.

5.1.2 Area Mescolatore

Vengono dunque presentati gli spettri relativi alle misure effettuate sul riduttore di giri del mescolatore aperto del sito. In Figura 74, di seguito, è visualizzato uno spettro in velocità sulla misura 01 RV. Si evidenziano:

- Il picco dovuto alla rotazione dell'albero, evidenziato dal cursore *shaft1*;
- Il picco dovuto alla frequenza di ingranamento, evidenziato dal cursore *gear wheel 1*, e seconda armonica;
- Il picco a frequenza pari a 300 Hz, dovuto al circuito di raddrizzamento AC/DC mediante ponte esafase del motore. Poiché la frequenza di linea è pari a 50 Hz, il ponte genera una tensione continua pulsante con frequenza pari a 6x la frequenza di linea [54].

Nello *zoom* riportato in Figura 75, inoltre, è possibile visualizzare la modulazione, alla frequenza di rotazione dell'albero, del contenuto alla frequenza di ingranamento, come è noto da letteratura [41]. Lo stesso contenuto a 300 Hz, del resto, risulta essere modulato dalla frequenza di rotazione dell'albero in ingresso, come mostrato in Figura 76.

Il contenuto a 2x la frequenza di ingranamento, del resto, mostra comportamento crescente rispetto alla frequenza fondamentale. Tale comportamento non è generalmente previsto, in quanto le armoniche della frequenza di ingranamento dovrebbero diminuire, mentre un aumento nelle armoniche potrebbe essere sintomo di usura del fianco dei denti [41].

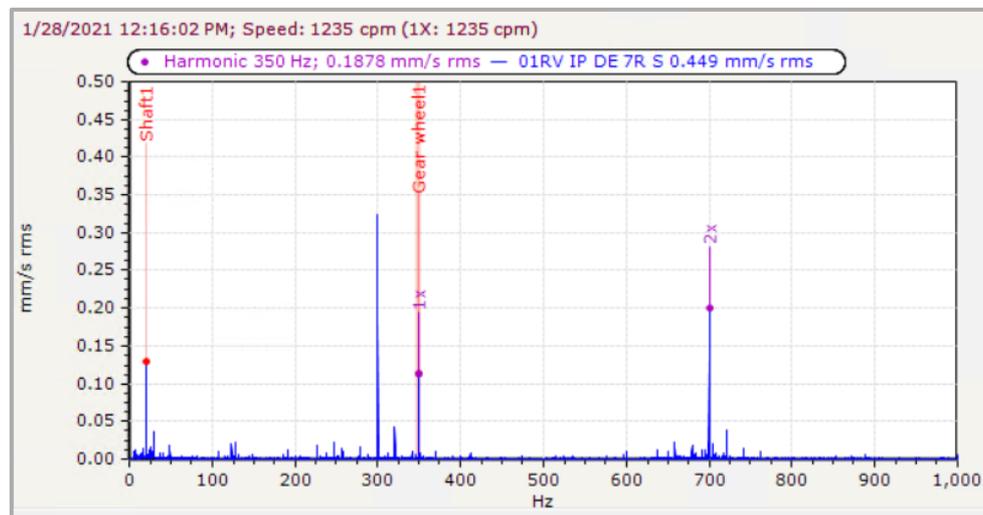


Figura 74 Contenuti in frequenza sulla misura 01 RV del riduttore di giri del mescolatore di gomma.

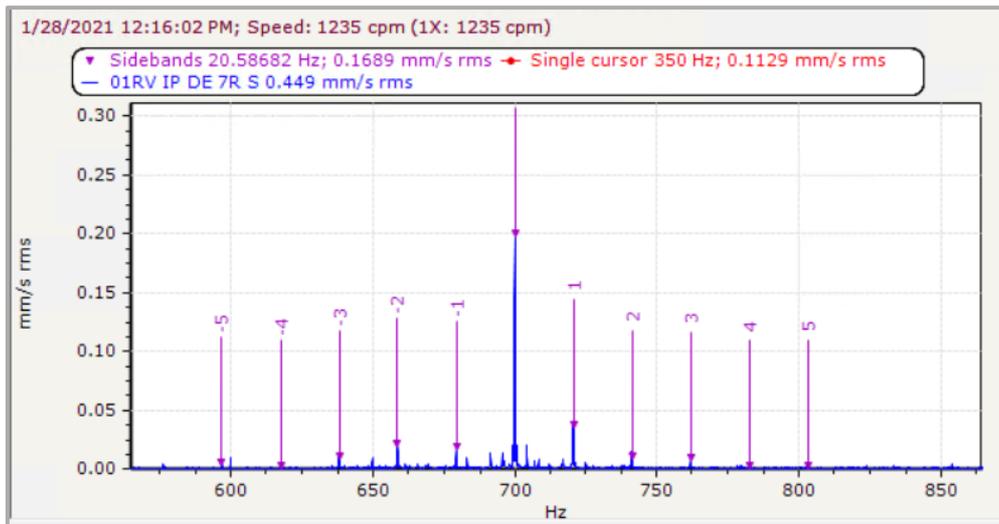


Figura 75 Modulazione alla frequenza di rotazione dell'albero in ingresso sulla frequenza di ingranamento.

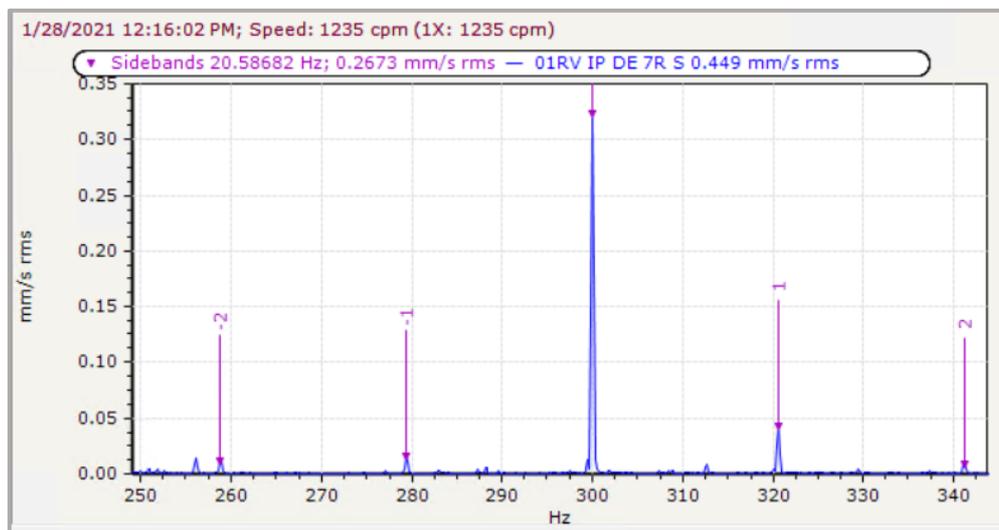


Figura 76 Modulazione alla frequenza di rotazione dell'albero sulla frequenza di raddrizzamento

Mentre il contenuto causato dalla frequenza di rotazione dell'albero dipende esclusivamente da esso, e dimostra, in genere, un comportamento crescente al crescere della velocità di rotazione; l'ingranamento delle ruote causa delle vibrazioni variabili a seconda sia della velocità di rotazione che dal carico da esse trasmesso. In Figura 77. di seguito, è possibile osservare due spettri effettuati sulla misura 01 RV con intervallo temporale di circa 1 h. Le condizioni operative del macchinario nelle due misure sono riassunte in Tabella 11. Si noti come la misura del carico venga effettuata indirettamente mediante acquisizione da PLC della corrente assorbita dal motore come spiegato nel cap. 4.2.

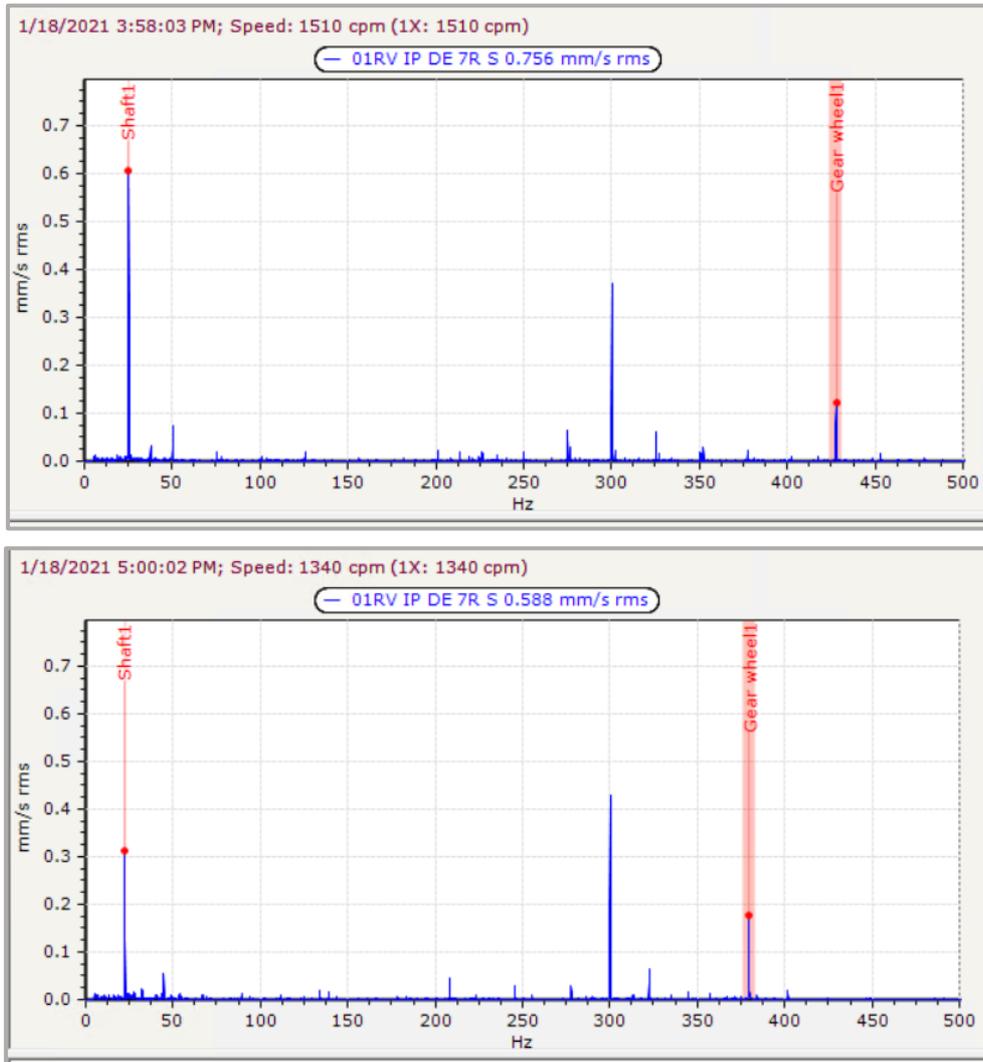


Figura 77 Spettri relativi alla misura 03 RV in diverse condizioni di velocità di rotazione e carico.

Ora	n motore (rpm)	i assorbita motore (A)
3:58 PM	1510	185
5:00 PM	1340	334

Tabella 11 Condizioni di velocità e corrente assorbita dal motore nelle due misure

Dai dati sperimentali, è possibile osservare:

- Il contenuto alla frequenza di rotazione, denotato dal cursore *shaft 1*, diminuisce a seguito della diminuzione della velocità di rotazione;
- Il contenuto causato dall'ingranamento, denotato dal cursore *gear wheel 1*, aumenta a seguito di un aumento della corrente assorbita e, di conseguenza, del carico trasmesso;
- Il contenuto a 300 Hz dovuto al circuito di raddrizzamento aumenta a seguito dell'aumento della corrente assorbita.

In Figura 78, di seguito, è riportato uno spettro relativo alla misura 03 RV sul medesimo macchinario.

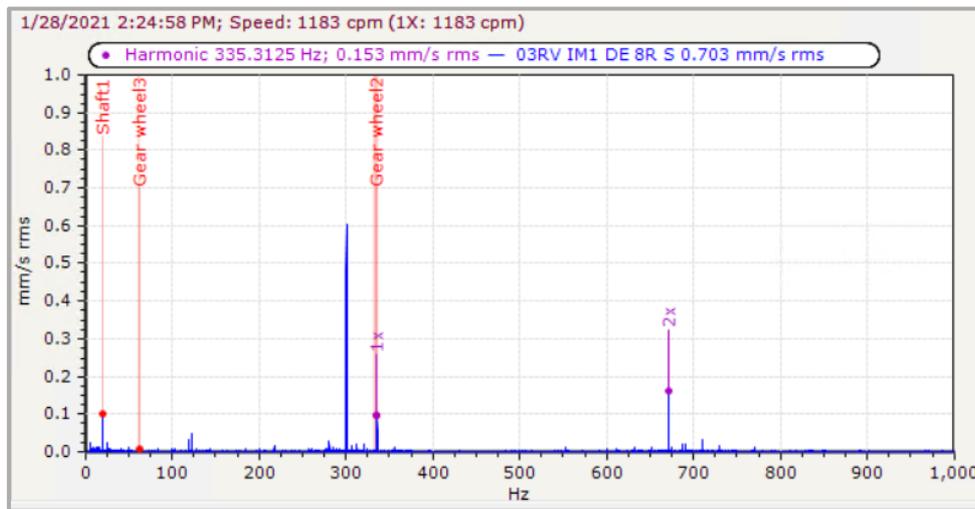


Figura 78 Spettro relativo alla misura 03 RV sul riduttore di giri del mescolatore di gomma.

Si evidenzia:

- Il contenuto dovuto alla frequenza di raddrizzamento a 300 Hz, il quale risulta essere preponderante;
- Il contenuto alla frequenza di rotazione dell'albero in ingresso, denotato dal cursore *shaft I*, il quale si trasmette sul punto di misura mediante la carcassa. Per velocità di rotazioni maggiori, il contenuto derivante dalla rotazione dell'albero in ingresso diventa predominante, come osservabile in Figura 80;
- La frequenza di ingranamento della corona calettata sull'albero, denotata dal cursore *gear wheel 2*. Analogamente a quanto visto in Figura 74, la seconda armonica, evidenziata in viola, risulta avere comportamento crescente rispetto alla fondamentale;
- La frequenza di ingranamento del pignone calettato sull'albero, denotato dal cursore *gear wheel 3*. Tale contenuto è piuttosto basso sebbene, dallo *zoom* presentato in Figura 79, la seconda armonica presenti ancora comportamento crescente rispetto alla fondamentale, e risulta modulata dalla frequenza di rotazione dell'albero su cui essa è calettata;

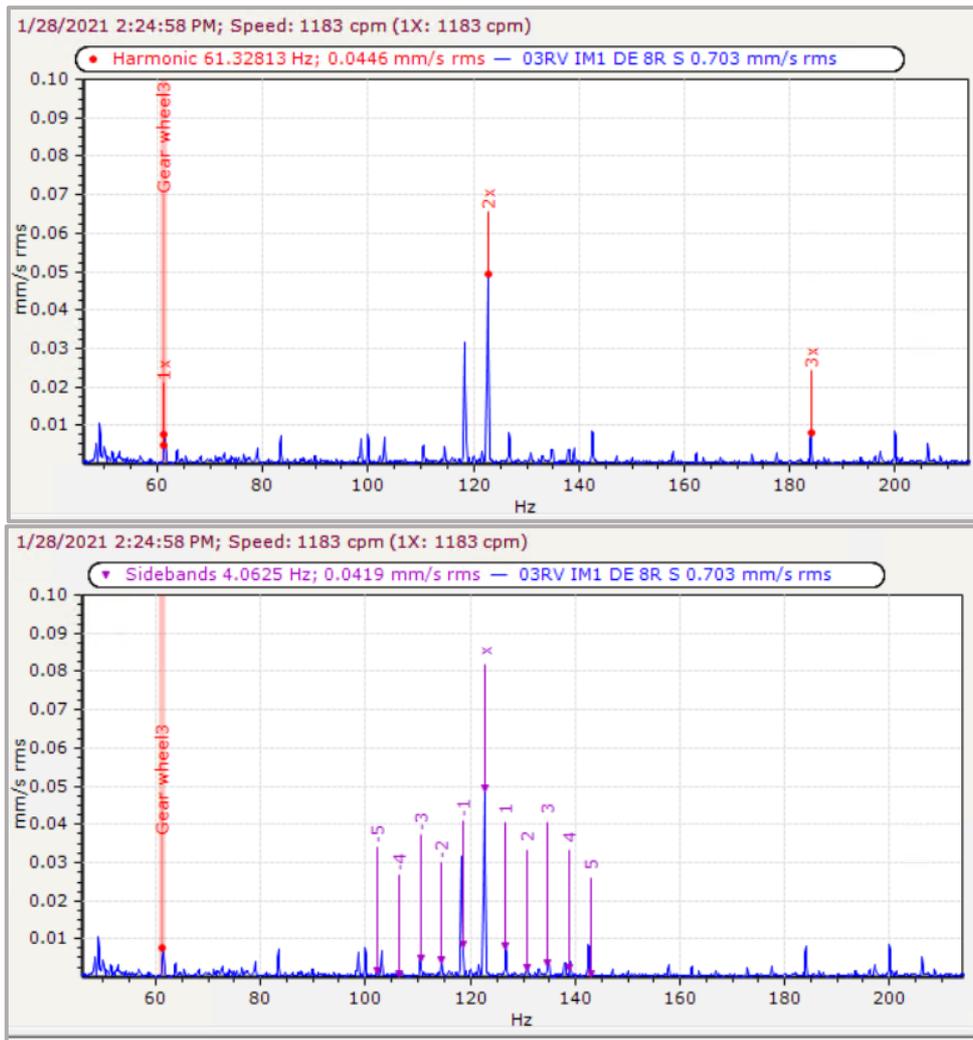


Figura 79 Zoom dello spettro relativo alla misura 03 RV in cui si evidenzia il comportamento crescente della seconda armonica della frequenza di ingranamento, modulata dalla frequenza di rotazione dell'albero.

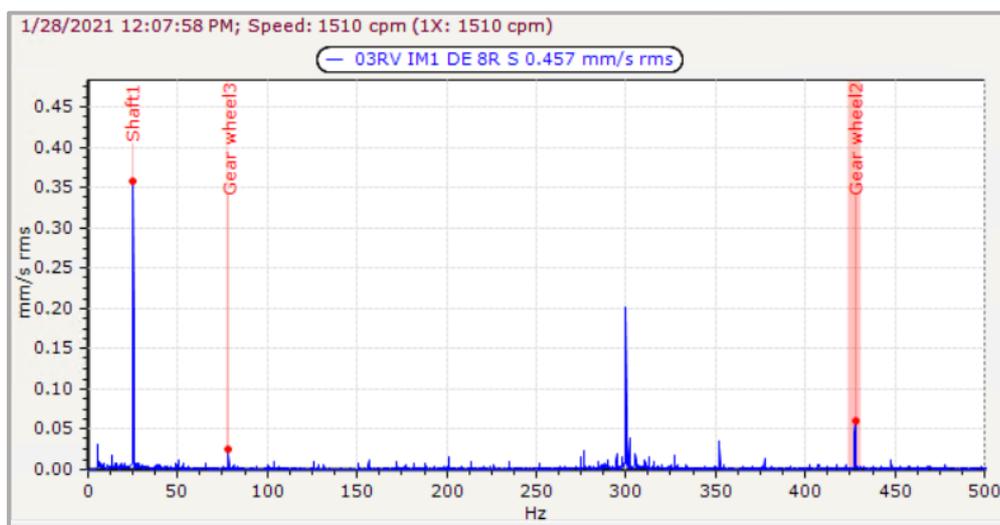


Figura 80 Spettro relativo alla misura 03 RV. Per tali velocità di rotazione, il contenuto della rotazione dell'albero veloce in ingresso al macchinario, che si trasmette sul punto di misura mediante la carcassa, diventa predominante.

Si presenta, infine, una misura in involuppo di tipo 3 sul punto 03 (03 R E3) con segnale nel tempo e spettro in Figura 81. Si evidenzia un contenuto minimo dovuto alla frequenza di gabbia (*FFT*) del cuscinetto modello 22316 montato sull'albero, nonché la frequenza di rotazione dell'albero, la quale provoca degli impulsi nel diagramma nel tempo, evidenziati dalla banda in viola.

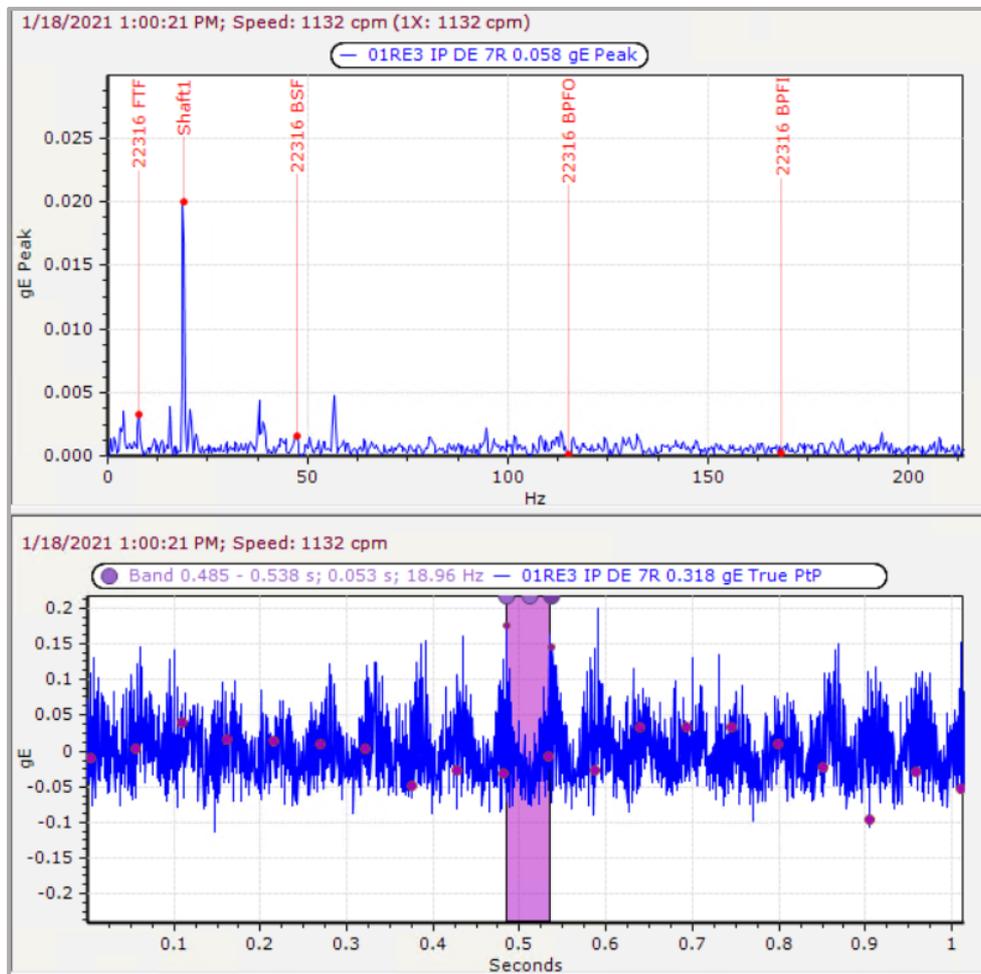


Figura 81 Spettro e diagramma nel tempo di una misura in involuppo di tipo 3 sul punto di misura 03 del riduttore di giri mescolatore gomma.

5.2 Correlazione con i dati di processo

Nella seguente sezione, verranno presentati dei grafici volti ad evidenziare il rapporto tra i diversi fenomeni vibratorii, evidenziati e descritti nella sezione precedente, e le condizioni operative dei macchinari, descritte in funzione di dati di velocità e di processo. Tale studio ha il fine di essere un riferimento per l'eventuale futura impostazione di soglie di allarme e preallarme sul valore di *overall* di vibrazione.

In Figura 82 è riportato un grafico di dispersione riportante il valore di *overall* di vibrazione misurato in corrispondenza delle sedi dei cuscinetti lato motore (*DE*) del riduttore di giri dell'estrusore gomma. I valori rappresentati con un cerchio sono ottenuti come media di almeno dieci valori, mentre le curve continue sono curve di *fitting* polinomiale del terzo ordine. In

corrispondenza dell'albero veloce in ingresso, nonché del primo albero intermedio, il livello di vibrazione misurato segue un andamento parabolico al variare della velocità di rotazione della vite di estrusione. Dalla Figura 72 e Figura 73 presentate, è chiaro che l'andamento del valore *overall* segua il contenuto a 20x la frequenza di rotazione dell'albero dovuto all'ingranamento, il quale risulta essere preponderante. Dal secondo albero intermedio in poi, la misura risulta essere molto bassa, non superando il valore di 0.1 mm/s rms. Il livello basso di vibrazione, sul quale risulta dunque difficile impostare delle soglie di monitoraggio, può essere dovuto alle basse velocità di rotazione alle quali il macchinario opera, dall'elevato spessore della carcassa del macchinario, la quale non consente una trasmissione delle sollecitazioni dal cuscinetto all'accelerometro; oppure potrebbe essere dovuto alla bassa sensibilità dello strumento di misura rispetto ai fenomeni vibrazionali osservati. In ogni caso, la metodologia impiegata per il monitoraggio dello stato di salute del macchinario non è efficace a prevederne una possibile condizione di guasto incipiente.

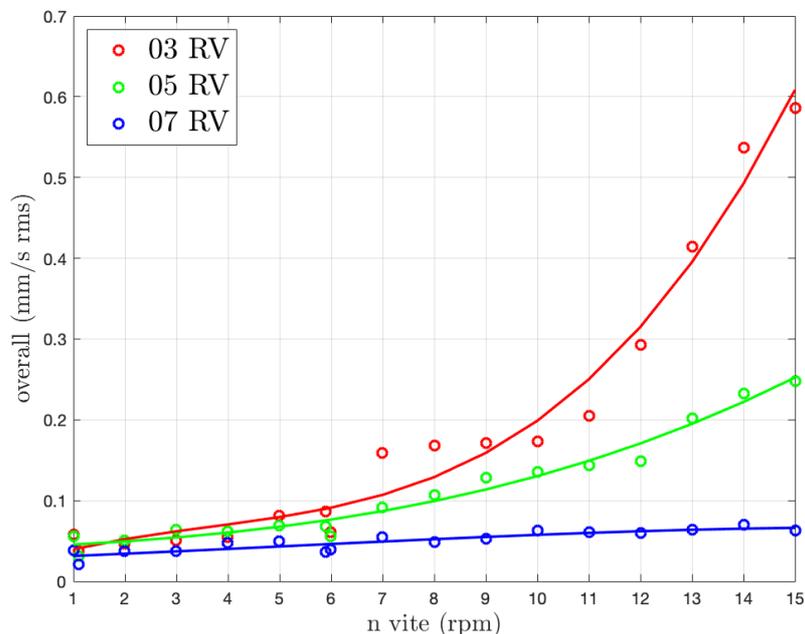


Figura 82 Diagramma di dispersione relativo alla misura di vibrazione overall lato motore sui vari alberi del riduttore dell'estrusore di gomma.

Si riporta, inoltre, un grafico analogo a quello presentato in Figura 82 per la sola misura 03 RV, in cui le curve sono parametrizzate in funzione del tipo di gomma lavorata. I valori riportati rappresentano una media dei valori sperimentali acquisiti di almeno dieci valori. Dai dati sperimentali osservati, la lavorazione di tessuto metallico risulta essere la più gravosa in termini di livello vibrazionale, e tale distacco è tanto più evidente quanto più ci si sposta verso le alte velocità. Sebbene gli spettri acquisiti sul macchinario siano relativamente scarni, come osservato sopra, tale risultato può essere un utile punto di partenza qualora si decidesse di monitorare il macchinario mediante tecniche vibrazionali dedicate.

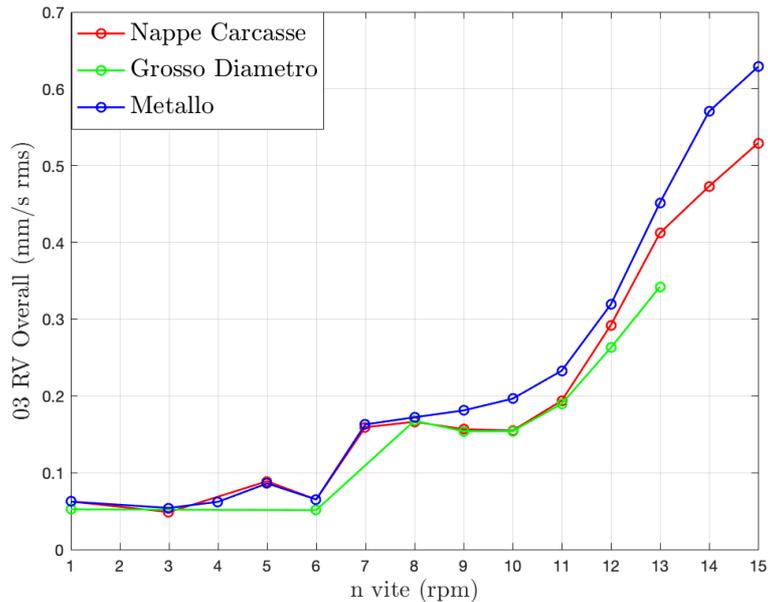


Figura 83 Dati misurati di Overall sulla misura 03 RV del riduttore estrusore gomma parametrizzati in funzione del tipo di gomma lavorato.

Per quanto concerne il riduttore di giri del mescolatore di gomma, in di seguito è riportato un diagramma di dispersione, ottenuto sul punto di misura 01 RV, in cui sono riportati i valori di vibrazione e corrente assorbita dal motore. I punti sono ottenuti come media di almeno 20 valori. È possibile notare:

- Il contributo derivante dalla frequenza di rotazione dell'albero (*shaft 1*) cresce in forma parabolica;
- Il contributo derivante dall'ingranamento del pignone sull'albero veloce in ingresso (*gear wheel 1*) assume valori relativamente bassi in tutto l'intervallo di funzionamento, sebbene mostri un certo comportamento crescente rispetto alla velocità di rotazione, in particolare fino a 1300 rpm, dopodiché torna a valori di vibrazione piuttosto moderati;
- Il livello complessivo di *overall* risulta essere fortemente dipendente dalla corrente assorbita soprattutto nel basso range di vibrazione. Ciò è dovuto al contenuto a 300 Hz, evidenziato in Figura 74, dovuto al circuito di raddrizzamento AC/DC. I picchi di corrente, infatti, ritrovano una corrispondenza nei picchi di *overall*, mentre il contributo derivante dall'ingranamento e dalla rotazione dell'albero sono secondari.

Infine, è presentato l'andamento del livello di vibrazione effettuato sul punto di misura 09 RV del medesimo macchinario, corrispondente alla sede del cuscinetto lato motore dell'albero di uscita del cilindro anteriore del mescolatore (Figura 85). Il valore di *overall* è fortemente influenzato dal contributo derivante dal ponte raddrizzatore e dalla frequenza di rotazione dell'albero veloce in ingresso, i quali si trasmettono per mezzo della carcassa del macchinario. In particolare, il valore di vibrazioni segue l'andamento della corrente fino a circa 1300 rpm dopodiché il contenuto derivante dalla rotazione dell'albero, caratterizzato da andamento parabolico, diventa predominante.

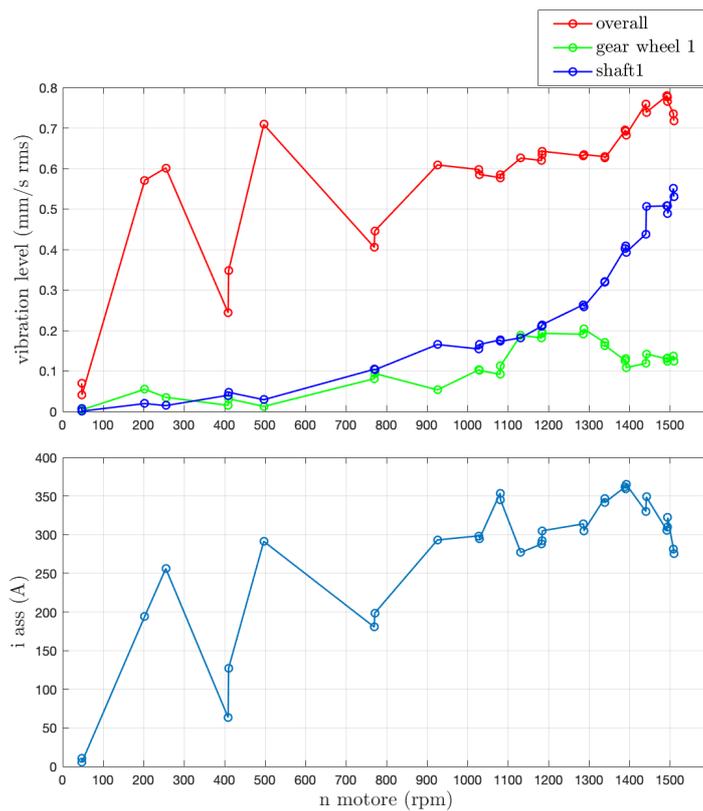


Figura 84 Dati acquisiti sulla misura 01 RV effettuata sul riduttore di giri del mescolatore gomma.

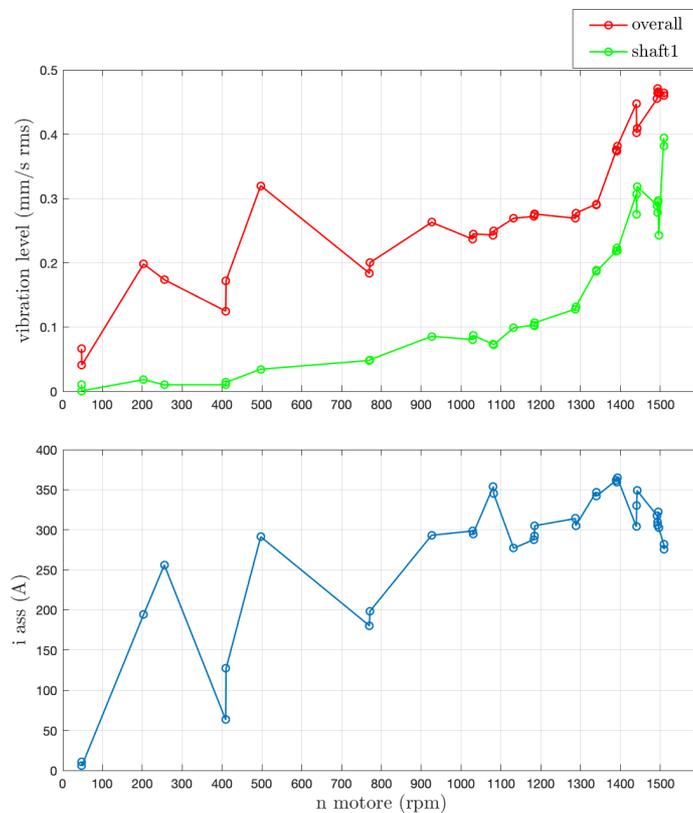


Figura 85 Dati acquisiti sulla misura di vibrazioni e corrente assorbita sul punto di misura 09 RV.

5.3 Studio di influenza sulla qualità della produzione

Come già anticipato, è stato infine studiato l'andamento del livello di vibrazione dei macchinari per comprendere se esistesse una correlazione con l'insorgenza di difetti sul prodotto lavorato, il che risulta essere un elemento di forte criticità nell'area di Alimentazione Gomma, come evidenziato nel cap. 2.4.5. La scelta effettuata, per tale studio, è stata quella di selezionare i punti di misura prossimi all'area di lavorazione del materiale, dunque in corrispondenza degli alberi lenti di uscita dai riduttori. Come evidenziato nel precedente capitolo, relativo all'impostazione delle per il monitoraggio stato di salute dei macchinari, le misure in accelerazione effettuate sul riduttore di giri denotano la scarsa capacità, da parte delle metodologie e strumentazioni selezionate, nello svolgimento di tale analisi. Pertanto, il macchinario che si è prestato a tale studio è stato il solo mescolatore di gomma.

Il punto di misura selezionato è stato il 09 RV, corrispondente al cuscinetto lato cilindro montato sull'albero di uscita del cilindro anteriore del mescolatore.

Per quanto concerne la misura di qualità del prodotto lavorato, essa viene effettuata lungo la linea di produzione in corrispondenza dell'avvolgimento del prodotto nelle bobine. Tale area corrisponde all'ultima lavorazione effettuata sul prodotto ed è denominata *enroulage*. Al termine dell'avvolgimento, il sistema di gestione della produzione registra la bobina sullo storico di produzione, con informazioni relative al tipo di prodotto, lunghezza, peso, ecc. Insieme a ciò, alla bobina viene attribuito un codice alfanumerico corrispondente alla qualità attribuita all'unità prodotta stessa. Le informazioni contenute nel codice vengono di seguito riassunte in Tabella 12:

Elemento	Significato
Classifica	<p>Tale componente riporta la misura complessiva della qualità del prodotto. In base a tale classifica, il prodotto può essere immediatamente spedito al cliente oppure deve subire rilavorazioni ed epurazioni successive. Si elencano di seguito le classifiche impiegate:</p> <ul style="list-style-type: none">- D: Prodotto direttamente inviato al cliente.- R2: Prodotto inviabile al cliente sebbene la qualità sia inferiore.- R1: Il prodotto non può essere inviato e deve subire epurazioni di vario genere prima di essere consegnato.- K: Classifica di tipo provvisorio, viene valutata dall'organo di controllo della qualità e viene modificata nelle altre tipologie di classifiche.- CL: Scarto. Il prodotto non è inviabile al cliente e non può essere in nessun modo riclassificato.
Tipo di difetto	<p>Tale elemento, rappresentato mediante un numero, fornisce informazioni circa il tipo di difetto che ha causato la classifica descritta sopra.</p>

Tabella 12 Metodo di classificazione del prodotto avvolto.

Nel caso in esame, come presentato in Figura 32, la principale causa di difetti sul prodotto finito risultano essere i grumi di gomma, evidenziato nei dati di produzione mediante il numero

10. Una volta ottenuti i dati di produzione relativi alla campagna di acquisizione di 4 settimane, dunque, è stato possibile estrarre una lista di unità produttive caratterizzate da una classifica non conforme causa grumi (es: R2 10 e così via).

Poiché la misura di qualità non viene effettuata in maniera sincrona rispetto ai dati acquisiti dalle centraline IMx, del resto, è stato necessario calcolare l'intervallo temporale Δt che intercorre tra il passaggio della gomma nei macchinari e la generazione della classifica del prodotto avvolto. Tale intervallo non è altro che la somma dei tempi-ciclo di produzione delle diverse unità produttive che intercorrono tra il mescolatore gomma e l'area di avvolgimento, oltre che il tempo di avanzamento del tessuto tra le unità. In Figura 86, di seguito, è schematizzato la linea di lavorazione della gomma, in cui sono evidenziati i tempi ciclo delle varie unità nonché i tempi di trasferimento del prodotto; misurati e monitorati dall'area Definizione Metodi del sito. Si noti come $\Delta t_{3,5}$ dipendano dalla lunghezza l del prodotto e velocità v di avanzamento lineare della linea, analogamente a quanto discusso nel cap. 2.4.5, in cui è già stata descritta la metodologia di calcolo del tempo ciclo di avvolgimento.



Figura 86 Calcolo dei tempi ciclo di produzione per la sincronizzazione dei dati di qualità con i dati di vibrazione. Il tempo ciclo di trasporto del tessuto dal gruppo calandra verso la pedana di avvolgimento dipende dalla lunghezza l del prodotto e velocità v di avanzamento lineare della linea.

In Tabella 13, di seguito, sono riassunti i valori dei tempi ciclo o, nel caso di $\Delta t_{3,5}$, la relativa formula per il calcolo. Il tempo ciclo del gruppo calandra non è stato inserito nel computo in quanto, in prima approssimazione, esso è trascurabile rispetto agli altri contributi.

Tempo-ciclo	Valore (s)
Δt_1	193
Δt_2	/
Δt_3	$\frac{l (m)}{v (m/s)}$
Δt_4	52
Δt_5	$\frac{l (m)}{v (m/s)}$

Tabella 13 Tempi ciclo della linea di lavorazione gomma.

In tal modo, è stato possibile parametrizzare i dati di vibrazione relativi al punto 09 RV in funzione della qualità del prodotto lavorato, espresso mediante classifica alfanumerica. In Figura 87, dunque, è riportato un diagramma di dispersione in cui sono confrontati i dati vibrazionali sulla misura 09 RV, in funzione della velocità di rotazione del motore, al variare della qualità del prodotto lavorato. Con la sigla *NF* ci si riferisce alle condizioni in cui la gomma lavorata non ha dato problemi di grumi mentre la sigla *R4* è stata descritta in Tabella 12.

Ogni punto è media di almeno 3 valori, nel caso dei dati *R4*, mentre i dati *NF* sono media di almeno 20 valori. Come è possibile notare, i livelli di vibrazione sono sostanzialmente gli stessi, a prescindere del tipo di gomma lavorata.

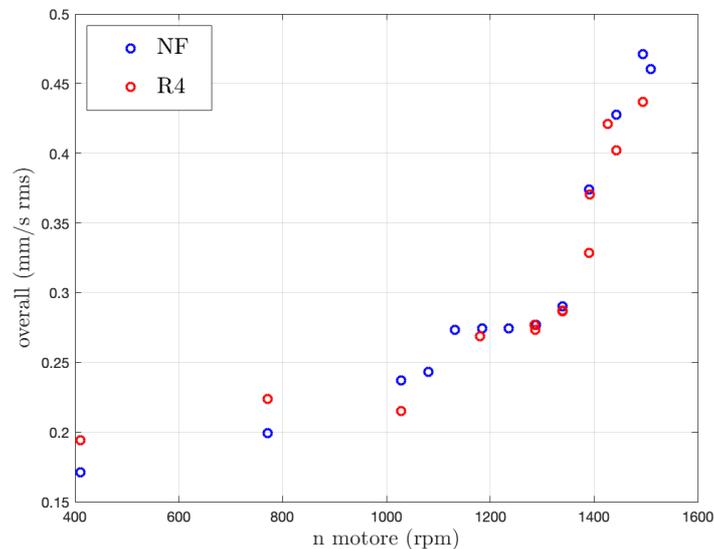


Figura 87 Valore di Overall misurato sul punto 09 RV in funzione della qualità della gomma in termini di grumi. Confronto tra lavorazione standard e classifica R4.

5.4 Considerazioni e sintesi risultati

Nel corso del seguente capitolo, sono stati riassunti i risultati significativi ottenuti a fronte dell'installazione dell'architettura di acquisizione precedentemente descritta. I punti di misura su cui gli accelerometri sono stati installati, infatti, sono ben superiori, così come i dati di processo che sono stati estratti dai *PLC* di reparto. Dopodiché, analizzando i dati sperimentali, sono stati selezionati i parametri che maggiormente influenzavano i livelli vibrazionali, al fine di proporre delle tecniche di monitoraggio sintetiche ed efficaci; così come sono stati omessi i risultati ridondanti ottenuti sui diversi punti.

Dall'analisi spettrale svolta, la quale si è basata sulla letteratura scientifica di riferimento per il *Condition Monitoring*, sono stati evidenziati dei contenuti in frequenza caratteristici del funzionamento degli azionamenti elettrici e relativi circuiti di raddrizzamento e *VFD* (*Variable Frequency Drives*), mostrandone anche la relazione in funzione della diversa velocità di rotazione e carico trasmesso dal macchinario. Sui riduttori di giri sensorizzati, del resto, sono stati osservati i contenuti in frequenza caratteristici di rotazione ed ingranamento, relative bande laterali di modulazione e comportamento delle armoniche. Mentre il comportamento derivante dalla frequenza di rotazione cresce in maniera parabolica, l'ingranamento ha, in genere, comportamento variabile in funzione della rotazione e del carico trasmesso. Ciò è stato evidenziato nei diversi punti di misura, dove il comportamento osservato è stato diverso.

Aspetto particolarmente rilevante, del resto, è stato osservare il livello di *overall* complessivo misurato sui vari stadi del riduttore di giri dell'estrusore di gomma del sito, il quale ha evidenziato una scarsa adeguatezza delle metodologie e strumentazione impiegata nel poter effettuare una strategia di manutenzione predittiva efficace. Per quanto concerne il riduttore del

mescolatore di gomma, invece, l'analisi spettrale è stata ben più ricca di informazioni, evidenziando chiaramente tutti i contributi previsti, permettendo di ottenere una base dati sperimentale utile per la predisposizione di livelli di allarme e preallarme variabili in funzione della velocità di rotazione e corrente assorbita dal motore nelle future applicazioni.

Infine, per quanto concerne l'insorgenza di grumi sul tessuto calandrato prodotto, è stato necessario estrarre, con il supporto dell'area di Definizione Metodi del sito, i relativi tempi ciclo che intercorrono tra le misure effettuate dalle centraline e la relativa misura di qualità. Parametrizzando i dati vibrazionali ottenuti in corrispondenza dell'albero di uscita del cilindro anteriore del mescolatore, dunque, è stata osservata una non correlazione statisticamente significativa tra la qualità della gomma, lavorata dal macchinario, ed i livelli vibrazionali dello stesso, mediante visualizzazione dei dati su diagramma di dispersione. Non è pertanto possibile porre sotto controllo il processo di alimentazione gomma, in termini di qualità, mediante la stessa architettura predisposta per il *Condition Monitoring*.

Conclusioni

Il livello di competizione attuale in ambito industriale richiede necessariamente una corsa verso l'impiego di moderne tecnologie che possano fungere da fattori abilitanti per il raggiungimento dei *target* industriali prefissati. In tal senso, il seguente studio ha svolto il ruolo di collegamento tra Michelin Italia, nel ruolo di detentrica di un impianto di produzione semifiniti, ed SKF Italia, nel ruolo di fornitrice di servizi di *asset management* ed Ingegneria di Manutenzione. Le moderne tecnologie sviluppate in ambito digitale, allora, vanno calzate ed adattate al contesto industriale specifico, inseguendo quelli che sono gli obiettivi specifici dell'azienda.

Attraverso le analisi di *CNA* e studio dell'indice di *OEE %*, allora, è stato descritto il contesto in cui Michelin Torino opera, sottolineando l'assenza di tecniche di manutenzione predittiva ed individuando l'area di Alimentazione Mescola come area di intervento, a causa delle perdite di produttività causa guasto che essa provoca ma anche a causa dell'insorgenza di grumi sul prodotto finito che nascono proprio in tale area. L'integrazione di dati eterogenei, come dati vibrazionali e di processo, la loro elaborazione ed analisi da remoto, allora, ha permesso di intraprendere un percorso volto alla digitalizzazione sia del processo che dei macchinari di produzione.

Per tale scopo, è stato necessario installare nuovi sensori di vibrazione e re-utilizzare vecchi sensori precedentemente installati ma non impiegati per tale scopo, aggiungendo una rete *LAN* per la comunicazione *TCP/IP* tra i dispositivi di acquisizione *IMx* ed il servizio *SKF Observer*. Inoltre, è stato necessario installare e programmare un dispositivo aggiuntivo per la conversione di protocollo da *Ethernet IP* a *Modbus TCP/IP* per la comunicazione tra PLC di reparto e *IMx*.

I dati di vibrazione e di processo così acquisiti hanno permesso di caratterizzare le condizioni di vibrazione del macchinario, sebbene nell'arco temporale esaminato non si siano verificate condizioni di malfunzionamento o guasto. Tuttavia, i dati hanno permesso di avere un riferimento storico sul quale sarà possibile impostare delle soglie di allarme e preallarme per il monitoraggio futuro.

L'integrazione dei dati di vibrazione con i dati di produzione, inoltre, ha dato la possibilità di effettuare studi aggiuntivi al fine di ottenere un controllo del processo. Lo studio di correlazione tra insorgenza di grumi sul prodotto finito e livello di vibrazione dei macchinari, infatti, ha evidenziato come non vi sia una corrispondenza tra i due fenomeni, permettendo di escludere la vibrazione come causa di insorgenza difetti.

La struttura di acquisizione così implementata, inoltre, fornisce potenzialità future oltre al solo controllo stato di salute delle macchine. In tal senso, si propone di svolgere studi futuri di correlazione tra insorgenza di difetti sul prodotto ed altri parametri fisici, quali, ad esempio, la temperatura di lavorazione della gomma.

Appendice A

Sono di seguito riportati i disegni di complessivo dei riduttori di giri sensorizzati nonché i dati di targa dei relativi azionamenti elettrici. I punti di misura sono evidenziati sui disegni di complessivo originali mediante un riquadro di colore rosso con il relativo numero.

Il disegno di complessivo originale del riduttore estrusore gomma è stato gentilmente fornito da Michelin Italia, che ne ha consentito la riproduzione.

Il disegno di complessivo originale del riduttore mescolatore gomma è stato fornito da Comerio Ercole, che ne ha poi consentito la riproduzione.

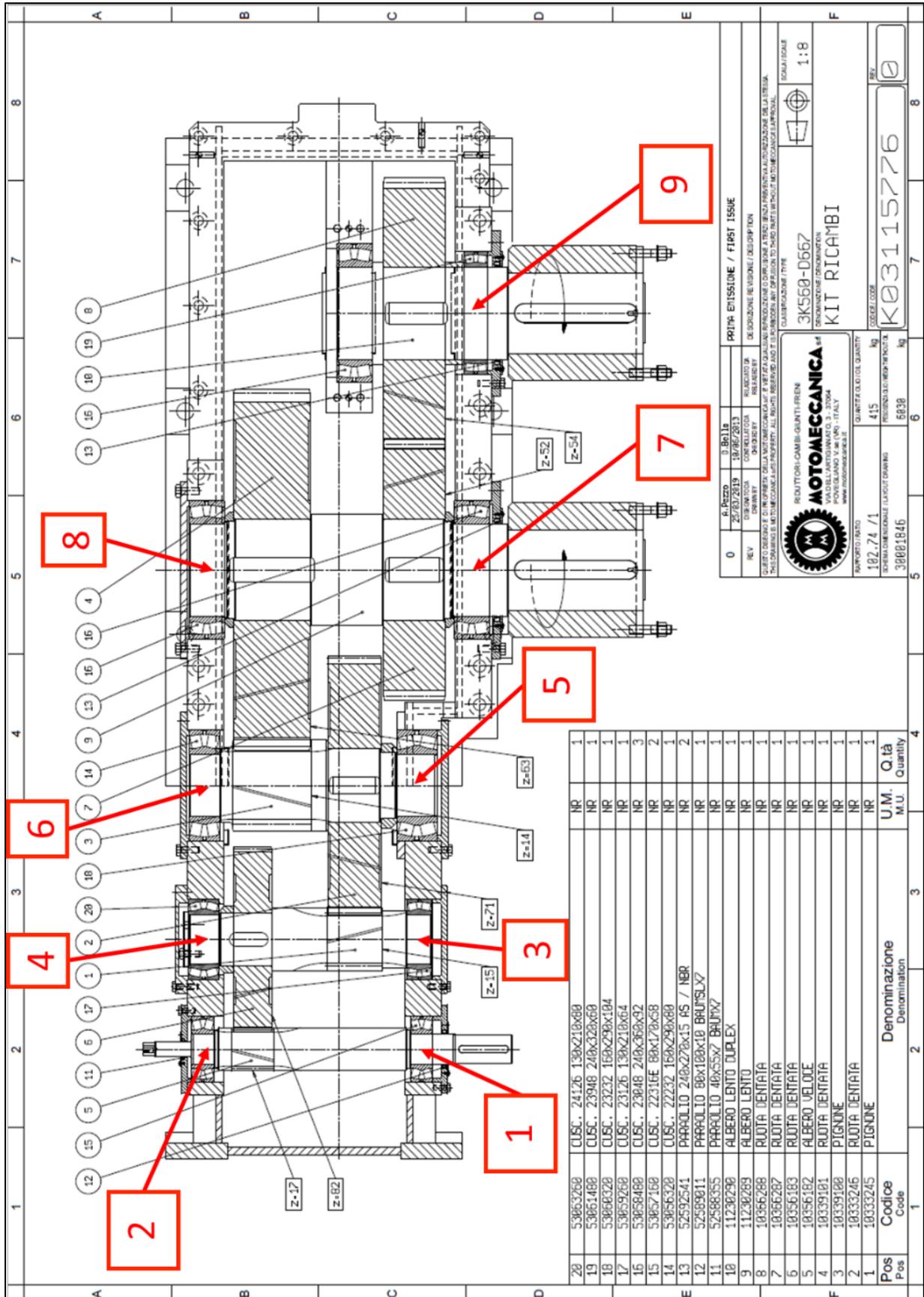
MOTORE ESTRUSORE GOMMA

Nidec Leroy-Somer LC 400					
Tipo			Trifase con Inverter		
V	Hz	rpm	kW	A	cos φ
400	50	1489	685	1155	0,88
Motor performance valid for: 400V 50 Hz at inverter input					
Hz	50				
Duty S	9				
Min Fsw	3 kHz				
Nmax	2610 rpm				

MOTORE MESCOLATORE GOMMA

ASEA LAR 256				
Tipo		CC		
V	Hz	rpm	kW	A
220	50	1510	253	13,3

RIDUTTORE MESCOLATORE GOMMA



Pos	Code	Denominazione	U.M.	Q.tà
Pos	Code	Denomination	M.U.	Quantity
20	53063260	CUSC. 24126 130x210x80	NR	1
19	53061480	CUSC. 23948 240x320x60	NR	1
18	53060320	CUSC. 23232 160x290x104	NR	1
17	53059260	CUSC. 23126 130x210x64	NR	1
16	53058480	CUSC. 23048 240x360x92	NR	3
15	53057160	CUSC. 22316E 80x170x58	NR	2
14	53056320	CUSC. 22232 160x290x80	NR	1
13	52592541	PARROLLO 240x270x15 AS / NBR	NR	2
12	52590811	PARROLLO 60x100x10 BRUNSLX7	NR	1
11	52588355	PARROLLO 40x55x7 BRUNSLX7	NR	1
10	11230290	ALBERO LENTO DUPLEX	NR	1
9	11230289	ALBERO LENTO	NR	1
8	10356298	RUOTA DENTATA	NR	1
7	10356267	RUOTA DENTATA	NR	1
6	10356183	RUOTA DENTATA	NR	1
5	10356182	ALBERO VELOCE	NR	1
4	10339101	RUOTA DENTATA	NR	1
3	10339100	PIGNONE	NR	1
2	10333245	RUOTA DENTATA	NR	1
1	10333245	PIGNONE	NR	1
Pos	Code	Denominazione	U.M.	Q.tà
Pos	Code	Denomination	M.U.	Quantity

0 Al Prezzo di Base
25/03/2013
REV
PRIMA EMISSIONE / FIRST ISSUE

DE SECONDA REVISIONE / DESCRIPTION
QUESTO DOCUMENTO È INFORMATICA E NON È VALIDO PER LA REVISIONE AUTOMATICA DELLA PRESSIONE. THIS DOCUMENT IS INFORMATICS AND IT IS NOT VALID FOR THE AUTOMATIC REVISION OF THE PRESSURE.

CLASSIFICAZIONE ITM
3K560-0667
KIT RICAMBI

REPARTO RETRO
192.74 / 1
38001846

QUANTITÀ DI OGNI QUANTITÀ
415
5838

SCALA FISCALE
1:8

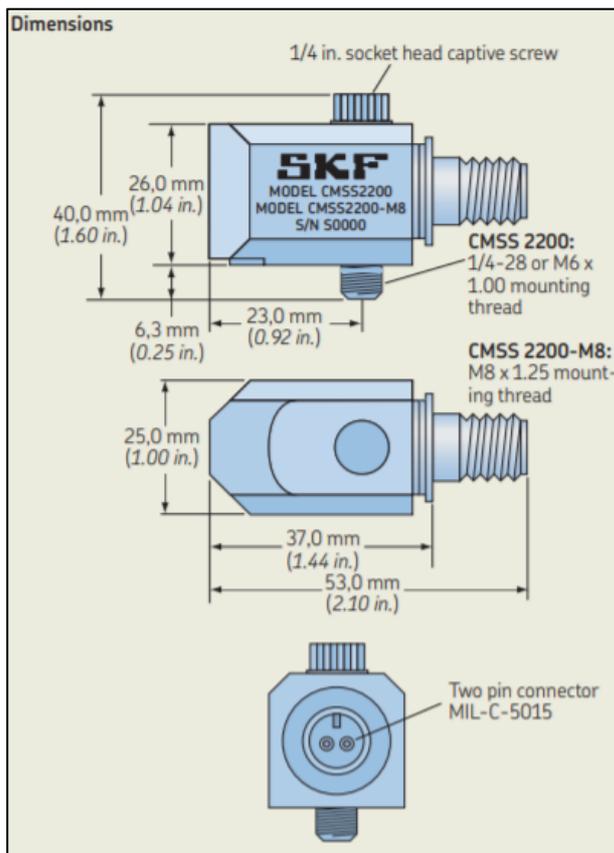
NUMERO IDENTIFICATIVO
K03115776

MOTOMECCANICA S.p.A.
POMERIGLIO (MO) - ITALY
www.motomeccanica.it

Appendice B

Sono di seguito riportati degli estratti da catalogo riportanti i dati dei trasduttori impiegati estratti da catalogo [45] e dei dispositivi di acquisizione SKF *IMx* per la quale verranno presentati i dati specifici del modello 8-plus, essendo gli altri dispositivi del tutto analoghi [55]. Inoltre, sono riportati i dati tecnici salienti del convertitore impiegato [56] e router 4G [57].

SFK CMSS2200



Electrical

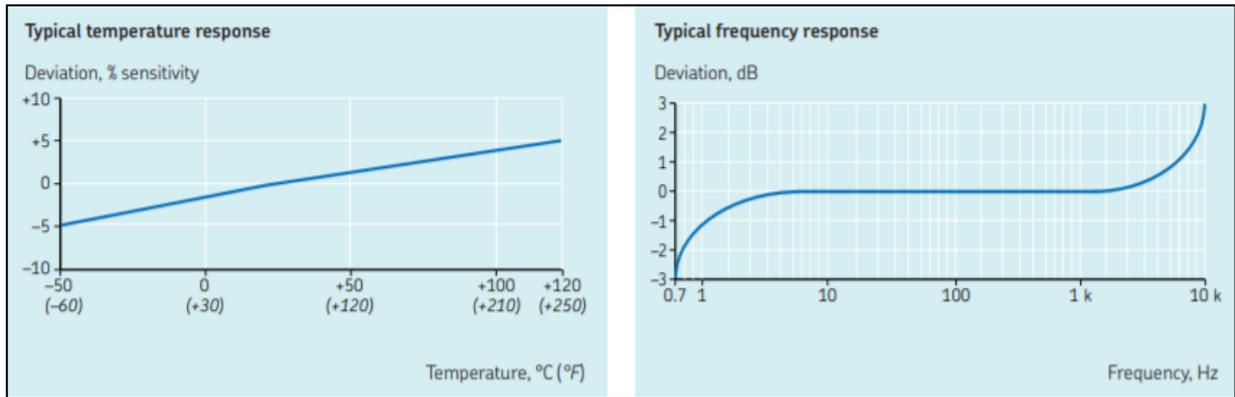
- Power requirements:
 - Voltage source: 18 to 30 V DC
 - Constant current diode: 2 to 10 mA, recommended 4 mA
- Electrical noise:
 - 2,0 Hz: 20 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Output impedance: < 100 Ω
- Bias output voltage: 12 V DC
- Grounding: Case isolated, internally shielded

Dynamic

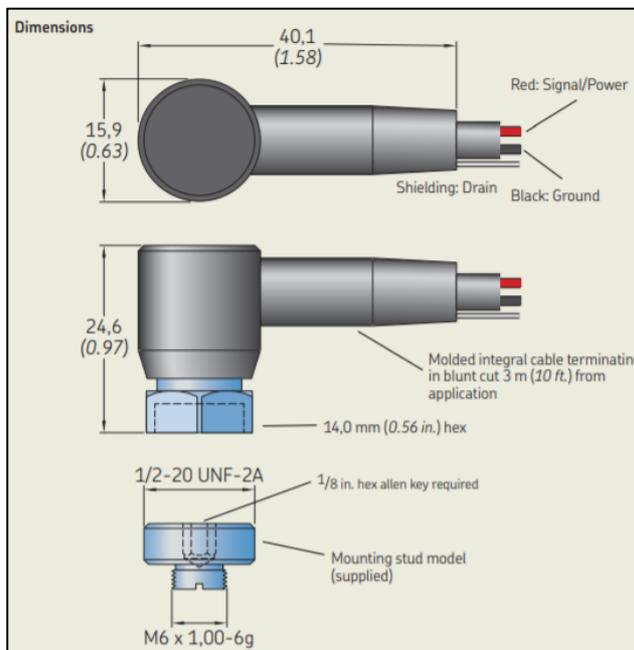
- Sensitivity: 100 mV/g
- Sensitivity precision: $\pm 5\%$ at 24 °C (75 °F)
- Acceleration range: 80 g peak
- Amplitude linearity: 1%
- Frequency range:
 - $\pm 10\%$: 1,0 to 5 000 Hz
 - ± 3 dB: 0,7 to 10 000 Hz
- Resonance frequency, mounted, nominal: 22 kHz
- Transverse sensitivity: $\leq 5\%$ of axial
- Temperature response: See graph

Environmental

- Temperature range: -50 to +120 °C (-60 to +250 °F) operating temperature
- Vibration limit: 500 g peak
- Shock limit: 5 000 g
- Electromagnetic sensitivity, equivalent g, maximum: 30 $\mu\text{g}/\text{gauss}$
- Sealing: Hermetic
- Base strain sensitivity: 0,002 g/ μstrain
- CE: According to the generic immunity standard for Industrial Environment EN 50082-2
 - Acceptance criteria: The generated "false equivalent g level" under the above test conditions should be less than 2 mg measured peak to peak



SKF WIND-100-10



Electrical

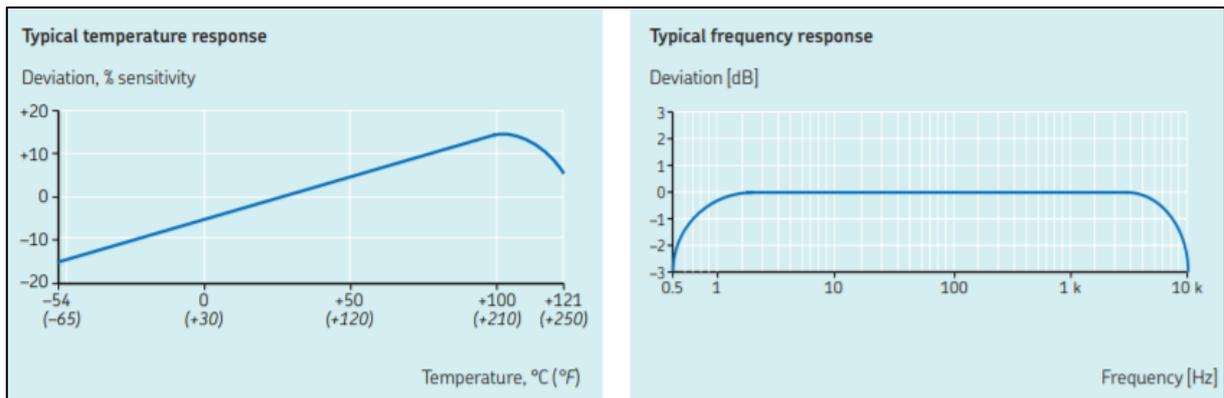
- Power requirements:
 - Voltage source: 18 to 28 V DC
 - Constant current diode: 2 to 20 mA
- Electrical noise:
 - Spectral:
 - Output impedance: < 150 Ω
- Bias output voltage: 8 to 12 V DC
- Electrical isolation (case): > 108 Ω

Environmental

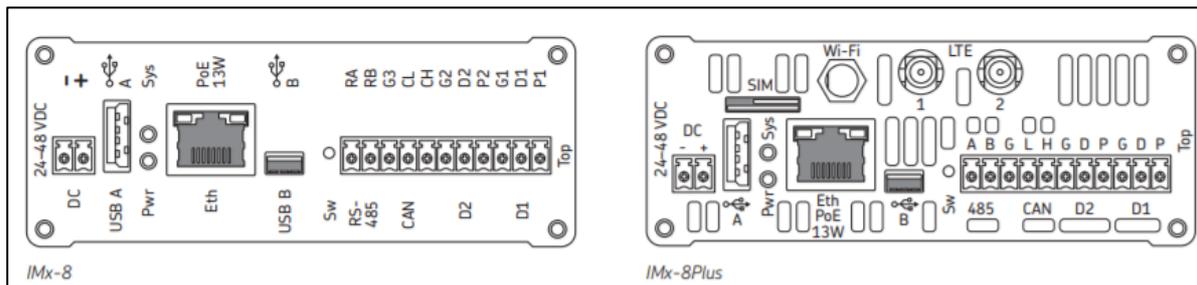
- Temperature range: -55 to +120 °C (-65 to +250 °F)
- Shock limit: 5 000 g peak
- Sealing: Welded hermetic
- CE: According to the generic immunity standard for Industrial Environment EN 50082-2
 - Acceptance criteria: The generated "false equivalent g level" under the above test conditions should be less than 2 mg measured peak to peak

Dynamic

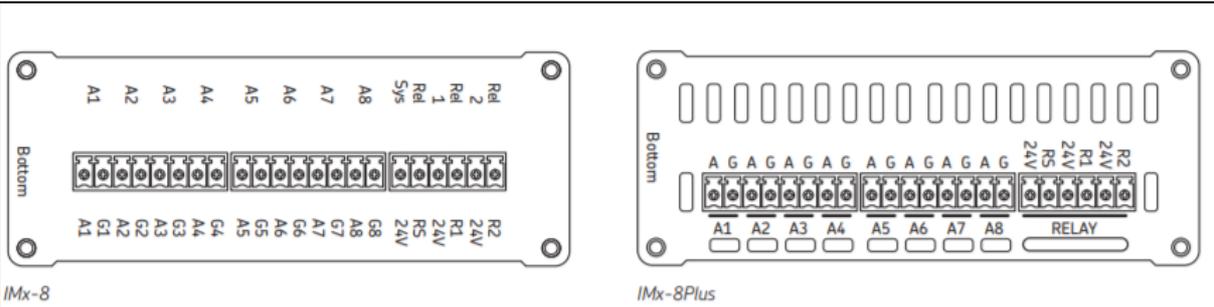
- Sensitivity: 100 mV/g
- Sensitivity precision: $\pm 15\%$ at 24 °C (75 °F)
- Acceleration range: 50 g peak
- Amplitude linearity: $\pm 1\%$
- Frequency range: ± 3 dB: 0,5 Hz to 10 kHz (30 to 600 000 cpm)
- Resonance frequency, mounted, nominal: 25 kHz (1 500 kcpm)
- Transverse sensitivity: $\leq 7\%$
- Temperature response: See graph



SKF IMx-8 plus



<p>DC input power connection</p> <p>Terminals are provided for the incoming DC power supply. A (2-way) connector is provided.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Pin</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>+</td> <td>24 to 48 V DC (nominal)</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>0 V DC</td> </tr> </tbody> </table> <p>Connect the incoming DC power to the DC terminals. It is recommended that the supply be protected by a 2 A slow blow fuse.</p> <p>The IMx-8/IMx-8Plus support Power over Ethernet (PoE) via the RJ45 connector and both power options can be applied to provide redundancy.</p> <p>USB A Host interface (Type A connector) SKF supply a Bluetooth dongle fitted in USB port A. The dongle supports Bluetooth v4.0 Low Energy.</p> <p>USB B Service interface (Type mini-B) SKF can supply an isolated cable for USB port B.</p> <p>LEDs Pwr – Power (green, normally on) Sys – System (red, normally off)</p> <p>Sw Rescue button (maintenance mode)</p> <p>D1 and D2 (Digital/tacho input connections)</p> <p>The digital input channels D1 and D2 support common types of two-, three-wire tacho sensors. For each input, 3-terminals are available:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Pin</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>G</td> <td>GND / Return</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>Signal</td> </tr> <tr> <td>P</td> <td>Power</td> </tr> </tbody> </table> <p>Digital sensor power is always enabled to the 'P' terminals. Peak current demand from the sensor should be no greater than the limit stated in the specifications, even if the average demand is less.</p>	Pin	Description	+	24 to 48 V DC (nominal)	-	0 V DC	Pin	Description	G	GND / Return	D	Signal	P	Power	<p>Eth (Ethernet)</p> <p>Connector RJ45 with LED Network support 10/100 Mbit/s</p> <p>Note: The Ethernet connection is isolated from the enclosure and is unrelated to G.</p> <p>RS485 (2-wire) for Modbus RTU</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Pin</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>(485) A/RA</td> <td>RS485 A</td> </tr> <tr> <td>(485) B/RB</td> <td>RS485 B</td> </tr> <tr> <td>G/G3</td> <td>GND</td> </tr> </tbody> </table> <p>SKF provide one 120-ohm RS485 termination resistor (coloured black) with each IMx and another as part of CMON 4135. (Not required when connecting optional GPS module).</p> <p>Notes:</p> <p>Demountable terminal connectors For the top connectors, one 11-way and one 2-way are provided.</p> <p>Interfaces When a LAN connection is being used, Modbus TCP/IP can also be supported, including some simultaneous use with Modbus RTU and support for multiple Modbus TCP/IP slave functionality. On a LAN connection, the IMx can be configured as a DHCP client to obtain its IP address automatically.</p> <p>Optional items For optional items and accessories, refer to ordering information.</p> <p>CAN For vehicle systems interfacing (currently no firmware support)</p>	Pin	Description	(485) A/RA	RS485 A	(485) B/RB	RS485 B	G/G3	GND	<p>IMx-8Plus specific</p> <p>Wi-Fi</p> <p>Wi-Fi antenna connection. Wi-Fi connectivity provides an alternative method for a TCP connection to @ptitude Observer software (Monitor service). The selection of connection method (mobile data or LAN) is a configuration choice. LAN connection is available by either Wi-Fi or RJ45.</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Standard</td> <td>802.11n</td> </tr> <tr> <td>Band</td> <td>2.4 GHz</td> </tr> <tr> <td>Network support</td> <td>Open/secured</td> </tr> <tr> <td>Security</td> <td>WPA2-PSK</td> </tr> <tr> <td>Auto connect</td> <td>To a specified SSID</td> </tr> <tr> <td>Antenna connector</td> <td>SMA female</td> </tr> </tbody> </table> <p>Whether mobile data or LAN connectivity is used the connection supports: DNS – server name lookup NTP – time synchronisation.</p> <p>Micro SIM card slot (Mobile Data)</p> <p>Firmware configurable support for physical micro-SIM (this slot) or eSIM.</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Network support</td> <td>2G, 3G, 4G</td> </tr> <tr> <td>Auto switching</td> <td>Yes</td> </tr> <tr> <td>Antenna connections</td> <td>LTE 1 and LTE 2 (SMA female)</td> </tr> </tbody> </table> <p>Additional notes for the IMx-8Plus:</p> <p>Interfaces Mobile data and Wi-Fi are alternative options for connection to @ptitude Observer software and multiple interfaces cannot be enabled simultaneously.</p>	Standard	802.11n	Band	2.4 GHz	Network support	Open/secured	Security	WPA2-PSK	Auto connect	To a specified SSID	Antenna connector	SMA female	Network support	2G, 3G, 4G	Auto switching	Yes	Antenna connections	LTE 1 and LTE 2 (SMA female)
Pin	Description																																									
+	24 to 48 V DC (nominal)																																									
-	0 V DC																																									
Pin	Description																																									
G	GND / Return																																									
D	Signal																																									
P	Power																																									
Pin	Description																																									
(485) A/RA	RS485 A																																									
(485) B/RB	RS485 B																																									
G/G3	GND																																									
Standard	802.11n																																									
Band	2.4 GHz																																									
Network support	Open/secured																																									
Security	WPA2-PSK																																									
Auto connect	To a specified SSID																																									
Antenna connector	SMA female																																									
Network support	2G, 3G, 4G																																									
Auto switching	Yes																																									
Antenna connections	LTE 1 and LTE 2 (SMA female)																																									



IMx-8

IMx-8Plus

A1 to A8 (Analogue inputs 1-8)

Channels A1 to A8 support constant current accelerometers, current or voltage inputs.

Transducer power is enabled by configuration, on a per channel basis.

Pin	Description
A1 to A8	Signal
G1 to G8	GND / Return

Relay drivers (Digital outputs)

The IMx-8/IMx-8Plus provides 3 relay driver outputs for system, warning and alarm status annunciation.

Pin	Description
24V	Relay drive power
RS	System relay output
24V	Relay drive power
R1	Relay 1 output
24V	Relay drive power
R2	Relay 2 output

The RS, R1 and R2 connections are of a type known as 'open collector' or 'open drain'. The system relay is failsafe (alarms on loss of power), R1 and R2 are non-failsafe.

Notes:

Demountable terminal connectors

For the bottom connectors, two 8-way (A1 to A4, A5 to A8) and one 6-way (relay drivers) are provided.

Current signals

When connecting a 4-20 mA current signal to an analogue input an external load resistor is required. SKF provide a set of 250-ohm load resistors (coloured blue), as part of CMON 4135.

Analogue channels

Frequency range	DC to 40 kHz
Maximum sampling frequency	102.4 kHz
Crosstalk rejection	-110 dB at 1 kHz
Vibration measurement accuracy	Amplitude: $\pm 2\%$ (up to 20 kHz), $\pm 5\%$ (20 to 40 kHz) Phase: $\pm 3^\circ$ (up to 100 Hz)

Measurement types

Overall	Acceleration, velocity, acceleration enveloping (gE*) *SKF enveloping filters 1 to 4, for bearing damage detection Optional high-pass (AC) filter, selectable cut-offs RMS, true peak and peak-peak
Detection	
FFT resolution	100 to 6 400 lines, integration/differentiation in the frequency domain
FFT window function	Hanning
Time waveform (TWF)	256 to 16 384 points (equivalent to FFT lines above)
Acquisition types	Fixed frequency range or order tracking
Synchronous measurements	Configurable across (up to) all 8-channels

Alarm capabilities

Overall value	Warning and alarm (window), scalar or vector (circular, amplitude/phase) Adaptive alarming Alarm group support
---------------	--

Other measurement types

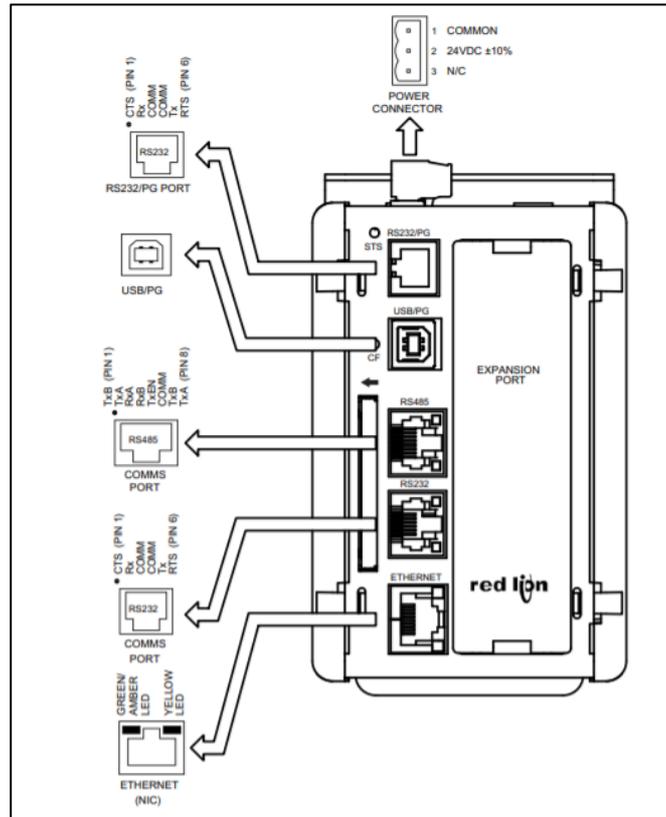
Modbus external channels	32 available
IMx derived points	Calculated values based on measurement data

Digital channels

Frequency range	From 0.016 Hz to 20 kHz (1 cpm - 1.2 Mcpm) When used for order tracking, maximum pulse frequency is 2.5 kHz
Speed accuracy	0.05% of measurement value (typically 0.01% up to 2.5 kHz)
Other capabilities	Pulse counting Configurable pulses per rev. The product of pulses per rev and rotational speed is subject to the maximum frequency range, limitation.

System interfaces	
IMx-8Plus top connectors	LTE antenna, LAN (Wi-Fi antenna and RJ45) and RS485 terminals USB A dongle provides: Bluetooth v4.0 Low Energy
IMx-8 top connectors	RJ45 connector and RS485 terminals USB A dongle provides: Bluetooth v4.0 Low Energy
Communication protocols	
	Modbus RTU, Modbus TCP/IP IEC 61850 (for communications networks in a sub-station environment)
Measurement data storage	
Modes	Data storage on time, associated measurement value or alarm condition Measurements linked to GPS and speed data (when available) Event capture trigger modes: Manual, Event, Scheduled and Run Cycle
Data time stamping support	Internal clock calendar (backup power capacitor for about 1 week) (S)NTP time synchronisation protocol Time can also be set from the IMx-Manager app
On-board/internal buffering	4 GB (non-volatile/Flash memory): 1 GB for trend and dynamic data 1 GB for event capture and run cycles 2 GB reserved
Self-diagnostics	
Built-in	Automatic hardware monitoring and diagnosis (watchdog and self-testing)
Remote access	Hardware, firmware identification and status information

Red Lion DSPSX



SPECIFICATIONS

- POWER:** 24 VDC $\pm 10\%$
200 mA min., without expansion card
1 Amp maximum with expansion card fitted
Must use NEC Class 2 or Limited Power Source (LPS) rated power supply.
- COMMUNICATIONS:**
USB/PG Port: Adheres to USB specification 1.1. Device only using Type B connection.



WARNING - DO NOT CONNECT OR DISCONNECT CABLES WHILE POWER IS APPLIED UNLESS AREA IS KNOWN TO BE NON-HAZARDOUS. USB PORT IS FOR SYSTEM SET-UP AND DIAGNOSTICS AND IS NOT INTENDED FOR PERMANENT CONNECTION.

Serial Ports: Format and Baud Rates for each port are individually software programmable up to 115,200 baud.

RS232/PG Port: RS232 port via RJ12

COMMS Ports: RS422/485 port via RJ45, and RS232 port via RJ12

DH485 TXEN: Transmit enable; open collector, $V_{OH} = 15$ VDC, $V_{OL} = 0.5$ V @ 25 mA max.

Ethernet Port: 10 BASE-T / 100 BASE-TX

RJ45 jack is wired as a NIC (Network Interface Card).

3. LEDs:

STS – Status LED indicates condition of Data Station.

TX/RX – Transmit/Receive LEDs show serial activity.

Ethernet – Link and activity LEDs.

CF – CompactFlash LED indicates card status and read/write activity

4. MEMORY:

On-board User Memory: 4 Mbytes of non-volatile Flash memory.

On-board SDRAM:

DSPSX: 2 Mbytes

DSPGT: 8 Mbytes

Memory Card: CompactFlash Type II slot for Type I and Type II cards.

- POWER CONNECTION:** Removable wire clamp screw terminal block.
Wire Gauge Capacity: 24 AWG to 12 AWG
Torque: 4.45 to 5.34 in/lb (0.5 to 0.6 N-m)
- MOUNTING:** Snaps onto standard DIN style top hat (T) profile mounting rails according to EN50022 -35 x 7.5 and -35 x 15.
- CERTIFICATIONS AND COMPLIANCES:**

SAFETY

UL Listed, File #E302106, UL508, CSA 22.2 No. 14-M05, File #E179259, UL61010-1, CAN/CSA-C22.2 No. 61010-1 and File #E317425, ANSI/ISA 12.12.01-2007, CSA 22.2 No. 213-M1987

UL Listed, File #E317425, ANSI/ISA 12.12.01-2007, CSA 22.2 No. 213-M1987 LISTED by Und. Lab. Inc. to U.S. and Canadian safety standards

IEC 61010-1, EN 61010-1: Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use, Part 1.

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

Emissions and Immunity to EN 61326: 2006: Electrical Equipment for Measurement, Control and Laboratory use.

Immunity to Industrial Locations:

Electrostatic discharge	EN 61000-4-2	Criterion B ³ 4kV contact discharge 8kV air discharge
Electromagnetic RF fields	EN 61000-4-3	Criterion A 10V/m (80 MHz to 1 GHz) 3 V/m (1.4 GHz to 2 GHz) 1 V/m (2 GHz to 2.7 GHz)
Fast transients (burst)	EN 61000-4-4	Criterion A 2kV power 1kV I/O signal
Surge	EN 61000-4-5	Criterion B 1kV L to L 2kV L to G power
RF conducted interference	EN 61000-4-6	Criterion A 3Vrms

5. **REAL-TIME CLOCK:** Typical accuracy is less than one minute per month drift. Crimson 2.0's SNTP facility allows synchronization with external servers. Battery: Lithium Coin Cell. Typical lifetime of 10 years at 25 °C.

A "Battery Low" system variable is available so that the programmer can choose specific action(s) to occur when the battery voltage drops below its nominal voltage.

This unit is NOT field serviceable. All work must be done by a qualified technician.

6. **ENVIRONMENTAL CONDITIONS:**

Operating Temperature Range: 0 to 50 °C

Storage Temperature Range: -30 to +70 °C

Operating and Storage Humidity: 80% max relative humidity, non-condensing, from 0 to 50 °C

Vibration According to IEC 68-2-6: Operational 5 to 150 Hz, in X, Y, Z direction for 1.5 hours, 2 g.

Shock According to IEC 68-2-27: Operational 30 g, 11 msec in 3 directions.

Altitude: Up to 2000 meters

7. **CONSTRUCTION:** Case body is burgundy high impact plastic and stainless steel. For indoor use only. Installation Category II, Pollution Degree 2.

Emissions:

Emissions EN 55011 Class A

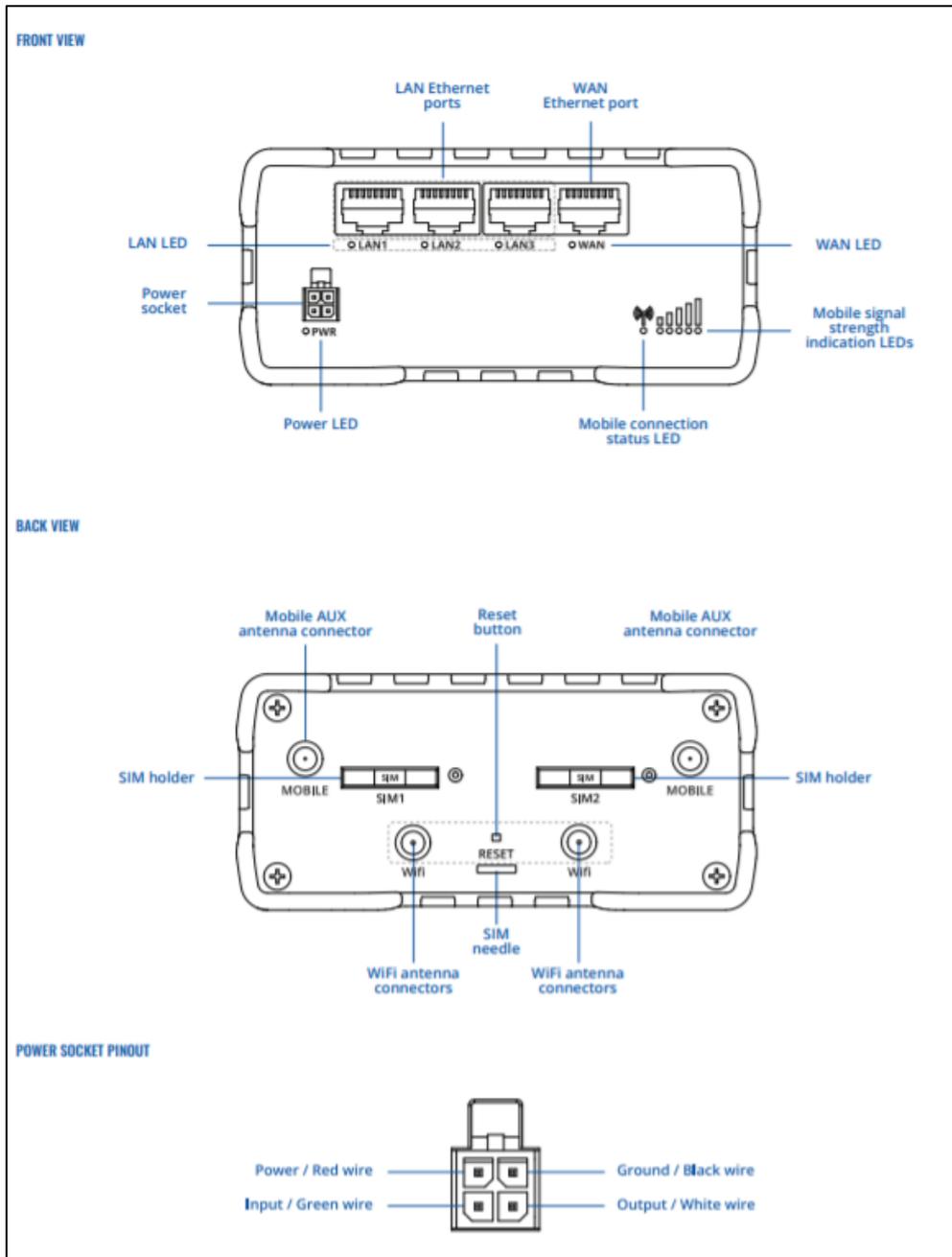
Notes:

1. *Criterion A: Normal operation within specified limits.*
 2. *Criterion B: Temporary loss of performance from which the unit self-recovers.*
 3. *This device was designed for installation in an enclosure. To avoid electrostatic discharge to the unit in environments with static levels above 4 kV, precautions should be taken when the device is mounted outside an enclosure. When working in an enclosure (ex. making adjustments, setting switches, etc.) typical anti-static precautions should be observed before touching the unit.*
11. **WEIGHT:** 15.1 oz (428 g)



WARNING - EXPLOSION HAZARD - DO NOT DISCONNECT EQUIPMENT UNLESS POWER HAS BEEN SWITCHED OFF OR AREA IS KNOWN TO BE NON-HAZARDOUS.

Teltonika RUT450



POWER

Connector	4 pin industrial DC power socket
Input voltage range	9 – 30 VDC (4 pin industrial socket), reverse polarity protection; surge protection >31 VDC 10us max
PoE (passive)	Passive PoE over spare pairs. Possibility to power up through LAN port, not compatible with IEEE802.3af and 802.3at standards
Power consumption	< 2 W idle, < 7 W Max

PHYSICAL INTERFACES (PORTS, LEDS, ANTENNAS, BUTTONS, SIM)

Ethernet	4 x RJ45 ports, 10/100 Mbps
I/Os	2 Inputs/Outputs pin on 4 pin power connector (available from HW revision 1600)
Status LEDs	1 x bi-color connection status LED, 5 x connection strength LEDs, 4 x LAN status LEDs, 1 x Power LED
SIM	2 x SIM slots (Mini SIM - 2FF), 1.8 V/3 V, external SIM holders, eSIM (Optional)
Power	4 pin power connector with 2 pins for Input/Output
Antennas	2 x SMA for LTE, 2 x RP-SMA for WiFi antenna connectors
Reset	Reset/restore to default button
Input/Output	2 programmable Inputs/Outputs

MOBILE

Mobile module	4G (LTE) – Cat 4 up to 150 Mbps, 3G – Up to 42 Mbps, 2G – Up to 236.8 kbps
Status	Signal strength, SINR, RSRP, RSRQ, Bytes sent/received
Bridge	Direct connection (bridge) between mobile ISP and device on LAN
SMS	SMS status, SMS configuration, send/read SMS via HTTP POST/GET, EMAIL to SMS, SMS to EMAIL, SMS to HTTP, SMS to SMS, scheduled SMS, SMS autoreply, SMPP
SIM switch	2 SIM cards, auto-switch cases: weak signal, data limit, SMS limit, roaming, no network, network denied, data connection fail, SIM idle protection
Passthrough	Router assigns its mobile WAN IP address to another device on LAN
APN	Auto APN
Black/White list	Operator black/white list
Multiple PDN (optional)	Possibility to use different PDNs for multiple network access and services
Band management	Band lock, Used band status display

WIRELESS

Wireless mode	IEEE 802.11b/g/n, Access Point (AP), Station (STA)
WiFi	WPA2-Enterprise (with external/internal Radius server), WPA2-PSK, WPA-PSK, WEP, MAC Filter
WiFi security	WPA2-Enterprise - PEAP, TLS, TTLS. AES-CCMP, TKIP, Auto Cipher modes. Client separation
SSID	SSID stealth mode and access control based on MAC address
WiFi users	Up to 100 simultaneous connections
Wireless Hotspot	Captive portal (Hotspot), internal/external Radius server, built in customizable landing page

Appendice C

Viene di seguito presentata una tabella con la corrispondenza tra punti misura e canale analogico di ingresso alle centraline. Con *DE* è indicato il lato motore (*Drive End*), mentre *NDE* risulta essere il lato opposto. Con *R* si intende una misura in direzione radiale, mentre con *A* una misura in direzione assiale. Per l'indicazione circa i punti di misura a disegno, si rimanda all'Appendice A.

Macchina	Grandezza misurata	Punto misura	Posizione	Direzione	Modello dispositivo.DAD	Tipo canale	Numero canale
Motore Estrusore 1	Accelerazione	1	NDE	R	IMx16.50	Analogico	14
	Accelerazione	2	DE	R	IMx16.50	Analogico	2
	Accelerazione	2	DE	A	IMx16.50	Analogico	3
	Velocità				IMx8.52	Digitale	1
Riduttore Estrusore 1	Accelerazione	3	DE	R	IMx16.50	Analogico	4
	Accelerazione	4	NDE	R	IMx16.50	Analogico	5
	Accelerazione	5	DE	R	IMx16.50	Analogico	6
	Accelerazione	6	NDE	R	IMx16.50	Analogico	7
	Accelerazione	7	DE	R	IMx16.50	Analogico	8
	Accelerazione	8	NDE	R	IMx16.50	Analogico	9
	Accelerazione	9	DE	R	IMx16.50	Analogico	10
	Accelerazione	10	NDE	R	IMx16.50	Analogico	11
Riduttore utensile	Accelerazione	9	DE	R	IMx8.51	Analogico	1
	Accelerazione	9	DE	A	IMx8.51	Analogico	2
	Accelerazione	7	DE	R	IMx8.51	Analogico	3
	Accelerazione	7	DE	A	IMx8.51	Analogico	4
	Accelerazione	5	DE	A	IMx8.51	Analogico	5
	Accelerazione	5	DE	R	IMx8.51	Analogico	6
	Accelerazione	1	DE	R	IMx8.51	Analogico	7
	Accelerazione	3	DE	R	IMx8.51	Analogico	8
	Accelerazione	4	NDE	R	IMx8.52	Analogico	1
	Accelerazione	6	NDE	R	IMx8.52	Analogico	2
	Accelerazione	2	NDE	R	IMx8.52	Analogico	3
	Accelerazione	8	NDE	R	IMx8.52	Analogico	4
	Velocità				IMx8.51	Digitale	1

Inoltre, è presentata una tabella con la corrispondenza tra indirizzi in *input* al dispositivo *Red Lion DSPSX* mediante tag e numero parola e canali digitali in *input* delle varie centraline IMx.

Modello dispositivo.DAD	Slave adress	Tag[n. parola]	Ch. No.	Name	E.U.
IMx8.50	5	Exch_SKF[0]	1	T circuito di riscaldamento vite	°C
		Exch_SKF[1]	2	T circuito di riscaldamento PA	°C
		Exch_SKF[2]	3	T circuito di riscaldamento camicia	°C
		Exch_SKF[3]	4	Velocità rotazione vite	rpm
		Exch_SKF[4]	5	Corrente assorbita motore plastificatore	A
		Exch_SKF[12]	13	Tipo di lavorazione	/
IMx8.51	1	Exch_SKF[6]	1	Temperatura circuito di riscaldamento cilindro anteriore	°C
		Exch_SKF[7]	2	Temperatura circuito di riscaldamento cilindro posteriore	°C
		Exch_SKF[8]	3	Velocità cilindro anteriore	m/min
		Exch_SKF[9]	4	Velocità cilindro posteriore	m/min
		Exch_SKF[10]	5	Corrente assorbita motore	A
		Exch_SKF[12]	7	Tipo di lavorazione	/
IMx8.51	2	Exch_SKF[6]	1	Temperatura circuito di riscaldamento cilindro anteriore	°C
		Exch_SKF[7]	2	Temperatura circuito di riscaldamento cilindro posteriore	°C
		Exch_SKF[8]	3	Velocità cilindro anteriore	m/min
		Exch_SKF[9]	4	Velocità cilindro posteriore	m/min
		Exch_SKF[10]	5	Corrente assorbita motore	A
		Exch_SKF[12]	7	Tipo di lavorazione	/

Bibliografia

- [1] J. Smit, S. Kreutzer, C. Moeller e M. Carlberg, *Industry 4.0*, European Parliament's Committee on Industry Research and Energy (ITRE), 2016.
- [2] K. Bledowski, *The Internet of Things: Industrie 4.0 vs. The Industrial Internet*, 2015.
- [3] Bundesregierung, *Die neue Hightech-Strategie. Innovationen für Deutschland*, 2014.
- [4] S. Head, *Industry 4.0, the next Industrial Revolution*, Siemens, 2013.
- [5] Forschungsunion and ACATECH, «Securing the future of German manufacturing Industry, Recommendations for Implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group,» 2013.
- [6] V. Roblek, M. Mesko e A. Krapez, «A complex view of Industry 4.0,» *SAGE Open*, 2016.
- [7] S. Y. Yurish, «Sensors: smart vs intelligent,» *Sensors and Transducers Journal*, vol. 114, pp. 1-6, 2010.
- [8] M. Ringel e Z. Hadi, «Innovation in 2018, The Most Innovative Companies 2018,» [Online]. Available: <https://www.bcg.com/publications/2018/most-innovative-companies-2018-innovation>.
- [9] Netflix Inc., «Annual reports and proxies,» 2016. [Online]. Available: <https://ir.netflix.net/financials/annual-reports-and-proxies/default.aspx>.
- [10] D. Ritter, E. Baltassis e M. Ouimet, «Are You Set Up to Achieve Your Big Data Vision?,» 2017. [Online]. Available: <https://www.bcg.com/publications/2017/big-data-advanced-analytics-technology-digital-are-you-set-up-to-achieve-your-big-data-vision>.
- [11] L. Beltrametti, N. Guarnacci, N. Intini e C. La Forgia, *La Fabbrica Connessa, la manifattura italiana (attraverso) Industria 4.0*, 4.0 Guerini, 2017.
- [12] BITKOM, VDMA, ZVEI, «Securing the future of German manufacturing industry Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0,» Forschungsunion/Acatech, 2013.
- [13] Ministero dello Sviluppo Economico, «Piano Nazionale Industria 4.0,» 2017. [Online]. Available: http://www.governo.it/sites/governo.it/files/industria_40_MISE.pdf.
- [14] Ministero dello Sviluppo Economico, «Piano nazionale Industria 4.0, Investimenti, produttività e innovazione,» [Online]. Available: https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/Piano_Industria_40.pdf.
- [15] MISE, «Nuovo Piano Nazionale Transizione 4.0, Le misure si potenziano e diventano strutturali,» [Online]. Available: <https://www.mise.gov.it/index.php/it/transizione40>.

- [16] C. Fotina, «Il Sole 24 Ore,» 2021. [Online]. Available: <https://www.ilsole24ore.com/art/cambia-piano-40-piu-digitale-meno-aiuti-beni-tradizionali-ADb5blBB>.
- [17] MISE, «Centri di Competenza ad Alta Formazione,» [Online]. Available: <https://www.mise.gov.it/index.php/it/incentivi/impresa/centri-di-competenza>.
- [18] CIM 4.0, «Competence Industry Manufacturing 4.0,» [Online]. Available: <https://cim40.com/chi-siamo/>.
- [19] C. 4.0, «I corsi di CIM 4.0 dedicati alle imprese manifatturiere che credono nell'innovazione,» [Online]. Available: <https://cim40.com/corsi/>.
- [20] F. Astone, «Industria Italiana,» 2020. [Online]. Available: <https://www.industriaitaliana.it/cim4-0-digital-factory-formazione-learning-hub-additive-manufacturing-iiot/>.
- [21] CIM 4.0, «CIM 4.0 Linee Pilota,» [Online]. Available: <https://cim40.com/linee-pilota/>.
- [22] CIM 4.0, «CIM 4.0 Progetti Finanziati,» [Online]. Available: <https://cim40.com/projects/>.
- [23] SKF Group, «Year-end report 2020,» February 2021. [Online]. Available: <https://investors.skf.com/sites/default/files/pr/202102020920-1.pdf>.
- [24] SKF Group, «Annual report 2019,» 2019. [Online]. Available: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d19680a7e4ae-SKF-Annual-report-2019_tcm_12-552661.pdf#cid-552661.
- [25] M. Cattaneo e L. Furlanetto, «Riparare e Mantenere,» *Manutenzione Tecnica e Management*, n. 6, 2020.
- [26] Furlanetto, Garetti e Macchi, *Ingegneria della Manutenzione – strategie e metodi*, FrancoAngeli, 2015.
- [27] M. Macchi, «I processi di manutenzione e la loro evoluzione,» *Manutenzione Tecnica e Management*, n. 9, 2020.
- [28] N. Saccani e F. Adrodegari, «Innovare la Manutenzione nell'epoca dell'Internet of Things,» *Manutenzione e Asset Management*, n. 27, 2020.
- [29] M. Macchi, «Industria 4.0 ed opportunità per la gestione del ciclo vita degli asset,» *Manutenzione e Asset Management*, n. 27, 2020.
- [30] N. Saccani, F. Adrodegari e M. Rapaccini, «Manutenzione e servizi smart nell'era della pandemia: emergenza o "New Normal"?,» *Manutenzione e Asset Management*, n. 10, 2020.
- [31] Michelin, «How is a tyre made,» [Online]. Available: <https://www.michelinman.com/howTireMade.html>.
- [32] SKF Reliability Systems, «The Guide to Asset Efficiency Optimization for Improved Profitability,» 2004.

- [33] SKF Group, «A Guide to Asset Efficiency Optimization,» 2009.
- [34] SKF Group, «Redefining your maintenance strategy using the SKF RCM® process,» 2015.
- [35] W. G. Wayne, «Mapping maintenance maturity,» SKF Knowledge Centre, 2016.
- [36] OEE Foundation, [Online]. Available: <http://www.oeefoundation.org/origin-of-oeef/>.
- [37] R. R. Williamson, Using Overall Equipment Effectiveness: The Metric and the Measures, Strategic Work Systems, Inc., 2006.
- [38] G. Fichera, «Misura delle Vibrazioni».
- [39] Piezoelectric accelerometer and vibration handbook, Denmark: Brüel & Kjær, 1978.
- [40] «Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration,» *ISO 20816-11*, 2016.
- [41] R. B. Randall, Vibration-based Condition Monitoring, Wiley Publication, 2011.
- [42] M. J., Spectrum Analysis, The key features of analyzing spectra, SKF USA Inc., 2002.
- [43] A. Fasana e S. Marchesiello, Meccanica delle Vibrazioni, CLUT, 2006.
- [44] MMF, Piezoelectric Accelerometers, Theory and Application, Metra Mess- und Frequenztechnik, 2001.
- [45] SKF Group, «SKF Vibration Catalogue,» 2018. [Online]. Available: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196804926fe-11604_16-EN-Vibration-Sensor-Catalogue---OK_tcm_12-267858.pdf.
- [46] V. Viktorov e F. Colombo, Automazione dei sistemi meccanici, CLUT, 2018.
- [47] Dewesoft, «Cosa è un convertitore ADC,» [Online]. Available: <https://dewesoft.com/it/daq/convertitore-adc-guida-completa#sampling-rate>.
- [48] Università di Firenze, Laboratorio di Misure Elettriche, «Sistema di Acquisizione Dati,» [Online]. Available: <https://www.dinfo.unifi.it/upload/sub/laboratori/misureelettliche/cap-4.pdf>.
- [49] SKF Group, «SKF Multilog On-line System IMx-8,» 2017.
- [50] SKF Group, Monitor critical machine functions. Continuously. In real time., Sweden, 2009.
- [51] SKF Reliability Systems, SKF @ptitude Observer, user manual, Sweden, 2012.
- [52] A. Bhowmick, Indian Institute of Technology e M. M. Hall, Rubber products manufacturing technology, Marcel Dekker, Inc., 1994.
- [53] CEI 70-1, «70-1 Gradi di protezione degli involucri (Codice IP)».
- [54] K. Detrich, S. Ganeriwala e N. Sawalhi, «The interference of variable frequency drives on the vibration signature analysis of machine defects».

- [55] SKF Multilog On-line, *System IMx-8/IMx-8Plus*, 2020.
- [56] Red Lion Controls, «Model DSP - Data Station Plus Datasheet,» 2012.
- [57] Teltonika Networks, «RUT 950 Datasheet,» 2020.
- [58] Hughes, *Electric Motors and drives*, Newness Press, 1990.
- [59] Dewesoft, «Dewesoft.com,» [Online]. Available:
<https://dewesoft.com/it/daq/convertitore-adc-guida-completa>.
- [60] M. Baratt, «Measuring Maintenance Performance,» SKF Group, 2004.
- [61] M. Baratt, «Asset Register - The Backbone of Any Maintenance Management System,» SKF Group, 2008.
- [62] «SAP Help Portal,» [Online]. Available:
<https://help.sap.com/viewer/e1adc70af32241619335c8768a892edb/15.2/en-US/d231f970719b43a3bb90cc3f8a7265c2.html>.
- [63] Wikipedia, «Diagramma di Pareto,» [Online]. Available:
https://it.wikipedia.org/wiki/Diagramma_di_Pareto.