



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Elettronica

**Studio e sviluppo di una rete di sensori e
implementazione di algoritmi di analisi dei dati**

**Development of a sensor network for a production line and
implementation of data analysis algorithms**

Relatore: Chiar.ma
Prof.ssa Paola Pierleoni

Tesi di Laurea di:
Diletta Di Domenico

Correlatore: Chiar.ma
Dott.ssa Luisiana Sabbatini

A.A. 2021/ 2022

Indice

INTRODUZIONE	1
1 STATO DELL'ARTE	3
1.1 Industria 4.0	3
1.2 Tecniche di manutenzione innovative	9
1.2.1 Manutenzione basata sulle condizioni	10
1.2.2 Manutenzione predittiva	12
1.3 Controllo statistico di processo	14
1.3.1 Six sigma	16
2 IMPLEMENTAZIONE RETE DI SENSORI	21
2.1 Obiettivi della rete	21
2.2 Descrizione linea di produzione	22
2.3 Selezione e descrizione dei sensori	23
2.4 Scelta dei sensori acquistati	28
2.5 Rete di sensori	31
2.6 Sistema di acquisizione dei dati da PLC	43
3 ANALISI DEI DATI	45
3.1 Descrizione dei sensori selezionati per l'analisi	45
3.2 Formato dei dati	52
3.3 Analisi dataset	53
3.3.1 Descrizione variabili del dataset	53
3.4 Criterio per definire la qualità del processo produttivo	55
3.5 Calcolo delle soglie statistiche	61
4 RISULTATI	69
CONCLUSIONE	77

Elenco delle figure

1.1	Tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0	4
1.2	Esempio di una carta di controllo	16
1.3	Livelli sigma sulla curva di distribuzione gaussiana	18
2.1	Unità FGC2	26
2.2	Esempi per le misure di vuoto	27
2.3	Display LED a due colori del sensore FESTO	31
2.4	Master IO-Link della BALLUFF	34
2.5	Modulo IO-Link 8 Analog In della BALLUFF	35
2.6	Struttura rete di sensori	36
2.7	Configurazione porte IO-Link dei moduli EIP + IO-Link	37
2.8	Selezione porta a cui è collegato il modulo IO-Link da configurare	38
2.9	Modalità di attivazione delle porte dei moduli IO-Link	39
2.10	Collegamento tra master IO-Link e modulo IO-Link 8 Analog In	41
3.1	Modulo Secondary Topsheet Cut & Slay	46
3.2	Unità di taglio Secondary Topsheet Cut & Slay	46
3.3	Secondary topsheet dopo il taglio	47
3.4	Banco di trasporto A3	48
3.5	Transfer drum	49
3.6	Unità Core Cut & Slip e descrizione dei rulli	50
3.7	Dataset	53
3.8	Dataset filtrato con le condizioni su SCRAP e RELIABILITY	56
3.9	Valori di SCRAP e RELIABILITY per l' ARTICOLO 1.0	57
3.10	Valori di SCRAP e RELIABILITY per l' ARTICOLO 3.0	57
3.11	Valori di SCRAP e RELIABILITY per l' ARTICOLO 4.0	58
3.12	Valori di SCRAP e RELIABILITY per l' ARTICOLO 7.0	59
3.13	Valori di SCRAP e RELIABILITY per l' ARTICOLO 11.0	59
3.14	Valori di SCRAP e RELIABILITY per l' ARTICOLO 12.0	59
3.15	Valori di SCRAP e RELIABILITY per l' ARTICOLO 13.0	60
3.16	Valori di SCRAP e RELIABILITY per l' ARTICOLO 14.0	60
3.17	Valori di SCRAP e RELIABILITY per l' ARTICOLO 15.0	61
3.18	Dataset filtrato con la condizione su SCRAP	62
3.19	Media, deviazione standard e soglie per STSV1	63
3.20	Soglie per sensore STSV1 e articoli 3.0, 4.0, 7.0, 11.0	63
3.21	Soglie per sensore STSV1 e articoli 12.0, 14.0, 15.0	64

Elenco delle figure

3.22	Media, deviazione standard e soglie per STSV2	64
3.23	Soglie per sensore STSV2 e articoli 3.0, 4.0, 7.0, 11.0	65
3.24	Soglie per sensore STSV2 e articoli 12.0, 14.0, 15.0	65
3.25	Media, deviazione standard e soglie per CCSV1	66
3.26	Soglie per sensore CCSV1 e articoli 3.0, 4.0, 7.0, 11.0	66
3.27	Soglie per sensore CCSV1 e articoli 12.0, 14.0, 15.0	66
3.28	Media, deviazione standard e soglie per CCSP1	67
3.29	Soglie per sensore CCSP1 e articoli 3.0, 4.0, 7.0, 11.0	67
3.30	Soglie per sensore CCSP1 e articoli 12.0, 14.0, 15.0	67
3.31	Media, deviazione standard e soglie per STSP1	68
3.32	Soglie per sensore STSP1 e articoli 3.0, 4.0, 7.0, 11.0	68
3.33	Soglie per sensore STSP1 e articoli 12.0, 14.0, 15.0	68
4.1	Dataset di test	70
4.2	Andamento STSV1 rispetto alle soglie statistiche	71
4.3	Andamento STSV2 rispetto alle soglie statistiche	71
4.4	Andamento CCSV1 rispetto alle soglie statistiche	72
4.5	Andamento CCSP1 rispetto alle soglie statistiche	73
4.6	Andamento STSP1 rispetto alle soglie statistiche	74

Elenco delle tabelle

2.1	Campo di misura dei sensori	30
2.2	Segnali per configurare le porte	39
3.1	Associazione numero articolo con tipo prodotto e velocità linea . . .	54
3.2	Numero di righe del dataset filtrato per ogni articolo	56

INTRODUZIONE

L'emergere e la rapida evoluzione di tecnologie dell'informazione e della comunicazione innovative e la loro integrazione a tutti i livelli nei sistemi industriali ha portato all'avvento di una nuova rivoluzione industriale, denominata Industria 4.0 (I4.0).

L'industria 4.0 è considerata una nuova fase industriale nel quale diverse tecnologie emergenti convergono per fornire soluzioni digitali e per migliorare l'efficienza aziendale.

Le principali tecnologie alla base dell'industria 4.0 sono: Internet of Things, Cloud Computing, Cyber-Physical System (CPS), Additive Manufacturing, Advanced Robotics, Artificial Intelligence (AI), e Big Data.

Le tecnologie alla base del concetto di I4.0 promettono di ridurre i costi, aumentare la flessibilità, aumentare la velocità e migliorare la qualità dei sistemi e dei processi produttivi.

Questa rivoluzione sta trasformando i sistemi produttivi e sta generando un'elevata quantità di dati. L'I4.0, infatti, fa affidamento sull'adozione di tecnologie digitali per acquisire dati in tempo reale e analizzarli, fornendo delle informazioni utili al sistema di produzione. La capacità di archiviare e trasformare questi dati in informazioni utili è proprio uno dei principali obiettivi dell'I4.0.

Il presente elaborato andrà a descrivere un sistema che mette in atto alcuni dei concetti base dell'I4.0 e che è in grado di acquisire dati in tempo reale da una linea di produzione che produce beni di consumo per la cura della persona.

Il sistema sopracitato è rappresentato da una rete di sensori cablata, che utilizza lo standard di comunicazione IO-link e il bus di campo Ethernet/IP per connettere dei sensori di pressione e di vuoto al sistema di controllo.

La parte iniziale dell'elaborato tratterà lo studio e lo sviluppo della rete di sensori cablata, considerando: le motivazioni per cui è stata implementata sulla linea di produzione, la scelta di determinati standard di comunicazione e dei sensori, lo studio della parte implementativa e la descrizione della linea di produzione e dei sensori installati.

La seconda parte sarà focalizzata sull'utilizzo di algoritmi, per l'elaborazione e l'analisi dei dati acquisiti, quasi in tempo reale, dai sensori.

Prima di implementare il sistema che verrà approfondito nell'elaborato, gli operatori della linea di produzione effettuavano dei controlli sistematici su dei manometri analogici installati sulla linea di produzione per accertare che il valore di pressione o vuoto si trovasse all'interno di un determinato range definito dall'ingegnere di linea. L'obiettivo che si vuole raggiungere è quello di utilizzare i dati acquisiti digitalmente

INTRODUZIONE

grazie all'architettura messa in atto per effettuare il monitoraggio basato sulle condizioni e per applicare un controllo statistico di processo, ovvero usare i dati storici per definire i range entro cui far variare il segnale di pressione o vuoto in maniera accettabile. Essendo una linea produttiva flessibile utilizzata per la produzione di diverse tipologie di prodotto, verrà effettuata una caratterizzazione articolo per articolo per poi verificare se i range definiti sono ottimali su ulteriori dati ottenuti dalla linea produttiva.

Per determinare le soglie statistiche entro cui deve variare l'andamento della variabile d'informazione, per ogni articolo, è stato implementato il metodo Six Sigma, il quale utilizza criteri statistici per l'ottimizzazione dei processi produttivi e la gestione della qualità nelle aziende. Il Six Sigma si basa sul calcolo della media e della deviazione standard del processo per definire i limiti statistici entro cui il processo monitorato è da considerarsi in controllo. L'applicazione di tale metodo ha consentito di definire il nuovo intervallo in cui il segnale di pressione e di vuoto deve essere compreso per poter considerare il processo sotto controllo.

In futuro si potrà definire un metodo più spinto per la definizione dei threshold minimi e massimi, dato che il sistema non sarà più nuovo, si avranno più dati a disposizione e una maggiore informazione sulla correlazione tra i vari parametri del processo produttivo.

Capitolo 1

STATO DELL'ARTE

1.1 Industria 4.0

Il termine Industria 4.0 (I4.0) si riferisce all'inizio della quarta rivoluzione industriale. Termine coniato per la prima volta in Germania e pronunciato all'annuale Fiera di Hannover nel 2011.

L'I4.0 è rivolta ad un numero crescente di settori (medicina, industria, agricoltura, istruzione) che stanno incrementando la loro digitalizzazione tramite tecnologie sempre più moderne e innovative. Questa rivoluzione creerà un ambiente in cui i processi saranno completamente automatizzati poiché, supportati da un apposito sistema di comunicazione, saranno in grado di scambiare i dati con altri sistemi, monitorarsi e agire di conseguenza; inoltre con la presenza di macchine e strumentazioni intelligenti si apporterà una maggiore efficienza nei rispettivi ambiti applicativi.

Tale rivoluzione, definita anche 'rivoluzione digitale', è determinata dall'emergere, dal progredire e dalla convergenza di una serie di tecnologie che sono in grado di aumentare l'interconnessione e la cooperazione delle risorse, che consentono una connessione quasi in tempo reale tra il mondo fisico e quello virtuale, e di migliorare l'efficienza aziendale, ovvero la gestione e il controllo dei processi produttivi [1].

Nel settore produttivo l'I4.0 rappresenta una nuova fase nell'organizzazione e nella gestione dell'intera catena del valore e ha il fine ultimo di incrementare la produttività, l'efficienza e la varietà produttiva degli impianti. Con I4.0 si stanno trasformando i sistemi di produzione e i prodotti e si stanno generando un grande volume di dati. L'adozione di tecnologie digitali per acquisire dati in tempo reale e analizzarli, la capacità di archiviare e trasformare le grandi quantità di dati in informazioni utili è un elemento chiave dell'I4.0.

L'I4.0 per alcuni studiosi viene anche definita Smart Manufacturing o Manufacturing 4.0, dato che le innovazioni implementate comprendono e riguardano anche tutto il ciclo di vita del prodotto ed i processi di produzione e di distribuzione. Per questo lo Smart Manufacturing viene definito come un sistema di produzione collaborativo e completamente integrato che risponde in tempo reale alle mutevoli richieste e condizioni della fabbrica, della rete di fornitura e delle esigenze dei clienti [2].

Nel settore industriale le innovazioni porteranno dei vantaggi su tutta la linea produttiva, e riguarderanno ogni singolo passaggio che va dalla lavorazione delle materie

prime alla consegna del prodotto finito. L'integrazione delle nuove tecnologie non andrà ad incidere solo sulla produttività ma consentirà anche di prendere delle scelte gestionali che andranno ad incidere sulla posizione dell'azienda nel mercato tramite l'utilizzo di algoritmi di decision-making [3]. Gli obiettivi iniziali dell'I4.0 sono tipicamente l'automazione, il miglioramento dei processi (manifatturieri) e l'ottimizzazione della produzione; gli obiettivi più maturi sono l'innovazione e la transizione verso nuovi modelli di business e fonti di guadagno.

Nelle righe precedenti si è parlato più volte di diverse tecnologie senza mai esplicitare quali sono i loro aspetti principali, prima di farlo è importante affermare che singolarmente e collettivamente, le tecnologie alla base del concetto di I4.0, definite anche "tecnologie abilitanti", promettono di ridurre i costi, aumentare la flessibilità, incrementare la velocità e migliorare la qualità della produzione.

Le tecnologie abilitanti dell'I4.0 sono: Internet of Things, Cloud Computing, Cyber-Physical System, Advanced Robotics, Additive Manufacturing, Simulation, Augmented Reality, Cybersecurity e Big Data; come si può vedere anche nella Figura 1.1



Figura 1.1: Tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0

[4]

Verranno descritte singolarmente ma è da sottolineare che il potenziale dell'Industria 4.0 sta anche nella loro sinergia e nella loro interazione.

Internet of Things Si può considerare come un'evoluzione che estende l'accesso ad internet ad oggetti e luoghi reali. L'IoT si riferisce a un mondo interconnesso in cui vari oggetti sono incorporati con sensori elettronici, attuatori o altri dispositivi digitali collegati in rete allo scopo di raccogliere e scambiare dati. Pertanto, l'IoT consente di generare, acquisire e condividere una grande quantità di dati, contribuendo al flusso

di informazioni all'interno di un'organizzazione, attraverso dispositivi fisici che sono in grado di interagire tra loro e con i sistemi di controllo tramite un'infrastruttura di rete e accedere a tutti i servizi che la rete può offrire. I produttori, grazie all'IoT riescono ad ottenere una visione completa dei processi della linea produttiva, riescono a ridurre sia i difetti nei prodotti effettuando delle modifiche in tempo reale sia l'errore umano. Le informazioni che si possono ottenere dagli oggetti connessi ad internet dipendono dal dispositivo stesso e dalla sua funzione, possono raccogliere dati relativi al movimento, alla posizione, alla temperatura, ad una condizione di salute, e tanto altro. Nel settore industriale l'IoT è in grado di offrire una connettività avanzata tra oggetti fisici, sistemi e servizi, consentendo di migliorare la produttività, di rendere più economici i processi produttivi, di controllare e automatizzare diverse applicazioni. Secondo le stime, del McKinsey Global Institute del 2015 l'Internet degli oggetti può aumentare la produttività del 10-25% migliorando l'efficienza produttiva [5].

Cloud Computing Il Cloud Computing rappresenta la distribuzione di servizi di calcolo, come server, risorse di archiviazione, database, rete, software, analisi e intelligence, erogate da un fornitore per un cliente tramite Internet ("il cloud") per condividere, archiviare o elaborare dei dati e per offrire una rapida innovazione delle risorse flessibili e delle economie di scala. Organizzazioni di ogni tipo e dimensione stanno adottando il Cloud Computing per aumentare la propria capacità con un budget minimo, senza investire in: licenze per nuovi software, per la manutenzione e l'aggiornamento di infrastrutture hardware e software, e senza incorporare nuove infrastrutture o formare nuovo personale. Il Cloud Computing è caratterizzato da: elevata flessibilità, riduzione dei costi, elasticità e utilizzo ottimale delle risorse; una caratteristica fondamentale da sottolineare è che la soluzione cloud può essere stratificata su richiesta, ovvero disegnata per il cliente sulla base delle sue esigenze [6].

Cyber-Physical System Un Cyber-Physical System (CPS) è un meccanismo attraverso il quale oggetti fisici e virtuali sono strettamente interconnessi, consentendo ai diversi componenti di interagire tra loro in una miriade di modi per scambiare informazioni; sono sistemi in grado di combinare modellazione computazionale, dati statistici e dati fisici in tempo reale. Grazie a questa combinazione, è possibile modellare digitalmente la risposta di un sistema, con scenari multipli, per supportare il processo decisionale. In questo modo, i dispositivi fisici (una macchina o una linea di produzione) e i processi fisici, in base a questi dispositivi, vengono digitalizzati, creando un sistema digitale identico al sistema fisico. Un CPS coinvolge un gran numero di metodologie transdisciplinari come l'ingegneria meccanica e mecatronica, la scienza del design e dei processi, i sistemi di produzione e l'informatica. Uno dei metodi tecnici chiave è quello dei sistemi embedded, che consentono una relazione altamente coordinata e combinata tra gli oggetti e i loro elementi computazionali o servizi. I CPS sono anche definiti sistemi autonomi basati su sensori e abilitati alla

comunicazione, infatti essi sono caratterizzati dall'integrazione di software, tecnologie di comunicazione e sensori e attuatori per la rilevazione e misurazione dei fenomeni reali. L'obiettivo è migliorare l'efficienza a tutti i livelli di un sistema industriale [6].

Additive manufacturing L'additive manufacturing (AM), nota anche come stampa tridimensionale (3D), è un processo che a partire da una rappresentazione digitale in 3D produce un oggetto fisico associato strato per strato, definendo e unendo gli strati man mano che si procede nella stampa. L'AM è stata annunciata come una tecnologia rivoluzionaria con enormi conseguenze per la gestione delle operazioni. Questo perché consente di migliorare la qualità dei prodotti, la flessibilità, la velocità e i costi di produzione. L'AM consente di produrre forme complesse, geometrie interne irraggiungibili con i metodi di produzione tradizionali e allevia i vincoli di producibilità che i progettisti devono affrontare, migliorando di conseguenza la qualità del prodotto. Una macchina AM può stampare con facilità prodotti di forme e geometrie diverse, determinando così la flessibilità di questa tecnologia. Consente una prototipazione e una commercializzazione rapida del prodotto. Pertanto, la velocità di questi processi è notevolmente migliorata, di conseguenza anche i costi iniziali di produzione si riducono, perché non sono necessari investimenti produttivi specifici. Inoltre, l'AM può essere interessante dal punto di vista della sostenibilità, perché la quantità di materiale sprecato nella produzione può essere sostanzialmente inferiore [7].

Advanced Robotics L'automazione della produzione non è una novità e la robotica nei sistemi di produzione è già molto sofisticata. Tuttavia, la tecnologia robotica sta avanzando rapidamente in modi che possono avere profonde implicazioni per le aziende. Recenti progressi nella tecnologia dei sensori e dell'intelligenza artificiale stanno rendendo possibile una nuova generazione di robot che possono essere impiegati accanto ai lavoratori umani, essi vengono definiti collaborativi, e sono chiamati "cobot". I cobot possono condividere lo spazio lavorativo con l'uomo senza la necessità di costruire delle barriere e per questo motivo essi devono garantire una sicurezza tale da non costituire una minaccia per l'operatore. Le nuove generazioni di robot stanno diventando più economiche e sempre più configurabili per compiti differenti, quindi sempre più flessibili. Si stanno facendo tanti progressi in questo ambito, ad esempio nel settore di veicoli a guida autonoma grazie ai sensori e alle tecnologie correlate si sta raggiungendo il punto in cui tali veicoli possono diventare autonomi e svincolati da percorsi predefiniti. Le opzioni di trasporto robotizzato hanno il potenziale per influenzare in modo significativo la progettazione della filiera produttiva. In sintesi, il costo, la flessibilità, la velocità e/o la qualità delle varie tecnologie robotiche stanno migliorando [7].

Augmented Reality L'Augmented Reality (AR) è una tecnologia importante per l'approccio Industria 4.0. Consente ai dipendenti di colmare il divario tra il mondo

fisico e il sempre più importante ambiente digitale, è una tecnologia incentrata sull'uomo e su un nuovo modo di lavorare dell'operatore che può accedere al mondo digitale tramite uno strato di informazioni posizionato sopra al mondo reale. L'AR può essere utilizzata per applicazioni di progettazione e produzione, per operazioni di assemblaggio (come sistema di guida per gli operatori), per attività di manutenzione, per effettuare il controllo della qualità, per effettuare simulazioni e pianificazioni. I componenti di base di un sistema AR sono la tecnologia di visualizzazione, una telecamera, un sistema di tracciamento e l'interfaccia utente. Sicuramente la realtà aumentata offre dei vantaggi importanti all'interno delle industrie, soprattutto in termini di efficienza, però ad oggi gli studi effettuati hanno dimostrato che ci sono ancora molte sfide da superare e soddisfare per l'applicazione di sistemi di AR nel mondo industriale che risulta essere molto più complesso di un ambiente di laboratorio [8].

Cybersecurity È necessario definire un sistema di protezione delle infrastrutture informatiche alla base dell'I4.0, per questo che la Cybersecurity è fondamentale per lo sviluppo delle nuove tecnologie. I sistemi industriali e le macchine sono dotati di sistemi che acquisiscono sempre più dati relativi al loro funzionamento e che vengono condivisi con sistemi informatici in rete, questi vengono utilizzati dalle imprese per gestire e controllare i processi industriali e per offrire servizi aggiuntivi. Gli elementi industriali da proteggere stanno diventando via via crescenti: dai sistemi embedded, reti di comunicazione, sistemi informatici e questo è incrementato anche dalla presenza di CPS. La dipendenza dei sistemi produttivi dell'Industria 4.0 dai sistemi informatici richiede la protezione di questi ultimi come prerequisito essenziale per ogni sviluppo credibile e sostenibile dell'Industria 4.0 stessa. Un attacco cyber in un impianto industriale può causare un blocco immediato sulla produzione, delle ripercussioni finanziarie e sulla sicurezza delle macchine. La prima contromisura efficace per evitare un attacco cyber è definire il rischio dell'attacco, ovvero partendo dall'analisi dell'infrastruttura di automazione e dalla definizione di quanto ciascuna macchina, zona produttiva o stabilimento riesca ad essere un potenziale oggetto di minaccia e con quali conseguenze; solo dall'analisi dell'effettivo rischio è possibile procedere ad investigare quali specifiche contromisure adottare [1]. Per la security dei dispositivi industriali è stato definito lo standard internazionale IEC 62443, la sua applicazione copre tutte le fasi del ciclo di vita dei sistemi di controllo di automazione industriale.

Simulation La simulazione nelle industrie riguarda la riproduzione virtuale degli ambienti e dei processi che avvengono al loro interno. Questo consente di avvicinare il mondo fisico e virtuale per analizzare dati, monitorare risultati e migliorare i processi che potrebbero causare un fallimento. L'aspetto principale di questa tecnologia è che consente di fare ciò che è stato descritto senza provocare fermi e sprechi di produzione, senza gravare sugli obiettivi dell'azienda poiché vengono utilizzati software e sistemi

informatici. L'uso di software di simulazione sta crescendo sempre di più, perché rappresentano uno strumento per l'apprendimento e per l'esecuzione di esperimenti. In un ambiente non reale gli errori sono ammessi poiché non creano nessun impatto sull'andamento della produzione e con questi sistemi si è in grado di capire quali processi possono risultare critici e definire delle azioni per risolverli. Per simulare un processo industriale in maniera ottimale sono necessari una grande quantità di dati e di informazioni, per cui è fondamentale acquisire sempre più dati, organizzare e archiviare le informazioni in maniera affidabile. L'Industria 4.0 conta su processi sempre più automatizzati e la simulazione è essenziale per effettuare test e valutazioni nelle routine aziendali senza causare fermi della produzione e problemi, proprio per questo che l'utilizzo del Digital Twin (gemello digitale) sta diventando sempre più frequente. Inoltre, simulando processi nuovi o migliorati, si evita il rischio di perdite e si possono prendere decisioni basate su risultati affidabili [3].

Big Data I big data sono l'accumulo di una grande quantità di dati, provenienti da molte fonti, come dispositivi, reti di sensori, macchine di produzione e sistemi di gestione aziendale. Il passaggio da dato ad informazione utile non è semplice e scontata, l'elaborazione risulta ancora più complessa quanto più essi sono eterogenei e quanto maggiore è la quantità di dati. Per le organizzazioni e i produttori che dispongono di una grande quantità di dati operativi e di produzione, le tecniche di analisi avanzate sono fondamentali per scoprire modelli, correlazioni sconosciute, tendenze di mercato, preferenze dei clienti e altre informazioni commerciali utili. Un'analisi approfondita di questi dati può migliorare la produttività, la qualità dei prodotti, la manutenzione delle macchine e la strategia dell'azienda, determinando gli obiettivi da raggiungere e le azioni operative da implementare. I big data non portano un vantaggio solo all'interno del sistema produttivo di un'azienda, ma ricoprono un ruolo importante anche nel marketing, per definire strategie innovative e attirare sempre di più l'interesse del cliente [6].

Le tecnologie appena descritte, singolarmente e integrate, consentono di mettere in atto tutte le innovazioni tecnologiche che riguardano la quarta rivoluzione industriale e di creare le basi per l'industria del futuro caratterizzata dall'essere innovativa, interconnessa e sostenibile. Le tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 consentiranno di avviare la trasformazione digitale delle aziende per raggiungere gli obiettivi prefissati: automatizzare e ottimizzare i processi operativi per aumentare la produttività, l'efficienza e la qualità dei prodotti, ottenere una maggiore continuità operativa con l'utilizzo di avanzate soluzioni di manutenzione e monitoraggio, migliorare le condizioni di lavoro e la sostenibilità, definire nuove strategie aziendali per creare nuovi modelli di business.

1.2 Tecniche di manutenzione innovative

L'industria 4.0 riguarda un processo di rivoluzione tecnologica e digitale soprattutto del mondo industriale, come è stato riportato nel paragrafo precedente.

La personalizzazione e la disponibilità di dati sono delle caratteristiche alla base dell'industria 4.0; acquisire e disporre di una grande quantità di informazioni è rilevante per collaborare per prendere delle decisioni in maniera proattiva. Per mettere in atto una tale trasformazione si necessita di strutture di reti di sensori e di macchine intelligenti per acquisire dati, di strumenti di previsione avanzati in grado di elaborare i dati in informazioni utili, e l'integrazione di alcune tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0.

La manutenzione rappresenta una delle funzioni più citate quando si considerano le applicazioni di Industria 4.0.

Grazie alla quarta rivoluzione industriale la manutenzione può rinnovare pratiche già note. In passato, i processi di manutenzione erano ritenuti di basso valore aggiunto per il business e si voleva ridurre il più possibile i costi legati a tali processi, perché erano considerati negativi. Si ignorava l'impatto delle operazioni di manutenzione sulla qualità del prodotto, sui costi di produzione e, soprattutto, sui profitti.

Lo sviluppo di nuove strumentazioni e tecnologie digitali che possono essere utilizzate per monitorare le condizioni operative di apparecchiature, macchinari e sistemi dell'impianto ha fornito i mezzi per gestire le operazioni di manutenzione [9]. Quindi nel tempo si è capito il vero valore della manutenzione e il suo contributo nella riduzione dei costi per fermo impianto, nel migliorare efficienza, tempo di vita dei componenti e produttività e il servizio proposto al cliente. Ad oggi si è capito che la manutenzione è uno dei processi aziendali che maggiormente può beneficiare della trasformazione digitale, dato che è una risorsa chiave che contribuisce all'eccellenza operativa.

Prima di esporre le innovazioni apportate nella manutenzione, è bene definire cosa si intende per manutenzione. Si considerano le seguenti definizioni di politiche di manutenzione [10]:

- manutenzione correttiva o reattiva - manutenzione eseguita a seguito di una rilevazione di un'avaria dell'apparecchiatura e utilizzata per riportare l'entità nella condizione di salute. Attività che non prevede elevati costi iniziali associati, tuttavia un impianto improvvisamente fermo può causare un impatto considerevole sull'operatività e potrebbe innescare situazioni di emergenza. Inoltre, le riparazioni effettuate sono mirate a far ripartire il macchinario e non ad ottimizzarne lo stato di funzionamento;
- manutenzione preventiva - si effettuano attività di manutenzione regolari: in base a intervalli di tempo o criteri prefissati per evitare il guasto, quindi consente di programmare i fermi macchina in tempi convenienti per la produzione, in modo da organizzare anticipatamente la disponibilità di pezzi di ricambio e

di personale. Le attività vengono svolte senza una precedente indagine sulle condizioni dell'entità quindi spesso la frequenza degli interventi può risultare non opportuna, ossia troppo elevata o troppo ridotta rispetto alle necessità delle attrezzature;

- manutenzione basata sulle condizioni (Condition Based Maintenance - CBM)- è una tecnica manutentiva che utilizza condizioni o soglie fisse impostate su dei valori per stabilire il momento adatto in cui effettuare la manutenzione, quando i limiti non vengono rispettati scattano degli allarmi. Tale tecnica prevede un'indagine sulle condizioni dell'entità e consente di prevenire danni e tempi di fermo dell'apparecchiatura;
- manutenzione predittiva (Predective Maintenance - PdM) - è una tecnica manutentiva basata sulle condizioni innovativa, ovvero supera i limiti dei metodi sopra definiti. Tramite l'uso di dati, analisi avanzate e tecniche di Machine Learning controlla e traccia le prestazioni dell'impianto durante il normale funzionamento e garantisce la capacità di predire il processo di degrado e il tempo residuo atteso prima dell'avaria dell'apparecchiatura, in modo da individuare una soluzione prima che si generino guasti effettivi.

Nel passato all'interno delle industrie venivano applicate soprattutto tecniche di manutenzione reattiva, grazie allo sviluppo di determinate tecnologie, oggi è possibile implementare anche tecniche di manutenzione basata sulle condizioni e predittiva. Ovviamente in alcune situazioni la manutenzione predittiva non è ancora una soluzione applicabile e quindi vengono utilizzate le altre metodologie, ma sicuramente uno degli obiettivi dell'Industria 4.0 è incrementare sempre di più l'utilizzo di tecniche di manutenzione predittiva (ove possibile e fornisce dei vantaggi) per ridurre i costi legati alla manutenzione, che comprendono dal 15 al 60% i costi complessivi di gestione di tutte le attività produttive.

1.2.1 Manutenzione basata sulle condizioni

La CBM è una strategia che monitora, tramite ispezioni visive, test e sensori, le effettive condizioni di un'entità per decidere che tipo di applicazione effettuare su di essa, quindi la decisione di eseguire la manutenzione viene presa osservando le condizioni del sistema e/o dei suoi componenti in tempo reale o quasi. La manutenzione viene eseguita quando alcuni indicatori mostrano una perdita nella prestazione, avvicinandosi allo stato di guasto o avaria; quindi la manutenzione viene attuata solo dopo aver osservato una diminuzione delle condizioni dell'apparecchiatura e solo in caso di necessità.

Le condizioni dell'apparecchiatura devono far sì che la manutenzione venga effettuata in un periodo di tempo sufficientemente lungo prima dell'avaria, in modo che il lavoro possa essere completato prima che l'apparecchiatura si guasti o che le prestazioni

scendano al di sotto del livello ottimale, evitando fermi di produzione e una discontinuità della linea produttiva. Affinché la CBM abbia successo, è necessario che siano presenti diversi elementi, come: definire una strategia di manutenzione programmata che consenta di ispezionare e individuare le anomalie nelle apparecchiature e di attivare tempestivamente gli ordini di lavoro successivi.

L'obiettivo della CBM è prevenire in anticipo le anomalie del prodotto, prima che si verificano, monitorare e individuare i guasti imminenti delle apparecchiature, in modo da programmare la manutenzione in modo proattivo quando è necessaria, e non prima. È una tecnica che consente di aumentare la precisione di previsione di un guasto, di eseguire una migliore manutenzione programmata, di ridurre o eliminare le ispezioni non necessarie, di diminuire gli intervalli di manutenzione basati sul tempo, di ridurre i budget dedicati alla manutenzione, di ottimizzare il processo produttivo e la produttività.

Tuttavia, nonostante i vantaggi, la CBM presenta alcuni limiti, poiché richiede un investimento iniziale abbastanza elevato, l'installazione di apparecchiature di monitoraggio, introduce nuove tecniche manutentive e necessita di personale formato e competente [11].

Oggi i progressi tecnologici hanno accelerato la crescita di questa tecnica manutentiva, rendendo più facile la raccolta, l'archiviazione e l'analisi dei dati con strutture che consentono di acquisire dati in tempo reale e sistemi informatici che ne consentono la visualizzazione, l'elaborazione e la capacità di supporto decisionale. I dati utilizzati possono derivare sia dal monitoraggio continuo degli asset sia da parametri di riferimento a intervalli predeterminati, essi forniscono una visione più approfondita delle prestazioni del sistema, della sua salute, della causa principale dei guasti e della previsione della vita utile residua del sistema o di un sottosistema. Aspetti fondamentali per applicare tecniche di CBM, sono:

- sistemi di raccolta e di trasmissione dei dati - utilizzo di reti di sensori cablate o wireless con appositi protocolli di comunicazione;
- selezione ed elaborazione dei dati - oltre ad avere un sistema in grado di acquisire i dati, è di fondamentale importanza la qualità e la corretta selezione dei dati. Considerando che questi ultimi vengono acquisiti da tantissimi sistemi, è importante capire quali dati sono necessari per effettuare la manutenzione;
- algoritmi per prevedere le condizioni di guasto - i dati disponibili devono essere analizzati e devono essere sviluppati algoritmi in grado di prevedere l'anomalia.

La CBM è un insieme di tecnologie, processi e capacità integrate che insieme riescono ad attuare ciò che è stato descritto in precedenza [12]. La CBM in alcune situazioni viene rimpiazzata con la PdM, tipo di manutenzione più evoluto dal punto di vista tecnologico. La CBM e la PdM per alcune caratteristiche sono simili, ma la PdM consente di superare i limiti imposti dalla CBM.

1.2.2 Manutenzione predittiva

La PdM svolge un compito fondamentale all'interno delle industrie in quanto è in grado di prevedere tendenze e schemi di comportamento degli apparati produttivi per anticipare i guasti in corso, migliorare il processo decisionale per l'attività di manutenzione, ridurre i tempi di fermo e i costi, mediante l'integrazione della conoscenza delle condizioni effettive delle apparecchiature e l'utilizzo di modelli statistici o di apprendimento automatico (Machine Learning). La conoscenza gli andamenti futuri di una apparecchiatura e del momento in cui si verificherà il guasto consentirà agli operatori di implementare un metodo per prevenire la perdita di prestazioni del sistema produttivo [13].

La PdM è una tecnica manutentiva ed un mezzo per migliorare la produttività, la qualità del prodotto e l'efficienza degli impianti.

Per fare tutto ciò la PdM si basa su dati storici, ma soprattutto su dati acquisiti in tempo reale, modelli statistici e conoscenze di dominio, le informazioni raccolte vengono elaborate in modelli matematici predittivi che consentono di ottimizzare la strategia di manutenzione.

Attraverso i dati ottenuti dall'impianto e le informazioni relative alle effettive condizioni dell'apparecchiatura e all'efficienza di un processo, le aziende sono in grado di pianificare un programma di manutenzione predittiva, per ridurre al minimo i guasti identificandoli anticipatamente, rilevando per tempo il problema si evita la necessità di effettuare una riparazione tempestiva, che genera costi notevoli e fermi lunghi.

Per poter pianificare un programma e un'attività di PdM è necessario conoscere o stimare la vita utile di un bene, la "Remaining Useful Life" (RUL) e il suo stato di salute, quindi individuare degli indicatori di salute, "Health Index" (HI) accurati [14]. La RUL di un bene è una questione chiave per la gestione della salute di un'apparecchiatura, la sua previsione basata sull'acquisizione dei dati di monitoraggio ottenuti dai sistemi produttivi può essere utilizzata per evitare delle catastrofi causati da un guasto o per estendere i cicli di vita. La RUL può essere sovrastimata o sottostimata, la prima comporta delle criticità maggiori poiché determinerebbe degli arresti delle apparecchiature imprevisti e causerebbe dei danni disastrosi per un'azienda. Un tema caldo tra i ricercatori è quello di trovare dei metodi di Machine Learning per stimare nella maniera più adatta possibile la RUL[15].

Lo stato di salute di un bene rappresenta la deviazione di un comportamento dalla sua condizione di funzionamento regolare. L'analisi dello stato di salute di un'apparecchiatura è fondamentale per l'implementazione di una tecnica di PdM, in quanto fornisce le prestazioni e lo stato di degrado di un bene utili a prevedere le condizioni dei componenti e dei sistemi. Il calcolo di un HI adeguato stabilisce la relazione tra il degrado di un componente e la sua RUL[16].

La PdM rappresenta una grande novità all'interno delle aziende e un pilastro nello scenario di Industria 4.0.

Per far sì che la PdM abbia successo le aziende devono disporre delle competenze ne-

cessarie a livello di tecnologie: Smart Sensors, IoT, Big Data, Data Analytics, Cloud, Cybersecurity, Machine Learning, Artificial Intelligence (di estrema importanza sono l'acquisizione, l'elaborazione e la qualità e sufficiente quantità di dati). Tali tecnologie consentono di rendere accessibili le tecniche di PdM e di rilevare, identificare e prevenire guasti precursori e imminenti alle apparecchiature e ai componenti delle macchine, di monitorare e predire la progressione del guasto, e di fornire supporti decisionali alle aziende per lo sviluppo dei piani di manutenzione.

La PdM comporta sicuramente investimenti iniziali considerevoli per sviluppare delle soluzioni adeguate, ma allo stesso tempo colma lacune dei modelli di manutenzione più tradizionali, apportando benefici di ampia portata, come:

- ottimizzazione dei tempi (riduzione dei tempi pianificati ed rimozione dei tempi non programmati);
- ottimizzazione nella pianificazione della manutenzione e dell'uso delle risorse manutentive per ridurre i costi (riguarda interventi di assistenza, ma anche risorse, scorte di materiale e pezzi di ricambio)
- riduzione sui costi delle riparazioni e riduzione dei costi di manutenzione non necessaria;
- miglioramento nelle prestazioni dell'impianto per allungare la vita utile del bene, la sua salute e le sue prestazioni.

Per terminare la PdM contribuisce alla riduzione di interventi inutili e a un'applicazione più efficace degli interventi necessari, contribuendo ad una maggiore continuità del servizio di macchine e impianti [17].

La PdM è la tecnica manutentiva più innovativa dal punto di vista tecnologico, però non è ancora accessibile a tutte le aziende, in parte a causa dei costi necessari per la sua implementazione (adozione di sistemi che si basano sulle tecnologie abilitanti dell'I4.0), in parte perché non sempre il livello tecnologico e culturale di un'azienda permette di beneficiare di tutti i suoi vantaggi.

Differenze CBM e Pdm La CBM e la PdM sono due tipologie di manutenzione che vengono spesso utilizzate in modo intercambiabile, per alcuni studiosi i due concetti sono sinonimi, perché presentano delle caratteristiche in comune: entrambe le strategie si basano sui dati acquisiti da sensori di misura per determinare la necessità di un intervento manutentivo, si pongono la finalità di prevenire i tempi di fermo non pianificati e di predire il guasto di un'apparecchiatura, per ridurre i costi [18].

Tuttavia per altri autori le due metodologie sono differenti e la PdM rappresenta un'evoluzione della CBM, infatti i due tipi di manutenzione presentano anche delle differenze:

- la CBM si basa sulla diagnostica basata sulle condizioni per prevedere quando potrebbe essere necessaria la manutenzione dopo che è avvenuta la perdita di una prestazione di un componente, mentre la PdM combina la diagnostica basata su condizioni per prevedere in anticipo il comportamento di fallimento o di guasto di un componente mediante dati acquisiti dai sistemi e tecniche di Machine Learning;
- la CBM si basa sul monitoraggio basato su condizione, la PdM monitoraggio in tempo reale integrato ad algoritmi predittivi che aiutano a determinare con precisione i tempi ideali per la manutenzione degli asset [19].

La PdM è una versione più avanzata, accurata e affidabile della CBM, però dato che la PdM non è sempre implementabile in questo elaborato si andrà a definire un sistema di CBM che utilizza un sistema di controllo statistico di processo per definire i limiti e le condizioni su cui devono far riferimento gli operatori per valutare lo stato di un sistema.

1.3 Controllo statistico di processo

Il controllo statistico di processo (CSP) insieme alla manutenzione è in grado di garantire la qualità di un sistema di produzione e di affrontare un guasto alle apparecchiature. Dato che anche lo stato di salute di un bene può avere un impatto importante sulla qualità di un prodotto, spesso si utilizzano controlli statistici di processo come sistema di monitoraggio per valutare lo stato di salute di un'apparecchiatura e per migliorare la qualità dei prodotti riducendo la variazione dei processi [20].

Il CSP utilizza metodi di campionamento e statistici per determinare, per monitorare e analizzare la qualità e la variabilità di un processo, come ad esempio un'operazione di produzione.

Uno degli obiettivi di questa metodologia è quello di fornire all'azienda strumenti adatti per migliorare servizi e prodotti attraverso l'eliminazione di errori, e di controlli ripetitivi e inutili, quindi è volto a ridurre tutte le operazioni che causano dei rallentamenti o dei fermi dei cicli produttivi. Per ottenere risultati simili è necessario: conoscere i processi in maniera approfondita, identificare caratteristiche critiche del processo tramite l'utilizzo di dati statisticamente significativi e che consentono di individuare cambiamenti nel normale funzionamento del processo, quindi anche in questa situazione sono di fondamentale importanza le architetture che consentono di acquisire i dati in tempo reale e la selezione, l'elaborazione e l'analisi dei dati ottenuti.

I concetti di CSP sono stati sviluppati dal Dr. Walter Shewhart dei Bell Laboratories e sono stati ampliati dal Dr. W. Edwards Deming. Shewart ha identificato due fattori principali che possono causare una variazione del processo:

1.3 Controllo statistico di processo

- fattori comuni - intrinseche nella variabilità di un processo produttivo, insorgono casualmente durante il normale svolgimento del processo e ne determinano la fluttuazione naturale all'interno di un intervallo;
- fattori speciali - fattori esterni che determinano una variabilità indesiderata o anomala rispetto al naturale svolgimento di un processo.

Un processo viene definito sotto controllo quando la sua variabilità è dovuta solo a cause comuni. La variabilità prodotta dai fattori speciali, che potrebbe causare problemi di qualità dei prodotti o guasti delle apparecchiature, è molto più marcata di quella prodotta da fattori comuni e da luogo in genere ad una prestazione del processo inaccettabile, infatti, un processo che funziona in presenza di questi fattori viene definito fuori controllo. Una volta individuate le cause speciali devono essere implementati i seguenti passi: rimuovere i fattori speciali per tornare in una situazione di controllo e definire le vie che consentono di ridurre la variabilità del processo.

Lo strumento principale che viene utilizzando per monitorare il processo produttivo e per capire se è effettivamente sotto controllo è costituito dalle carte di controllo. La carta di controllo descrive l'andamento di una variabile informativa di un prodotto in funzione del tempo, quindi ne fornisce una rappresentazione nel tempo come verrà mostrato più avanti.

Le carte di controllo captano diverse informazioni sul processo produttivo:

- quando intraprendere azioni correttive e quando non sono necessarie - in questo modo si evitano anche controlli superflui e inutili;
- quali azioni correttive applicare - ciò è possibile tramite l'analisi e l'interpretazione delle carte
- reale capacità del processo e come migliorarlo - quando il processo si trova in stato di controllo statistico è possibile valutarne la reale efficienza produttiva e la capacità di rientrare nelle specifiche richieste. Se il processo non dovesse mostrarsi idoneo si potrebbe migliorarlo.

Le carte di controllo sono essenzialmente rappresentazioni grafiche di un processo nel tempo che, basandosi su teorie statistiche, sono di facile interpretazione e utilizzo. Le carte di controllo, supportando l'analista nel riconoscimento della causa di variazione, consente di individuare un processo fuori controllo evitando due errori tipici. Il primo consiste nell'interpretare una causa comune di variazione come una causa speciale; in questo caso si potrebbe esercitare un'azione correttiva eccessiva che può a sua volta aumentare la variabilità del processo. Il secondo si commette quando una variazione speciale viene trattata come una variazione comune. In questo caso, si rischia di non intervenire prontamente e adeguatamente per "correggere" il sistema. La carta di controllo definisce dei limiti entro cui può variare un determinato processo, e su di essa si trovano sempre 3 limiti di controllo:

- Limite Centrale (o central limits CL) - valore desiderato quando il processo è sotto controllo, in genere coincide con la media della variabile di processo
- Limite di Controllo Superiore (o upper control limit UCL)
- Limite di Controllo Inferiore (o lower control limit LCL)

Il processo è considerato in controllo quando tutti i punti cadono tra UCL e LCL [21]. Nella Figura 1.2 viene mostrato un esempio di una carta di controllo con un processo sotto controllo e in cui sono riportati i limiti sopra definiti.

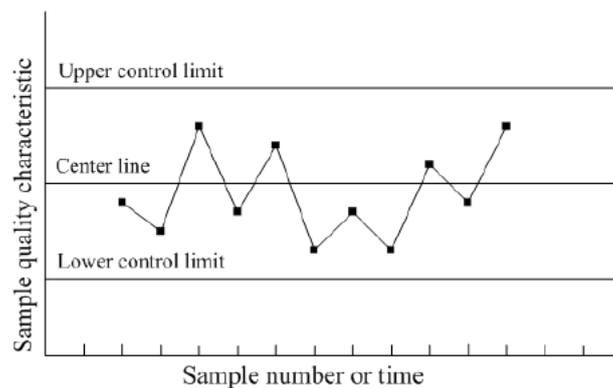


Figura 1.2: Esempio di una carta di controllo [22]

Le carte di controllo devono essere scelte in base ai parametri di processo da analizzare e i loro limiti di controllo devono essere definiti in modo rigoroso.

Uno degli obiettivi del SPC è ridurre la variabilità di un processo per aumentarne la qualità, un modo per raggiungerlo può essere implementato dalla metodologia Six Sigma, che verrà descritta nel paragrafo successivo.

1.3.1 Six sigma

Six Sigma è un metodo finalizzato all'ottimizzazione dei processi e alla gestione della qualità nelle aziende, introdotto dall'ingegnere americano Bill Smith mentre lavorava nell'azienda Motorola alla fine degli anni '80. Le strategie Six Sigma mirano a migliorare la qualità di produzione identificando e rimuovendo le cause dei difetti e riducendo al minimo la variabilità nei processi produttivi e i tassi di errore. Ciò viene fatto utilizzando metodi di gestione della qualità empirici e statistici, misurando le prestazioni di processi con determinati indicatori matematici e assumendo persone che fungono da esperti Six Sigma [23].

Questo metodo utilizza dei criteri statistici per migliorare i processi aziendali, facendo uso della media e della deviazione standard della variabile d'informazione selezionata e del livello sigma. Consente di definire delle soglie statiche minime e massime, le quali rappresentano i limiti entro cui il processo considerato deve variare per essere sotto controllo.

Six Sigma è un programma di gestione della qualità basato sul controllo dello scarto quadratico medio (indicato con la lettera greca sigma) che ha lo scopo di portare la qualità di un prodotto o di un servizio a un determinato livello, particolarmente favorevole per il consumatore. Il termine Six Sigma deriva dalla modellazione statistica dei processi di produzione. La maturità di un processo di produzione può essere descritta da una valutazione sigma che ne indica la resa o la percentuale di prodotti privi di difetti, considerando a quante deviazioni standard di una distribuzione normale corrisponde la frazione di risultati privi di difetti.

La lettera greca in Six Sigma illustra il principio sul quale si fonda questo metodo: in matematica, tale lettera denota la deviazione standard di una distribuzione normale gaussiana, dove un sigma rappresenta una singola deviazione standard dalla media. Nei processi aziendali, il risultato desiderato non viene sempre raggiunto, ma si verifica una variazione come nella normale distribuzione gaussiana. Questa dispersione all'interno di un processo, data dal numero di errori, può essere quantificata come livello sigma. Più bassa è la dispersione, migliori sono le prestazioni del processo e più alto è il valore sigma raggiunto.

L'obiettivo del metodo è di raggiungere un tale controllo del processo da avere soltanto 3,4 parti difettose per milione, il che porta a limiti molto restrittivi sulla variabilità del processo produttivo. Tale variabilità ristretta si ottiene se il processo ha sei σ , cioè tre deviazioni standard sopra e sotto la media, e stabilisce che il margine di errore può essere fino a sei deviazioni standard dalla media [24]. La variabilità viene a essere così ristretta che, inizialmente, secondo l'opinione comune era impossibile da raggiungere. Tuttavia, alcune industrie hanno dimostrato che un simile obiettivo è raggiungibile.

Six Sigma, dunque, indica che sono presenti 6 deviazioni standard, cioè un tasso di precisione del 99,99966%, ovvero una possibilità di sbagliare dello 0,00034%, in questo modo si massimizza l'efficienza e si riducono i difetti più dei livelli Sigma inferiori.

Il Six Sigma si pone l'obiettivo di ridurre la variabilità di un processo e il livello 6 σ è quello, permette di farlo generando dei tassi di errore estremamente bassi, però il livello 6 non è l'unico implementabile.

I livelli sigma possono variare da uno a sei, ogni livello è associato ad una percentuale di errore accettabile, strettamente legati a considerazioni di natura statistica sulla distribuzione della variabile misurata. Questo approccio statistico per il monitoraggio della qualità garantisce che le applicazioni tecniche abbiano un margine di errore estremamente ridotto.

Tutti i livelli sigma misurano il numero massimo di difetti consentiti per un milione di parti, il livello 6 è quello caratterizzato da una percentuale di errore e di difetti più bassa, per cui rappresenta il livello maggiormente utilizzato.

La Figura 1.3 mostra i livelli sigma implementabili.

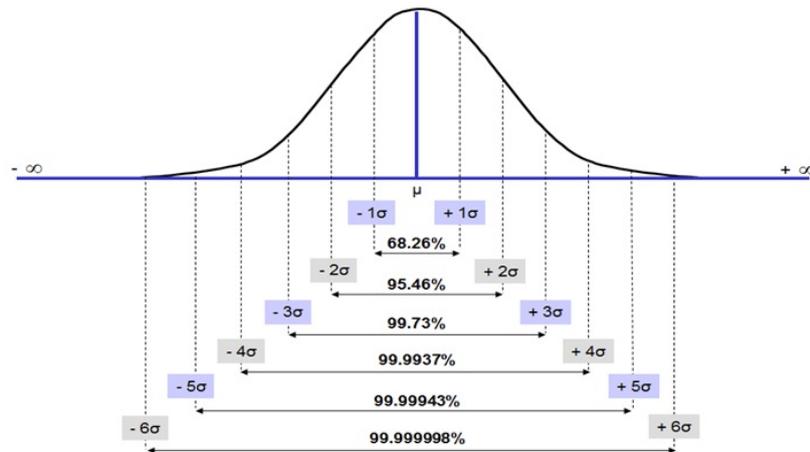


Figura 1.3: Livelli sigma sulla curva di distribuzione gaussiana [25]

Nell'elaborato proposto vengono applicati i metodi Three Sigma e Six Sigma per definire la variabilità tollerabile per un determinato processo. Three Sigma è il terzo livello sigma, il quale stabilisce che può esserci solo un margine di errore fino a 3 deviazioni standard dalla media. Questo significa che il 93,3% di tutti gli esiti cadono all'interno del range di accuratezza. Tutti i livelli Sigma misurano il numero massimo di difetti consentiti per un milione di parti. Per Three Sigma, può esserci un tasso di errore di tre parti per milione o 66.800 parti difettose.

Three Sigma e Six Sigma sono entrambi aspetti della metodologia di produzione Sigma [24].

L'obiettivo finale di questo documento è quello di identificare il range all'interno del quale deve variare il valore di pressione o di vuoto di alcuni sensori installati su una linea produttiva quando essa si trova in una condizione ottimale. Per svolgere questo compito, ovvero per definire le soglie, è stato scelto come metodo il Six Sigma poiché la linea produttiva presa in considerazione è flessibile e viene utilizzata per la produzione di diverse tipologie di articolo (per articolo si intende differente tipologia di prodotto o diversa velocità di produzione della linea produttiva), quindi l'analisi proposta deve essere caratterizzata articolo per articolo, e anche per ogni sensore installato sulla linea produttiva, in quanto sulla macchina sono presenti diversi sensori di pressione e di vuoto. È stato proposto questo metodo abbastanza tradizionale perché dovendo effettuare l'analisi su tantissimi sensori e su diverse tipologie di articoli è difficile implementare una tecnica di analisi molto smart e customizzata. Inoltre il sistema di raccolta dei dati implementato è nuovo, quindi non si conoscono ancora le potenzialità e le caratteristiche delle variabili di pressione e di vuoto, in questo elaborato è stato proposto un primo tentativo per identificare delle soglie statistiche entro cui poter far variare l'andamento del vuoto o della pressione. Tali soglie vengono applicate per ridurre la variabilità del processo e si presuppone che

1.3 Controllo statistico di processo

delle pressioni e dei vuoti sotto controllo, all'interno dei range stabiliti, consentano la produzione di prodotti finiti in qualità e la riduzione degli scarti produttivi. Questa metodologia consente di definire le soglie in maniera puntuale e basandosi sui dati acquisiti dalla rete di sensori, più dati a disposizione si hanno e più precisi saranno i limiti calcolati. Nell'elaborato verrà anche proposta una differenza a livello grafico sui risultati ottenuti applicando il metodo Three Sigma e il metodo Six Sigma. Prima di trattare la parte di analisi dei dati, viene descritta la rete di sensori che è stata implementata per effettuare la loro acquisizione.

Capitolo 2

IMPLEMENTAZIONE RETE DI SENSORI

2.1 Obiettivi della rete

Prima di iniziare con lo studio della rete di sensori di pressione e di vuoto cablata, verranno definiti quali sono gli obiettivi che si vogliono raggiungere con l'implementazione di questa rete cablata su una linea di produzione dell'azienda Fater S.p.A.. L'azienda in questione è stata fondata da Francesco Angelini nel 1958 e dal 1992 è una joint venture tra Procter & Gamble e Gruppo Angelini. Produce beni di consumo, nello specifico prodotti assorbenti e intimi per la cura della persona e prodotti detergenti per la pulizia di tessuti e della casa. La rete di sensori cablata è stata implementata su una linea di produzione del reparto "Fem Care" dove vengono realizzati i prodotti assorbenti per la cura femminile, tale linea è denominata "FGC2". I motivi per cui è stata sviluppata questa rete di sensori sulla linea di produzione sono differenti:

- per effettuare il "revamping", ovvero la sostituzione di manometri di pressione e di vuoto analogici con dei sensori di pressione e di vuoto con 2 uscite (un'uscita elettrica analogica e un'uscita pneumatica) e un display di visualizzazione digitale;
- per generare un sistema in grado acquisire i dati relativi ai valori di pressione e di vuoto dalla linea di produzione, quindi digitalizzare la raccolta dati, in modo da storicizzarli e analizzarli
- per digitalizzare il controllo che viene effettuato dagli operatori sui sensori di pressione e di vuoto.

Per quanto riguarda l'ultimo punto dell'elenco, occorre una spiegazione più dettagliata sul lavoro che viene effettuato dall'operatore. Attualmente l'operatore della FCG2 deve svolgere dei controlli sistematici (una volta a turno, ogni turno dura 8 ore: primo turno dalle ore 6:00 alle 14:00, secondo turno dalle ore 14:00 alle 22:00 e terzo turno dalle ore 22:00 alle 6:00) sui valori di pressione e di vuoto, ovvero deve verificare se il valore letto da uno specifico sensore si trova all'interno di alcuni limiti definiti dall'ingegnere di linea e deve registrare tale valore su un'applicazione Web nella sezione "Run Route" dopo che ha selezionato la sua mansione e il sensore specifico su

cui sta effettuando la verifica. Tale applicazione Web viene utilizzata dagli operatori per svolgere diverse mansioni come ad esempio: il "Run Route", ovvero effettuare controlli e verifiche su valori letti da diversi sensori o parti di unità della linea di produzione; l'"RLS" (running line standards) in questa sezione l'operatore trova una linea guida da seguire per attuare la manutenzione della macchina, il "Change Over" in questa sezione l'operatore trova una linea guida da visualizzare per eseguire il cambio formato sulla linea di produzione. Quando l'operatore effettua il "Run Route" sui valori di pressione/vuoto si può trovare davanti a due situazioni differenti:

- il valore rientra all'interno dei limiti definiti;
- il valore NON rientra all'interno dei limiti definiti.

Nel primo caso l'operatore deve solo registrare il dato letto per uno specifico sensore nella sezione "Run Route" dell'applicazione Web, nel secondo caso deve occuparsi di riinserire il valore della pressione/vuoto all'interno del range definito dall'ingegnere tramite una valvola di regolazione posta in vicinanza del sensore e collegata ad esso, per evitare anomalie nel processo di produzione del prodotto o problemi di qualità. In questo elaborato verrà effettuata un'analisi con i dati raccolti dalla rete di sensori aeraulici, per uno specifico prodotto, formato e velocità della linea verranno definiti, tramite l'analisi storica, delle soglie statistiche all'interno del quale deve variare un determinato valore di pressione o vuoto, quindi verrà valutare la varianza giusta che si può tollerare in questo processo. Questa analisi verrà dettagliata nel capitolo successivo, in questo si andrà a definire tutto ciò che riguarda lo studio e lo sviluppo della rete di sensori aeraulici.

2.2 Descrizione linea di produzione

Per poter capire al meglio ciò che verrà descritto nelle pagine successive si effettua una descrizione della linea di produzione dove è stata implementata la rete di sensori. La linea di produzione in questione, denominata "FGC2", si trova all'interno del reparto "Fem Care" dell'azienda Fater S.p.A. e produce prodotti assorbenti per la cura femminile.

All'interno del reparto sono presenti 7 linee di produzione, le differenze principali tra le varie linee sono riconducibili alle materie prime utilizzate e al tipo di articolo che producono.

Le linee FGC1, FGC2 e FGC3 si occupano della produzione di articoli definiti "ULTRA", la loro particolarità è di essere molto sottili. Gli articoli vengono poi suddivisi in base alla dimensione (size) e in base al tipo (tier), le dimensioni variano da S1 a S5, sulle linee descritte producono solo le dimensioni dispari, e il tipo può essere: Seta, Idea, Petalo, Cotone, Intervallo, Twiggy, Natura.

Sulla linea FGC2 vengono prodotti articoli con dimensione S3 e i principali tipi di articolo sono Seta, Idea e Petalo, che variano l'uno dall'altro per materia prima o

per differenze nel processo di produzione.

La FGC2 può essere suddivisa in 4 blocchi principali:

- UNWINDER - parte iniziale della linea, costituita da svolgitori dove vengono posizionate le bobine di materia prima;
- CONVERTER - parte centrale della linea, può essere definito il cuore poiché comprende tutti i moduli che consentono la realizzazione del prodotto, alla fine del converter si ottiene il singolo prodotto finito racchiuso nella busta esterna che lo foderà;
- BAGGER - imbustatrice, parte della linea dove i singoli prodotti vengono inseriti all'interno delle buste. All'uscita dell'imbustatrice si ottiene il pacco con all'interno un numero variabile di prodotto finito, al variare del numero varierà la dimensione della busta del pacco;
- CASE PACKER - inscatolatrice, parte della linea dove i pacchi vengono inseriti all'interno delle casse. Anche in questo caso il numero di pacchi all'interno di una cassa può variare.

In questa descrizione manca la zona di formazione del pallett, chiamato anche pallettizzatore, in quanto le varie casse dopo essere state identificate con il bar code vengono trasportate con un nastro trasportatore al magazzino dove viene formato il pallett di prodotto finito.

Una delle parti più importanti della linea è sicuramente il converter, è la zona più complessa dato che comprende tutte le macchine e le unità che assemblano le materie prime e danno forma al prodotto finito. L'unwinder e il converter vengono suddivisi per comodità in geografici, l'unwinder coincide con il geografico 1/A anche GEO1/A, mentre il converter è suddiviso in GEO2/B, GEO3/C, GEO4/D E GEO5/E. All'interno di ogni geografico sono presenti 9 moduli, la struttura della linea è modulare. I moduli del geografico sono costituiti da macchine, motori, unità di taglio e di saldatura, rulli, banchi di trasporto, sensori di diversa tipologia, telecamere che consentono di gestire ogni singolo processo e step necessario alla formazione del prodotto finito. È stata effettuata la descrizione della linea di produzione in quanto con l'implementazione della rete di sensori non tutti i manometri analogici presenti sulla linea sono stati sostituiti e integrati nella rete, ma solo alcuni di questi, quelli che sono più critici per il processo di produzione, ovvero che sono integrati nei moduli dove avvengono gli step di formazione del prodotto principali, e dove l'operatore deve effettuare dei controlli sistematici.

2.3 Selezione e descrizione dei sensori

Prima di iniziare con la selezione e la descrizione dei sensori aerulici verrà descritto poiché è stata presa la decisione di digitalizzare la parte della linea dedicata ai sensori

di pressione e di vuoto e non ad altri sensori presenti sulla FGC2.

I sensori pneumatici svolgono delle funzionalità molto importanti per la realizzazione del prodotto finito in qualità. Senza i sensori di pressione le operazioni di taglio e di saldatura dei teli di materia prima non verrebbero eseguite correttamente, così come l'assemblaggio e l'adesione delle materie prime che si ottengono applicando la colla tra i teli di materiale. I sensori di vuoto svolgono dei compiti fondamentali per il processo di produzione, vengono generate delle camere di vuoto all'interno di banchi di trasporto o di rulli di trasporto, questi ultimi sono caratterizzati da dei fori in superficie, il vuoto all'interno della camera permette di far aderire il telo di materia prima sul banco o sul rullo, quindi il vuoto è fondamentale per il trasporto del materiale.

Se il vuoto all'interno della camera non presenta un valore corretto può accadere che il telo non aderisce nella maniera corretta al banco o al rullo, quindi il telo potrebbe spostarsi lateralmente, da sinistra verso destra o viceversa e non essere centrato sull'asse centrale di trasporto, ciò comporterebbe la realizzazione di un prodotto non in qualità. Oppure dopo aver tagliato un telo di materiale con la forma del prodotto finito, se il vuoto del banco o del rullo non sono corretti, il materiale potrebbe generare delle pieghe laterali, le quali portano ad un prodotto di scarto.

Inoltre monitorare l'andamento del vuoto è fondamentale anche per effettuare la manutenzione su alcune unità della FGC2, soprattutto su quelle di taglio. In prossimità del taglio, le unità della linea di produzione tende a sporcarsi maggiormente, dato che le materie prime sono costituite da materiali porosi, quindi quando viene effettuato il taglio si genera una polvere, questa polvere può contaminare i fori dei banchi e dei rulli di trasporto. Una contaminazione eccessiva non consente il corretto trasporto del materiale, per questo motivo che durante ogni turno gli operatori svolgono delle attività di manutenzione (di pulizia) su quelle zone della linea in cui la contaminazione potrebbe causare un problema per il processo produttivo, per la realizzazione del prodotto finito e per la qualità finale del prodotto.

Questi sono i motivi principali per cui è stata presa la decisione di digitalizzare e raccogliere i dati dai sensori di pressione e di vuoto, inoltre è da considerare che questi sensori sono presenti sulla linea in numero elevato e che alcuni di essi svolgono funzioni fondamentali per il processo produttivo.

Dopo aver definito il motivo per cui è stata digitalizzata la parte della linea produttiva correlata ai sensori aeraulici, è stato effettuato uno studio sui manometri analogici da sostituire.

Da ciò si deduce che non tutti i manometri di pressione e di vuoto presenti sulla linea di produzione sono stati sostituiti questo per due motivi principali:

- alcuni sensori presenti sulla linea erano già caratterizzati da un display di visualizzazione digitale, quindi questi sono solo stati integrati nella rete di sensori che verrà descritta in seguito;
- tra i manometri analogici sono stati cambiati solo quelli che sono critici per il

processo e sul quale gli operatori vanno ad effettuare dei controlli sistematici.

In precedenza è stato descritto il lavoro che deve svolgere l'operatore quando effettua un controllo sui valori di pressione e di vuoto. Sull'applicazione Web l'operatore vede solo alcuni dei sensori, non tutti quelli presenti sulla linea di produzione, in quanto i controlli vengono effettuati solo per i sensori da tenere sotto controllo. Per poter definire i sensori più critici per il processo si effettua una piccola descrizione delle principali funzionalità dei componenti che utilizzano un sistema pneumatico e in cui si effettua la misura di pressione o di vuoto con sensori. I principi che verranno descritti utilizzano la compressione e l'espansione dell'aria atmosferica per azionare degli automatismi. I cilindri sono i componenti pneumatici che trasformano l'energia dell'aria compressa in lavoro meccanico determinato da uno spostamento. Il cilindro utilizza l'aria compressa per agire su un pistone posto al suo interno al fine di creare il movimento richiesto. I sensori di pressione consentono di effettuare la misura della pressione utilizzata dall'attuatore pneumatico per generare il movimento. Le pressioni principali che vengono misurate sono quelle:

- delle unità/testate - le principali unità sono quelle di taglio o di saldatura, esse sono costituite da un telaio e da due rulli. Nel caso delle unità di taglio il rullo inferiore rappresenta il coltello e quello superiore, liscio, rappresenta il contro coltello, nel caso delle unità di saldatura il rullo superiore è liscio mentre quello sottostante presenta sulla sua superficie dei pin sporgenti che hanno sia una funzione estetica che di saldatura. Nel caso dell'unità di taglio Figura 2.1a, la pressione consente al rullo superiore di spingere su quello sottostante per generare il taglio di un telo o di più teli saldati insieme. Nel caso dell'unità di saldatura Figura 2.1b, la pressione impressa comprime il rullo superiore su quello sottostante per generare la saldatura a freddo tra i due materiali.
- della colla spray - alcune saldature vengono effettuate tramite colla spray. La colla spray fuoriesce da un tubo e da un altro tubo fuoriesce l'aria che consente di spruzzare la colla sulle materie prime, quindi in questo caso si misura la pressione dell'aria che spinge la colla.
- della colla a contatto - altre colle non sono spray ma a contatto. È presente un pistone che spinge la colla a contatto contro il telo. Si misura la pressione del pistone, quando non deve stendere la colla il pistone viene sollevato.
- di alcuni rulli - stesso principio della pressione delle unità. Ci sono dei rulli che vengono spinti uno contro l'altro tramite la pressione impressa da un cilindro e svolgono funzioni differenti, per migliorare l'assemblaggio di due teli incollati, per schiacciare il prodotto dopo che è stata effettuata la tripiega.
- di alimentazione - pressione dell'aria che viene utilizzata da alcune macchine per funzionare, ad esempio quella dei fusori.

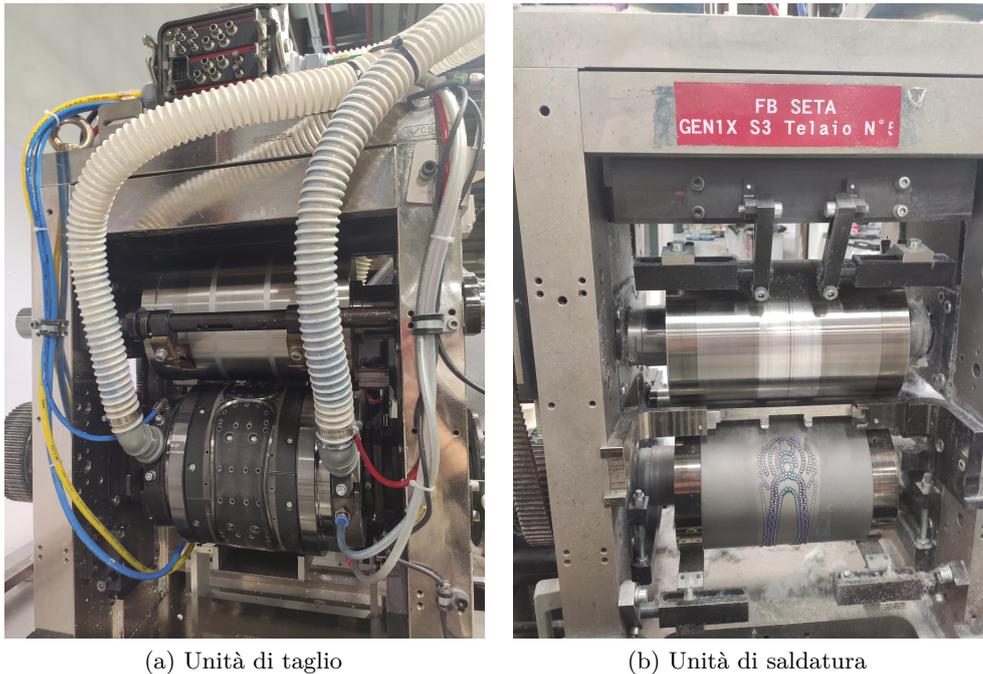


Figura 2.1: Unità FGC2

Per quanto riguarda la misura del vuoto la situazione è diversa. Il vuoto è quella situazione fisica, in cui in un determinato ambiente, la pressione della miscela di gas è inferiore a quella atmosferica, ovvero è inferiore a 1013,25 mbar. Per misurare il vuoto all'interno di un ambiente industriale esso deve essere creato, questo viene fatto con appositi macchinari industriali, generalmente pompe del vuoto, che vanno a generare una camera in cui la pressione è inferiore di quella atmosferica. I diversi sensori di vuoto presenti sulla linea svolgono un ruolo importante, verranno descritti i principali valori che vengono misurati:

- vuoti dei banchi di trasporto - all'interno della linea di produzione sono situati diversi banchi che servono per il trasporto di teli di materia prima o del prodotto finito. L'unione di una cinghia e di 2 rulli costituiscono la camera interna del banco di trasporto dove viene generato il vuoto. Sulla superficie superiore del banco sono presenti dei fori, essi consentono di far aderire il telo di materia prima o il prodotto finito al banco, evitando che il telo fuoriesca dall'asse centrale del banco o che possa ripiegarsi. Con il sensore si misura il vuoto della camera interna del banco. Nella Figura 2.2a viene mostrato un banco di trasporto.
- vuoto dei rulli - il concetto è lo stesso dei banchi, quello che cambia è che il vuoto viene generato all'interno di una camera che può ricoprire tutta l'area del rullo o solo parte di essa. Anche in questo caso il rullo presenta dei fori in superficie per consentire al telo di materia prima di aderire su di esso durante il

suo trasporto. Si misura il vuoto interno alla camera del rullo. Nella Figura 2.2b viene mostrato un rullo di trasporto.

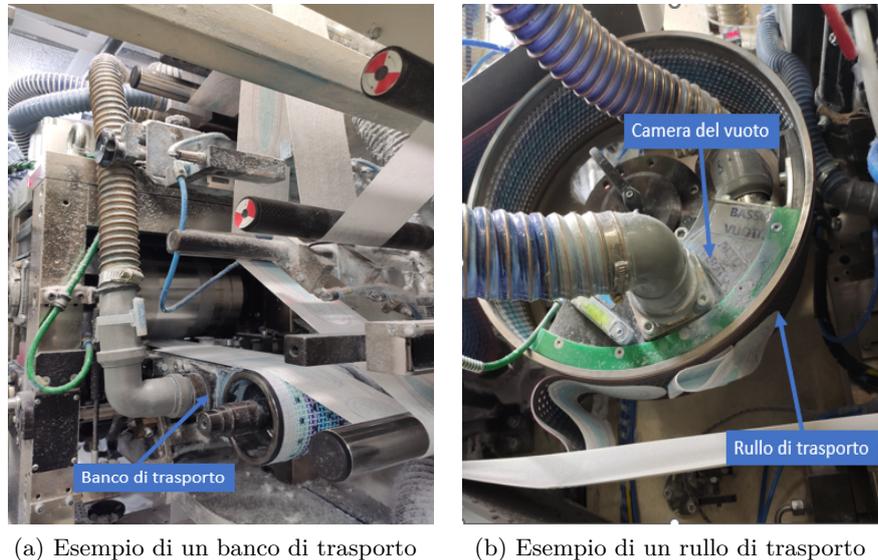


Figura 2.2: Esempi per le misure di vuoto

Quelle descritte fino ad ora sono le principali applicazioni dei sensori di pressione e di vuoto, sono legate a dei processi critici e di fondamentale importanza per la buona riuscita e la qualità del prodotto.

Sono delle azioni di rilievo e da tenere sotto controllo in quanto, nel caso delle misure di pressione: considerando per esempio la pressione di saldatura di due materiali, essa è fondamentale per definire la qualità del prodotto finale infatti vengono effettuati dei test appositi per calcolare la forza di saldatura tra i teli tramite dei dinamometri, tale forza non deve essere inferiore ad un determinato valore definito; anche la pressione delle unità di taglio è rilevante poiché determina il taglio di materiali per la formazione del prodotto finito o il prodotto finito stesso, quindi il taglio deve essere effettuato in maniera impeccabile per evitare la formazione di scarti. In realtà sono molto più critiche le misure del vuoto: il vuoto presente all'interno dei rulli o dei banchi di trasporto deve consentire di trasportare il telo o il prodotto nella maniera corretta, per evitare problemi di disallineamento o che parti del telo si possano ripiegare e generare degli scarti, come già espresso in precedenza, quindi sono misure che devono essere monitorate dagli operatori.

Gli operatori hanno la possibilità di controllare i valori e di reinserirli nell'intervallo prestabilito nel caso in cui fossero al di fuori tramite l'utilizzo di una valvola di regolazione del dispositivo pneumatico.

La scelta dei manometri analogici da sostituire è stata portata a termine considerando quanto descritto, per cui altri manometri analogici non legati a processi particolarmente critici non sono stati "digitalizzati".

Alla fine di questo studio sono stati selezionati 63 manometri analogici da sostituire e 48 sensori da integrare nella rete cablata.

La maggior parte di questi sensori si trova all'interno del converter (per l'esattezza 80), quindi nella parte centrale della linea di produzione poiché è la zona dove avvengono la maggior parte dei processi, quindi la più delicata. All'interno dell'unwinder, ovvero del GEO1/A sono stati presi in considerazione 10 sensori, nel bagger 16 sensori, mentre nel case packer solo 3 sensori da integrare nella rete.

2.4 Scelta dei sensori acquistati

In generale, un trasduttore di pressione è un dispositivo che misura la forza di un fluido o di un gas e converte il valore in un segnale elettrico. La misura può essere relativa ad un valore di riferimento o ad una scala assoluta:

- misurazione della pressione assoluta - la pressione viene misurata rispetto al vuoto assoluto (nessuna materia nell'atmosfera e pressione nulla 0 bar).
- misurazione della pressione relativa - la pressione viene misurata rispetto alla pressione atmosferica. La pressione atmosferica è la pressione che agisce attraverso lo strato d'aria presente sulla terra, essa decresce all'aumentare dell'altitudine, e a livello del mare corrisponde a circa 1013 mbar. Quando la pressione è superiore a quella atmosferica si ottiene una pressione relativa positiva, altrimenti una pressione relativa negativa.
- misurazione della pressione differenziale - nella misura di pressione differenziale viene indicata la differenza tra due pressioni: quella misurata e quella di riferimento.

I sensori costituenti la rete implementata misurano tutti una pressione relativa, nel caso dei sensori di pressione la misura sarà positiva perché superiore a 1 atm, nel caso dei sensori di vuoto sarà negativa perché inferiore ad 1 atm.

Nella sezione precedente è stato definito il numero totale di manometri analogici che sono stati sostituiti e il numero di sensori che sono stati integrati nella rete.

I sensori con display led già presenti sulla linea di produzione sono 48, di questi solo uno è un sensore di pressione, il resto sono dei sensori di vuoto. Questi trasduttori non erano connessi a nessun sistema di raccolta dati, venivano utilizzati dagli operatori per visualizzare il valore di vuoto che in genere è molto piccolo, quindi difficile da leggere su un manometro analogico. I manometri analogici sostituiti sono 63, tra questi 59 erano dei manometri e 4 erano dei vacuometri. Nel seguente capitolo si descriveranno le caratteristiche dei sensori.

I trasduttori già presenti sulla linea di produzione sono dei sensori con display digitale della KEYENCE della serie AP-30. Il modello dei sensori di vuoto è AP-31, mentre quello del sensore di pressione è AP-32P.

I trasduttori che sono stati installati per sostituire i manometri analogici sono dei

sensori della FESTO con display digitale e della linea SPAN. Il modello del sensore di pressione è il seguente: SPAN-P10R-G18M-PNLK-PNVBA-L1, mentre quello del sensore di vuoto è: SPAN-V1R-G18M-PNLK-PNVBA-L1.

Queste 4 tipologie di sensori hanno diverse caratteristiche in comune e alcune proprietà differenti. La scelta di acquistare dei sensori di un'altra marca è stata presa dall'azienda per motivi interni.

Tutti i sensori possono misurare la forza di fluidi come aria compressa e gas non corrosivi, quindi solo fluidi gassosi e non liquidi; e misurano una pressione relativa, quindi riferita a quella atmosferica.

I trasduttori di pressione e di vuoto considerati rientrano nella famiglia di sensori a deformazione elastica, ovvero che si basano sulla deformazione di un elemento elastico per effettuare la misura. I sensori a deformazione elastica possono essere meccanici, piezoelettrici o piezoresistivi. I trasduttori installati sulla linea produttiva sono tutti piezoresistivi, utilizzano l'effetto piezoresistivo, che si verifica quando la resistenza elettrica di un materiale cambia in risposta ad una deformazione meccanica applicata. I materiali che subiscono maggiormente questo effetto sono materiali metallici e semiconduttori, in quest'ultimi, soprattutto nel silicio l'effetto è di almeno due ordini di grandezza maggiore rispetto ai metalli, questo perché nei metalli la variazione di resistenza è legata ad una variazione nella geometria del materiale dovuta ad una deformazione meccanica, mentre nel silicio è dovuta ad una variazione della massa effettiva media dei portatori e questo cambiamento altera la mobilità dei portatori del silicio e quindi la sua resistività. Quando alcuni materiali semiconduttori sono esposti a sollecitazioni meccaniche, la loro resistività cambia, facendo variare il valore di resistenza specifico, e tale cambiamento di resistenza viene convertito in un segnale di uscita. L'uscita del trasduttore è una tensione o una corrente elettrica proporzionale alla pressione applicata che ha causato la deformazione del materiale [26].

Uno dei motivi per cui sono stati scelti queste tipologie di sensori riguarda i requisiti ambientali della linea produttiva che non sono particolarmente critici, sia i sensori della KEYENCE che quelli della FESTO lavorano correttamente in un ambiente con temperature comprese tra i 0°C e i 50°C e con umidità relativa non superiore all'85%, condizioni rispettate all'interno dell'ambiente dove sono stati installati. È fondamentale che i criteri sulla temperatura e sull'umidità vengano rispettati poiché l'esposizione a parametri differenti da quelli testati possono compromettere definitivamente il corretto funzionamento del dispositivo. I sensori sono esposti anche a delle vibrazioni e nel loro funzionamento devono sopportare questa condizione senza degenerarsi o guastarsi, in genere i sensori di pressione per applicazioni industriali sono in grado di sopportare vibrazioni da 10 a 2000Hz, i trasduttori presi in considerazione sopportano vibrazioni da 10 a 60 Hz, il test è stato effettuato in conformità con la normativa IEC 60068-2.

Il campo di misura è un altro parametro valutato nell'acquisto dei sensori. Le misure di pressione rientrano in un range variabile da 0 a 10 bar, mentre quelle di vuoto da 0 a -1 bar. I campi di misura di ogni sensore sono riportati nella tabella 2.1:

Tabella 2.1: Campo di misura dei sensori

AP-31P	AP-32P	SPAN-P10R- G18M-PNLK- PNVBA-L1	SPAN-V1R- G18M-PNLK- PNVBA-L1
da 0 a -1,013 bar	da 0 a 10 bar	da 0 a 10 bar	da 0 a -1 bar

I sensori sono tutti analogici, hanno un'uscita analogica, è assente la fase di digitalizzazione del segnale di ingresso, che verrà eseguita tramite un convertitore analogico-digitale. Una differenza tra i sensori della KEYENCE e quelli della FESTO: i sensori della KEYENCE sono dotati di una singola uscita elettrica in tensione a 1 - 5V, mentre i sensori della FESTO presentano due uscite in tensione (0 - 10 V e 1 - 5 V) e una uscita in corrente a 4 - 20 mA, quindi quest'ultimi danno la possibilità di scegliere quale uscita elettrica si ritiene migliore.

I sensori della FESTO sono stati configurati con un'uscita elettrica in corrente, poiché il rumore elettrico non influisce su questa modalità come su quella in tensione, un segnale in corrente ha una più elevata immunità alle interferenze elettromagnetiche di un segnale in tensione, perché tali interferenze sono immesse nella linea del segnale come tensioni e causano piccolissime variazioni di corrente verso la resistenza d'ingresso del ricevitore. Inoltre è stata preferita la configurazione a 4 - 20 mA, poiché consente di identificare più facilmente un errore nel segnale, un'anomalia del cavo elettrico o un problema di alimentazione è rilevato attraverso la caduta della corrente sotto i 4 mA. L'operatore è in grado di identificare la presenza di un problema in quanto il sensore non è più alimentato (quindi si spegne) e, se previsto, viene attivato un allarme. Con un'uscita settata a 0 - 10V l'errore è più difficile da rilevare. Sul sensore della FESTO l'uscita a 4 - 20 mA deve essere inserita manualmente perché la configurazione standard prevede un'uscita in tensione a 0 - 10V, inoltre il settaggio deve essere effettuato per ogni singolo sensore.

I sensori sono dotati di display digitale, il valore della pressione e di vuoto può essere letto sul display con unità di misura differenti, in più si ha la possibilità di cambiare il colore dello schermo.

Sui sensori della KEYENCE la pressione può essere visualizzata in una delle 4 unità di misura disponibili: bar, Pa, Psi, kfg/cm² o mmHg, consentendone l'utilizzo in tutto il mondo. La risoluzione del display è molto elevata: 1/1000. Lo schermo LED dei sensori della KEYENCE è dotato di due colori: rosso e verde.

Funzionalità utile in quanto selezionando la modalità di funzionamento a finestra direttamente dal menu di navigazione del sensore si possono impostare i valori limiti inferiori e superiori desiderati e si può scegliere di applicare il colore verde allo schermo se il valore di pressione o vuoto rientra nei limiti prestabiliti e il rosso se non rientra nei limiti. Proprietà pratica considerando che l'operatore deve verificare se il valore letto su uno specifico sensore rientra all'interno di un determinato intervallo

[27].

Sui sensori della FESTO la pressione può essere visualizzata in una delle seguenti unità di misura disponibili: MPa, bar, inH₂O, inHg, kPa, kgf/cm², mbar, mmHg, psi. Anche il display di questi sensori è dotato di due colori: rosso e blu, come si può vedere nella Figura 2.3, quindi anche in questo caso si può scegliere di definire un colore diverso quando il valore della pressione è contenuto nell'intervallo prestabilito e quando non lo è. Questa funzionalità può essere impostata dal menu di navigazione del sensore con l'ausilio dei tasti presenti sul dispositivo, dal menu si deve selezionare la schermata che consente di monitorare l'intervallo di pressione, poi possono essere impostate le soglie minime e massime, e infine si può selezionare la modalità per fissare il colore [28].



Figura 2.3: Display LED a due colori del sensore FESTO

I sensori hanno due collegamenti, un attacco pneumatico e uno elettrico. L'attacco pneumatico permette il collegamento con il tubo dell'aria e consente al sensore di effettuare la misura di pressione, il valore acquisito viene convertito dall'elettronica in un segnale di tensione o corrente. Il cavo elettrico congiunge il sensore con la rete che verrà descritta di seguito, tale collegamento consente l'alimentazione del dispositivo, la conversione del valore analogico in digitale e la lettura del dato dal PLC.

2.5 Rete di sensori

Per controllare e monitorare in modo affidabile le macchine industriali e le linee produttive, si ha bisogno di una comunicazione industriale professionale e di una tecnologia di rete.

Una produzione sempre più veloce, flessibile, efficiente e mutevole richiede una comunicazione regolare tra sensori e Internet. Interfacciare sensori e attuatori alla rete di comunicazione industriale migliora le prestazioni del sistema, perché i dati di processo e la diagnostica possono essere disponibili simultaneamente a molti sistemi

e condivisi sul Web.

Il volume di dati sempre crescente e la comunicazione complessa richiedono componenti potenti e affidabili che siano in grado di trasportare le informazioni attraverso tutti i livelli. È qui che la tecnologia dei bus di campo può essere d'aiuto. La moderna trasmissione dati tramite sistemi di bus di campo come Profibus, Profinet, EtherCAT, CC-Link o EtherNet/IP in combinazione con IO-Link crea le condizioni ideali per adattare la produzione ai requisiti dell'I4.0.

Il bus di campo ha sostituito il cablaggio parallelo, costituito da fasci di cavi, in un unico cavo bus. L'introduzione del bus di campo ha permesso la riduzione di: costi, tempi di lavoro, disponibilità di materiali e di spazio. Realizza un'architettura multi-punto in cui ogni dispositivo o nodo interessato allo scambio di dati è collegato ad un'unica linea di comunicazione (fisica o logica) che costituisce il tramite della distribuzione e raccolta delle informazioni. In ambito IEC (International Electrotechnical Commission) con bus di campo si intende lo standard di comunicazione tra i diversi dispositivi che costituiscono il processo, ovvero: dispositivi di campo (come sensori, attuatori) e dispositivi di controllo (come Programmable Logic Controller (PLC)). La comunicazione tra i nodi è gestita secondo un protocollo che è caratteristico di ogni tipo di bus di campo (quelli sopra nominati). Il modello ISO/OSI è il riferimento per i protocolli.

Il protocollo bus di campo semplifica il cablaggio, consente di risparmiare tempo durante la progettazione e l'installazione e riduce i costi. In combinazione con IO-Link, la tecnologia a bus di campo mostra ancor meglio i suoi punti di forza. IO-Link fornisce al bus di campo una velocità di trasmissione dati più elevata e sfrutta al meglio il protocollo. I sistemi diventano meno soggetti a malfunzionamenti e più flessibili [29].

L'IO-Link è un potente standard aperto di comunicazione (IEC 61131-9) per la creazione di soluzioni intelligenti per l'automazione industriale, è la prima tecnologia IO standardizzata che comunica dal controllore fino al livello di automazione più basso e integra sensori e attuatori nel bus di campo. L'IO-Link è un protocollo di comunicazione punto-punto indipendente dal bus di campo, che utilizza cavi standard non schermati per effettuare il collegamento cablato o wireless tra un sistema IO compatibile e un dispositivo sul campo. L'obiettivo di questo standard è quello di creare una piattaforma che consenta a sensori ed attuatori di comunicare con il sistema di controllo e di acquisire dati per migliorare i processi e le operazioni industriali automatizzate. IO-Link è una tecnologia abilitante digitale e intelligente, per lo scambio di dati di processo, di sistema e di eventi, con elevata qualità del segnale [30].

La piattaforma che è stata implementata sulla FGC2, all'interno della Fater S.p.A., collega i sensori di pressione e di vuoto con uscita analogica al sistema di controllo sfruttando il bus di campo EtherNet/IP e lo standard di comunicazione IO-Link. EtherNet/IP (Ethernet Industrial Protocol) è costituito da pacchetti Ethernet utilizzati con il protocollo industriale dei livelli CIP (Common Industrial Protocol),

TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) e/o UDP (User Datagram Protocol) per fornire i dati richiesti al controllore. EtherNet/IP è uno standard di bus di campo aperto basato su CIP, sviluppato da Rockwell Automation e ODVA (Open DeviceNet Vendor Association) e utilizzato principalmente nella tecnologia di automazione.

Il bus di campo, in questo caso EtherNet/IP collega i PLC ai dispositivi di misura [31].

I maggiori produttori di PLC hanno sviluppato dei protocolli di comunicazione su bus di campo propri. Di conseguenza l'azienda è legata al produttore del PLC per definire il bus di campo, per consentire a ogni componente installato sulla linea produttiva di comunicare con il PLC. All'interno della Fater S.p.A. vengono utilizzati i PLC dell'Allen-Bradley della Rockwell Automation, il cui bus di campo prioritario è il protocollo EtherNet/IP. Tale rete all'interno dell'azienda viene utilizzata per dati che sono meno prioritari e non troppo critici.

Per realizzare la rete di sensori basata sul protocollo di comunicazione IO-Link, non è stata realizzata una nuova rete EtherNet/IP indipendente, ma il sistema è stato collegato ad uno switch della rete EtherNet/IP esistente tramite un nuovo ramo di rete.

Il bus di campo EtherNet/IP integrato alla soluzione IO-Link genera una produzione sempre più efficiente, veloce e flessibile e garantisce di ottenere delle ottime prestazioni dell'impianto fornendo la possibilità di acquisire i dati direttamente dai sensori di pressione per riportarli al PLC.

Un sistema IO-Link è costituito dai seguenti componenti:

- un master IO-Link;
- dispositivo IO-Link (sensori, valvole, moduli I/O);
- cavi standard a 3 o a 5 conduttori non schermati;
- strumenti per configurare e assegnare i parametri IO-Link.

Il master IO-Link stabilisce la connessione tra i dispositivi IO-Link e il sistema di automazione e di controllo. L'IO-Link inserisce dispositivi intelligenti all'interno del sistema di controllo, ed è in grado di integrare anche dei sensori con uscita analogica o tramite i convertitori analogici IO-Link o degli hub IO-Link che sono capaci di digitalizzare il dato in ingresso e di inviarli al master.

Per implementare la rete di sensori di pressione e di vuoto sulla linea FGC2 è stato realizzato un sistema che utilizza un master IO-Link e un hub di sensori IO-Link della BALLUFF. Il modello del master IO-Link, anche definito modulo EIP + IO-Link, è il seguente: BNI EIP-508-105-Z015, raffigurato nella Figura 2.4



Figura 2.4: Master IO-Link della BALLUFF
[32]

È un modulo di rete per EtherNet/IP ed è caratterizzato da [32]:

- 2 porte EtherNet/IP;
- 2 porte per l'alimentazione, una di ingresso e una di uscita;
- 8 porte IO-Link per collegare l'hub di sensori;
- LED per indicare lo stato del modulo e degli hub di sensori a esso connessi;
- display;

Alle porte IO-Link del master sono stati connessi gli hub di sensori, anche chiamati moduli "IO-Link 8 Analog In" della BALLUFF, modello BNI IOL-719-002-Z012, raffigurato nella Figura 2.5.



Figura 2.5: Modulo IO-Link 8 Analog In della BALLUFF
[33]

Tali moduli sono caratterizzati da [34]:

- un'uscita IO-Link per il collegamento con il master;
- 8 porte analogiche per collegare i sensori di pressione e di vuoto;
- LED per indicare lo stato del modulo.

Alle porte analogiche vengono connessi i sensori della FESTO e della KEYENCE, per convertire il segnale da analogico a digitale e trasferire il dato acquisito al PLC. La rete di sensori implementata sulla FCG2 è strutturata come nella Figura 2.6. La rete di sensori cablata è costituita da 111 sensori di pressione e di vuoto, da 22 moduli "IOLINK 8 Analog In" della BALLUFF e da 7 moduli master IO-Link della BALLUFF, da un alimentatore della Siemens da 20A, dal PLC e dai collegamenti. Nella Figura 2.6 sono mostrati i collegamenti tra i vari elementi costituenti la rete. Il sistema è alimentato da un alimentatore posto all'interno del quadro elettrico Power/Safety sulla linea di produzione, ogni modulo EIP + IO-Link è alimentato singolarmente e non a cascata come risulta dalla figura precedente 2.6. Il master IO-Link fornisce l'alimentazione anche ai moduli "IO-Link 8 Analog In" e ai sensori, a 24V.

Il collegamento tra i master IO-Link e lo switch di rete avviene per mezzo di cavi Ethernet STP Cat5e a cascata.

Il master IO-Link viene connesso al bus di campo Ethernet/IP e all'alimentazione, se il dispositivo è alimentato il suo display si illumina, per qualche secondo, e i LED si accendono. Dopo il cablaggio, ogni modulo viene integrato all'interno del software Rockwell RS Logic studio 5000 e viene configurato. La configurazione comprende: la modifica dell'indirizzo IP e della subnet mask dallo stato di fabbrica.

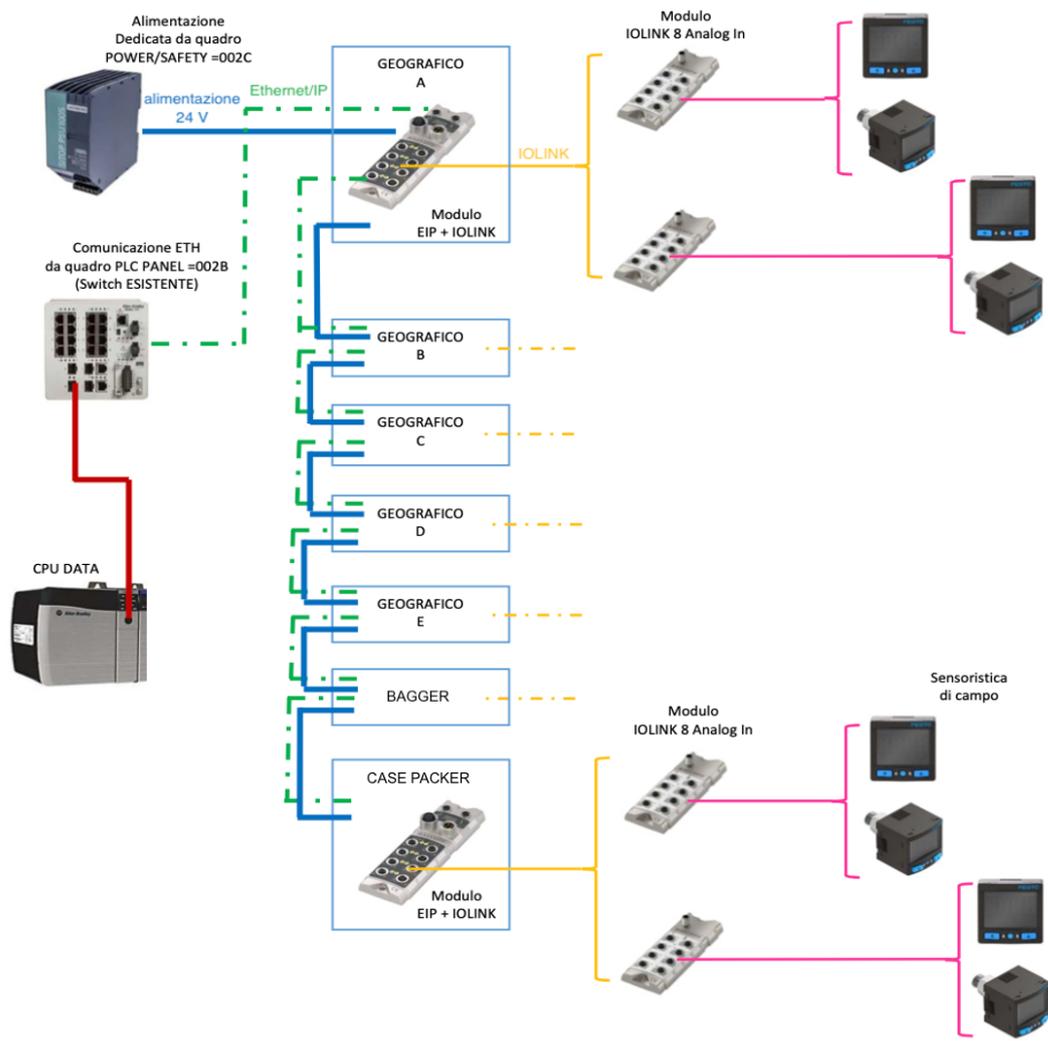


Figura 2.6: Struttura rete di sensori

Tale aggiornamento viene effettuato da Browser, inserendo l'indirizzo IP originale del master IO-Link come URL si viene indirizzati ad una pagina Web in cui è possibile modificare l'indirizzo IP e la subnet mask, dopo aver effettuato questi passaggi e aver salvato la nuova configurazione, il master IO-Link deve essere resettato, ovvero viene disalimentato e rialimentato.

Dopo la configurazione di tutti i master IO-Link, nel caso in esame 7, viene eseguita la connessione tra i moduli IO-Link 8 Analog In e i master IO-Link master, mediante il collegamento di un cavo M12 tra l'interfaccia IO-Link dell'hub di sensori e una porta IO-Link del master. Non si verifica nessuna comunicazione tra i dispositivi fin quando la porta IO-Link del master non viene abilitata, questo passaggio viene effettuato nel Web Server, a cui si può accedere inserendo il nuovo indirizzo IP del master IO-Link come URL. Dopo l'accesso al Web Server, si entra nella pagina di configurazione, dove verrà mostrata la seguente schermata 2.7:

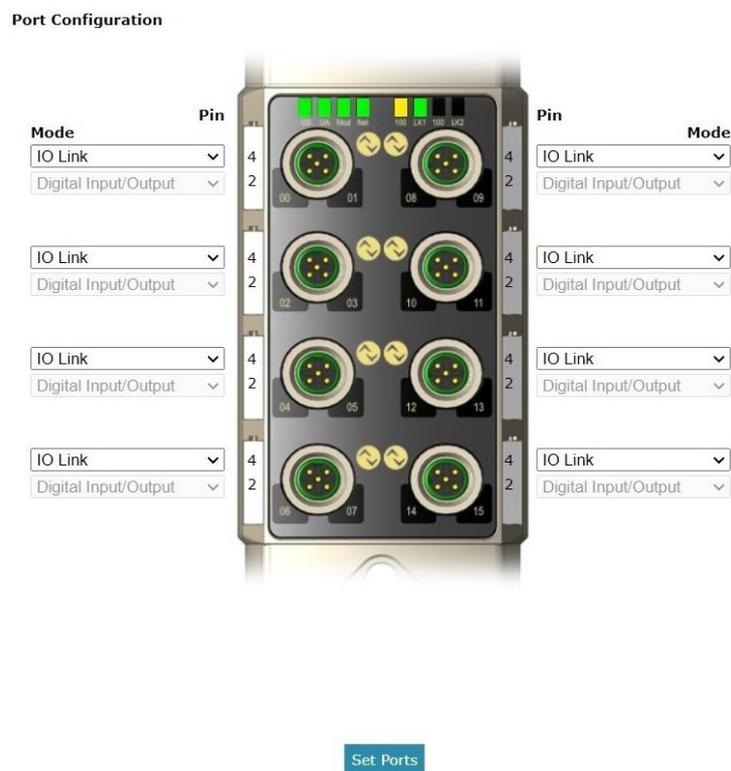


Figura 2.7: Configurazione porte IO-Link dei moduli EIP + IO-Link

I LED adiacenti ai canali del master sono tutti spenti, perchè le porte IO-Link devono essere ancora configurate. La modalità di configurazione della porta è settata su IO-Link, un'altra modalità disponibile è Digital Input/Output. Cliccando sul tasto "Set Points" mostrato nella Figura 2.7 verranno abilitate tutte le porte del master IO-Link, e nei canali dove sono collegati i moduli IO-Link 8 Analog In i LED relativi alle porte diventeranno verdi e fissi, mentre sui canali senza nessun collegamento i LED diventeranno verdi ma lampeggianti.

Dopo aver abilitato la comunicazione tra master IO-Link e modulo IO-Link, è necessario attivare le porte analogiche dei moduli IO-Link, poiché allo stato di fabbrica le porte sono tutte disabilitate e i LED relativi ad ognuna di esse saranno spenti. Per configurare le porte sul modulo IO-Link si deve accedere al Web Server inserendo l'indirizzo IP del master IO-Link a cui è connesso il modulo IO-Link sull'URL del Browser [35]. Dopo aver effettuato l'accesso, nella sezione "Ports" si ha la possibilità di scegliere la porta del master IO-Link relativa al modulo IO-Link sul quale deve essere effettuata l'attivazione dei canali.

Nella Figura 2.8 viene selezionato il modulo IO-Link collegato alla porta 1 del master per essere configurato.

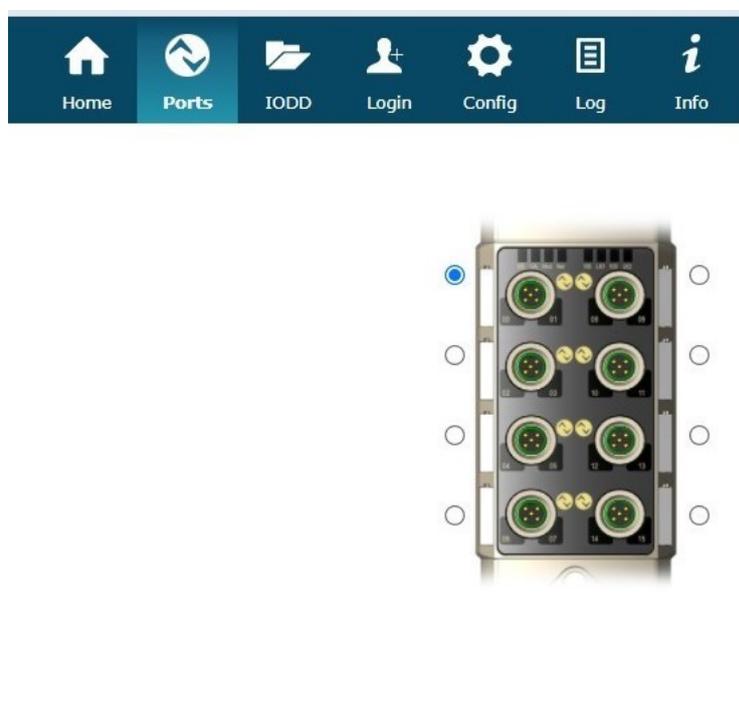


Figura 2.8: Selezione porta a cui è collegato il modulo IO-Link da configurare

Dopo aver selezionato il modulo da settare verranno mostrate sul Web Server due tabelle: la prima è non modificabile, e contiene i valori analogici trasmessi dal modulo IO-Link per ogni uscita analogica e dei bit di diagnostica, la seconda tabella è modificabile, al suo interno contiene i parametri del modulo IO-Link da sovrascrivere oppure da leggere. La seconda tabella permette di attivare le porte del modulo IO-Link, inserendo i valori dei parametri "Analog mode port", come mostrato nella Figura 2.9:

240 (1)	Analog mode port 0	Off	Write	Read
240 (2)	Analog mode port 1	Off	Write	Read
240 (3)	Analog mode port 2	Off	Write	Read
240 (4)	Analog mode port 3	Off	Write	Read
240 (5)	Analog mode port 4	Off	Write	Read
240 (6)	Analog mode port 5	Off	Write	Read
240 (7)	Analog mode port 6	Off	Write	Read
240 (8)	Analog mode port 7	Off	Write	Read

Figura 2.9: Modalità di attivazione delle porte dei moduli IO-Link

Di default ogni porta è settata su "Off", quindi allo stato di fabbrica sono tutte disabilitate. Le porte possono essere configurate in modo indipendente per accettare segnali di tensione, corrente, sensori Pt o termocoppie. I segnali di tensione e corrente accettati sono riportati nella seguente Tabella 2.2:

Tabella 2.2: Segnali per configurare le porte

Ingresso	Intervallo
Tensione	0 V - 10 V
Tensione	5 V - 10 V
Tensione	-10 V - +10 V
Tensione	0 V - 5 V
Tensione	-5 V +5 V
Corrente	4 - 20 mA
Corrente	0 - 20 mA

È necessario settare ogni porta relativamente al dispositivo ad essa connessa e al segnale desiderato. Nel caso in esame i sensori di pressione e di vuoto che verranno collegati alle porte dei moduli IO-Link sono caratterizzati da un'uscita analogica a 4 - 20 mA (sensori FESTO) oppure da un'uscita analogica a 1 - 5 V (sensori KEYENCE). Se si vuole attivare una porta del modulo IO-Link a cui è attaccato un sensore della FESTO, si deve selezionare sul parametro "Analog mode port", il valore 4 - 20 mA, considerando che le porte sono numerate da 0 a 7 per cui prima deve essere individuato il canale dove rendere possibile il collegamento.

Dopo aver abilitato la porta sul modulo IO-Link si accende il LED relativo a quel canale. Se la porta è abilitata ma il sensore non è collegato ad essa il LED sarà di colore rosso, dal momento che il modulo IO-Link si aspetta un segnale in 4-20 mA ma non riceve nessuna corrente, per cui comunica che il canale analogico è in errore. Se la porta è abilitata correttamente e il sensore FESTO è collegato ad essa, il LED diventerà di colore giallo, poiché riceve un segnale coerente con la sua configurazione. Per collegare il sensore della KEYENCE ad una porta del modulo IO-Link, il canale deve essere abilitato con un segnale 0 - 5V.

Considerando che sono stati integrati nella rete di sensori BALLUFF 111 sensori di pressione e di vuoto, 111 porte dei moduli IO-Link sono state abilitate con una

configurazione coerente al segnale di uscita del trasduttore.

Il segnale analogico viene digitalizzato sulla porta di ingresso del modulo IO-Link e viene inviato al master IO-Link come dato di processo. Per ogni porta ci sono 16 bit riservati per digitalizzare il dato. Il valore digitalizzato può essere rappresentato in diversi formati (con segno, senza segno, o dimensionato), con diverse risoluzioni (16, 14, 12 o 10 bit), con diverso allineamento (a sinistra o a destra).

La velocità di trasmissione dei dati dei moduli IO-Link, ovvero il volume di dati trasmessi sul canale in una unità di tempo, è pari a 38,4 kbit/s (COM2). Per valutare il tempo di ciclo, ovvero tempo di trasmissione del flusso di dati di processo tra master IO-Link e modulo IO-Link, si deve considerare la versione del protocollo IO-Link. Il protocollo IO-Link 1.0 fornisce un tempo di ciclo troppo elevato pari a 1320 ms, mentre con la revisione di questo protocollo, la versione IO-Link 1.1, il tempo di ciclo viene estremamente ridotto a 55ms, per cui è consigliabile utilizzare un master IO-Link 1.1 come nel caso in esame. La massima velocità con cui trasmettere i dati dipende quindi dal protocollo IO-Link [34].

I sensori di pressione e di vuoto sono caratterizzati da un tempo di ciclo minimo molto più basso di 55 ms, nel caso dei sensori FESTO il tempo di risposta minimo è pari a 3 ms, mentre per i sensori KEYENCE è pari a 2,5 ms, però il tempo di risposta viene settato dal modulo IO-Link e non dal sensore.

Un altro parametro importante è il Request Packet Interval (RPI) del PLC, è una variabile che specifica il periodo di aggiornamento dei dati in una connessione. In genere l'RPI viene configurato in millisecondi, nel caso in esame è stato settato a 50 ms, ciò sta ad indicare che il PLC effettua una lettura ogni 50 ms.

Fino ad ora sono state esplicitate le caratteristiche principale della rete di sensori implementata sulla FCG2.

Un'altra considerazione importante è il grado di protezione dei master IO-Link e dei moduli IO-Link, questo viene espresso dal codice IP (International Protection) definito nella norma EN 60529 per individuare il grado di protezione degli involucri di dispositivi elettronici, con una tensione nominale inferiore a 72,5 kV, contro la penetrazione di agenti esterni. Il grado di protezione dei dispositivi è IP67, quindi l'involucro è totalmente protetto contro la polvere e contro l'immersione in acqua temporanea e non permanente. Poiché il grado di protezione degli involucri dei dispositivi è elevato, i master IO-Link e i moduli IO-Link sono stati posizionati sulla parete retrostante della linea di produzione, e non all'interno dei quadri elettrici, quindi l'operatore può entrare in stretto contatto con il master IO-Link o i moduli IO-Link, senza sezionare l'area, perché il grado di sicurezza è accertato

I 7 master IO-link sono stati posizionati: 1 nell'unwinder, 4 nel converter, (1 master IO-Link in ogni geografico), 1 nella bagger e l'ultimo nel case packer. Alle porte dei master IO-Link vengono connessi, tramite un cavo di connessione M12, i 22 moduli IO-Link "8 Analog In". All'interno dell'unwinder è stato inserito un solo modulo IO-Link connesso al master IO-Link dell'UNWINDER e sul modulo IO-Link sono stati inseriti 8 sensori. Sul converter sono stati installati 18 moduli IO-Link e su di

questi sono stati collegati un totale di 84 sensori. Sulla bagger sono stati installati 2 moduli IO-Link e 16 sensori, mentre sul case packer 1 modulo IO-Link e 3 sensori. Prima di installare la rete è stato effettuato uno studio sulla posizione ideale di ogni modulo IO-Link e master IO-link e sul come effettuare il collegamento sensore - modulo IO-Link e modulo IO-Link - master IO-Link. Per eseguire l'ultimo punto è stato messo in atto il criterio della distanza e delle porte libere disponibili. Il collegamento tra un master IO-Link e il modulo IO-Link è mostrato nella seguente Figura 2.10:

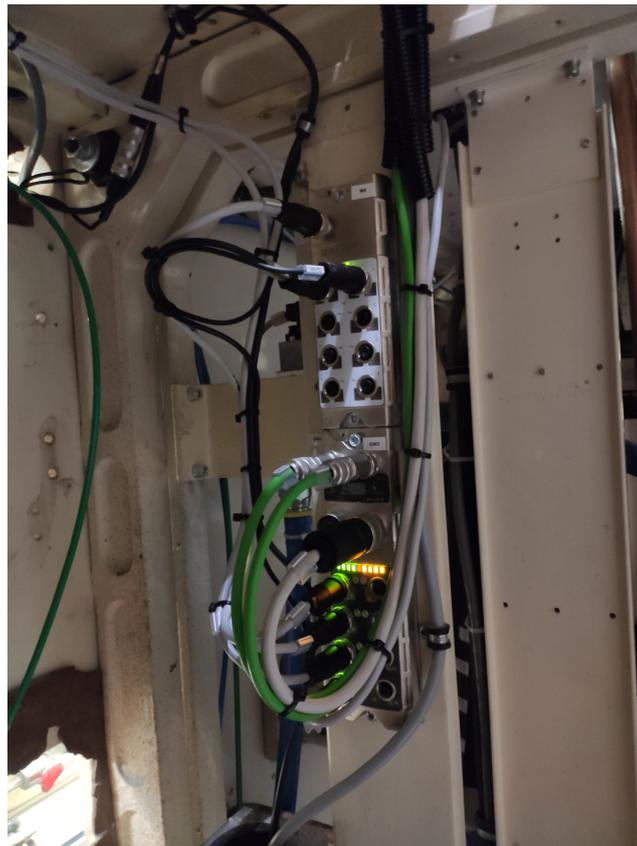


Figura 2.10: Collegamento tra master IO-Link e modulo IO-Link 8 Analog In

Ad ogni sensore, modulo IO-Link e master IO-Link è stata associata una nomenclatura univoca applicata su un'etichetta per definire un nome standard per ogni dispositivo da utilizzare anche sul pannello operatore, all'interno del tag del PLC o all'interno dei sistemi in cui vengono nominati i sensori (come ad esempio sulla sezione "Run Route" dell'applicazione per selezionare il sensore sul quale effettuare il monitoraggio). È utile anche per consentire all'operatore di individuare facilmente il dispositivo nel momento in cui si attiva un warning o un allarme sul pannello operatore, avendo una nomenclatura univoca per ogni dispositivo è facile identificarlo sulla linea produttiva e risolvere l'anomalia. Per i sensori di pressione e di vuoto l'etichetta è utile anche per la lettura del valore di pressione o vuoto dal pannello

operatore, per effettuare i controlli sistematici, per individuare la variabile all'interno del database e scaricarla, per visualizzare il suo andamento sul tool di visualizzazione (database e tool di visualizzazione saranno descritti nel capitolo successivo). La nomenclatura univoca per ogni sensore di pressione o di vuoto è stata così definita:

- acronimo del modulo della linea produttiva dove è posizionato il sensore di pressione o di vuoto, ad esempio il modulo "Secondary Topsheet Cut & Slay" (unità di taglio) viene abbreviato con STS;
- lettera P, nel caso in cui il sensore è di pressione o lettera V, se il sensore è di vuoto;
- un numero (se sul modulo STS è già presente il sensore STSV1, il successivo sensore di vuoto verrà nominato STSV2).

Vantaggi della tecnologia installata I vantaggi principali del sistema implementato sono:

- facile da installare, per effettuare i collegamenti servono dei cavi standard a 3, 4 o 5 conduttori. Il master IO-Link può essere integrato facilmente con il bus di campo;
- i cavi non devono essere schermati in quanto la comunicazione digitale garantisce l'immunità ai disturbi;
- i sensori possono essere sostituiti rapidamente: scollegare il cavo elettrico e pneumatico, ricollegarli al nuovo sensore e abilitare la porta del modulo IO-Link con il segnale fornito in uscita dal sensore.
- se si usura un cavo elettrico che connette il sensore e il modulo IO-Link, il sensore non invierà più alcun segnale poiché non sarà alimentato. Sostituendo il cavo elettrico il problema viene risolto velocemente, senza creare un grande impatto sui fermi di linea;
- i moduli IO-Link 8 Analog In sono caratterizzati da canali in cui il segnale di ingresso analogico può essere di corrente, di tensione, sensore Pt e termocoppia, ciò dà la possibilità di integrare all'interno della rete, sensori di diverso tipo: sensori di temperatura, celle di carico e non solo sensori aerulici;
- possibilità di soddisfare un'ampia gamma di requisiti applicativi, poiché è in grado di utilizzare contemporaneamente dispositivi standard binari, analogici e sensori/attuatori IO-Link;
- i dispositivi hanno una classe di protezione elevata (IP67) quindi non devono essere inseriti nel quadro elettrico e l'operatore può entrare a stretto contatto con essi perché sicuri;
- interfaccia universale flessibile, a basso costo e ad alte prestazioni.

2.6 Sistema di acquisizione dei dati da PLC

In questa sezione verrà descritto la modalità di raccolta dati dal PLC. Il collegamento tra il master IO-Link e il PLC consente a quest'ultimo la lettura dei dati acquisiti da ogni sensore sotto forma di tags, la lettura viene effettuata ogni 50 ms.

Per trasferire i dati dal PLC al server è stato definito un sistema di comunicazione dalla Rockwell Automation, customizzato per P&G, quindi tale sistema è proprietario. Il PLC e il server comunicano mediante un protocollo UDP, la scelta di utilizzare un protocollo UDP e non TCP/IP è stata presa poichè la comunicazione mediante TCP si verifica solo dopo il three-way handshake (autenticazione reciproca tra mittente e destinatario), ciò fornisce un'elevata sicurezza ma non una trasmissione dati veloce, mentre l'UDP rinunciando a questa procedura riduce il più possibile la durata della trasmissione dei dati. La comunicazione tra il PLC e il server è sicura e diretta per merito del lavoro svolto da P&G e Rockwell Automation.

Il server o virtual machine è caratterizzato da:

- protocollo Ethernet/IP (protocollo di rete industriale, il più veloce);
- database "Influxdb", ottimizzato per memorizzare delle serie temporali, come le tag di un PLC.
- interfaccia di visualizzazione dei dati "Grafana". Applicazione molto utilizzata per la visualizzazione di serie temporali.

Il database e l'interfaccia di visualizzazione sono open source e gratis, per cui il sistema di comunicazione realizzato è molto economico.

Per trasferire i dati dal PLC al database (una parte integrante del server) è necessario individuare quali tag (variabili) si vogliono prelevare dal PLC, ad esempio nel caso in esame per trasferire i dati di pressione e vuoto dal PLC al database sono state selezionate solo le tag relative a quei dati, e non tutte le tag disponibili perchè non necessarie. Il passaggio descritto genera un file con estensione XML. Successivamente viene generato un programma PLC, all'interno del quale viene generato un modulo virtuale con il file XML, il quale fa da data broadcaster, ovvero fornisce i dati selezionati dal PLC al database.

All'interno di Influxdb è possibile individuare due database differenti:

- **Data High Definition** - è il database ad alta definizione, i dati vengono acquisiti ogni 50ms e storicizzati per 3 giorni;
- **Data Standard Definition** - i dati vengono acquisiti ogni secondo e possono essere storicizzati dai 3 ai 9 mesi.

Si possono prelevare 5000 tags in 50 ms, numero molto elevato, ed è da considerare che la frequenza con il quale le tags vengono acquisite non è neanche migliorabile.

Capitolo 2 IMPLEMENTAZIONE RETE DI SENSORI

Da Grafana può essere selezionato il database da leggere. Grafana viene utilizzato molto all'interno della Fater, anche dagli operatori della linea, per visualizzare l'andamento di alcuni dati in tempo reale.

Il sistema di comunicazione realizzato per raccogliere i dati dal PLC è il miglior sistema possibile da implementare, sviluppare, realizzare. Il sistema è in grado di acquisire i dati alla stessa velocità del PLC, ovvero 50 ms ed è in grado di prelevare i dati dal livello più basso, per cui acquisisce i dati grezzi, che dal PLC vengono trasferiti al database, e da qui possono essere trasportati fino al livello più alto possibile, ovvero al cloud, per avere la possibilità di analizzare, elaborare e studiare i dati acquisiti.

Questa soluzione implementata da Rockwell Automation e P&G, soddisfa tutti i bisogni dell'azienda ed è caratterizzata da:

- raccolta dati ad alta definizione - con la massima velocità e ad elevato volume
- manutenzione e configurazione di PLC e server sono semplificate
- architettura semplificata rispetto ai metodi installati in precedenza
- riduzione dei costi
- eliminazione obsolescenza

Dopo aver acquisito e scaricato i dati dal database Influxdb essi possono essere elaborati ed analizzati. Nel capitolo successivo verrà discussa l'elaborazione effettuata sui dati acquisiti dai sensori di vuoto e pressione tramite la struttura realizzata.

Capitolo 3

ANALISI DEI DATI

In questo capitolo verrà analizzato come sono stati applicati ai dati acquisiti dai sensori di pressione e di vuoto i metodi Six Sigma e Three Sigma per il calcolo delle soglie statistiche.

L'obiettivo da raggiungere è quello di voler definire dei limiti statistici entro cui far variare la variabile di pressione e di vuoto per garantire un processo produttivo a qualità elevata e per ridurre al minimo gli scarti di prodotto.

Il metodo che verrà introdotto può essere facilmente esteso a tutti i 111 sensori di pressione e di vuoto integrati nella rete di sensori, perchè standard, puntuale e altamente ripetibile, però in questo elaborato l'analisi è stata ridotta ad un numero contenuto di sensori di vuoto e pressione. Sono stati presi in considerazione 5 sensori: 3 di vuoto e 2 di pressione, la selezione dei sensori è stata effettuata considerando quelli che sono legati a dei processi più critici per la produzione del prodotto finito.

3.1 Descrizione dei sensori selezionati per l'analisi

Per effettuare l'analisi sono stati considerati 5 sensori, come già espresso, 3 di vuoto e 2 di pressione. È stato scelto di prendere un numero maggiore di sensori di vuoto poiché sono legati a processi più critici e sono strettamente correlati con alcune operazioni di manutenzione effettuate sulla linea produttiva.

I sensori di vuoto selezionati sono posizionati all'interno del converter in due moduli differenti. Per modulo si intende una sezione di un geografico del converter, all'interno del quale viene svolta una determinata attività per la realizzazione del prodotto finito.

Due sensori di vuoto si trovano all'interno del modulo chiamato "Secondary Topsheet Cut & Slay" o abbreviato STS, modulo del GEO2/B, mostrato nella Figura 3.1, il nome del modulo è stato ripreso dall'unità di taglio che lo compone.

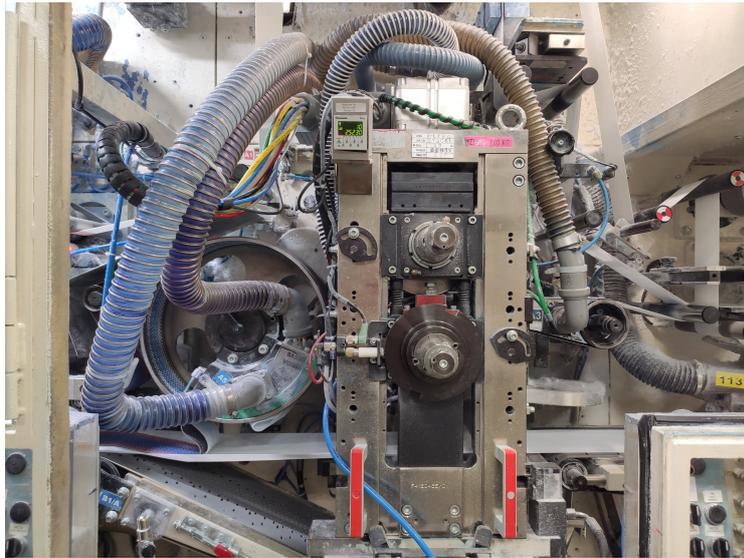


Figura 3.1: Modulo Secondary Topsheet Cut & Slay

Tale unità, mostrata nella Figura 3.2, effettua il taglio di un telo di materiale chiamato secondary topsheet.

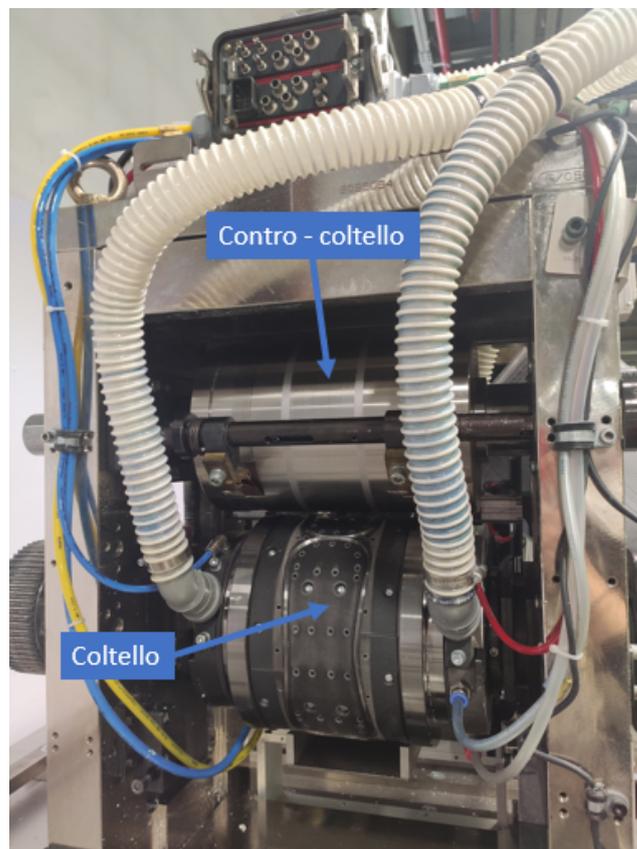


Figura 3.2: Unità di taglio Secondary Topsheet Cut & Slay

3.1 Descrizione dei sensori selezionati per l'analisi

L'unità di taglio è costituita da una testata e due rulli, il rullo superiore o contro-coltello è liscio, il rullo inferiore rappresenta il coltello, che effettua il taglio del materiale. La forma assunta dal materiale dopo il taglio è mostrata nella Figura 3.3:

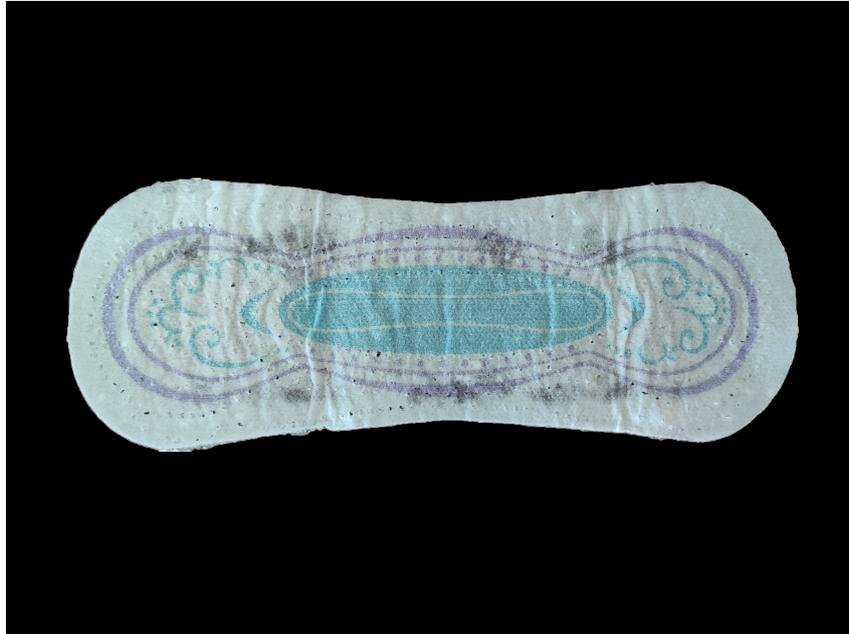


Figura 3.3: Secondary topsheet dopo il taglio

Per entrare nel dettaglio del processo: all'interno del modulo STS avviene il taglio del materiale secondary topsheet, quest'ultimo è un telo costituito principalmente da materie plastiche. Sulla parte iniziale della FGC2, prima del converter, è posizionato l'unwinder. Sull'unwinder sono presenti gli svolgitori: la maggior parte delle materie prime utilizzate per la formazione del prodotto finito, come il secondary topsheet, sono costituite da bobine.

Per cui sulla FGC2 sono presenti impianti che eseguono il processo di svolgimento delle bobine e di trasporto dei teli per garantire la lavorazione dei materiali e la formazione del prodotto finito. Il secondary topsheet per arrivare al modulo STS segue un percorso guidato da rulli folli (elementi che consentono il trasporto del materiale) e guidabanda (rulli che permettono di cambiare direzione al telo) [36]. Giunto al modulo STS il secondary topsheet viene trasferito da un rullo guidabanda ad un banco trasportare, chiamato banco A3. Il banco A3 è il banco di ingresso all'unità di taglio STS, e trasporta il materiale tra il contro-coltello e il coltello dell'unità.

Il taglio del materiale è permesso da due cilindri pneumatici posti sulla testata dell'unità, essi utilizzano l'aria compressa per agire sul pistone all'interno del cilindro al fine di creare lo spostamento del contro-coltello sul coltello e il contatto tra i 2 rulli genera il taglio del secondary topsheet. Dopo il taglio il telo di materiale ha la forma mostrata nella Figura 3.3. Un soffio di distacco permette al prodotto tagliato di

allontanarsi dal coltello, per iniziare ad aderire sul rullo di trasporto (transfer drum). Il materiale tagliato viene trasportato dal transfer drum, sul banco successivo, dove è posizionato il topsheet (un altro telo di materia prima che costituisce il prodotto finito). Il processo continua nei moduli successivi.

Nell'analisi sono stati considerati: il vuoto del banco di trasporto A3 e il vuoto del transfer drum, i sensori di vuoto relativi a queste misure sono denominati rispettivamente STSV2 e STSV1.

Il banco di trasporto, mostrato nella Figura 3.4, è costituito da 2 rulli e una cinghia e al suo interno viene generata una camera di vuoto, tramite la rimozione di aria e gas.

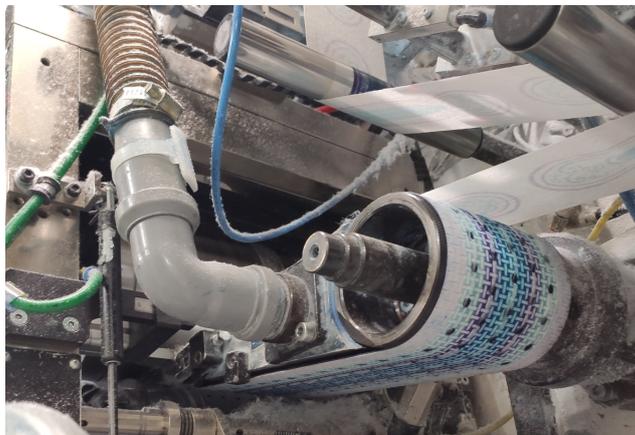


Figura 3.4: Banco di trasporto A3

Sulla superficie esterna del banco sono presenti dei fori per permettere al vuoto generato nella camera di far aderire il prodotto su di esso, per evitare che il telo possa decentrarsi rispetto all'asse centrale del banco, quindi spostarsi lateralmente durante il trasporto, in tal caso il secondary topsheet non verrebbe tagliato nella maniera corretta e si formerebbe un prodotto di scarto.

Il banco A3 risulta uno dei punti della linea più critici, perché in prossimità di esso viene effettuato il taglio del secondary topsheet il quale produce la formazione di una polvere che potrebbe contaminare i fori del banco. Una contaminazione eccessiva dei fori è legata ad un trasporto del materiale non corretto, e ad una formazione di prodotti non in qualità e di scarto, quindi è molto importante monitorare il vuoto che viene misurato in questo punto dal sensore STSV2. Gli operatori per evitare la contaminazione del banco devono effettuare delle operazioni di manutenzione (la pulizia del banco) una volta a turno. Si verificano delle situazioni in cui l'operatore per non fermare la linea produttiva per pulire il banco, varia manualmente il valore del vuoto tramite una valvola di regolazione legata al sensore, generando un vuoto più spinto il prodotto riesce comunque ad aderire bene al banco.

Il transfer drum è un rullo di trasporto posto in prossimità di tutte le unità di taglio. Il transfer drum è un rullo aperto con diversi fori sulla sua superficie, in una sezione

3.1 Descrizione dei sensori selezionati per l'analisi

del rullo c'è una camera chiusa dove vengono rimossi aria e gas e viene generato il vuoto, ciò viene mostrato nella Figura 3.5.

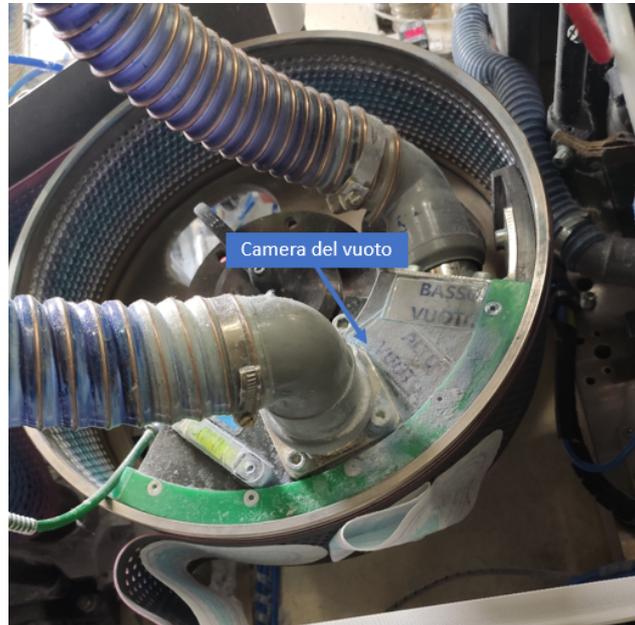


Figura 3.5: Transfer drum

Dalla Figura 3.5 si vede che all'interno della camera sono definiti alto e basso vuoto, quindi la sezione dove viene generato il vuoto è costituita da due settori differenti, in uno viene creato l'alto vuoto e questo non viene monitorato perché è una quantità fissa, nell'altra sezione viene creato il basso vuoto, il sensore STSV1 misura il basso vuoto.

Sono presenti due camera di vuoto differenti perché nella sezione del rullo più vicina all'unità di taglio si necessita di un vuoto più spinto per prelevare il prodotto dal coltello e farlo aderire correttamente sulla superficie del rullo senza formare delle pieghe sul materiale, mentre nella sezione relativa al basso vuoto, quella più lontana dall'unità di taglio, il vuoto deve essere meno spinto poiché il prodotto deve essere rilasciato sul banco successivo dove è posizionato il topsheet, banco di ingresso all'unità fusion bond dove avviene la saldatura a freddo tra topsheet e secondary topsheet. La superficie esterna del rullo è rotante mentre la camera di vuoto è fissa. Dalla Figura 3.5 è possibile notare la sezione del rullo dove aderisce il secondary topsheet tagliato.

L'ultimo sensore di vuoto considerato per effettuare l'analisi dei dati si trova all'interno del GEO2/B nel modulo "Core Cut & Slip" o abbreviato CCS, quest'ultimo prende il nome dall'unità di taglio che lo compone.

Il modulo coincide con l'unità di taglio CCS, la quale è costituita dai 3 rulli visibili nella Figura 3.6.

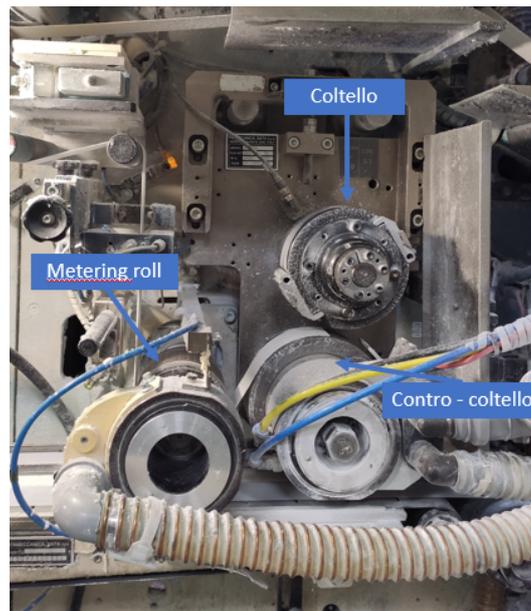


Figura 3.6: Unità Core Cut & Slip e descrizione dei rulli

Su questa sezione della FGC2 viene effettuato il taglio di un materiale molto poroso chiamato "core". Il core rappresenta la materia assorbente del prodotto finito. A differenza del secondary topsheet, il core non viene caricato sulla linea sotto forma di bobina, il telo viene posizionato su delle pedane di legno, in una pedana sono presenti metri di core piegato e sovrapposto. La pedana con i metri di materiale viene posizionato all'interno di una cabina della linea dove l'estremità del telo viene prelevata, e mediante un sistema di rulli folli e guidabanda il core viene trasferito all'unità CCS, dove viene lavorato.

Il "metering roll" è il primo rullo di trasporto che conduce il core verso il coltello. All'interno del rullo è presente una camera fissa dove viene generato il vuoto, il rullo sulla sua superficie presenta dei fori per far aderire meglio il materiale.

Sul "metering roll" alcuni fori sono sempre scoperti poiché il materiale scorrendo copre solo una superficie del rullo. Da questo rullo il core viene trasportato sul contro-coltello, qui avviene il taglio. La misura del vuoto all'interno del "metering roll" viene effettuata dal sensore CCSV4.

Il coltello, posizionato sopra al contro-coltello, come si può vedere nella Figura 3.6, effettua il taglio del telo, suddividendo quest'ultimo in porzioni di 20 cm di lunghezza. In questa unità il taglio viene effettuato in maniera differente, poiché il materiale non deve assumere la forma del prodotto finito, esso viene semplicemente tagliato ai bordi per essere posizionato all'interno dell'assorbente, in questa maniera si evitano scarti di prodotto e risparmio in termini di costi.

Il contro-coltello è un rullo rotante con dei fori sulla superficie, all'interno presenta due camere di vuoto separate, dove vengono generati alto e basso vuoto. Le camere dove sono presenti l'alto e il basso vuoto sono fisse, mentre il rullo esterno con i fori ruota. La camera dove si misura l'alto vuoto presenta un vuoto più spinto, per

3.1 Descrizione dei sensori selezionati per l'analisi

facilitare il taglio e far aderire bene la materia prima al rullo subito dopo il taglio. Il vuoto presente all'interno di questa sezione viene misurato dal sensore CCSV1. La camera dove si misura il basso vuoto presenta un vuoto meno spinto perché serve a rilasciare il core tagliato sul banco successivo (sopra al topsheet saldato con il secondary topsheet), un vuoto più spinto potrebbe generare delle pieghe sul prodotto durante il trasferimento. Il basso vuoto viene misurato dal sensore CCSV2.

I vuoti misurati dai sensori CCSV1 e CCSV2 sono abbastanza critici, in quanto in prossimità della loro misura avviene il taglio del core, materiale molto poroso, quando viene tagliato genera una polvere bianca che potrebbe otturare i fori del contro-coltello e causare dei problemi nel processo di trasporto. Anche in questo caso per evitare problemi di qualità del prodotto e di scarto, gli operatori effettuano delle attività di manutenzione una volta a turno, per mantenere puliti i fori dei rulli. Dato che il controllo e il monitoraggio di questi vuoti è fondamentale per ottenere un processo produttivo in qualità è stato scelto di considerare anche il vuoto CCSV1 per l'elaborazione dei dati.

A questo punto verranno descritti i sensori di pressione selezionati per l'analisi.

Il sensore di pressione CCSP1 si trova all'interno del modulo "Core Cut & Slip". All'interno del modulo CCS viene eseguita un'altra operazione oltre al taglio del core, viene applicata una colla sul secondary topsheet tagliato e saldato con il topsheet. La colla che permette l'adesione tra secondary topsheet e core è chiamata AWA/NCA ed ha la caratteristica di essere spray; per essere applicata sul telo utilizza la pressione dell'aria. Sono presenti due tubi: da uno di questi fuoriesce la colla AWA/NCA, dall'altro l'aria che applica la colla sul secondary topsheet; il sensore CCSP1 misura l'aria immessa nel tubo per spruzzare la colla.

Il secondo sensore di pressione si trova all'interno del modulo "Secondary Topsheet Cut & Lay". È stata già affermata in precedenza l'importanza delle pressioni perché legata al corretto funzionamento delle unità di taglio e di saldatura presenti sulla FGC2. Il sensore STSP1 misura la pressione immessa all'interno del cilindro per far spostare il pistone e consentire al contro-coltello (rullo liscio) di spingere sul coltello e generare il taglio della materia prima, ovvero del secondary topsheet. Tale misura è fondamentale per la buona riuscita e la qualità del taglio e di conseguenza del prodotto finito. La pressione applicata deve essere tale da consentire il corretto schiacciamento tra i due rulli per generare il taglio, una pressione troppo bassa non permetterebbe al contro-rullo di premere sul coltello in maniera efficace e quindi il taglio non verrebbe eseguito, una pressione troppo elevata potrebbe spingere eccessivamente i due rulli uno contro l'altro causandone l'usura.

La rete di sensori implementata sulla linea che mette in comunicazione i trasduttori con il sistema di controllo e il sistema informatico di raccolta e di trasferimento dei dati consentono di acquisire i valori di pressioni e vuoti per analizzarli ed elaborarli.

3.2 Formato dei dati

I dati da analizzare sono stati scaricati dal database Influxdb mediante un codice Python scritto in Visual Studio Code.

Sono stati utilizzati per l'analisi dati acquisiti ogni secondo.

Le variabili sono state ottenute sotto forma di file pickle (estensione .p), un file ricavato mediante il modulo pickle di Python, il quale implementa protocolli per serializzare una struttura di oggetti Python, cioè serve per convertire degli oggetti Python in una rappresentazione di byte.

Il pickle è un formato di serializzazione binario, quindi i dati scaricati sono di tipo binario.

Una volta che il modulo pickle ha serializzato degli oggetti, esso è in grado di memorizzarlo, in modo che quando verrà effettuata una nuova conversione sullo stesso oggetto non terrà conto di quelli già serializzati.

I dati scaricati nel formato pickle sono stati inseriti all'interno di una cartella costituita da 3 sotto-cartelle: una relativa al prodotto, una relativa ai valori delle pressioni e una ai valori dei vuoti.

All'interno di ognuna di esse sono presenti delle schede relative alle variabili acquisite, ad esempio nella sezione delle pressioni ci sarà una cartella per ogni sensore di pressione. In quest'ultima verrà allocato il file pickle ottenuto dal codice Python.

Ogni volta che il codice Python viene eseguito vengono acquisiti nuovi dati e viene generato un nuovo file pickle all'interno della cartella associata alla variabile.

Ogni file pickle è denominato con il time stamp (data + ora) in cui è stato eseguito il download delle variabili.

All'interno della cartella relativa al prodotto sono inseriti dati non relativi a pressioni e vuoti, ma ad informazioni legate al tipo di articolo prodotto sulla linea produttiva, allo stato della linea, e dati sullo scarto e l'affidabilità; queste informazioni possono essere acquisite mediante il sistema informatico di raccolta dati, che è in grado di effettuare le letture dei dati all'interno dei PLC aziendali e di scaricarli dal database. I dati scaricati, contenenti informazioni sul prodotto, pressioni e vuoti, sono stati caricati ed elaborati con Python utilizzando il tool Jupyter Notebook.

Principalmente per analizzare i dati è stata usata la libreria Pandas, quest'ultima è una delle più importanti, permette di gestire, elaborare e analizzare dati in formato sequenziale o tabellare, come dati memorizzati in un foglio di calcolo o in un database e da la possibilità di caricare e salvare dati in formati molto diversi.

È stata impiegata anche la libreria Matplotlib, per realizzare grafici.

I dati inseriti nella cartella principale, sono stati caricati in Python e mediante delle funzioni della libreria Pandas, dai file pickle singoli è stata prodotta una tabella, anche chiamata dataframe; quindi le singole informazioni sono state unite insieme per creare un unico dataset.

3.3 Analisi dataset

Il dataframe ottenuto dai file picke è strutturato, come nella Figura 3.7:

	ARTICLE	SCRAP	RELIABILITY	STSV1	STSV2	CCSV1	STSP1	CCSP1
2022-03-01 05:00:00+01:00	1.0	15.649899	5.163692	-0.020325	-0.021454	-0.070569	5.281067	0.409485
2022-03-01 05:00:01+01:00	1.0	15.649899	5.163692	-0.022025	-0.021415	-0.072037	5.269165	0.409294
2022-03-01 05:00:02+01:00	1.0	15.649899	5.163692	-0.021136	-0.021106	-0.069564	5.416870	0.409103
2022-03-01 05:00:03+01:00	1.0	15.649899	5.163692	-0.020363	-0.021299	-0.072269	5.444641	0.409561
2022-03-01 05:00:04+01:00	1.0	15.649899	5.163692	-0.021329	-0.021299	-0.070607	5.444641	0.409523
...
2022-05-07 22:46:54+02:00	14.0	1.862060	77.473495	-0.045195	-0.043851	-0.057701	5.282898	0.372940
2022-05-07 22:46:55+02:00	14.0	1.862060	77.473495	-0.044809	-0.043735	-0.057662	5.282898	0.369507
2022-05-07 22:46:56+02:00	14.0	1.862060	77.473495	-0.048171	-0.044547	-0.057469	4.705505	0.366112
2022-05-07 22:46:57+02:00	14.0	1.862060	77.473495	-0.044190	-0.044006	-0.057430	5.174561	0.363785
2022-05-07 22:46:58+02:00	14.0	1.862060	77.473495	-0.047282	-0.044701	-0.012373	5.163269	0.366417

Figura 3.7: Dataset

Il dataset è costituito da 8 colonne, la cui descrizione verrà effettuata nelle righe successive, e da 2283815 righe. L'indice non è numerico ma è nel formato data time, ovvero 'YYYY-MM-DD HH:MM:SS' e in più è indicato il fuso orario UTC standard. Il dataset comprende dati acquisiti nel periodo 01-03-22 al 07-05-22, non si hanno a disposizione i dati antecedenti al primo marzo perché la rete di sensori ancora era stata installata sulla FGC2.

I dati scaricati sono associati a mappe temporali in cui la linea produttiva, la FGC2, è sempre in uno stato di produzione, ovvero non ferma o spenta, è fuorviante considerare i dati prelevati dai sensori di pressione e di vuoto nei momenti in cui la linea non produce. I valori che verrebbero letti non sarebbero coerenti e corretti, a causa della variazione della quantità di aria all'interno dei tubi e dei cilindri e della variazione del valore letto dai sensori di vuoto motivata dal fatto che non scorre nessun materiale sui rulli o sui nastri i trasporto e che i fori sono sempre scoperti. Al dataset poteva essere aggiunta una colonna dedicata allo stato della linea ma essendo sempre pari allo stato "PRODUZIONE" è una variabile futile.

3.3.1 Descrizione variabili del dataset

ARTICLE La variabile "ARTICLE" può assumere 10 valori differenti, pari a: 1.0, 3.0, 4.0, 7.0, 10.0, 11.0, 12.0, 13.0, 14.0, 15.0. Ogni numero è associato ad un determinato articolo prodotto sulla linea produttiva e alla velocità con cui viene prodotto.

Nella Tabella 3.1 è riportata la descrizione di cosa è associato al numero assunto dalla variabile "ARTICLE":

Tabella 3.1: Associazione numero articolo con tipo prodotto e velocità linea

Articolo	Tipo di prodotto	Velocità linea (Pz/min)
1.0	Petalo Blu	820
3.0	Lines Cotone	820
4.0	Seta Ultra	1300
7.0	Seta Ultra	1080
10.0	Lines Cotone	860
11.0	Intervallo	1300
12.0	Twiggy	1300
13.0	Petalo Blu	1080
14.0	Idea	980
15.0	Idea	860

La velocità della linea è espressa in pezzi al minuto. Come si può notare nella Tabella 3.1 si verificano delle situazioni in cui uno stesso tipo di prodotto, viene realizzato con velocità della linea differente, ciò è dovuto al fatto che varia il numero di pezzi all'interno della confezione (busta), di conseguenza varierà anche la dimensione della busta e il numero di confezioni all'interno di una cassa. Ad esempio l'articolo 1.0 e l'articolo 13.0, sono associati sempre allo stesso tipo di prodotto: Petalo Blu, ma la velocità della linea assume due valori differenti in quanto per l'articolo 1.0 all'interno della confezione vengono inseriti 10 pezzi, mentre per l'articolo 13.0 ne vengono inseriti 20, la linea può girare con una velocità maggiore quando immette una quantità maggiore di pezzi in una confezione, cioè quando produce una busta con dimensioni maggiori.

SCRAP All'interno di questa colonna sono riportati i valori dello scarto. Lo scarto è una quantità calcolata considerando il rapporto tra il numero totale di pezzi scartati in un turno e il numero totale di pezzi prodotti in un turno moltiplicato per 100, quindi i dati associati a questa variabile sono delle percentuali. In un turno il valore dello scarto è sempre lo stesso, ovvero è una quantità che cambia valore ogni 8 ore. Nel PLC ci sono diverse tags che quantificano lo scarto, quella scaricata fornisce il valore dello scarto per ogni turno, in realtà il valore dello scarto che si ottiene dal PLC non è associato al turno corretto ma a quello precedente, per cui il dato è stato elaborato per effettuare un'associazione corretta tra dato e indice. La manipolazione è stata attuata mediante le funzioni della libreria Pandas.

Questa quantità è stata usata per definire se la linea produttiva si trova in una condizione favorevole o sfavorevole rispetto all'andamento della produzione. Verrà spiegato il criterio per definire la qualità del processo produttivo nel sotto-capitolo successivo.

3.4 Criterio per definire la qualità del processo produttivo

RELIABILITY All'interno di questa colonna sono riportati i valori della process reliability, parametro utilizzato per valutare quanto un processo è affidabile. Tale quantità è calcolata effettuando il rapporto tra il numero di secondi in cui la linea ha girato in un turno e il numero di secondi in cui avrebbe potuto girare in un turno moltiplicato per 100, quindi anche in questo caso i dati associati alla variabile sono delle percentuali. Al denominatore è sempre presente il numero massimo di secondi in cui la linea potrebbe girare, cioè 28000 secondi; da ciò si intuisce che il dato non tiene conto dei fermi pianificati per effettuare un cambio formato o una manutenzione, ma i fermi vengono trattati tutti nello stesso modo ovvero come un tempo perso per la produzione del prodotto.

Anche per questa variabile all'interno del PLC sono presenti diverse tags che ne quantificano il valore. Una di queste tag fornisce il valore della reliability istante per istante (quindi ogni secondo) in un turno, quindi l'ultimo istante del turno fornisce un'informazione sull'affidabilità della linea per tutte le 8 ore precedenti. La variabile acquisita invece fornisce direttamente l'affidabilità della linea in un turno, quindi all'interno di un turno il valore sarà sempre lo stesso per ogni marca temporale. Anche in questa situazione la variabile non è associata al turno corretto ma a quello precedente, quindi i dati sono stati elaborati mediante le funzioni di Pandas per associare il valore di reliability alla corretta marca temporale e al corretto turno a cui è associata.

Anche questa quantità è stata usata per definire la bontà della linea e del processo produttivo.

STSV1, STSV2, STSP1, CCSV1, CCSP1 I dati all'interno di queste colonne sono i valori assunti dai segnali di pressione e di vuoto e misurati dai sensori considerati. Il dato viene acquisito ogni secondo per ogni sensore.

Il valore dei vuoti può variare da 0 a -1 bar (valore sempre negativo), mentre quello delle pressioni da 0 a 10 bar (valore sempre positivo).

Le spiegazioni relative al processo di funzionamento dei sensori selezionati è reperibile all'interno del sotto-capitolo "Descrizione dei sensori selezionati per l'analisi".

3.4 Criterio per definire la qualità del processo produttivo

All'interno dell'azienda per valutare se la linea produttiva ha lavorato in maniera efficace durante un turno considerano due parametri: scarto (SCRAP) e affidabilità (RELIABILITY).

I valori delle due variabili devono superare delle condizioni imposte per poter considerare la produzione buona in un turno. Il valore dello scarto deve essere inferiore all'1,5%, mentre il valore dell'affidabilità deve essere superiore all'80%, se entrambe le condizioni sono rispettate in un turno la produzione viene considerata come appropriata.

Il dataset originale, mostrato nella Figura 3.7, è stato filtrato imponendo le condizioni

appena definite, ovvero **SCRAP** $\leq 1,5$ % e **RELIABILITY** $\geq 80\%$, ottenendo così un nuovo dataset con un numero di righe notevolmente ridotto, da 2283815 a 372090 righe, quindi quasi 2 milioni di righe in meno. Il dataset con i filtri sullo scarto e l'affidabilità è mostrato nella Figura 3.8:

	ARTICLE	SCRAP	RELIABILITY	STSV1	STSV2	CCSV1	STSP1	CCSP1
2022-03-16 14:00:00+01:00	4.0	1.330321	89.939659	-0.016847	-0.018787	-0.051866	5.417480	0.403152
2022-03-16 14:00:01+01:00	4.0	1.330321	89.939659	-0.016228	-0.018478	-0.051518	5.403748	0.402924
2022-03-16 14:00:02+01:00	4.0	1.330321	89.939659	-0.017504	-0.018401	-0.053295	5.325623	0.403114
2022-03-16 14:00:03+01:00	4.0	1.330321	89.939659	-0.014992	-0.018903	-0.052213	5.283508	0.403191
2022-03-16 14:00:04+01:00	4.0	1.330321	89.939659	-0.017195	-0.019715	-0.050745	5.317078	0.403801
...
2022-05-06 05:59:54+02:00	3.0	1.265714	90.152618	-0.032250	-0.025071	-0.052175	5.314636	0.389877
2022-05-06 05:59:55+02:00	3.0	1.265714	90.152618	-0.028849	-0.025032	-0.051402	5.324402	0.380302
2022-05-06 05:59:56+02:00	3.0	1.265714	90.152618	-0.032173	-0.025264	-0.052793	5.324707	0.378014
2022-05-06 05:59:57+02:00	3.0	1.265714	90.152618	-0.029390	-0.024684	-0.053411	4.797668	0.377747
2022-05-06 05:59:59+02:00	3.0	1.265714	90.152618	-0.028463	-0.024762	-0.008431	5.147705	0.389877

Figura 3.8: Dataset filtrato con le condizioni su **SCRAP** e **RELIABILITY**

Come si può osservare Figura 3.8 il primo giorno in cui le condizioni vengono rispettate è il 16-03-2022, mentre nel dataset originale il primo giorno disponibile era il 01-03-22, quindi due settimane di dati non sono state considerate.

Per valutare la quantità di dati con cui sono state calcolate le soglie statistiche sono state quantificate le righe del dataset filtrato per ogni articolo, le informazioni sono riportate nella Tabella 3.2:

Tabella 3.2: Numero di righe del dataset filtrato per ogni articolo

Articolo	Numero righe
1.0	0
3.0	26130
4.0	86863
7.0	18572
10.0	53406
11.0	26040
12.0	51422
13.0	0
14.0	51422
15.0	109657

Dalla Tabella 3.2 si può notare che per alcuni articoli non si ha a disposizione una quantità sufficiente di dati per definire le soglie. Sono due articoli che non vengono prodotti frequentemente sulla linea produttiva. Inoltre il criterio sullo scrap e la

3.4 Criterio per definire la qualità del processo produttivo

reliability sono molto stringenti e quindi riducono notevolmente la quantità di dati disponibili, considerando anche che il periodo temporale a disposizione è solo di due mesi.

Sui valori di scrap e reliability è stata effettuata anche un'ulteriore analisi per determinare se i valori scartati sono legati a dati in cui: solo il valore dello scrap è fuori limite, solo quello della reliability o entrambi. Per valutare ciò sono state realizzate delle tabelle per ogni articolo, in cui sono stati riportati: data e ora dell'inizio del turno, data e ora della fine del turno, il valore dello scrap, e il valore della reliability. I valori di scrap e reliability sono stati evidenziati in verde quando rispettano i criteri stabiliti, in rosso quando non li rispettano.

Per l'articolo 1.0, la tabella è mostrata nella Figura 3.9.

Start	End	Scrap	Reliability
2022-03-01 06:00:01+01:00	2022-03-01 09:52:53+01:00	5,196731	70,171997
2022-03-14 14:31:20+01:00	2022-03-14 21:48:45+01:00	2,945011	82,646011
2022-03-15 05:57:04+01:00	2022-03-15 13:06:21+01:00	1,945331	52,018864
2022-04-12 22:00:00+02:00	2022-04-13 05:59:59+02:00	2,832616	87,677605
2022-04-13 06:00:00+02:00	2022-04-13 09:40:52+02:00	6,05939	46,143108

Figura 3.9: Valori di SCRAP e RELIABILITY per l'ARTICOLO 1.0

I dati ottenuti sono molto pochi, poiché è un articolo che viene prodotto raramente, inoltre non si verificano situazioni in cui entrambi i criteri sono rispettati quindi per questo articolo non sono state calcolate le soglie statistiche. Lo scrap non assume mai un valore inferiore a 1,5%.

Per l'articolo 3.0, la tabella è mostrata nella Figura 3.10.

Start	End	Scrap	Reliability
2022-03-01 14:00:00+01:00	2022-03-01 21:59:59+01:00	5,885613	49,176647
2022-03-01 22:00:00+01:00	2022-03-02 05:59:59+01:00	3,319869	70,90023
2022-03-02 06:00:00+01:00	2022-03-02 09:29:58+01:00	4,863649	52,814621
2022-05-05 10:57:22+02:00	2022-05-05 13:59:59+02:00	4,798964	80,275925
2022-05-05 14:00:00+02:00	2022-05-05 21:59:59+02:00	2,152922	87,891769
2022-05-05 22:00:00+02:00	2022-05-06 05:59:59+02:00	1,265714	90,152618
2022-05-06 06:00:00+02:00	2022-05-06 10:00:01+02:00	4,62141	74,621674

Figura 3.10: Valori di SCRAP e RELIABILITY per l'ARTICOLO 3.0

In questa situazione si può notare che non si verifica mai una condizione in cui il valore di scrap è minore dell'1,5% e quella della reliability è inferiore all'80%, solo situazioni opposte, o in cui nessun criterio è rispetto o entrambi sono rispettati.

Per l'articolo 4.0, la tabella è mostrata nella Figura 3.11.

Capitolo 3 ANALISI DEI DATI

Start	End	Scrap	Reliability
2022-03-03 14:00:00+01:00	2022-03-03 21:58:53+01:00	5,420981	10,99375
2022-03-03 22:05:11+01:00	2022-03-04 05:59:59+01:00	2,950803	84,818207
2022-03-04 06:00:00+01:00	2022-03-04 13:59:59+01:00	1,99243	82,902733
2022-03-07 06:00:00+01:00	2022-03-07 13:59:59+01:00	2,541714	88,002708
2022-03-15 14:00:00+01:00	2022-03-15 21:56:23+01:00	1,781904	94,786766
2022-03-16 06:27:39+01:00	2022-03-16 13:59:59+01:00	1,739268	90,597816
2022-03-16 14:00:00+01:00	2022-03-16 21:58:11+01:00	1,330321	89,939659
2022-03-17 06:00:00+01:00	2022-03-17 13:59:59+01:00	1,524307	79,550758
2022-03-17 14:00:00+01:00	2022-03-17 21:53:25+01:00	2,336355	73,244247
2022-03-18 06:05:04+01:00	2022-03-18 13:59:59+01:00	2,363666	88,173058
2022-03-21 14:00:00+01:00	2022-03-21 21:59:59+01:00	1,371738	93,766609
2022-03-21 22:00:00+01:00	2022-03-22 05:55:09+01:00	1,204832	92,695831
2022-03-28 06:23:05+02:00	2022-03-28 13:59:59+02:00	10,666515	6,282474
2022-03-31 14:00:00+02:00	2022-03-31 21:59:59+02:00	2,886161	85,271233
2022-03-31 22:00:00+02:00	2022-04-01 05:59:59+02:00	2,213918	89,573166
2022-04-01 06:00:00+02:00	2022-04-01 13:59:59+02:00	10,224709	29,079277
2022-04-07 14:00:00+02:00	2022-04-07 21:59:59+02:00	3,840913	67,856567
2022-04-07 22:00:00+02:00	2022-04-08 05:59:59+02:00	1,652662	90,90934
2022-04-08 06:00:00+02:00	2022-04-08 13:59:59+02:00	2,748037	77,088829
2022-04-11 06:00:00+02:00	2022-04-11 13:59:59+02:00	2,292628	87,603043
2022-04-11 14:00:00+02:00	2022-04-11 21:59:59+02:00	2,005516	85,984032
2022-04-11 22:00:00+02:00	2022-04-12 05:59:59+02:00	0,936328	92,939285
2022-04-28 14:00:00+02:00	2022-04-28 21:59:59+02:00	1,684589	90,900162
2022-04-28 22:00:00+02:00	2022-04-29 05:59:59+02:00	2,875564	85,77346
2022-04-29 06:00:00+02:00	2022-04-29 13:59:59+02:00	9,897136	10,162787
2022-04-29 14:00:00+02:00	2022-04-29 21:59:59+02:00	2,049052	82,771477
2022-04-30 06:00:00+02:00	2022-04-30 13:59:59+02:00	19,24276	7,140297
2022-05-03 14:00:00+02:00	2022-05-03 21:59:59+02:00	2,558066	88,475449
2022-05-03 22:00:00+02:00	2022-05-04 05:59:59+02:00	3,344617	73,985733
2022-05-04 06:00:00+02:00	2022-05-04 13:59:59+02:00	1,636337	100,310944

Figura 3.11: Valori di SCRAP e RELIABILITY per l'ARTICOLO 4.0

L'articolo 4.0 è uno di quelli che viene prodotto con maggiore frequenza sulla linea di produzione, per cui ci sono molti dati a disposizione. Nonostante la quantità elevata di informazioni, i criteri stringenti sullo scrap riducono di molto i dati utili per il calcolo delle soglie statistiche. Nella Figura 3.11 è ben visibile che il criterio sulla reliability viene rispettato nella maggioranza dei casi e non si verifica mai una situazione in cui esso è inferiore all'80% e lo scarto è inferiore all'1,5%, questa condizione si verifica anche in tutti gli articoli che verranno mostrati nelle figure successive. Una eccezione si verifica solo per l'articolo 12.0. Per l'articolo 7.0, la tabella è mostrata nella Figura 3.12.

3.4 Criterio per definire la qualità del processo produttivo

Start	End	Scrap	Reliability
2022-03-02 10:35:53+01:00	2022-03-02 13:59:59+01:00	4,863649	52,814621
2022-03-02 14:00:00+01:00	2022-03-02 21:57:26+01:00	3,306721	30,791563
2022-03-02 22:01:33+01:00	2022-03-03 05:59:59+01:00	3,79773	84,323074
2022-03-03 06:00:00+01:00	2022-03-03 09:36:09+01:00	4,459783	56,496758
2022-03-18 09:18:53+01:00	2022-03-18 13:59:59+01:00	2,363666	88,173058
2022-03-21 06:21:25+01:00	2022-03-21 09:25:08+01:00	2,256866	77,52359
2022-03-24 11:27:31+01:00	2022-03-24 13:59:59+01:00	4,31808	60,429226
2022-03-24 14:00:00+01:00	2022-03-24 21:59:59+01:00	3,441998	70,906052
2022-03-24 22:00:00+01:00	2022-03-25 05:59:59+01:00	2,117287	91,520935
2022-04-12 00:44:27+02:00	2022-04-12 05:59:59+02:00	0,936328	92,939285
2022-04-21 10:37:15+02:00	2022-04-21 13:59:59+02:00	2,517401	76,779549
2022-04-21 14:00:00+02:00	2022-04-21 21:48:27+02:00	3,895181	60,268326
2022-04-21 22:10:06+02:00	2022-04-22 05:59:54+02:00	3,390346	82,086655
2022-04-22 06:06:40+02:00	2022-04-22 13:59:59+02:00	3,161262	72,118446
2022-04-26 06:06:05+02:00	2022-04-26 13:02:59+02:00	3,87231	81,161934
2022-05-04 14:00:00+02:00	2022-05-04 21:59:59+02:00	2,088432	90,606232
2022-05-04 22:00:00+02:00	2022-05-05 05:58:40+02:00	1,901125	88,655296

Figura 3.12: Valori di SCRAP e RELIABILITY per l'ARTICOLO 7.0

Per l'articolo 11.0, la tabella è mostrata nella Figura 3.13.

Start	End	Scrap	Reliability
2022-04-01 14:04:11+02:00	2022-04-01 21:59:59+02:00	4,540183	57,373489
2022-04-01 22:00:00+02:00	2022-04-02 05:50:03+02:00	1,558842	91,766998
2022-04-19 06:01:49+02:00	2022-04-19 13:59:59+02:00	1,550241	88,335548
2022-04-19 14:00:00+02:00	2022-04-19 21:59:59+02:00	16,378639	2,582122
2022-04-19 22:00:00+02:00	2022-04-20 05:59:59+02:00	2,534899	81,486275
2022-04-20 06:00:00+02:00	2022-04-20 13:59:59+02:00	0,822292	92,794052
2022-04-20 14:00:00+02:00	2022-04-20 21:59:59+02:00	4,868336	8,996955
2022-04-20 22:00:00+02:00	2022-04-21 05:59:59+02:00	1,080088	92,315704

Figura 3.13: Valori di SCRAP e RELIABILITY per l'ARTICOLO 11.0

Per l'articolo 12.0, la tabella è mostrata nella Figura 3.14.

Start	End	Scrap	Reliability
2022-04-13 14:00:00+02:00	2022-04-13 21:59:59+02:00	4,431846	53,543591
2022-04-13 22:00:00+02:00	2022-04-14 05:59:59+02:00	1,35115	74,260399
2022-04-14 06:00:00+02:00	2022-04-14 13:59:59+02:00	1,894124	83,917633
2022-04-14 14:00:00+02:00	2022-04-14 21:59:59+02:00	1,22622	89,958893
2022-04-14 22:00:00+02:00	2022-04-15 03:05:06+02:00	1,335831	54,280323

Figura 3.14: Valori di SCRAP e RELIABILITY per l'ARTICOLO 12.0

Capitolo 3 ANALISI DEI DATI

Per questo prodotto si è presentata per bene 2 la situazione in cui viene rispettata la condizione sullo scarto ma non quella sulla reliability. È uno stato verificatosi solo per questo articolo e mai per gli altri articoli.

Per l'articolo 13.0, la tabella è mostrata nella Figura 3.15.

Start	End	Scrap	Reliability
2022-03-11 14:01:12+01:00	2022-03-11 21:59:59+01:00	2,632689	85,960648
2022-03-14 06:06:45+01:00	2022-03-14 13:59:59+01:00	4,498607	64,970932
2022-04-12 09:38:31+02:00	2022-04-12 13:57:11+02:00	2,927966	64,782471

Figura 3.15: Valori di SCRAP e RELIABILITY per l'ARTICOLO 13.0

Ci sono pochi dati a disposizione perché è un articolo che viene prodotto con bassa frequenza e si può notare nessuna che il criterio sullo scrap e la reliability non vengono mai rispettati in concomitanza.

Per l'articolo 14.0, la tabella è mostrata nella Figura 3.16.

Start	End	Scrap	Reliability
2022-03-10 14:00:00+01:00	2022-03-10 21:59:59+01:00	2,292731	75,447914
2022-03-10 22:00:00+01:00	2022-03-11 05:52:24+01:00	8,216007	4,129746
2022-03-11 06:31:52+01:00	2022-03-11 13:02:06+01:00	4,155387	50,19521
2022-03-24 01:04:22+01:00	2022-03-24 05:59:59+01:00	0,750152	87,976112
2022-03-24 06:00:00+01:00	2022-03-24 09:35:10+01:00	4,31808	60,429226
2022-04-05 11:14:36+02:00	2022-04-05 13:59:59+02:00	4,052889	71,451599
2022-04-05 14:00:00+02:00	2022-04-05 21:59:59+02:00	0,838152	96,450516
2022-04-07 00:14:10+02:00	2022-04-07 05:59:59+02:00	1,518976	80,20153
2022-04-26 14:00:43+02:00	2022-04-26 21:59:59+02:00	2,149765	89,114464
2022-04-26 22:00:00+02:00	2022-04-27 02:45:35+02:00	1,967044	88,963478
2022-04-28 01:10:41+02:00	2022-04-28 05:59:59+02:00	2,45115	76,038383

Figura 3.16: Valori di SCRAP e RELIABILITY per l'ARTICOLO 14.0

Per l'articolo 15.0, la tabella è mostrata nella Figura 3.17.

3.5 Calcolo delle soglie statistiche

Start	End	Scrap	Reliability
2022-03-08 12:05:14+01:00	2022-03-08 13:59:59+01:00	35,05427	3,985811
2022-03-08 14:00:00+01:00	2022-03-08 21:59:59+01:00	2,535219	81,365387
2022-03-09 12:02:17+01:00	2022-03-09 13:59:59+01:00	34,17783	3,310447
2022-03-09 14:00:00+01:00	2022-03-09 21:59:59+01:00	1,644385	91,426086
2022-03-09 22:00:00+01:00	2022-03-10 05:59:59+01:00	1,614647	92,355797
2022-03-22 14:15:16+01:00	2022-03-22 21:59:59+01:00	3,628058	77,369652
2022-03-22 22:00:00+01:00	2022-03-23 05:59:59+01:00	1,844258	90,454224
2022-03-23 06:00:00+01:00	2022-03-23 13:59:59+01:00	1,414893	92,308327
2022-03-23 14:00:00+01:00	2022-03-23 21:59:59+01:00	3,224146	64,203438
2022-04-06 00:31:35+02:00	2022-04-06 05:59:59+02:00	0,865887	90,938698
2022-04-06 06:00:00+02:00	2022-04-06 13:59:59+02:00	0,769893	91,26136
2022-04-06 14:00:00+02:00	2022-04-06 21:59:59+02:00	1,360498	97,966316
2022-04-27 06:00:00+02:00	2022-04-27 13:59:59+02:00	1,651343	57,058823
2022-04-27 14:00:00+02:00	2022-04-27 21:59:59+02:00	3,705214	82,944069
2022-05-07 10:03:53+02:00	2022-05-07 13:59:59+02:00	5,676422	29,448589
2022-05-07 14:00:00+02:00	2022-05-07 21:59:59+02:00	1,86206	77,473495

Figura 3.17: Valori di SCRAP e RELIABILITY per l'ARTICOLO 15.0

Dai risultati ottenuti da queste tabelle si può facilmente estrapolare l'informazione legata all'inutilità della condizione sulla reliability, in quanto nella maggior parte dei casi in cui entrambe le condizioni non sono accertate, il dato relativo allo scrap è sempre non accettabile indipendente dalla reliability. Di conseguenza il solo valore della variabile scrap fornisce l'informazione sulla bontà del processo produttivo e di conseguenza su quali dati scartare e poter utilizzare per il calcolo delle soglie statistiche.

Per cui la condizione: $RELIABILITY \geq 80\%$ può essere rimossa dato che non apporta alcun contributo.

3.5 Calcolo delle soglie statistiche

Dopo aver filtrato il dataset applicando la condizione sulla variabile SCRAP, ovvero sullo scarto, sono state calcolate le soglie statistiche mediante il metodo Six Sigma e Three Sigma. Il dataset filtrato, viene mostrato nella Figura 3.18

	ARTICLE	SCRAP	STSV1	STSV2	CCSV1	STSP1	CCSP1
2022-03-08 22:00:00+01:00	15.0	1.088074	-0.020363	-0.016933	-0.033588	5.444641	0.404068
2022-03-08 22:00:01+01:00	15.0	1.088074	-0.019629	-0.016392	-0.034206	5.444641	0.404411
2022-03-08 22:00:02+01:00	15.0	1.088074	-0.019745	-0.016933	-0.033588	5.444641	0.404793
2022-03-08 22:00:03+01:00	15.0	1.088074	-0.019977	-0.016662	-0.033626	5.444641	0.405022
2022-03-08 22:00:04+01:00	15.0	1.088074	-0.019552	-0.015657	-0.033240	5.444641	0.405022
...
2022-05-06 05:59:54+02:00	3.0	1.265714	-0.032250	-0.025071	-0.052175	5.314636	0.389877
2022-05-06 05:59:55+02:00	3.0	1.265714	-0.028849	-0.025032	-0.051402	5.324402	0.380302
2022-05-06 05:59:56+02:00	3.0	1.265714	-0.032173	-0.025264	-0.052793	5.324707	0.378014
2022-05-06 05:59:57+02:00	3.0	1.265714	-0.029390	-0.024684	-0.053411	4.797668	0.377747
2022-05-06 05:59:59+02:00	3.0	1.265714	-0.028463	-0.024762	-0.008431	5.147705	0.389877

Figura 3.18: Dataset filtrato con la condizione su SCRAP

A partire da questi dati è stato effettuato il calcolo dei limiti statistici. Six Sigma è un metodo finalizzato all'ottimizzazione del processo e della qualità nei sistemi aziendali e utilizza nozioni statistiche per ridurre la variabilità di un processo produttivo.

Le soglie statistiche sono state calcolate per ogni sensore e per ogni articolo. Nel primo passaggio dell'analisi viene selezionato il sensore di pressione o di vuoto, nel secondo passaggio vengono raggruppati i dati per articolo. Per ogni articolo è stata valutata la media del processo, cioè del segnale di pressione o di vuoto, e la sua deviazione standard.

La media è la media aritmetica del processo, la propensione dei dati di collocarsi attorno ad essa viene definita tendenza centrale, mentre la deviazione standard (nota anche come Sigma o σ) determina la diffusione dei dati intorno alla media. Maggiore è il numero di σ tra la media del processo e i limiti accettabili, minore è la probabilità che il processo funzioni oltre questi limiti di processo accettabili, causando un difetto. Motivo per cui un processo 6σ (Six Sigma) ha prestazioni migliori rispetto ai processi con livello σ inferiori.

Per definire le soglie accettabili sono stati implementati i metodi Six Sigma e Three Sigma, per quantificare la dispersione dei dati attorno la media e fare un confronto. Le soglie ottenute sono state comparate anche con i limiti attualmente imposti alle pressioni e ai vuoti, tali limiti sono stati definiti in precedenza da un'ingegnere di linea, senza l'utilizzo di dati storici ma tramite un'analisi dei processi effettuata base esperienza.

Le operazioni eseguite per il calcolo delle soglie con il metodo 3σ sono riportate nell'equazione 3.1:

$$USL = \mu + 3\sigma \quad LSL = \mu - 3\sigma \quad (3.1)$$

3.5 Calcolo delle soglie statistiche

Le operazioni eseguite per il calcolo delle soglie con il metodo 6 σ sono riportate nell'equazione 3.2:

$$USL = \mu + 6\sigma \quad LSL = \mu - 6\sigma \quad (3.2)$$

Dove USL sta per "Upper Specification Limit" e LSL per "Lower Specification Limit", e rappresentano le soglie statistiche ottenute.

Per ogni sensore e articolo verranno riportati in forma tabellare: media, deviazione standard, USL e LSL ottenuti con il metodo 3 σ e con il metodo 6 σ ; e in forma grafica le soglie calcolate e le soglie definite dall'ingegnere della FGC2.

Sensore STSV1, nella Figura 3.19, sono riportati i valori sopra citati per ogni articolo in forma tabellare.

ARTICLE	3.0	4.0	7.0	11.0	12.0	14.0	15.0
media	-0.020140	-0.022102	-0.018413	-0.009920	-0.010024	-0.019832	-0.020932
deviazione standard	0.001384	0.004633	0.001124	0.000862	0.000821	0.004325	0.003675
USL3 σ	-0.018064	-0.015153	-0.016728	-0.008626	-0.008793	-0.013345	-0.015419
LSL3 σ	-0.022217	-0.029051	-0.020099	-0.011213	-0.011256	-0.026319	-0.026444
USL6 σ	-0.015987	-0.008204	-0.015042	-0.007333	-0.007561	-0.006858	-0.009907
LSL6 σ	-0.024293	-0.036000	-0.021784	-0.012507	-0.012488	-0.032806	-0.031956

Figura 3.19: Media, deviazione standard e soglie per **STSV1**

Per poter effettuare un confronto tra i limiti statistici calcolati e quelli definiti dall'ingegnere, essi vengono mostrati graficamente. In arancio sono evidenziati i limiti dell'ingegnere, in rosso quelli calcolati con la metodologia 6 σ , in blu quelli ottenuti con la metodologia 3 σ . Per il sensore STSV1 il limite massimo per il vuoto è settato a 0 bar, mentre il limite minimo a -0.04 bar, rappresentano l'intervallo entro cui può variare il vuoto secondo le direttive proposte dall'ingegnere, regole definite senza considerare i dati acquisiti dal sensore.

Essi sono visibili per il sensore STSV1 nelle figure: 3.20 e 3.21:

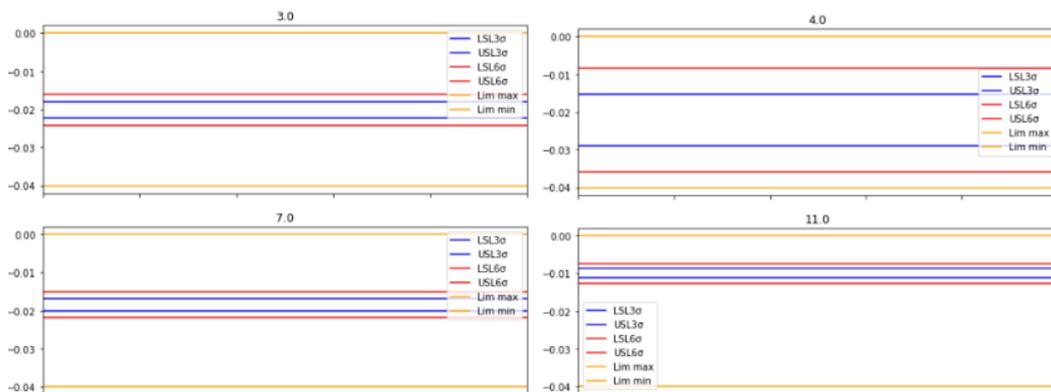


Figura 3.20: Soglie per sensore **STSV1** e articoli **3.0, 4.0, 7.0, 11.0**

Capitolo 3 ANALISI DEI DATI

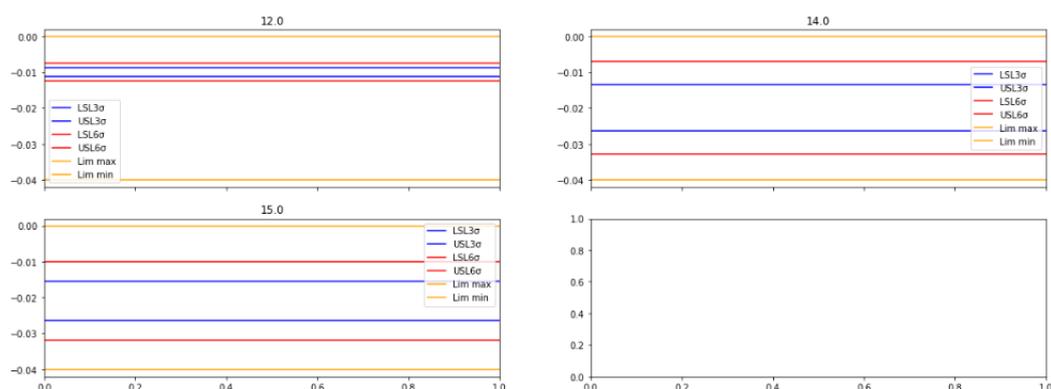


Figura 3.21: Soglie per sensore **STSV1** e articoli **12.0, 14.0, 15.0**

Dalle figure precedenti si può evincere che le soglie calcolate sono molto più stringenti rispetto a quelle proposte dall'ingegnere e sono tutte abbastanza centrate all'interno dell'intervallo delimitato dalle soglie arancioni.

Media, deviazione standard e soglie statistiche per il sensore **STSV2**, sono riportate, in forma tabellare, nella Figura 3.22:

ARTICLE	3.0	4.0	7.0	11.0	12.0	14.0	15.0
media	-0.031159	-0.028418	-0.028205	-0.030370	-0.026689	-0.028615	-0.028909
deviazione standard	0.000749	0.001633	0.000765	0.000461	0.002834	0.003668	0.004464
LSL3σ	-0.032282	-0.030868	-0.029352	-0.031062	-0.030940	-0.034117	-0.035605
USL3σ	-0.030036	-0.025969	-0.027057	-0.029679	-0.022437	-0.023114	-0.022212
LSL6σ	-0.033405	-0.033318	-0.030500	-0.031754	-0.035192	-0.039618	-0.042302
USL6σ	-0.028913	-0.023519	-0.025909	-0.028987	-0.018185	-0.017612	-0.015515

Figura 3.22: Media, deviazione standard e soglie per **STSV2**

I limiti in forma grafica sono riportati nelle figure 3.23 e 3.24, considerare che il range di vuoto definito dall'ingegnere è compreso tra -0.015 bar e -0.045 bar.

3.5 Calcolo delle soglie statistiche

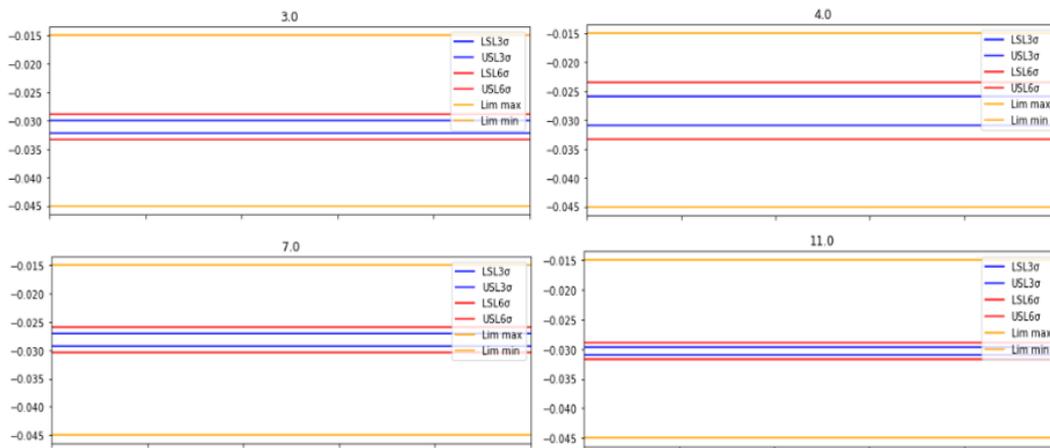


Figura 3.23: Soglie per sensore **STSV2** e articoli **3.0, 4.0, 7.0, 11.0**

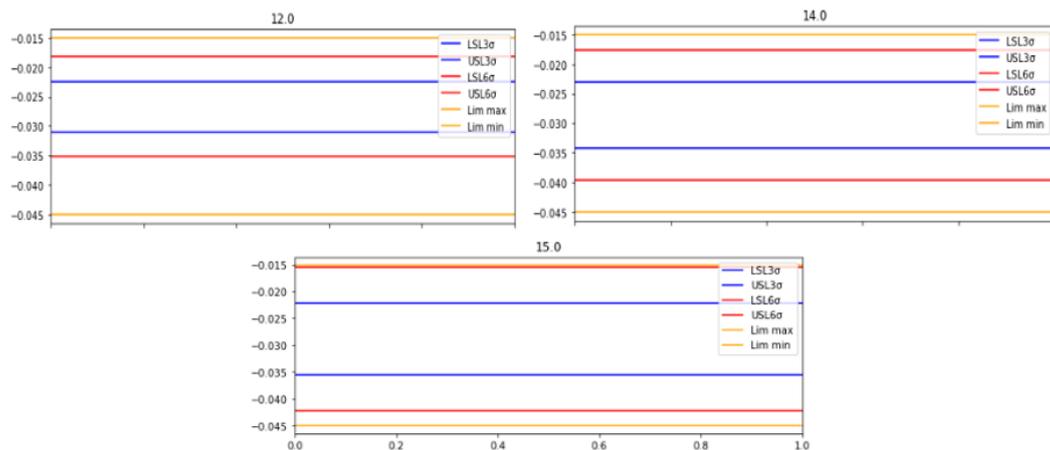


Figura 3.24: Soglie per sensore **STSV2** e articoli **12.0, 14.0, 15.0**

Dai grafici si possono dedurre gli stessi risultati relativi al sensore STSV1. Inoltre dai grafici è evidente che le soglie statistiche calcolate sono differenti per ogni articolo, per cui utilizzare un unico intervallo per tutti i prodotti potrebbe generare più scarti e prodotti non in qualità. Nonostante le soglie sono tutte centrate tra i limiti arancioni, l'intervallo risulta essere troppo ampio perchè non clusterizzato articolo per articolo. Media, deviazione standard e soglie statistiche per il sensore CCSV1, sono riportate, in forma tabellare, nella Figura 3.25:

ARTICLE	3.0	4.0	7.0	11.0	12.0	14.0	15.0
media	-0.060146	-0.052725	-0.054795	-0.065653	-0.072477	-0.060118	-0.058950
deviazione standard	0.004688	0.002116	0.003641	0.001407	0.007775	0.002014	0.003026
LSL3σ	-0.067178	-0.055900	-0.060257	-0.067764	-0.084140	-0.063139	-0.063489
USL3σ	-0.053113	-0.049551	-0.049334	-0.063542	-0.060814	-0.057096	-0.054412
LSL6σ	-0.074211	-0.059074	-0.065718	-0.069875	-0.095803	-0.066160	-0.068028
USL6σ	-0.046080	-0.046376	-0.043873	-0.061431	-0.049152	-0.054075	-0.049873

Figura 3.25: Media, deviazione standard e soglie per **CCSV1**

Nelle figure 3.26 e 3.27 sono rappresentati i limiti in forma grafica, l'intervallo imposto dall'ingegnere di linea per il sensore CCSV1 è compreso tra -0.04 bar e -0.08 bar.

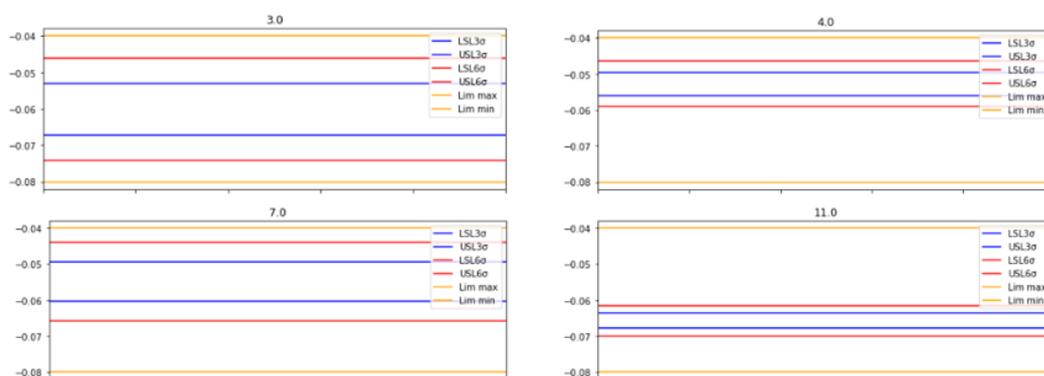


Figura 3.26: Soglie per sensore **CCSV1** e articoli **3.0, 4.0, 7.0, 11.0**

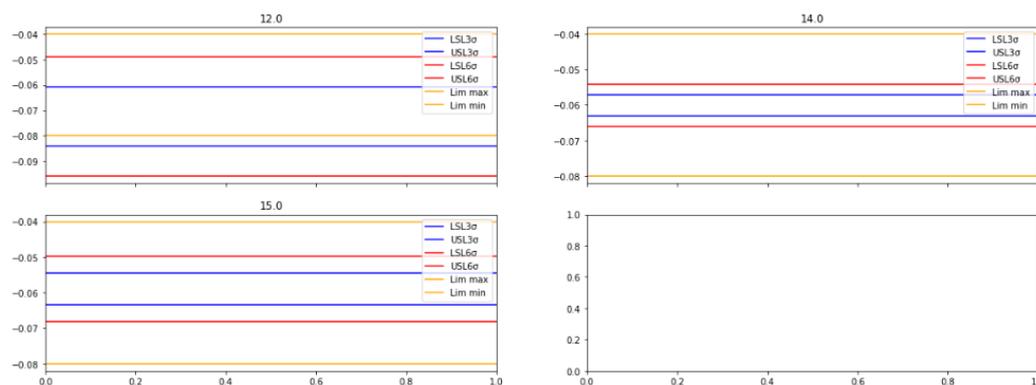


Figura 3.27: Soglie per sensore **CCSV1** e articoli **12.0, 14.0, 15.0**

Dai grafici possono essere dedotte le stesse considerazioni fatte sui sensori precedenti.

Media, deviazione standard e soglie statistiche per il sensore CCSP1, sono riportate, in forma tabellare, nella Figura 3.28:

3.5 Calcolo delle soglie statistiche

ARTICLE	3.0	4.0	7.0	11.0	12.0	14.0	15.0
media	0.385206	0.406442	0.539734	0.523088	0.484556	0.417169	0.416219
deviazione standard	0.007553	0.004113	0.001114	0.048651	0.030385	0.008975	0.008114
LSL3σ	0.373876	0.400272	0.538064	0.450112	0.438979	0.403707	0.404048
USL3σ	0.396536	0.412612	0.541405	0.596064	0.530133	0.430632	0.428391
LSL6σ	0.362546	0.394102	0.536393	0.377135	0.393402	0.390244	0.391876
USL6σ	0.407867	0.418782	0.543076	0.669041	0.575710	0.444094	0.440562

Figura 3.28: Media, deviazione standard e soglie per **CCSP1**

Nelle figure 3.29 e 3.30 sono visibili i limiti in forma grafica, l'intervallo imposto dall'ingegnere di linea per il sensore CCSP1 è compreso tra 0.3 bar e 0.7 bar, sono positivi poichè si sta considerando un sensore di pressione.

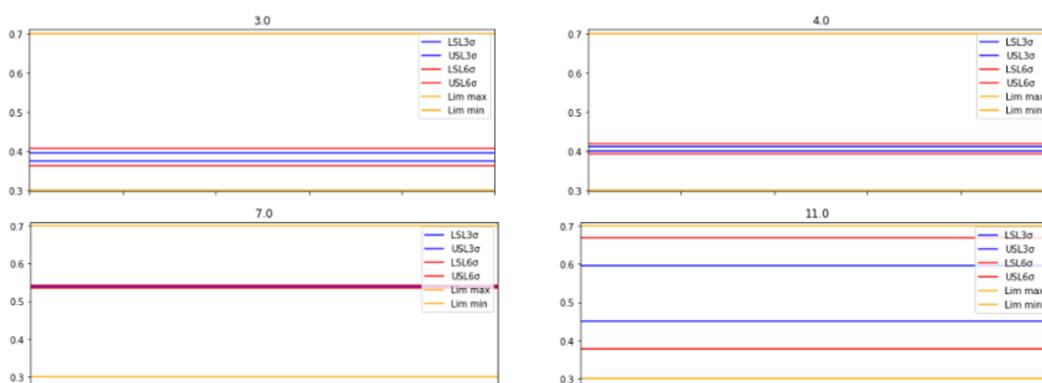


Figura 3.29: Soglie per sensore **CCSP1** e articoli **3.0, 4.0, 7.0, 11.0**

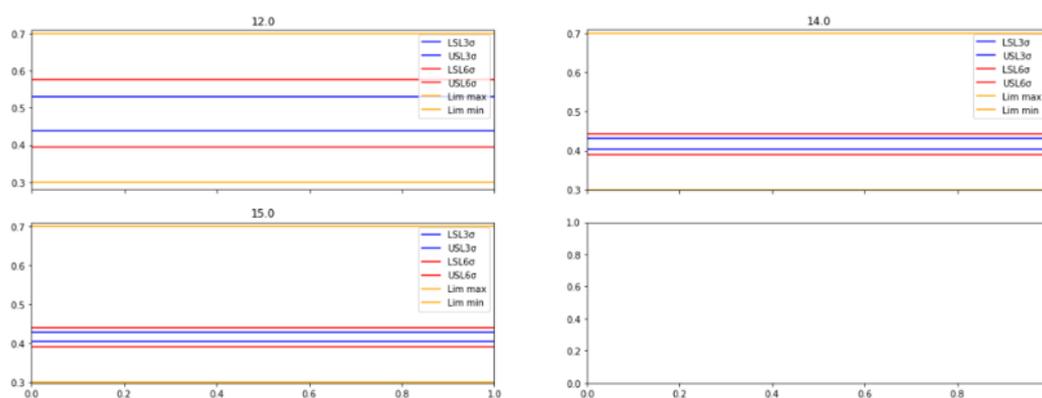


Figura 3.30: Soglie per sensore **CCSP1** e articoli **12.0, 14.0, 15.0**

Anche per CCSP1, sensore di pressione, possono essere tratte dai grafici sempre le stesse conclusioni.

Capitolo 3 ANALISI DEI DATI

Media, deviazione standard e soglie statistiche per il sensore STSP1, sono riportate, in forma tabellare, nella Figura 3.31:

ARTICLE	3.0	4.0	7.0	11.0	12.0	14.0	15.0
media	5.106659	5.295445	5.271476	5.393276	5.391399	5.354539	5.359816
deviazione standard	0.236487	0.176543	0.191489	0.054707	0.039409	0.125394	0.117028
LSL3 σ	4.751928	5.030630	4.984242	5.311216	5.332285	5.166447	5.184275
USL3 σ	5.461390	5.560259	5.558710	5.475337	5.450513	5.542631	5.535358
LSL6 σ	4.397197	4.765816	4.697009	5.229155	5.273171	4.978356	5.008733
USL6 σ	5.816121	5.825074	5.845944	5.557398	5.509627	5.730722	5.710900

Figura 3.31: Media, deviazione standard e soglie per **STSP1**

Nelle figure 3.32 e 3.33 sono mostrate le soglie in forma grafica, l'intervallo imposto dall'ingegnere di linea per il sensore STSP1 è compreso tra 4.0 bar e 6.0 bar.

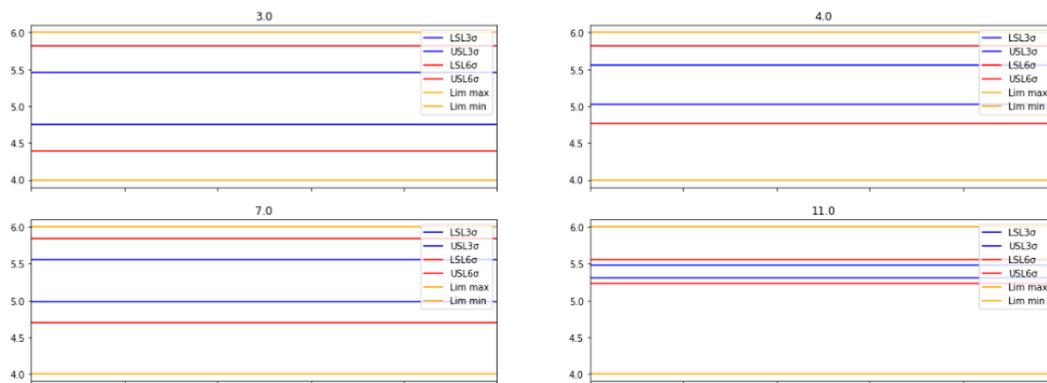


Figura 3.32: Soglie per sensore **STSP1** e articoli **3.0, 4.0, 7.0, 11.0**

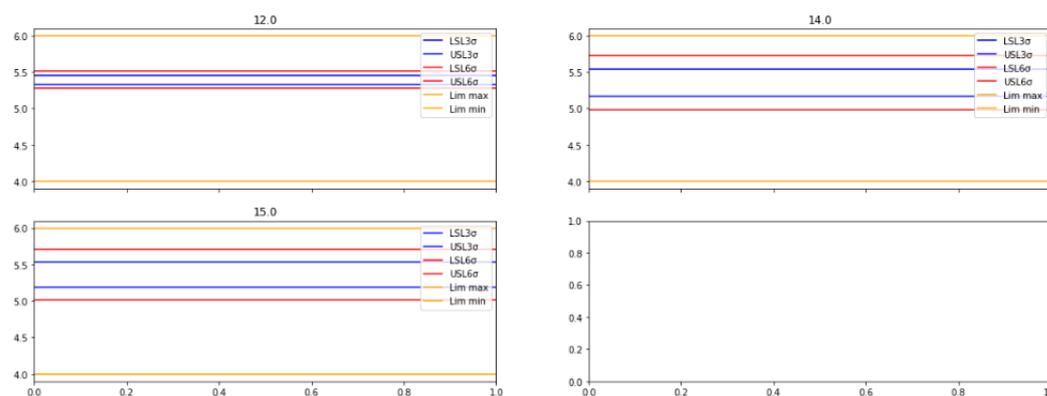


Figura 3.33: Soglie per sensore **STSP1** e articoli **12.0, 14.0, 15.0**

STSP1 è l'ultimo sensore considerato per il calcolo delle soglie statistiche con i metodi 3 σ e 6 σ .

Capitolo 4

RISULTATI

Dai grafici mostrati nel capitolo precedente è possibile dedurre che:

- le soglie impostate dall'ingegnere di linea sono eccessivamente ampie;
- è necessario definire dei limiti accettabili non solo per ogni sensore, ma anche per ogni tipo di prodotto e velocità della linea di produzione;
- nella maggioranza dei casi le soglie calcolate sono centrate rispetto a quelle impostate in precedenza.

Per validare la bontà delle soglie calcolate con le due metodologie è stato utilizzato un nuovo dataset, definito di test, per verificare se con ulteriori dati, ovvero dati non impiegati per il calcolo delle soglie statistiche, il segnale di pressione o di vuoto risulta essere sotto controllo, cioè se ha la capacità di soddisfare specifiche richieste. Il dataset di test è strutturato analogamente a quello originale (di training), presenta 7 colonne: ARTICLE, SCRAP, STSV1, STSV2, CCSV1, STSP1, CCSP1. La colonna RELIABILITY non è stata considerata perché non apporta nessun contributo sulla condizione in cui sta lavorando la linea.

Sono stati scaricati dal database solo i dati relativi alla linea in stato di produzione, ovvero linea accessata e in funzionamento.

Il dataset di test comprende dati dal periodo 10-05-2022 al 02-06-2022.

Il dataset di test, utilizzato per validare le soglie statistiche è mostrato nella Figura 4.1:

	ARTICOLO	SCRAP	STSV1	STSV2	CCSV1	STSP1	CCSP1
2022-05-10 14:07:32+02:00	5.0	162.917023	-0.004058	-0.023340	-0.039122	5.104370	0.395485
2022-05-10 14:07:33+02:00	5.0	162.917023	-0.006144	-0.023147	-0.039934	5.120239	0.443092
2022-05-10 14:07:34+02:00	5.0	162.917023	-0.004367	-0.022877	-0.040861	5.140991	0.425926
2022-05-10 14:11:39+02:00	5.0	162.917023	-0.004173	-0.023224	-0.038890	4.731140	0.446678
2022-05-10 14:11:40+02:00	5.0	162.917023	-0.006028	-0.023611	-0.038658	4.713745	0.442139
...
2022-06-02 05:46:51+02:00	7.0	95.150116	-0.010009	-0.004637	-0.059139	4.974060	0.417267
2022-06-02 05:46:52+02:00	7.0	95.150116	-0.008579	-0.005101	-0.053227	4.948730	0.417648
2022-06-02 05:46:53+02:00	7.0	95.150116	-0.010975	-0.004908	-0.061187	4.935913	0.416962
2022-06-02 05:46:54+02:00	7.0	95.150116	-0.007999	-0.004251	-0.058289	4.949951	0.416580
2022-06-02 05:46:55+02:00	7.0	95.150116	-0.011052	-0.004869	-0.056086	5.146790	0.415779

Figura 4.1: Dataset di test

Per poter validare le soglie adattive calcolate i segnali di pressione e di vuoto dei sensori considerati sono stati raffigurati in un grafico con i relativi limiti associati. La validazione è stata effettuata per ogni sensore e per ogni articolo, considerando che durante il periodo in cui sono stati acquisiti i dati del dataset di test non sono stati prodotti tutti gli articoli per cui sono stati determinati i limiti in precedenza. Non ci sono valori di pressione e di vuoto relativi ad ogni articolo prodotto, il numero di articoli considerato per ogni sensore è ridotto, la validazione verrà effettuata solo per i prodotti: 7.0, 14.0 e 15.0.

Per ogni sensore di pressione e di vuoto selezionato i grafici sottostanti mostrano l'andamento della variabile informativa in funzione del tempo e le specifiche da validare.

La variabile informativa associata ad una pressione o ad un vuoto è raffigurata con due colori differenti: in nero quando il segnale è relativo a dati che non rispettano la condizione sullo scarto, ovvero $SCRAP \geq 1,5\%$, in verde quando è relativo a dati che invece rispettano la condizione sullo scarto, cioè $SCRAP \leq 1,5\%$. La scelta di raffigurare il segnale con questa modalità è stata presa per verificare se la condizione sullo scarto apporta degli effetti su come l'andamento del vuoto e della pressione si posiziona rispetto agli intervalli ottenuti.

Le specifiche da validare e quelle attuali sono raffigurate con gli stessi colori visti nel sotto-capitolo precedente, ovvero: in blu le soglie ottenute con la metodologia 3σ , in rosso quelle ricavate con la metodologia 6σ e quelle attuali sono raffigurate in arancione e rappresentano i limiti definiti da un ingegnere della linea produttiva su base esperienza.

Per il sensore STSV1 come il vuoto si posiziona rispetto alle soglie da accettare è mostrato nella Figura 4.2:

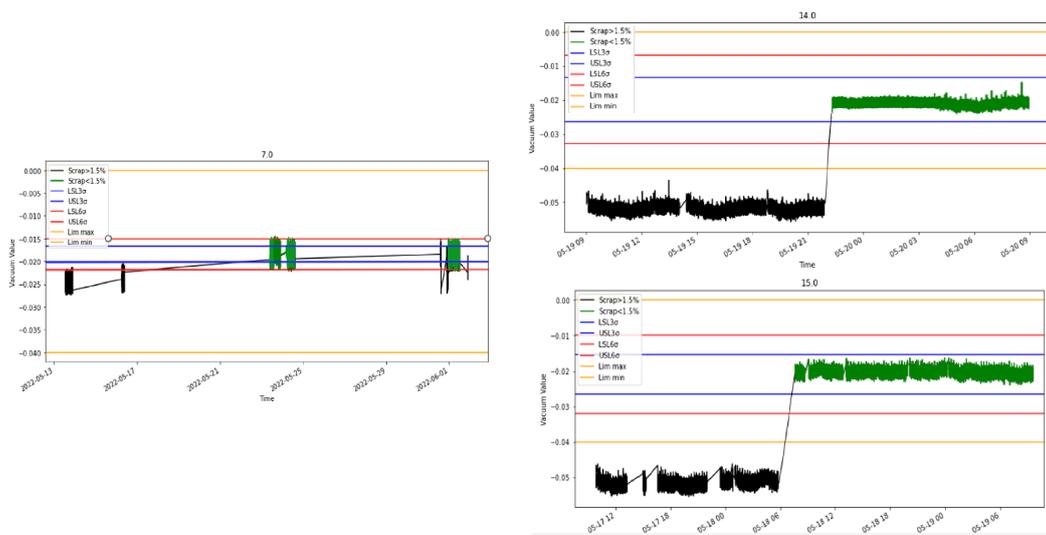


Figura 4.2: Andamento STSV1 rispetto alle soglie statistiche

Dai grafici si evince che il processo risulta sempre sotto controllo quando il valore dello scarto è inferiore all'1,5%, mentre con valori di scarto superiori non si può affermare lo stesso risultato. Inoltre con le specifiche calcolate mediante il Six Sigma, i dati risultano ben centrati nell'intervallo e non sono presenti outliers, mentre non risulta così quando sono determinate con il Three Sigma, per cui si può desumere che tali limiti sono troppo stringenti per la variabile considerata. Per il sensore STSV2 come il vuoto si posiziona rispetto alle specifiche da verificare è mostrato nella Figura 4.3:

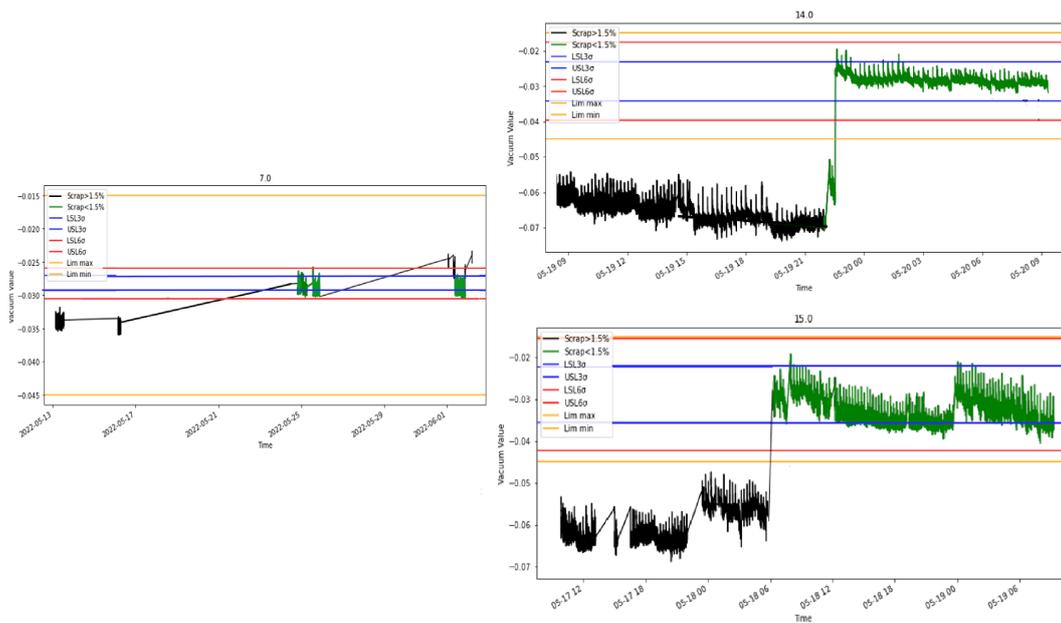


Figura 4.3: Andamento STSV2 rispetto alle soglie statistiche

Capitolo 4 RISULTATI

Anche in questa situazione le deduzioni che si possono ottenere dai grafici sono le stesse. Il processo risulta essere sotto controllo quando le condizioni sullo scarto vengono rispettate, mentre quando lo scarto è superiore all'1,5% (segnale in nero) il processo è fuori controllo. Inoltre il segnale del vuoto per $SCRAP \leq 1,5\%$ si posiziona bene rispetto alle specifiche ottenute con il Six Sigma, mentre il Three sigma risulta troppo stringente soprattutto per l'articolo 7.0.

I segnali mostrati per il sensore STSV2 presentano spesso dei gradini o dei picchi, ciò è dovuto alla correlazione del vuoto con il trasporto della materia prima, ovvero il secondary topsheet. I picchi sono legati al cambio di bobina di secondary topsheet, quando avviene la sostituzione di una bobina terminata con una nuova, la materia prima rimane invariata ma con il cambio di bobina i teli potrebbero presentare delle caratteristiche differenti in termini di densità e porosità di materiale e ciò causa una leggera variazione nell'andamento vuoto; inoltre durante la sostituzione della bobina terminata con quella nuova il telo subisce un processo definito "splice" in cui si genera un picco di tensione che genera un effetto anche sull'andamento del vuoto.

Per il sensore CCSV1 come il vuoto si posiziona rispetto ai limiti da verificare, è mostrato nella Figura 4.4:

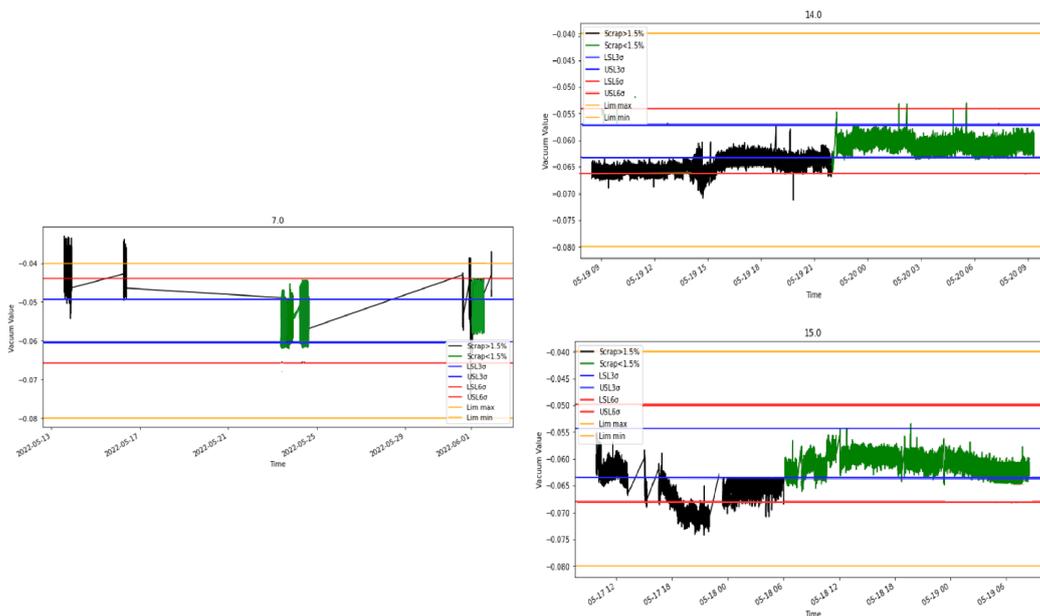


Figura 4.4: Andamento CCSV1 rispetto alle soglie statistiche

Valgono le stesse considerazioni enunciate per i sensori STSV1 e STSV2, anche se in questa situazione la correlazione tra l'andamento del segnale e la condizione sullo scarto è meno evidente, però quando il vuoto è associato a dati con scarto inferiore all'1,5% l'andamento è ben centrato rispetto alle specifiche ottenute con

il Six Sigma, mentre quando è inferiore all'1,5% l'andamento del vuoto tende ad andare fuori dall'intervallo calcolato spostandosi verso il basso.

Per il sensore di pressione CCSP1, viene mostrato l'andamento del segnale rispetto ai limiti calcolati solo per gli articoli 14.0 e 15.0, poiché per l'articolo 7.0 i limiti calcolati con i metodi 3σ e 6σ risultano molto stringenti rispetto a quelli definiti dall'ingegnere di linea quindi dal grafico non si riuscivano ad estrapolare dei risultati evidenti. Come si posiziona il vuoto rispetto alle soglie viene evidenziato nella Figura 4.5:

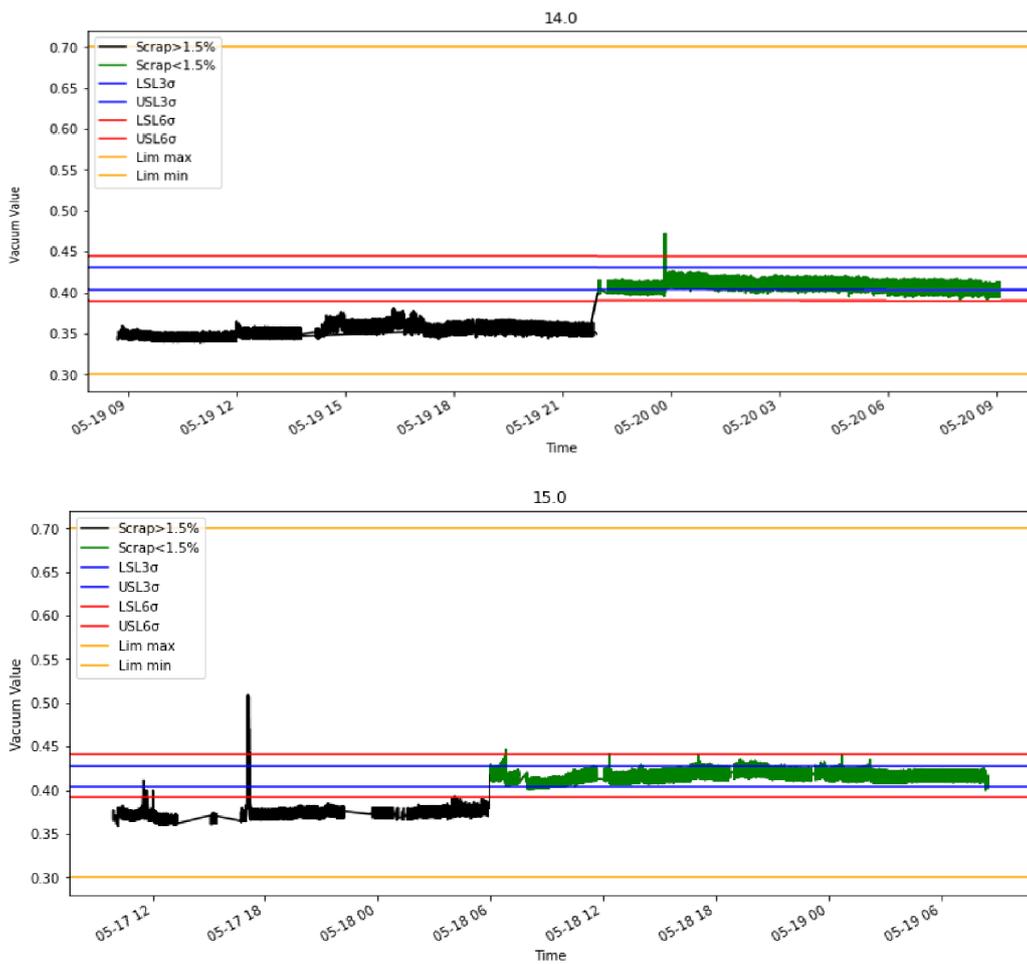


Figura 4.5: Andamento CCSP1 rispetto alle soglie statistiche

Per questo sensore è visibile come le specifiche ottenute mediante il 3σ e il 6σ sono molto più stringenti rispetto a quelle attuali. L'andamento della variabile è ben centrato nell'intervallo ottenuto con il 6σ . Anche in questo caso il metodo Three Sigma non è accettabile, è troppo stringente. La selezione dei limiti ottenuti con il Three Sigma definirebbe un processo che va frequentemente fuori controllo. Il segnale quando soddisfa le condizioni sullo scarto è sotto controllo anche per il

sensores CCSP1.

L'ultimo sensore da considerare è STSP1, un'altra variabile di pressione. L'andamento di tale processo rispetto alle specifiche definite si posiziona come mostrato nella Figura 4.6:

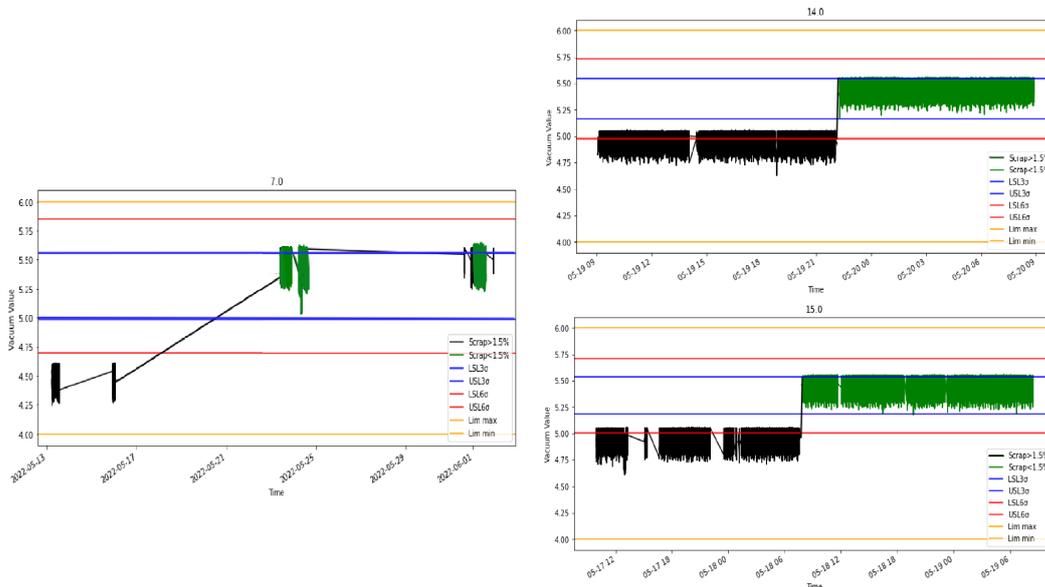


Figura 4.6: Andamento STSP1 rispetto alle soglie statistiche

Riassumendo, dai grafici mostrati possono essere estratte le seguenti conclusioni:

- le specifiche calcolate con il metodo Three Sigma sono troppo stringenti e non possono essere validate, il sistema andrebbe frequentemente fuori controllo;
- le soglie statistiche calcolate con la metodologia Six Sigma sono più stringenti rispetto a quelle definite dall'ingegnere, ma il processo risulta sotto controllo e non sono visibili outliers.
- le specifiche ottenute con il Six Sigma possono essere validate, in quanto il segnale, associato a dati di pressione o di vuoto il cui la condizione sullo scarto viene rispettata, risulta essere sempre sotto controllo, per tutti i sensori e gli articoli analizzati.

Il metodo applicato e proposto in questo elaborato ha permesso di definire dei nuovi limiti statistici basati sull'utilizzo di dati storici acquisiti direttamente dai sensori di pressione e di vuoto. I limiti utilizzati in precedenza per effettuare il monitoraggio e il controllo sui sensori erano uguali per ogni articolo prodotto sulla linea produttiva ed erano stati stabiliti sulla base dell'esperienza dell'ingegnere di linea. Ad oggi la

possibilità di avere delle soglie ottenute da dati acquisiti direttamente dai trasduttori mediante la struttura di rete implementata consente di avere delle soglie caratterizzate per ogni articolo e più stringenti, ciò permetterà di ridurre la quantità di scarti prodotti.

La relazione tra l'andamento della variabile, le soglie statistiche determinate e la condizione sullo scarto sono ben evidenti nei grafici riportati. La condizione di avere un segnale sotto controllo quando lo scarto è inferiore ad una certa quantità considerata critica per il processo produttivo, fornisce dei buoni risultati per l'analisi effettuata, poiché consente di affermare che mantenendo il processo sotto controllo si può ridurre la quantità di scarti prodotti dall'azienda durante un ciclo produttivo, migliorando l'efficienza della linea produttiva.

L'obiettivo che l'azienda vuole raggiungere con la definizione di queste nuove soglie è quello di avere dei segnali di pressione e di vuoto ottimali che non causino problemi associati allo scarto. Gli scarti sono dovuti principalmente ad un trasporto non corretto del materiale, cioè ad un vuoto scorretto che può causare: disallineamento del telo rispetto all'asse centrale o formazione di pieghe sui teli dopo il taglio, tenendo sotto un maggiore controllo i valori di vuoto per ogni articolo il processo risulta maggiormente monitorato, e ciò comporta la produzione di prodotti con una qualità più elevata e la riduzione degli scarti.

Inoltre l'azienda vuole utilizzare queste soglie per cambiare la modalità con cui monitorare i valori di pressione e di vuoto: attualmente è l'operatore che effettua un controllo sulla quantità letta dal sensore di pressione e di vuoto e verifica se tale quantità rientra nell'intervallo definito; quindi viene effettuato un monitoraggio base tempo con la frequenza di un controllo a turno.

Da ciò si vuole passare ad un monitoraggio basato su condizione, in cui non serve più effettuare un controllo sul valore letto da ogni sensore, ma vengono utilizzate le soglie statistiche calcolate per abilitare un sistema di allarme, quando il valore di pressione o di vuoto si trova in prossimità dei limiti massimo o minimo, viene attivato un allarme, che avvisa per tempo l'operatore. L'operatore dopo aver disattivato l'allarme, può riportare il valore all'interno delle soglie statistiche calcolate mediante l'utilizzo di una valvola di regolazione legata al sensore.

I motivi per cui un valore tende ad uscire dalle soglie statistiche calcolate possono essere differenti: nel caso dei vuoti può essere dovuto ad una eccessiva contaminazione dei banchi di trasporto o dei rulli, ad una materia prima con una porosità eccessiva, oppure all'operatore stesso che varia il valore della pressione o del vuoto mediante la valvola di regolazione.

Un sistema di allarme integrato con le soglie statistiche calcolate, fa sì che quando il valore si avvicina al fuori soglia non si verifichino le situazioni appena descritte, poiché tali processi vengono anticipati dall'operatore che riporta il segnale all'interno dell'intervallo di controllo, ciò consente di migliorare la qualità del processo produttivo.

CONCLUSIONE

La rete di sensori installata sulla linea produttiva ha fornito la possibilità di collegare i trasduttori di pressione e di vuoto al sistema di controllo mediante l'utilizzo del bus di campo Ethernet/IP e del protocollo di comunicazione IO-Link, i quali combinati creano le condizioni ideali per adattare la produzione ai requisiti dell'I4.0. L'architettura implementata consente di acquisire dati da sensori di pressione e di vuoto in tempo reale, per poterli analizzare, elaborare e utilizzare per implementare tecniche di monitoraggio e di manutenzione.

Nell'elaborato è stato applicato un controllo statistico di processo mediante il metodo Six Sigma per il calcolo delle soglie statistiche, utili a determinare delle nuove specifiche entro cui deve variare il vuoto o la pressione per mantenere il processo sotto controllo.

Il Six Sigma metodo tradizionale, puntuale, che si basa sull'utilizzo di dati storici e criteri statistici per ridurre la variabilità di un processo produttivo è stato ritenuto valido per la definizione di tali limiti, ciò può essere affermato per due motivi principali: dalle analisi effettuate è risultato che per ogni sensore e per ogni prodotto il segnale di pressione e di vuoto si posiziona all'interno delle specifiche calcolate e soprattutto poiché l'andamento della variabile che rispetta la condizione sullo scarto risulta essere sotto controllo, risultato che non si verifica quando questa condizione non viene rispettata.

Da queste ultime considerazioni si può evincere che esiste una relazione importante tra le specifiche definite e le limitazioni sulla variabile scarto: con un segnale sotto controllo si possono ridurre gli scarti prodotti, migliorando, di conseguenza, l'efficienza della linea produttiva.

Le nuove soglie consentiranno di passare da un monitoraggio base tempo ad uno base condizione, mediante l'integrazione del sistema applicato con un allarme.

La scelta di utilizzare tale metodo, è stata presa per la complessità del sistema da analizzare (tanti sensori e articoli) e perché il sistema implementato sulla linea rappresenta una novità per l'azienda, per cui si avevano a disposizione pochi dati e informazioni.

È importante sottolineare che il metodo applicato è preliminare, quando si avranno a disposizione una maggiore quantità di dati e di informazioni sarà possibile definire una metodologia più spinta e innovativa. Però la soluzione implementata consente comunque di migliorare il monitoraggio effettuato sui sensori di vuoto e di pressione e la qualità del processo produttivo.

Con maggiori informazioni a disposizione e una quantità di dati acquisiti più elevata

CONCLUSIONE

si potranno implementare anche delle soluzioni di manutenzione basata su condizione sulle operazioni di pulizia che vengono effettuate dagli operatori periodicamente.

Il vantaggio principale della rete di sensori realizzata è dato dalla possibilità di collegare al sistema di controllo sensori di diversa tipologia: sensori di temperatura, celle di carico, trasduttori di posizione, ecc...; l'integrazione dei dati acquisiti dai sensori attualmente montati sulla linea produttiva e quelli che potranno essere installati in futuro fornisce la possibilità di ricavare correlazioni tra le varie variabili, per effettuare uno studio più approfondito del processo produttivo e contribuire maggiormente a migliorare il processo e il sistema di produzione.

Bibliografia

- [1] K. Schwab, *The Fourth Industrial Revolution*. Crown Business, 2017.
- [2] A. G. Frank, L. S. Dalenogare, and N. F. Ayala, “Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies,” *International Journal of Production Economics*, vol. 210, pp. 15–26, 2019.
- [3] A. Ghadge, M. E. Kara, H. Moradlou, and M. Goswami, “The impact of industry 4.0 implementation on supply chains,” *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 31, no. 4, pp. 669–686, 2020.
- [4] “Smart manufacturing and smart industry in context.” <https://www.i-scoop.eu/industry-4-0/manufacturing-industry/>.
- [5] J. Manyika, R. Dobbs, M. Chui, J. Bughin, P. Bisson, and J. Woetzel, “The internet of things: mapping the value beyond the hype,” tech. rep., McKinsey Global Institute, 2015.
- [6] R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, and S. T. Newman, “Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A review,” *Engineering-london*, vol. 3, no. 5, pp. 616–630, 2017.
- [7] T. L. Olsen and B. Tomlin, “Industry 4.0: Opportunities and challenges for operations management,” *Manufacturing & Service Operations Management*, vol. 22, pp. 113–122, 2022.
- [8] T. Masood and J. Egger, “Augmented reality in support of industry 4.0—implementation challenges and success factors,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 58, pp. 181–195, 2019.
- [9] R. K. Mobley, *An introduction to predictive maintenance*. Elsevier, second ed., 2002.
- [10] P. Kamat and R. Sugandhi, “Anomaly detection for predictive maintenance in industry 4.0—a survey,” in *E3S Web of Conferences*, vol. 170, EDP Sciences, 2020.
- [11] J.-H. Shin and H.-B. Jun, “On condition based maintenance policy,” *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 119–127, 2015.

Bibliografia

- [12] A. Prajapati, J. Bechtel, and S. Ganesan, “Condition based maintenance: A survey,” *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 18, pp. 384–391, 10 2012.
- [13] T. Zonta, C. A. da Costa, R. da Rosa Righi, M. J. de Lima, E. S. da Trindade, and G. P. Li, “Predictive maintenance in the industry 4.0: A systematic literature review,” *Computers Industrial Engineering*, vol. 150, p. 106889, 2020.
- [14] C. Chen, N. Lu, B. Jiang, and C. Wang, “A risk-averse remaining useful life estimation for predictive maintenance,” *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 8, no. 2, pp. 412–422, 2021.
- [15] H. Yang, Z. Sun, G. Jiang, F. Zhao, and X. Mei, “Remaining useful life prediction for machinery by establishing scaled-corrected health indicators,” *Measurement*, vol. 163, p. 108035, 06 2020.
- [16] G. Mazzuto, S. Antomarioni, F. Ciarapica, and M. Bevilacqua, “Health indicator for predictive maintenance based on fuzzy cognitive maps, grey wolf, and k-nearest neighbors algorithms,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2021, pp. 1–21, 02 2021.
- [17] J. Levitt, *Complete guide to preventive and predictive maintenance*. Industrial Press Inc., 2003.
- [18] J. Fernandes, J. Reis, N. Melão, L. Teixeira, and M. Amorim, “The role of industry 4.0 and bpmn in the arise of condition-based and predictive maintenance: A case study in the automotive industry,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 8, pp. 1–5, 2021.
- [19] N. Sakib and T. Wuest, “Challenges and opportunities of condition-based predictive maintenance: A review,” *Procedia CIRP*, vol. 78, pp. 267–272, 2018. 6th CIRP Global Web Conference – Envisaging the future manufacturing, design, technologies and systems in innovation era (CIRPe 2018).
- [20] L. Liu, L. Jiang, and D. Zhang, “An integrated model of statistical process control and condition-based maintenance for deteriorating systems,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 68, no. 11, pp. 1452–1460, 2017.
- [21] J. S. Oakland, *Statistical process control*. Butterworth Heinemann, 6th ed., 2007.
- [22] Sarıçiçek and O. İmen, “A new diagnosis system based on fuzzy reasoning to detect mean and/or variance shifts in a process,” *International journal of innovative computing, information control: IJICIC*, vol. 7, 12 2011.
- [23] T. G., *Six Sigma: SPC and TQM in Manufacturing and Services*. Routledge, 1st ed., 2001.

- [24] T. Pyzdek and P. A. Keller, *The Six Sigma Handbook*. McGraw-Hill, 3th ed., 2010.
- [25] D. Mallants, M. Raiber, and P. Davies, “Decision support system for investigating gas in water bores and links to coal seam gas development,” 08 2016.
- [26] E. O. Doebelin, *Strumenti e metodi di misura*. McGraw-Hill, 2th ed., 2008.
- [27] KEYENCE CORPORATION, *Sensore di pressione con display digitale a due colori Serie AP-30*. <https://www.keyence.it/products/process/pressure/ap-30/>.
- [28] Festo SE Co.KG, *Pressure sensor SPAN*, 11a ed., 2017. https://www.festo.com/net/it_it/SupportPortal/Files/716189/SPAN_2017-11a_8035568g1.pdf.
- [29] H. Eren, *Fieldbus Systems*, pp. 1147–1153. 03 2005.
- [30] “Io-link system description –technology and application,” tech. rep., IO-Link Community, Mar. 2018.
- [31] P. Brooks, “Ethernet/ip: Industrial protocol white paper,” 2001.
- [32] “Moduli di rete per ethernet/ip, bni eip-508-105-z015.” <https://www.balluff.com/it-it/products/BNI006A>.
- [33] “Hub sensori/attuatori io-link, bni iol-719-002-z012.” <https://www.balluff.com/it-sm/products/BNI00AJ>.
- [34] Balluff GmbH, *User’s Guide: BNI IOL-719-002-Z012*, 2017. https://assets.balluff.com/WebBinary1/MAN_BNI_IOL_719_002_Z012_EN_D22_DOK_932235_AA_000.pdf.
- [35] Balluff GmbH, *User’s Guide: BNI EIP-502-105-Z015 / BNI EIP-508-105-Z015*, 2019. https://assets.balluff.com/WebBinary1/MAN_BNI_EIP_50x_105_Z015_EN_F20_DOK_933690_03_000.pdf.
- [36] A. Caravita, *Macchine per il converting: funzionalità e implementazione di tecniche di controllo*. Tesi di dottorato, Università degli studi di Bergamo, Facoltà di Ingegneria - Dipartimento di progettazione e tecnologie, 2012.