



**Politecnico  
di Torino**

**POLITECNICO DI TORINO**

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale**

**Percorso Innovazione e Imprenditorialità**

**“Studio della Tracciabilità dei Controlli di Qualità  
nell’Industria Agroalimentare Secondaria“**

**Relatore:**

**Prof. Maurizio Galetto**

**Candidato:**

**Giampaolo Volpe**

**Anno accademico 2024-2025**

# Sommario

Introduzione .....	3
CAPITOLO 1: Certificazioni nel Settore Agroalimentare Secondario .....	6
Qualità: norme ISO, UNI, EN .....	6
Certificazione di prodotto vs Certificazione di processo .....	8
Tassonomia delle certificazioni in vigore.....	9
HACCP .....	11
HARPC.....	15
Certificazione ISO 22000 .....	17
Certificazione ISO 22005 .....	18
Certificazione FSSC 22000 .....	19
Certificazione BRCGS .....	20
Certificazione IFS.....	21
Certificazioni Halal e Kosher .....	22
Certificazioni IGP e DOP .....	23
CAPITOLO 2: Tracciabilità nell'Industria Agroalimentare Secondaria.....	25
Revisione letteratura scientifica.....	26
Metodologia PRISMA .....	26
Risultato e analisi .....	27
Definizione di Tracciabilità.....	29
Sistemi di tracciabilità attualmente in uso: stato dell'arte .....	32
Tracciabilità del prodotto .....	32
Tracciabilità della MP lungo il processo: DNA biologico .....	33
Tracciabilità del PF in fase di distribuzione.....	35
Internet of Things (IoT).....	37
Radio Frequency Identification (RFID).....	40
Wireless Sensor Network (WSN).....	42
Datamatrix & QR Code .....	43
Near Field Communication (NFC) .....	45
Evoluzione moderna dell'IoT.....	47
Tracciabilità dei controlli qualità lungo il processo produttivo .....	49
PAT e PON.....	50
Problemi nella Agri Food Supply Chain (AFSC) .....	51
Blockchain: definizione e panoramica generale .....	56

Smart Contracts.....	60
Vantaggi e sfide future della Blockchain.....	62
CAPITOLO 3: Riprogettazione del Sistema di Tracciabilità e Controllo Qualità del processo con F.lli Saclà .....	70
Mappatura AS-IS .....	71
Descrizione del Processo Produttivo della “Salsa Alfredo Pesto” .....	71
Diagramma concettuale BPMN .....	79
Tabella sulla razionalizzazione dei controlli .....	85
Identificazione criticità: i pain points del processo produttivo .....	86
Modello TO-BE.....	87
Migliorie a livello di pensiero statistico.....	95
Background sui piani di campionamento .....	95
Piano di campionamento per attributi sui vasi in vetro .....	103
Progettazione Piano ad hoc .....	103
Progettazione Piano secondo la norma MIL STD 105E.....	109
Confronto e analisi.....	112
Piano di campionamento per variabili su MP.....	116
Test di normalità della variabile di qualità.....	120
Test sulla Deviazione Standard .....	123
Applicazione del Metodo K.....	124
Analisi e considerazioni.....	125
Migliorie in ottica tecnologica .....	127
Sistemi di Machine Vision e Algoritmi di Machine Learning.....	127
Interoperabilità dei sistemi informatici: MES e PIMS .....	140
Considerazioni Modello TO-BE.....	145
Conclusioni .....	147
Bibliografia .....	148
Allegati (Figure) .....	158
Allegati (Tabelle).....	161
Ringraziamenti .....	161
Ringraziamenti personali.....	161

## Introduzione

L'alimentazione rappresenta un aspetto essenziale non solo per la sopravvivenza umana, ma anche per la configurazione e lo sviluppo delle società. Sin dalle origini della civiltà, il modo in cui gli esseri umani hanno coltivato, preparato e consumato il cibo ha influenzato la salute, il benessere e la struttura economica, politica e culturale delle comunità. Le pratiche alimentari hanno plasmato il commercio, le rotte migratorie e stimolato innovazioni tecnologiche, creando complessi sistemi di interscambio tra popoli e culture. Dalla domesticazione di piante e animali all'organizzazione delle prime forme di agricoltura, la gestione del cibo ha favorito la nascita di società stabili e gerarchicamente strutturate, con un impatto significativo sulla geopolitica e sulle dinamiche di potere globale.

Nel contesto attuale, il sistema alimentare globale si presenta sempre più interconnesso e complesso, affrontando nuove sfide che richiedono soluzioni innovative e mirate, con alla base la sicurezza e la qualità degli alimenti, oggi priorità imprescindibili per la salute pubblica e la stabilità economica. La globalizzazione ha ampliato e complicato le catene di approvvigionamento, collegando produttori e consumatori a migliaia di chilometri di distanza. Questo ha generato nuove opportunità di scambio, ma ha anche evidenziato le vulnerabilità di un sistema in cui ogni anello della filiera può rappresentare un punto critico per la sicurezza alimentare.

L'aumento della complessità logistica impone un controllo rigoroso lungo l'intera catena di fornitura, dalla produzione alla distribuzione fino al consumo. Gli scandali alimentari e le crisi sanitarie degli ultimi decenni hanno dimostrato come anche minime falle nei sistemi di controllo possano avere conseguenze gravi su scala globale, alimentando preoccupazioni tra consumatori e governi. Di fronte a questa crescente sensibilità, la domanda di alimenti sicuri e di alta qualità è aumentata considerevolmente. I consumatori, più informati e consapevoli, richiedono standard elevati, maggiore trasparenza e garanzie sull'origine e sulla composizione dei prodotti.

A tal scopo, l'industria agroalimentare secondaria, responsabile della lavorazione e trasformazione dei prodotti primari in alimenti complessi o confezionati, gioca un ruolo cruciale nell'assicurare la sicurezza e la qualità degli alimenti destinati al consumo. La tracciabilità dei controlli di qualità è essenziale per garantire la conformità alle normative, mantenere standard elevati e soddisfare le crescenti esigenze dei consumatori in termini di affidabilità e trasparenza.

La sicurezza e la qualità alimentare non sono responsabilità esclusivamente aziendali, ma una sfida che coinvolge l'intero sistema agroalimentare. La gestione di queste problematiche richiede l'adozione di tecnologie avanzate, protocolli rigorosi e una stretta collaborazione tra tutti gli attori della filiera. Solamente attraverso un approccio integrato di questo tipo, è possibile prevenire rischi e garantire cibo sano e sicuro per tutti.

La presente tesi si pone come obiettivo principale quello di esaminare come i sistemi di tracciabilità possano garantire la sicurezza alimentare, migliorare la gestione dei controlli qualità nelle filiere produttive e ridurre i rischi associati alla distribuzione di prodotti non conformi.

Il capitolo introduttivo avrà l'obiettivo di presentare le certificazioni richieste in questo settore, fornendo una panoramica dettagliata sulla loro tassonomia e sul loro campo di applicazione.

Il secondo capitolo prevede un'analisi più approfondita della tematica, partendo da uno studio della letteratura scientifica al fine di comprendere l'evoluzione degli studi in questo settore e valutare lo stato attuale delle ricerche. Saranno quindi presentati i concetti fondamentali relativi alla tracciabilità, offrendo una visione approfondita dei sistemi attualmente adottati e dei sistemi adottabili in futuro, con le loro rispettive limitazioni. Verrà, inoltre, analizzata la tecnologia blockchain e il suo potenziale contributo nella risoluzione delle sfide della filiera agroalimentare, mediante un esame approfondito del suo funzionamento, con particolare attenzione alle opportunità, ai punti di forza e alle criticità.

La realizzazione e lo studio di modelli BPMN (Business Process Modelling and Notation) sarà poi approfondita per comprendere come tali strumenti possano supportare l'implementazione di sistemi di tracciabilità efficienti.

Il capitolo conclusivo sarà dedicato alla riprogettazione del sistema di tracciabilità e controllo qualità del processo di un'azienda medio-grande del settore agroalimentare italiano, la F.lli Saclà. Partendo da una mappatura AS-IS, e passando per un'analisi accurata dei punti critici di tale processo, verrà proposto un modello TO-BE, mediante il quale verranno formulate possibili soluzioni volte a risolvere le criticità sopra elencate.

Attraverso l'analisi delle tecnologie e dei processi attualmente utilizzati, nonché delle principali sfide legate all'implementazione di sistemi di tracciabilità, questo lavoro si propone di evidenziare le migliori pratiche e le innovazioni che possono supportare la qualità e la sicurezza nel settore agroalimentare secondario.

## CAPITOLO 1: Certificazioni nel Settore Agroalimentare Secondario

Nel settore agroalimentare secondario, che si occupa della trasformazione, lavorazione e conservazione dei prodotti alimentari, la qualità e la sicurezza rappresentano due pilastri fondamentali per garantire la fiducia dei consumatori e la conformità alle normative internazionali (Corallo, Latino, Menegoli e Striani 2020). A fronte di una crescente complessità delle filiere produttive, amplificata dalla globalizzazione e dalle sempre più stringenti esigenze di trasparenza e tracciabilità, le certificazioni sono diventate strumenti indispensabili per attestare l'aderenza a standard elevati in termini di qualità, sicurezza, sostenibilità e gestione dei processi produttivi (Betti et al. 2024).

Questi sistemi di certificazione non solo assicurano che le pratiche aziendali rispondano ai requisiti legali, ma svolgono anche un ruolo cruciale nel rafforzare la competitività delle imprese sul mercato globale. Le certificazioni rappresentano una forma di garanzia che coinvolge tutti gli attori della filiera, dal produttore al distributore al consumatore, e abbracciano aspetti chiave come il controllo delle materie prime, i processi di lavorazione, il rispetto delle norme igienico-sanitarie e l'impatto ambientale (Betti et al. 2024).

### Qualità: norme ISO, UNI, EN

Prima di entrare nel dettaglio delle certificazioni specifiche applicabili all'industria agroalimentare secondaria, è importante definire il termine *Qualità*, che risulta essere il principio cardine a cui tutte le certificazioni di questo ambito si riferiscono, e i relativi standard normativi.



*Fig.1: Standard di qualità da seguire*

La norma principale di riferimento è la ISO 9000/2015, una normativa accessoria che definisce la *Qualità* come il “grado in cui un insieme di caratteristiche intrinseche soddisfa i requisiti”. Nel caso specifico, tale concetto viene interpretato come la capacità del prodotto, e del processo che porta alla sua realizzazione, di soddisfare particolari esigenze attraverso processi correttamente normati e regolamentati.

L'acronimo ISO (International Organization for Standardization) sopra citato rappresenta una delle tre tipologie di norme vigenti in questo settore. In particolare, ISO è la principale organizzazione internazionale incaricata di creare norme tecniche, spesso denominate standard ISO. Tra queste, la ISO 9001 è specifica per i Sistemi di Gestione della Qualità: a differenza della ISO 9000, è una vera e propria certificazione, poiché stabilisce i requisiti necessari per un sistema di gestione della qualità in un'organizzazione. Questi requisiti sono generali e applicabili a qualsiasi tipo di organizzazione.

Oltre agli standard ISO, esistono anche le norme UNI ed EN.

UNI è l'abbreviazione dell'Ente Nazionale Italiano di Unificazione, un ente privato che sviluppa norme tecniche per i settori industriali, commerciali e dei servizi in Italia, rappresentando il Paese nelle organizzazioni europee (CEN) e mondiali (ISO). Le norme italiane riportano l'acronimo UNI e, quando UNI precede da solo il numero della norma, indica che è stata redatta dalle Commissioni UNI o dagli Enti Federati.

EN, invece, indica le norme prodotte dal CEN (Comité Européen de Normalisation), organismo di standardizzazione europeo. I Paesi membri del CEN sono obbligati a recepire le norme EN (in Italia diventano UNI EN) per garantire uniformità nelle normative tecniche europee, senza possibilità di norme nazionali in conflitto con tali contenuti.

Dunque, per quanto riguarda le norme ISO, applicabili a livello globale, ogni Paese può decidere di adottarle come standard nazionali: in Italia, per esempio, vengono indicate come UNI ISO (o UNI EN ISO, se adottate anche in Europa). Di conseguenza, una norma come UNI EN ISO 9001 indica uno standard internazionale (ISO) adottato sia a livello europeo (EN) sia dall'ente italiano di normazione (UNI).

Sulla base della conformità alle normative sopra descritte, effettuare la procedura di Controllo Qualità nell'industria agroalimentare secondaria significa verificare che i prodotti trasformati derivati dall'agricoltura rispettino specifici standard qualitativi e di sicurezza alimentare, al fine di ridurre i rischi di contaminazione e di preservare la fiducia dei consumatori, ottimizzando così il processo produttivo.

### Certificazione di prodotto vs Certificazione di processo

Altra distinzione importante da fare è tra certificazione di prodotto e certificazione di processo, anche dette di sistema. Dal glossario di *Accredia* (Ente italiano di accreditamento) si riportano le seguenti definizioni:

*“La **certificazione di prodotto** (regolata dalle norme settoriali, generiche e specifiche, di prodotto o da riferimenti normativi equivalenti) è una forma di **assicurazione diretta**, con cui si accerta la rispondenza ai requisiti applicabili di un prodotto tangibile o intangibile (servizio), inteso come risultato di un processo.”*

*“La **certificazione di sistema** assicura la capacità di un'organizzazione (produttrice di beni o fornitrice di servizi) di strutturarsi e gestire le proprie*

*risorse e i propri processi produttivi in modo da riconoscere e soddisfare i bisogni dei clienti, impegnandosi al miglioramento continuo. È una forma di **assicurazione indiretta**".*

Dunque, si definiscono strumenti distinti ma complementari: se la prima ha la funzione di garantire che il prodotto possieda determinate proprietà fisiche e chimiche e che rispetti parametri di sicurezza e qualità, la seconda mira ad assicurare che i metodi, le tecnologie e i sistemi utilizzati per produrre beni o servizi siano controllati e standardizzati per garantire una qualità costante.

### Tassonomia delle certificazioni in vigore

Descritto in maniera completa il concetto di qualità e analizzata la differenza tra certificazione di prodotto e di sistema (processo), si può passare a definire le certificazioni richieste nell'industria agroalimentare secondaria (presentate in *Tabella 1*), che risultano essere uno strumento essenziale per garantire trasparenza lungo tutta la filiera, rafforzando la fiducia dei consumatori e facilitando l'accesso a mercati globali sempre più esigenti.

<b>Nome Certificazione</b>	<b>Ambito di applicazione</b>	<b>Anno inizio validità</b>	<b>Obbligatoria vs volontaria</b>	<b>Tipologia di Certificazione</b>
<b><u>HACCP</u></b>	Strutture alimentari operanti in Europa	1993 in Europa, 1997 in Italia	Obbligatoria	Processo
<b><u>HARPC</u></b>	Strutture alimentari operanti negli Stati Uniti	2016	Obbligatoria	Processo

<b><u>ISO 22000</u></b>	Sistemi di gestione per la sicurezza alimentare	2005	Volontaria	Processo
<b><u>ISO 22005</u></b>	Sistemi di gestione per la tracciabilità di filiera alimentare e mangimistica	2008	Volontaria	Processo
<b><u>FSSC 22000</u></b>	Sistemi di gestione per la sicurezza, la qualità e la legalità alimentare	2009	Volontaria	Processo
<b><u>BRCGS</u></b>	Richiesta dai maggiori retailer al mondo di natura anglosassone per lavorare nella GDO anglosassone	1998	Volontaria	Prodotto
<b><u>IFS</u></b>	Richiesta dai maggiori retailer al mondo di natura europea per lavorare nella GDO europea	2003	Volontaria	Prodotto
<b><u>Kosher e Halal</u></b>	Nicchia di mercato legata rispettivamente alle comunità	Inizio- Metà del	Volontarie	Prodotto

	ebraiche e alle comunità islamiche	XX secolo		
<b><u>Denominazione di Origine Protetta (DOP)</u></b>	Indicata per i prodotti DOP	1992	Obbligatoria	Prodotto
<b><u>Indicazione Geografica Protetta (IGP)</u></b>	Indicata per i prodotti IGP	1992	Obbligatoria	Prodotto

*Tabella 1: Certificazioni nell'industria agroalimentare secondaria*

Si analizzano, di seguito, le certificazioni sopra elencate.

## HACCP

**HACCP** è l'acronimo di Hazard Analysis Critical Control Point. Si tratta di un approccio preventivo alla sicurezza alimentare, incentrato sulla prevenzione dei rischi per la salute dei consumatori attraverso l'identificazione, la valutazione e il controllo dei pericoli potenziali associati alla produzione, alla lavorazione e alla distribuzione degli alimenti. La documentazione HACCP è un mezzo per dimostrare a terzi (organi di controllo inclusi) l'osservanza di requisiti e procedure di prevenzione dai rischi ed è obbligatoria per tutti gli operatori delle filiere alimentari. È dunque un metodo di valutazione che permette l'identificazione dei pericoli e la definizione dei CCP (Critical Control Point), il loro conseguente e costante monitoraggio in tutte le fasi della filiera, con l'obiettivo di prevenire rischi di contaminazione (biologica, fisica o chimica), necessari per assicurare l'immissione di alimenti sicuri per l'uomo sul mercato.

A tal scopo, il sistema HACCP effettua una netta distinzione tra PRP, oPRP e CCP, già sopra citati.

Un PRP è un prerequisito di base, ossia una condizione o un'attività di base necessaria per mantenere un ambiente igienico lungo tutta la catena alimentare. La ISO 22002-1, che rientra nella FSSC 22000 sotto descritta, definisce quindici prerequisiti di base per la sicurezza alimentare, da valutare nella fase di progettazione di un sistema alimentare. La definizione corretta dei prerequisiti di base (durante la fase di progettazione di un sistema di gestione per la sicurezza alimentare) o delle fasi preliminari definite dal Codex Alimentarius permetterà di avere una gestione più pulita, che consentirà di focalizzare le energie sui reali pericoli che eventualmente possono presentarsi in azienda.

Un CCP è un punto critico di controllo, ovvero una fase o una concatenazione di fasi della produzione alimentare, che richiede un monitoraggio continuo e in cui è possibile applicare delle misure per eliminare o ridurre un pericolo alimentare (possibilmente presente) ad una soglia di accettabilità.

Un oPRP (prerequisito operativo), invece che una fase o concatenazione di fasi, è un'attività necessaria per far sì che non si possa sviluppare un'attività atta allo sviluppo patogeno.

Dunque, prima bisogna definire i prerequisiti di base (PRP) nella fase di progettazione di un sistema alimentare. Una volta definiti quelli di base, nell'effettuazione della valutazione e dell'analisi dei rischi (legati a eventuali contaminazioni che possono generare problemi alla salute dei consumatori) mediante HACCP, si va a definire un'altra tipologia di prerequisiti, ossia i prerequisiti operativi (oPRP), che verranno messi a confronto (durante l'analisi HACCP) con i CCP.

Per adottare efficacemente il sistema HACCP si deve seguire quanto definito dal Codex Alimentarius, un insieme di linee guida e codici di buone pratiche (create dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) e dall'Organizzazione per l'Alimentazione e l'Agricoltura (FAO)), standardizzate a livello internazionale, che contribuisce al miglioramento della sicurezza, qualità e correttezza del commercio mondiale di alimenti.

Il processo previsto dal Codex Alimentarius si suddivide in due fasi ben distinte:

1. Il codice definisce cinque fasi preliminari da attuare **prima** dell'implementazione dei sette principi HACCP, quali la costituzione del gruppo HACCP, la descrizione del processo/prodotto alimentare, la definizione della destinazione d'uso previsto, la costruzione di un diagramma di flusso e la verifica del diagramma di flusso.
2. Implementazione dei **7 principi HACCP**:



*Fig.2: Sistema HACCP*

**1. Individuazione dei pericoli** (biologici, chimici e fisici) associati ad ogni fase e analisi dei rischi. Il gruppo per l'autocontrollo deve fare un elenco di tutti gli eventuali pericoli per ogni fase, materia prima, prodotto intermedio e prodotto finito (inclusi approvvigionamento ed immagazzinamento delle materie prime);

**2. Individuazione dei CCP** (punti di controllo critici) utilizzando la metodologia P X G (Probabilità per Gravità). Si definirà il fattore di rischio che necessiterà dell'adozione dell'albero delle decisioni. La valutazione sarà necessaria per definire il peso della fase, conseguentemente la descrizione delle misure di controllo esistenti da adottare per minimizzare o eliminare il pericolo nelle varie attività di produzione, lavorazione, magazzino e distribuzione;

**3. Definizione dei limiti critici da rispettare.** Può trattarsi di una serie di fattori come temperatura, tempo, pH, grado di umidità, struttura e aspetto;

**4. Definizione delle procedure di monitoraggio.** Le procedure di monitoraggio servono a garantire che i CCP e gli oPRP rimangano nei limiti critici. Il monitoraggio può essere effettuato mediante osservazione o misurazioni ed è in questa fase che si dovranno definire anche le responsabilità delle attività;

**5. Definizione e pianificazione delle azioni correttive,** quando i risultati di monitoraggio rivelano una tendenza a superare i limiti critici del livello di sicurezza. Le azioni correttive devono essere documentate ed immediate;

**6. Definizione delle procedure di verifica.** Queste procedure possono includere attività come l'auditing del sistema HACCP, l'analisi del prodotto e la revisione dei record;

**7. Definizione delle procedure di registrazione,** ovvero raccolta e conservazione di tutti i dati e documenti necessari (piano HACCP, monitoraggio, lista delle azioni correttive e delle modifiche, dati di verifica, ecc.);

La normativa HACCP è dunque uno standard di processo obbligatorio vigente in territorio europeo. Se ci si sposta sulla normativa obbligatoria per la sicurezza alimentare americana, non si parla più di HACCP ma piuttosto di HARPC, acronimo di Hazard Analysis and Risk Based Preventive Control.

## HARPC



*Fig.3: HACCP vs HARPC*

Il **sistema HARPC** si applica solamente alle strutture alimentari operanti negli Stati Uniti che producono, trasformano, imballano, distribuiscono, ricevono, stoccano o importano alimenti per queste ultime. Per gli importatori di prodotti negli Stati Uniti sono stati definiti requisiti di registrazione e monitoraggio specifici. Ciò significa che gli importatori americani devono assicurarsi che i produttori da cui importano siano a norma con le nuove regole americane in materia di sicurezza delle produzioni alimentari.

All'interno di un sistema HARPC, vengono approfonditi i principi della prevenzione e della collocazione dei monitoraggi nel processo. In particolare, diversamente dal HACCP in cui ci si limita ai rischi fisici, chimici e biologici, vengono qui valutati i seguenti rischi in maniera più diretta:

- Pericoli biologici, fisici, chimici e radiologici;
- Tossine naturali, pesticidi, residui di farmaci, materiali decomposti, parassiti, allergeni, additivi colorati e coloranti;
- Pericoli presenti in natura;
- Pericoli introdotti involontariamente;

- Pericoli introdotti intenzionalmente, inclusi atti di terrorismo food defense e food fraud;

I controlli preventivi sono di natura scientifica e tecnologica. Devono essere adeguati a ridurre o prevenire significativamente i pericoli “noti o ragionevolmente prevedibili” per ciascun tipo di alimento soggetto alla normativa FDA (Food and Drug Administration) pertinente.

I sistemi HARPC e HACCP, come si è potuto vedere, sono molto simili, in quanto entrambi sono obbligatori, appartengono alla sezione delle certificazioni di processo e includono l’obbligo di condurre un’analisi dei rischi, implementare controlli, monitoraggio delle fasi e adozione di azioni correttive.

Tuttavia, sono emerse anche delle differenze sostanziali. HACCP è una metodologia progettata per identificare, prevenire e controllare i pericoli a livelli di sicurezza accettabili durante la produzione alimentare, mentre HARPC è uno standard di sicurezza alimentare progettato per prevenire potenziali rischi prevedibili che possono causare malattie durante il consumo. Inoltre, il primo è uno standard normativo, mentre il secondo è una legge obbligatoria degli Stati Uniti promulgata dal FDA ai sensi del Food Safety Modernization Act (FSMA). Infine, HACCP richiede che le strutture di trasformazione degli alimenti identifichino i punti critici di controllo (CCP) e stabiliscano limiti critici, mentre HARPC richiede che le strutture di trasformazione degli alimenti identifichino e implementino controlli preventivi basati sulla scienza o sul rischio, supportati da dati scientifici o letteratura scientifica autentica. Dunque, i requisiti del piano di sicurezza alimentare di HARPC sono più completi della metodica classica, in quanto affronta i problemi di sicurezza alimentare oltre i punti critici di controllo e i limiti critici, richiedendo valutazioni basate sul rischio per identificare potenziali rischi e prevenire che si verifichino.

Analizzati i due grandi sistemi di prevenzione obbligatoria in merito alla sicurezza alimentare, si definiscono di seguito le attestazioni ottenibili su

base volontaria, ad eccezione delle Certificazioni IGP e DOP, dalle aziende dell'industria agroalimentare secondaria.

### Certificazione ISO 22000



*Fig.4: Certificazione ISO 22000*

La **Certificazione ISO 22000** è lo standard di processo fondamentale per i sistemi di gestione della sicurezza nel settore agroalimentare. La norma ISO 22000 è stata concepita per essere compatibile e armonizzata con le altre norme internazionali sui sistemi di gestione, come la ISO 9001. Essa può quindi essere integrata con i sistemi e i processi di gestione già esistenti. L'ISO 22000 è applicabile a tutte le aziende che operano in modo diretto o indiretto lungo la filiera agroalimentare, inclusi i produttori, trasformatori, distributori ed utilizzatori di packaging, materiali e oggetti destinati ad entrare in contatto con alimenti (MOCA). I principali vantaggi della certificazione sono il miglioramento tangibile e dimostrabile delle performance in ambito di sicurezza agroalimentare e la maggiore garanzia di conformità alle norme. Più precisamente, questa norma permette alle aziende di sviluppare e implementare un sistema di gestione della sicurezza agroalimentare all'interno di un quadro di riferimento ben definito, ma sufficientemente flessibile per adattarsi alle specifiche esigenze aziendali. Essa consente di comprendere e individuare i rischi concreti a cui possono essere esposti sia l'azienda che i consumatori e di creare strumenti per misurare, monitorare e migliorare in modo efficace tutte le prestazioni legate alla sicurezza alimentare, garantendo al contempo il pieno rispetto delle normative vigenti e dei requisiti essenziali.

## Certificazione ISO 22005



*Fig.5: Certificazione ISO 22005*

La **Certificazione ISO 22005** definisce i requisiti dei sistemi di gestione per la tracciabilità di filiera nel settore agroalimentare. Pur non essendo obbligatoria, la sua adozione può offrire un significativo vantaggio competitivo per le aziende alimentari, soprattutto nei mercati in cui tracciabilità e trasparenza della filiera sono particolarmente apprezzate.

Tale norma di processo è progettata per favorire il rispetto dei requisiti igienico-sanitari e della qualità dei prodotti, rispondendo al contempo alle esigenze specifiche dei consumatori. Attraverso la sua implementazione, è possibile documentare con chiarezza la storia e l'origine dei prodotti, facilitando interventi tempestivi in caso di ritiro o richiamo delle merci. Inoltre, consente di definire con precisione le responsabilità di ciascun operatore all'interno della filiera e di semplificare la gestione delle informazioni chiave sui prodotti agroalimentari. Questo approccio consente di comunicare in modo trasparente e dettagliato con i principali stakeholder e i consumatori, assicurando la conformità agli obblighi normativi locali ed internazionali, e contribuisce a migliorare il rendimento operativo, ad incrementare la produttività e ad ottimizzare i profitti dell'organizzazione.

## Certificazione FSSC 22000



*Fig.6: Certificazione FSSC 22000*

La **Certificazione FSSC (Food Safety System Certification) 22000** definisce i requisiti dei sistemi di gestione per la sicurezza, qualità e legalità alimentare a livello globale. Si basa su tre elementi principali:

1. ISO 22000: lo standard internazionale per i sistemi di gestione della sicurezza alimentare;
2. ISO/TS 22002-1 (o altri PRP - Programmi di Prerequisiti specifici per il settore): che, come sopra citato, definisce i quindici requisiti tecnici di base, quali l'igiene e le buone pratiche di fabbricazione;
3. Requisiti aggiuntivi di FSSC: specifiche aggiuntive non coperte da ISO 22000, come il controllo delle frodi alimentari e il monitoraggio delle allergie;

Dunque, lo standard di processo FSSC 22000 estende ISO 22000 aggiungendo i PRP (sopra definiti) e ulteriori requisiti specifici. Quindi, la FSSC 22000 è più completa, poiché combina lo standard gestionale con requisiti pratici e dettagliati di sicurezza alimentare, risultando spesso preferita dai grandi rivenditori e dai marchi internazionali. Non è obbligatoria per legge, ma molte aziende della grande distribuzione e multinazionali alimentari la richiedono come condizione per collaborare con i propri fornitori.

## Certificazione BRCGS



*Fig.7: Certificazione BRCGS*

La **Certificazione BRCGS (Brand Reputation Compliance Global Standards)** è uno standard di prodotto, riconosciuto dal Global Food Safety Initiative (GFSI) per la promozione della sicurezza alimentare, nato dalla GDO anglosassone per la qualifica dei produttori di alimenti a marchio delle catene in UK e USA. Viene richiesta dai maggiori retailer al mondo di natura anglosassone (Tesco, Walmart) per lavorare nella GDO anglosassone. Aiuta le aziende a selezionare e qualificare i loro fornitori e fornisce un quadro per gestire la sicurezza, l'integrità, la legalità e la qualità dei prodotti nell'industria di produzione, lavorazione e confezionamento di alimenti e ingredienti alimentari. I requisiti dello standard riguardano il sistema di gestione della qualità, il sistema HACCP e i programmi di prerequisiti, tra cui i requisiti GMP (Good Manufacturing Practice), GLP (Good Laboratory Practice) e GHP (Good Hygiene Practice). Tale standard consente alle aziende di dimostrare il proprio impegno per la sicurezza alimentare, riducendo il rischio di implicazioni legali in caso di incidenti e attestando l'adozione di tutte le misure preventive necessarie. Inoltre, facilita l'implementazione di un sistema di gestione che garantisca il rispetto degli standard di qualità, sicurezza e conformità legale, con particolare attenzione alle normative dei Paesi in cui i prodotti verranno distribuiti. Infine, contribuisce a migliorare la gestione della sicurezza alimentare attraverso un controllo efficace e un monitoraggio continuo dei fattori critici e si pone come obiettivo quello di ridurre sprechi, rilavorazioni e ritiri di prodotti dal

mercato, ottimizzando i processi produttivi e migliorando l'efficienza complessiva.

### Certificazione IFS



*Fig.8: Certificazione IFS*

La **Certificazione IFS (International Featured Standard)** è anch'esso uno standard di prodotto riconosciuto dal GFSI per lo scopo analogo a quello visto sopra, ed è il riferimento per Italia, Francia, Belgio e Germania. Tale attestazione viene richiesta da importanti retailer come Conad, Lidl, Carrefour, Metro, Esselunga e Coop per poter lavorare come fornitori della Grande Distribuzione Organizzata nei paesi sopra citati. Così come per la BRCGS, i requisiti dello standard sono relativi al sistema di gestione della qualità, al sistema HACCP e ai programmi di prerequisiti pertinenti, compresi i requisiti GMP, GLP e GHP. Tale attestazione mira a migliorare la fiducia dei consumatori e dei partner commerciali, ridurre i rischi legati alla sicurezza alimentare, promuovere il miglioramento continuo dei processi aziendali e facilitare l'accesso a nuovi mercati e opportunità di business.

Nessuna delle due certificazioni può essere richiesta da aziende della produzione alimentare appartenenti al settore primario.

Sia la BRC sia la IFS sono quindi certificazioni che impattano direttamente sui fornitori della GDO. Operare come fornitore della GDO significa rispettare allegati qualità definiti nelle trattative commerciali. Gli allegati qualità sono documenti che accompagnano i contratti tra produttori alimentari e la grande distribuzione, nei quali vengono specificate le norme,

le certificazioni e gli standard di qualità che i prodotti devono rispettare per essere venduti nelle catene di supermercati e ipermercati. Questi allegati servono a garantire la sicurezza, la salubrità, la qualità e la legalità dei prodotti alimentari offerti ai consumatori, nonché a proteggere la reputazione delle catene di distribuzione e dei produttori stessi. Gli allegati qualità si basano sui requisiti dei due più importanti standard per la certificazione alimentare. Questo perché questi standard nascono proprio dall'impegno della GDO, allo scopo di fornire un protocollo di qualifica standardizzato per la valutazione dei produttori di alimenti commercializzati nelle catene. Quindi i requisiti dei quali si dovrà dare evidenza durante la fase di qualifica come fornitore e di mantenimento della stessa saranno incentrati sullo standard BRCS, se la qualifica dovrà avvenire per una catena di natura anglosassone, mentre sullo standard IFS per le catene franco-tedesche ed italiane. In generale, la ISO 22005, BRC e IFS sono riconosciute dal GFSI (Global Food Safety Initiative) e sono nella fattispecie norme "private", ovvero di proprietà di un marchio. La ISO 22000, invece, è una norma "pubblica".

In ultima battuta, restano da definire le certificazioni Kosher e Halal e le certificazioni di Denominazione di Origine Protetta (DOP) e Indicazione Geografica Protetta (IGP).

### Certificazioni Halal e Kosher



*Fig.9: Certificazioni Halal e Kosher*

Le **Certificazioni Kosher e Halal** sono ottenibili su base volontaria, ma allo stesso tempo risultano essere necessarie ed indispensabili per specifiche nicchie di mercato. Queste certificazioni garantiscono che i prodotti rispettino i requisiti alimentari delle comunità ebraiche (Kosher) e islamiche (Halal). Non esiste una data di introduzione univoca per entrambe le certificazioni, poiché tutte e due derivano da antichi precetti religiosi, piuttosto che da standard moderni come le certificazioni ISO. Tuttavia, i processi formali di certificazione per l'industria alimentare si sono sviluppati nel corso del XX secolo.

La certificazione Kosher, in particolare, risale all'inizio del XX secolo negli Stati Uniti, quando le prime organizzazioni iniziarono a formalizzare il processo per garantire la conformità dei prodotti alle leggi alimentari ebraiche. Tra le prime organizzazioni vi fu l'Union of Orthodox Jewish Congregations of America (OU), fondata nel 1923, che rimane tuttora una delle principali autorità di certificazione Kosher a livello mondiale.

La certificazione Halal, invece, come processo organizzato, ha iniziato a svilupparsi nel XX secolo. Con l'aumento della popolazione musulmana nei Paesi non islamici, soprattutto negli anni '70 e '80, sono emerse organizzazioni dedicate alla certificazione Halal, come l'Islamic Food and Nutrition Council of America (IFANCA). I regolamenti Halal formali si sono poi diffusi in tutto il mondo, con Paesi come la Malesia che hanno stabilito standard nazionali per il cibo Halal negli anni '80.

### Certificazioni IGP e DOP



*Fig.10: Certificazioni IGP e DOP*

**Le Certificazioni di Denominazione di Origine Protetta (DOP) e Indicazione Geografica Protetta (IGP)** sono invece attestazioni di prodotto obbligatorie rispettivamente per i prodotti DOP e IGP. Entrambe del 1992, queste certificazioni garantiscono che il prodotto abbia un legame con il territorio e che segua un disciplinare di produzione specifico. Per il DOP fondamentale è che sia la produzione, sia la trasformazione e sia l'elaborazione avvengano nella stessa area geografica mentre per IGP è fondamentale che la produzione, e/o la trasformazione, e/o l'elaborazione avvengano nell'area stessa. Diversamente dalla DOP, per l'IGP è sufficiente che almeno una delle fasi sopra menzionate si svolga nella zona specificata.

## CAPITOLO 2: Tracciabilità nell'Industria Agroalimentare Secondaria

Le certificazioni alimentari sono strumenti fondamentali per garantire la sicurezza e la qualità dei prodotti lungo l'intera filiera alimentare. Uno degli aspetti centrali di queste certificazioni è la tracciabilità, che consente di seguire il percorso di ciascun prodotto dal fornitore iniziale fino al consumatore finale. La tracciabilità permette alle aziende di documentare e monitorare ogni fase della produzione e distribuzione, aiutando a identificare eventuali contaminazioni o difetti e a intervenire tempestivamente. Grazie a numerosi studi condotti dalla *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)* viene sottolineato come una solida tracciabilità non solo faciliti il ritiro rapido di prodotti non sicuri, riducendo così i rischi per la salute pubblica, ma aumenti anche la trasparenza della filiera, elemento essenziale per la fiducia dei consumatori. Inoltre, come riportato da *Accredia* relativamente agli obiettivi dell'Agenda ONU entro il 2030, *"i governi hanno trovato nell'Infrastruttura della Qualità (IQ) un set di strumenti necessari ad accompagnare il percorso di crescita sostenibile. Tra gli elementi dell'IQ, un credibile sistema di tracciabilità e verifica delle caratteristiche dei prodotti è strategico per infondere fiducia ai consumatori e risolvere il fallimento del mercato derivante dal disallineamento informativo tra produttore e consumatore. L'effetto sull'utilità del consumatore e, in definitiva, sullo sviluppo dei mercati è infatti particolarmente importante per tutti quei beni che impattano sulla salute e il benessere di chi li consuma."* Dunque, un sistema di tracciabilità efficiente incoraggia pratiche di produzione responsabili e sostenibili, poiché ogni passaggio viene documentato e può essere controllato per conformità agli standard di sicurezza e sostenibilità.

## Revisione letteratura scientifica

Proprio sul tema della tracciabilità alimentare, è stata condotta nella presente tesi un'analisi critica della letteratura scientifica. Effettuare una revisione della letteratura scientifica implica andare a verificare e sintetizzare le conoscenze disponibili sull'argomento in esame, raccogliendo dati e risultati da fonti scientifiche attendibili. Tale procedura consente di ottenere una visione di insieme delle diverse ricerche sperimentali condotte sull'argomento, mettendo alla luce i risultati ritenuti più importanti, le metodologie utilizzate, le controversie presenti e le lacune di conoscenza esistenti. La revisione della letteratura è importante per capire in che modo la propria indagine si colloca in un contesto scientifico specifico, per aggiornarsi sulle innovazioni del settore e per formulare nuovi quesiti di ricerca e nuove metodologie sperimentali. Dunque, una buona revisione della letteratura fornisce una solida base teorica e un contesto critico su cui costruire nuove ricerche, garantendo che queste siano innovative e ben supportate dalle conoscenze preesistenti.

## Metodologia PRISMA

Per lo sviluppo di questo specifico lavoro di tesi sono state consultate ed analizzate diverse fonti, quali articoli scientifici, capitoli di libri, conference paper e literature review. È stata condotta la ricerca su Scopus filtrando per parole chiave, titolo dell'articolo e contenuto dell'abstract, usando la stringa: "Traceability **AND** ("Food Industry" OR "Food Manufacturing" OR "Agrifood System" OR "Food Supply Chain") **AND** ("Quality Control")".

Per poter arrivare ad ottenere un numero ragionevole di articoli, è stato applicato il Metodo PRISMA. PRISMA è l'acronimo di Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses. Tale metodologia risulta essere un quadro di riferimento per la segnalazione di revisioni sistematiche, pensato per aiutare i ricercatori a documentare in modo chiaro e trasparente ogni fase del processo, rendendo i risultati più affidabili e replicabili e permettendo di eseguire un'analisi rigorosa e sistematica delle

fonti, supportando decisioni basate su evidenze scientifiche solide (Page et al. 2021).

All'interno del flowchart, i criteri di ammissibilità sono essenziali per valutare la validità, l'applicabilità e la completezza di una revisione letteraria (Liberati et al. 2009). Vale la pena evidenziare che i criteri di esclusione sono stati progettati per mettere in atto un'esclusione progressiva ed incrementale. Ad esempio, se l'articolo è stato rifiutato dal primo criterio di esclusione, l'articolo viene automaticamente escluso e non viene effettuata alcuna ulteriore verifica dei criteri di esclusione aggiuntivi.

### Risultato e analisi

Utilizzando la stringa sopra citata, sono stati ottenuti 115 documenti. Il primo criterio di esclusione utilizzato è stato l'arco temporale, in quanto si è scelto di considerare solamente articoli e paper pubblicati tra il 2017 e il 2024. Questo ha portato ad avere 73 documenti rimanenti. Dei 73 restanti, usando il filtro sulla lingua inglese, ne sono stati esclusi due, arrivando ad una quota pari a 71. Dei 71 rimanenti, operando sull'area di interesse e considerando solamente "Engineering, Computer science e Agricultural and Biological Sciences", ne sono rimasti 49. Dei 49 restanti, rimuovendo quelli non sufficientemente esaustivi, ne sono rimasti 39, che risulta essere il numero finale dei documenti considerati in questa revisione letteraria.

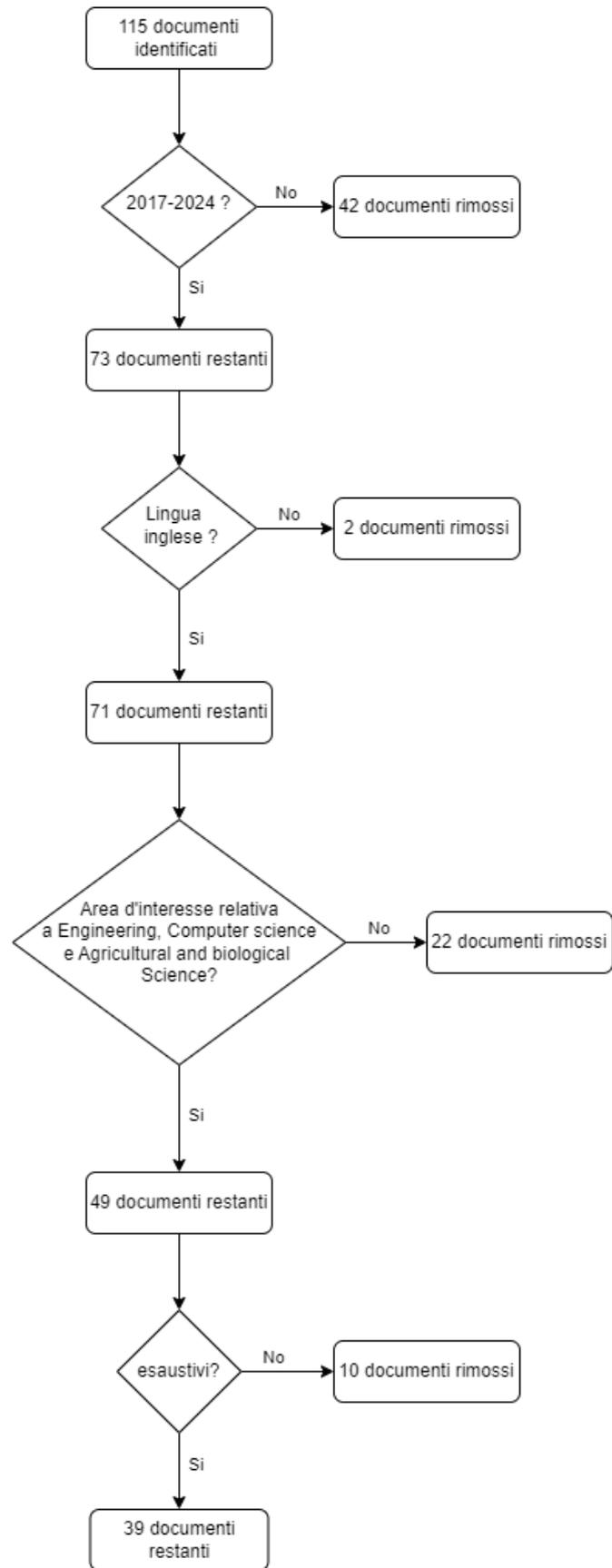
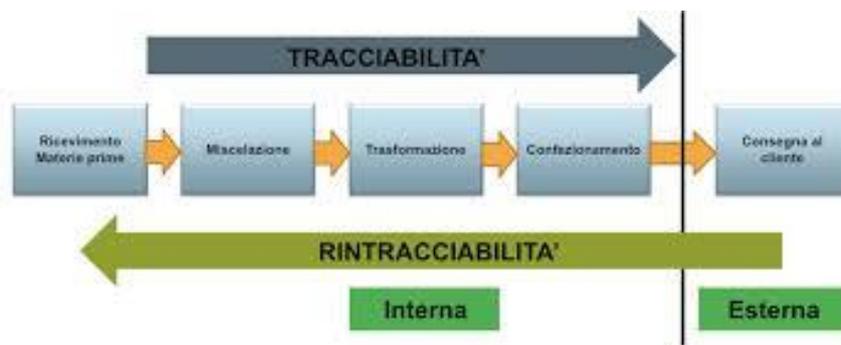


Fig.11: Applicazione Metodo PRISMA

A partire dal risultato ottenuto, segue un'analisi accurata e approfondita sul tema della tracciabilità nel settore agroalimentare secondario.

### Definizione di Tracciabilità

In seguito a numerosi scandali agroalimentari, la tracciabilità è stata istituita come un obbligo legale volto a migliorare l'igiene e la sicurezza alimentare. Oggi essa ha acquisito una duplice funzione: oltre a rispondere alla crescente domanda dei consumatori per maggiore trasparenza e sicurezza, rappresenta un elemento chiave per migliorare la competitività delle imprese e ottimizzare i processi produttivi. Questo sistema consente di identificare con rapidità le responsabilità lungo l'intera filiera produttiva (Betti et al. 2024).



*Fig.12: Tracciabilità vs Rintracciabilità*

La tracciabilità si configura come un processo complesso che coinvolge gestione, archiviazione e comunicazione di dati, documentando ogni fase del percorso produttivo, dal "monte" (origine) al "valle" (destinazione finale) del prodotto. Questo processo è anche detto di tracking. Oltre al tracking, tale sistema permette il processo inverso, ossia la rintracciabilità (anche detto processo di tracing), che collega tutte le informazioni registrate per risalire alla storia di un prodotto da valle a monte della filiera produttiva (Benatia et al. 2018).

Questa forma di tracciabilità, orientata alla rintracciabilità, è definita tracciabilità di filiera, la quale si basa su una stretta cooperazione tra tutte le aziende coinvolte e richiede la partecipazione attiva di ogni soggetto

attraverso sistemi di tracciabilità interna. La tracciabilità di filiera è un processo non governabile da un singolo soggetto, ma basato sulle relazioni tra gli operatori ed è proprio per questo motivo che necessita del coinvolgimento di tutti i soggetti che hanno contribuito alla formazione del prodotto (Kamann, Alfaro, e Sebrek, 2019). La tracciabilità di filiera richiede come prerequisito cardine ed essenziale l'implementazione di sistemi di tracciabilità interna. Quest'ultima è la tracciabilità lungo tutto il processo o la trasformazione svolta da ciascun partner sui suoi prodotti. Ha luogo indipendentemente dai partner commerciali e si concretizza in una serie di procedure interne, specifiche di ciascuna azienda, che consentono di risalire alla provenienza dei materiali, al loro utilizzo e alla destinazione dei prodotti. La tracciabilità interna implica che ciascun attore registri dettagli sull'origine dei materiali, sui controlli di qualità e sulle tipologie di lavorazione e destinazioni del prodotto lungo tutto il processo produttivo. Tutti gli attori della catena di fornitura devono coordinarsi e partecipare per garantire un risultato affidabile (Corallo, Latino, Menegoli, e Pontrandolfo 2020).

La rintracciabilità è un utile strumento di tutela dei consumatori in quanto permette di facilitare i controlli e di richiamare i prodotti in caso si verificasse la necessità. Nonostante la qualità e la sicurezza in campo alimentare siano migliorate, la fiducia del consumatore, soprattutto nel settore agroalimentare, è diminuita. Ciò dipende dal fatto che i contatti fra i consumatori ed i produttori di alimenti si sono notevolmente dilatati, acuendo nei consumatori la sensazione di poca comprensione dei meccanismi che regolano la filiera. La tracciabilità è un tentativo di ridare fiducia al consumatore, rendendo trasparente il sistema e permettendo un contatto fra chi produce e chi consuma (Betti et al. 2024). L'obbligo di portare informazioni al consumatore introduce la necessità di un trasferimento di dati lungo la filiera e rende indispensabili solidi sistemi di tracciabilità interna e un sistema efficace di comunicazione per il trasferimento delle informazioni lungo la filiera.

A livello comunitario, il mercato europeo ha classificato la tracciabilità in due livelli distinti: tracciabilità obbligatoria e tracciabilità volontaria. La tracciabilità obbligatoria è focalizzata su finalità finanziarie e fornisce informazioni basilari sui prodotti, spesso senza includere dettagli qualitativi. La tracciabilità volontaria, invece, permette a ogni attore della catena di selezionare liberamente quali dati aggiuntivi raccogliere per migliorare la qualità del monitoraggio. Sebbene non obbligatoria, la tracciabilità volontaria è essenziale per integrare i dati obbligatori con informazioni più approfondite, arricchendo così il sistema di tracciabilità complessivo. Tuttavia, essa rappresenta una sfida in quanto ogni attore può applicare standard e metodi diversi, generando una grande varietà di dati (Corallo et al. 2018).



*Fig.13: Regolamento CE n.178/2002*

Un passo significativo verso la regolamentazione della tracciabilità in Europa è stato compiuto con il Regolamento CE sopra citato, che ha istituito l'EFSA, acronimo di European Food Safety Authority (Autorità europea per la sicurezza alimentare), e ha definito i principi, le procedure e i requisiti della legislazione alimentare, la quale individua, come figura responsabile per la sicurezza degli alimenti, l'operatore del settore alimentare (OSA).

Tale regolamento, entrato in vigore il 1° gennaio 2006 in tutta l'Unione Europea, ha imposto che tutte le aziende alimentari e mangimistiche operanti sul territorio europeo debbano disporre di un sistema di rintracciabilità di alimenti e mangimi. Si è introdotta la cosiddetta "procedura di rintracciabilità", uno strumento che ha offerto ai consumatori la possibilità

di fare scelte consapevoli attraverso *“la possibilità di ricostruire e seguire il percorso di un alimento, di un mangime, di un animale destinato alla produzione alimentare o di una sostanza destinata o atta ad entrare a far parte di un alimento o di un mangime attraverso tutte le fasi della produzione, della trasformazione e della distribuzione”* (Cruz e Miguel Rosado Cruz 2019).

### Sistemi di tracciabilità attualmente in uso: stato dell'arte

Con la pubblicazione del Regolamento CE n.178/2002, vengono stabilite le procedure relative a questioni aventi un'incidenza diretta o indiretta sulla sicurezza degli alimenti e dei mangimi, con l'obiettivo di tracciare qualsiasi alimento, mangime o ingrediente lungo tutta la filiera alimentare. In questo contesto, la tracciabilità deve garantire le giuste informazioni sui prodotti verso fornitori e clienti, al fine di evitare frodi alimentari e proteggere la salute pubblica, garantendo che i consumatori abbiano fiducia negli alimenti disponibili sul mercato e promuovendo, allo stesso tempo, un approccio basato sulla prevenzione dei rischi lungo tutta la filiera alimentare.

Più precisamente, definendo un sistema di tracciabilità, occorre fare una distinzione tra “tracciabilità di prodotto” e “tracciabilità documentale relativa ai controlli qualità effettuati lungo il processo produttivo”. La prima è relativa alla capacità di tracciare il percorso di un prodotto alimentare lungo tutta la filiera, dalla materia prima fino al prodotto finito che arriva al consumatore finale mentre la seconda è legata al raccogliere, registrare e conservare in modo sistematico tutte le informazioni relative ai controlli effettuati sulle materie prime, durante le fasi di trasformazione e sui prodotti finiti.

### Tracciabilità del prodotto

Di seguito, si approfondisce la tracciabilità di prodotto in termini di materia prima (MP) lungo il processo produttivo, con relativa analisi biologica del DNA, e in termini di prodotto finito (PF) nella fase di distribuzione a valle, con i relativi sistemi di tracciabilità utilizzati.

## Tracciabilità della MP lungo il processo: DNA biologico

La tracciabilità biologica basata sul DNA della MP rappresenta una soluzione innovativa all'interno dell'industria agroalimentare secondaria. Si tratta di una tecnica emergente di tracciabilità, il cui scopo principale è quello di poter tracciare la MP lungo tutta la filiera produttiva, dal momento in cui entra nel processo come alimento a sé stante fino a quando, a seguito di processi di trasformazione, viene assemblata con altre MP per ottenere il PF finale (Kalaitzis e El-Zein 2016).

A differenza dei metodi tradizionali basati sulla valutazione di caratteri morfologici e biochimici della MP, la cui utilità è limitata dall'influenza delle condizioni ambientali e dalle difficoltà di analisi dei prodotti processati, tracciare la MP sulla base del proprio codice genetico permette di risalire all'origine e all'autenticità della MP stessa e, per di più, di seguirla in ogni sua trasformazione.

Per capire meglio questo sistema di tracciabilità, va fatto un appunto sulla molecola di DNA. L'acido desossiribonucleico o deossiribonucleico (DNA) è l'acido nucleico che contiene le informazioni genetiche di tutti gli esseri viventi. Si tratta di una molecola a doppia elica, la quale viene mantenuta attraverso dei legami ad idrogeno tra le basi azotate (che possono essere Adenina, Citosina, Guanina, Timina), e la sequenza di queste costituisce il codice genetico. L'analisi del codice genetico permette di individuare delle differenze, anche di una singola base, specifiche per ciascun essere vivente. Ed è proprio su questo concetto che si basa la tracciabilità genetica perché l'analisi della sequenza delle basi azotate rappresenta una carta d'identità biologica (Čapla et al. 2020).

Proprio per analizzare le differenze legate alle basi azotate, vengono impiegati dei marcatori molecolari, i quali costituiscono uno strumento potente e affidabile per la caratterizzazione varietale poiché consentono di definire l'identità genetica di ciascuna pianta attraverso la produzione di un profilo molecolare individuo-specifico. Tra di essi, soprattutto negli ultimi anni, hanno avuto un notevole successo gli SSR. Gli SSR sono delle

sequenze semplici ripetute, costituite da gruppi di nucleotidi (1-6 nucleotidi) che si ripetono in determinate regioni genomiche n volte (il numero di ripetizioni può variare tra i diversi organismi). Gli SSR hanno il vantaggio di non essere influenzabili dall'ambiente, di essere co-dominanti, di essere identificabili in tutti gli esseri viventi in qualunque stadio di sviluppo e di essere altamente polimorfici e riproducibili. Il ciclo di analisi che subiscono i marcatori molecolari è il seguente: si parte dall'estrazione del DNA dalla MP in questione, si passa all'amplificazione di questi marcatori mediante l'analisi PCR (Polymerase Chain Reaction) che fornisce informazioni sufficienti per l'identificazione varietale, si analizzano al sequenziatore i profili genetici derivanti dai frammenti nucleotidici amplificati nelle diverse varietà di MP, per poi compararli tra loro e analizzare i dati ottenuti sulla base di metodi statistici (Kalaitzis e El-Zein 2016).

L'analisi del DNA mediante i marcatori molecolari rappresenta, dunque, uno strumento di identificazione varietale estremamente affidabile, in grado di riconoscere particolari regioni o varietà di colture. Confrontando i profili genetici dei prodotti, è possibile confermare la loro provenienza e rilevare eventuali frodi. In questo contesto, nel lavoro di (Guido et al. 2020) viene trattato un sistema di tracciabilità per la catena di fornitura dell'olio extravergine di oliva, utilizzando un consorzio di agricoltori calabresi come caso di studio. Il sistema proposto utilizza, con l'obiettivo di certificare la genuinità del prodotto come "Made in Italy" e biologico, l'analisi del DNA, esponendo i vantaggi derivanti dall'applicazione di tale sistema di tracciabilità. In primo luogo, anche se il DNA è comunque alterato da vari processi di trasformazione come stress meccanico e riscaldamento, è più resistente e termostabile rispetto alle proteine e altri marcatori biochimici. Ciò porta inevitabilmente a identificare la MP di riferimento in ogni fase del processo, anche e soprattutto all'interno di un prodotto assemblato. In secondo luogo, il DNA può essere potenzialmente estratto da qualsiasi matrice (incluso, ad esempio, il liquido di governo), perché è presente in pressoché tutte le cellule di un organismo. Infine, a causa della degenerazione del codice genetico e della presenza di regioni genomiche non codificanti, il DNA offre molte più informazioni rispetto alle proteine.

Per tutti questi motivi, si prevede che l'analisi biologica del DNA, attualmente poco implementata a causa della sua complessità, diventerà parte integrante dei sistemi di tracciabilità all'interno delle filiere agro-alimentari, offrendo così un livello aggiuntivo di sicurezza e affidabilità sulla MP in entrata.

### Tracciabilità del PF in fase di distribuzione

Analizzato di sopra il sistema di tracciabilità basato sul DNA della MP in ingresso alla filiera, si valutano di sotto i possibili profili da implementare relativamente alla tracciabilità del prodotto a valle, col fine di superare i sistemi di tracciabilità del passato che ponevano le proprie basi su operazioni manuali svolte dai dipendenti, i quali registravano le informazioni in loco per poi trascriverle su registri cartacei o per inserirle nei sistemi digitali. Questo processo manuale, tuttavia, era vulnerabile a errori umani, compromettendo la qualità dei dati, risultando inefficiente in termini di risorse e aumentando il rischio di perdita di informazioni. Dunque, dal momento in cui la gestione della tracciabilità nel settore agroalimentare secondario richiede la raccolta di un grande volume di dati lungo tutta la filiera, i sistemi di tracciabilità, elencati in *Tabella 2*, assumono un ruolo sempre più cruciale nel garantire la sicurezza, la qualità e la trasparenza dei prodotti dalla fase di trasformazione del PF in poi.

<b>Nome tecnologia</b>	<b>Anno di primo utilizzo</b>	<b>Ambiti di applicazione</b>	<b>Studi di riferimento</b>
<b><u>IoT</u></b>	1999	Gestione, monitoraggio e controllo dell'intera catena di approvvigionamento alimentare	(Kurnia et al. 2023), (Liberty et al. 2024), (Bougdira, Akharraz, e Ahaitouf 2019)(Yujun et al. 2021)

<b><u>RFID</u></b>	1948	Inizialmente in ambito militare, oggi usati principalmente come strumento di supporto all'IoT nell'ottica della tracciabilità e sicurezza alimentare	(Kamann, Alfaro, e Sebrek, 2019), (Turan e Ozturkoglu 2022), (Lin, Shi e Zhou, 2022)
<b><u>WSN</u></b>	1978	Inizialmente in ambito militare, oggi usati principalmente per il monitoraggio di linee e/o impianti industriali, oltre che nell'agricoltura di precisione	(Dudina, Vasiliev e Mandrakov 2021)
<b><u>Datamatrix &amp; QR Code</u></b>	1993, 1994	Applicazioni industriali e logistiche relative alla tracciabilità della supply chain, informazioni aggiuntive sui prodotti, come origine e qualità	(Corallo, Latino, Menegoli, e Pontrandolfo 2020), (Guido et al. 2020)
<b><u>NFC</u></b>	2002	Supporto all'IoT nell'ottica della gestione e controllo della catena alimentare di approvvigionamento	(Conti 2022)

*Tabella 2: Sistemi di tracciabilità in fase di distribuzione del prodotto nell'industria agroalimentare secondaria*

L'industria agroalimentare è oggi uno dei pilastri fondamentali dell'economia europea, con l'Europa in testa alle esportazioni mondiali del settore, raggiungendo un valore di 19,7 miliardi di euro a maggio 2024 («EU Agri-Food Trade Stays on Course - European Commission» 2024).

## Internet of Things (IoT)

Spinta dal potenziale economico di questo settore, negli ultimi decenni si è assistito a significativi progressi nei processi e prodotti automatizzati e nelle tecnologie di comunicazione applicati all'agroalimentare. Questi sviluppi hanno portato alla diffusione del concetto di **Internet delle cose (IoT)**, che ha rivoluzionato la raccolta dei dati rendendola più rapida e affidabile.

L'espressione "*Internet of Things*" (IoT) è stata formulata per la prima volta nel 1999 dall'ingegnere inglese Kevin Ashton, cofondatore dell'Auto-ID Center del Massachusetts Institute of Technology. Affinché un oggetto possa essere definito Smart, ossia Intelligente, l'oggetto IoT deve essere identificabile, ovvero dotato di un identificativo univoco nel mondo digitale. Deve poi essere connesso, per poter trasmettere e ricevere informazioni, e deve anche consentire un'analisi del suo stato di funzionamento, della sua localizzazione e della sua tracciabilità (origine e movimentazione). Inoltre, deve essere in grado di interagire con l'ambiente ed elaborare dati, attraverso la misurazione di determinati parametri ambientali e il monitoraggio di variabili di flusso, come i consumi.

La crescita nell'utilizzo dell'IoT non ha avuto luogo solamente nelle grandi realtà aziendali ma è riuscita anche ad abbracciare il settore delle PMI agroalimentari, il cosiddetto "*SME Food Sector*" (Jose e Shanmugam 2019), in cui sono stati implementati con successo sistemi di tracciabilità intelligenti mediante i quali si è riusciti a realizzare l'identificazione del prodotto, l'analisi degli ingredienti, il monitoraggio delle condizioni di trasporto e stoccaggio, e la raccolta di dati in ogni fase della lavorazione e produzione. Tramite uno studio australiano viene dimostrato che, sebbene i sistemi cartacei supportati da semplici fogli di calcolo Excel siano ampiamente utilizzati per la registrazione dei dati, tecnologie come l'IoT offrono sistemi più robusti, consentendo il collegamento esplicito dei dati necessari in tempo reale (Kurnia et al. 2023).

Grazie all'IoT, diversi dispositivi possono connettersi a Internet e trasmettere dati utili tramite sensori wireless. Una rete di sensori raccoglie

continuamente informazioni che possono essere utilizzate per prendere decisioni strategiche basate su dati aggiornati e precisi. Questi dati vengono inviati ai server per essere elaborati e attivare azioni specifiche, come il monitoraggio della temperatura, dell'umidità o del movimento di oggetti. In merito a quest'ultimo aspetto, Liberty et al. (2024) illustrano l'importanza dell'integrazione delle tecnologie **IoT con i sistemi robotici**.

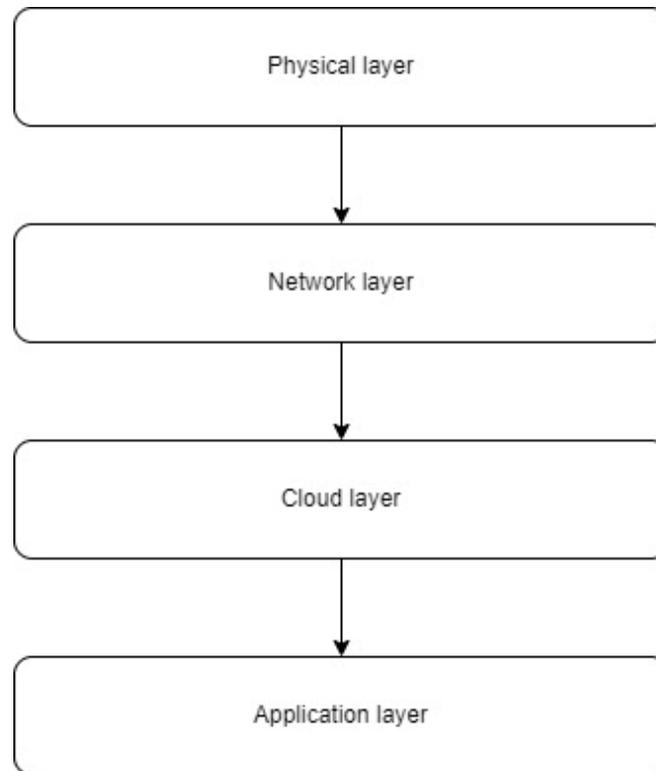


*Fig.14: IoT integrato con i sistemi robotici*

I robot, combinati con un sistema di Internet of Things, possono trasmettere dati in tempo reale a sistemi di gestione centralizzati. Questa capacità consente il monitoraggio continuo dei processi produttivi e l'identificazione immediata di eventuali deviazioni o anomalie che potrebbero compromettere la qualità o la sicurezza del prodotto. L'accesso ai dati in tempo reale aiuta i produttori a rispondere rapidamente a potenziali problemi, migliorando la capacità di risalire alla fonte dei problemi in modo rapido ed efficiente, riducendo così al minimo l'impatto sulla produzione e sulla sicurezza dei consumatori (Bougdira, Akharraz, e Ahaitouf 2019). Questa reattività immediata garantisce che le azioni correttive possano essere implementate senza ritardi, salvaguardando ulteriormente l'integrità del prodotto e mantenendo la fiducia dei consumatori. Dunque, l'integrazione delle tecnologie con l'IoT non solo semplifica il flusso di lavoro, ma funge anche da misura preventiva contro potenziali guasti (Yujun et al. 2021).

Nell'ambito della catena di fornitura alimentare supportata dalla tecnologia IoT, (Reddy, Devi, e Kavita 2023) e (Bougdira, Ahaitouf, e Akharraz 2019) presentano un diagramma a blocchi, illustrato nella Fig.15, che rappresenta

i quattro livelli tecnologici interconnessi che collaborano per fornire i dati essenziali alla tracciabilità. Tali livelli contribuiscono a migliorare i processi di identificazione, tracciabilità, monitoraggio e gestione delle informazioni.



*Fig.15: Livelli tecnologici in un sistema di tracciabilità basato sull' IoT di (Reddy, Devi, e Kavita 2023) e (Bougdira, Ahaitouf, e Akharraz 2019)*

1. **Physical Layer** (livello fisico): comprende le strutture materiali, come sensori e dispositivi (ad esempio RFID, QR code, Datamatrix), che raccolgono dati sulla filiera alimentare;

2. **Network Layer** (livello di rete): questo livello si occupa di instradare i dati dal livello fisico verso destinazioni come sistemi centrali o piattaforme cloud per l'elaborazione e l'analisi. Grazie all'infrastruttura di rete, con gateway e protocolli di comunicazione, si garantiscono sicurezza e affidabilità nella trasmissione delle informazioni;

3. **Cloud Layer** (livello cloud): in questa fase, i dati acquisiti vengono archiviati ed elaborati su una piattaforma cloud, che fornisce uno spazio di analisi e conservazione. Il cloud consente alle parti coinvolte di accedere

facilmente alle informazioni, dando loro una visione chiara e aggiornata della filiera alimentare;

4. **Application Layer** (livello applicativo): composto da vari software, questo livello rende disponibili in tempo reale le informazioni sulla filiera agli interessati. Le applicazioni, come quelle per dispositivi mobili, permettono agli utenti di scansionare un QR code per accedere immediatamente ai dati di tracciabilità del prodotto presenti nel cloud;

Tra gli strumenti abilitanti all'IoT, seguendo il più possibile un ordine cronologico, vi sono, allo stato dell'arte, le tecnologie elencate di sotto:

### Radio Frequency Identification (RFID)



*Fig.16: IoT integrato con tecnologia RFID*

Uno dei primissimi strumenti di supporto all'IoT, cresciuto notevolmente negli ultimi anni, è rappresentato dalla tecnologia **RFID (Radio Frequency Identification)**, considerata una versione avanzata del codice a barre unidimensionale. Utilizzata per la prima volta nel 1948 in ambito militare da parte del Governo inglese per poter aggirare e ingannare la contraerea tedesca, l'RFID è un tipo di tecnologia wireless unidirezionale che sfrutta le onde radio per identificare e tracciare a distanza oggetti tramite etichette elettroniche, le quali assegnano a ciascun elemento un'identità unica. Questa identificazione univoca permette di trasmettere informazioni attraverso canali a radiofrequenza, che possono essere lette e recuperate da appositi dispositivi chiamati lettori RFID.

I lettori RFID sono spesso collegati a Internet, consentendo il monitoraggio e la raccolta dei dati in tempo reale. Il sistema RFID è costituito da tre componenti principali: i TAG (o etichette), i Reader (lettori) e il Sistema di Gestione. La comunicazione avviene tramite onde radio, consentendo la raccolta e la memorizzazione autonoma delle informazioni grazie alla combinazione tra TAG e lettori. I TAG RFID, applicati sui prodotti o sulle loro confezioni, contengono informazioni specifiche sulle caratteristiche del prodotto, le condizioni di stoccaggio e il trasporto. Grazie alla capacità di essere letti a distanza, i sistemi RFID velocizzano il monitoraggio e riducono gli errori di lettura (Kamann, Alfaro, e Sebrek, 2019).

La gestione e l'analisi dei dati memorizzati sui TAG possono essere eseguite tramite un sistema gestionale centralizzato, che offre funzionalità avanzate per la tracciabilità. In questo modo, ogni TAG può contenere e aggiornare i dettagli relativi alla storia produttiva e distributiva di un prodotto, permettendo così un controllo completo lungo l'intera filiera (Turan e Ozturkoglu 2022) e aumentando la fiducia del consumatore sul tema della sicurezza alimentare. In uno studio condotto da (Lin, Shi e Zhou, 2022) è stata eseguita un'indagine su un campione di 1.691 persone per valutare il livello di attenzione dei consumatori alla sicurezza alimentare. I dati, analizzati secondo vari fattori come genere, età e livello di istruzione, hanno mostrato che le donne sono più attente alla sicurezza alimentare rispetto agli uomini, con una percentuale superiore al 40% in diverse regioni della Cina settentrionale e meridionale. Lo studio proposto ha mostrato come il sistema di tracciabilità sopra citato, l'RFID, abbia migliorato la soddisfazione degli utenti di circa il 15,6% rispetto ai sistemi di sicurezza alimentare tradizionali implementati mediante codici a barre.

## Wireless Sensor Network (WSN)



*Fig.17: IoT integrato con tecnologia WSN*

Un'opzione alternativa o integrativa alla tecnologia RFID, abilitante anch'essa dell'IoT, è rappresentata dalle **reti di sensori wireless (Wireless Sensor Network WSN)**. Utilizzata per la prima volta a fini militari da parte del Dipartimento della Difesa Americano nel 1978, una WSN è una rete wireless che consiste di dispositivi autonomi, distribuiti spazialmente, che utilizzano dei sensori per raccogliere e monitorare in tempo reale dati relativi alle condizioni ambientali, al trasporto e alla conservazione dei prodotti. I dati raccolti da questi sensori WSN vengono trasmessi attraverso una rete che può utilizzare tecnologie diverse come WiFi, Bluetooth o reti cellulari. L'utente vede la rete come un unico corpo con cui poter interagire, raccogliere dati dell'ambiente circostante, elaborarli, per poi spedirli a stazioni di misura poste lontano dal luogo di misura. Queste informazioni possono essere analizzate immediatamente o archiviate in cloud per un'analisi successiva. Inoltre, per poter rendere le reti di sensori wireless dei sistemi di tracciabilità efficienti anche in ambito alimentare, le WSN possono essere arricchite con tecnologie avanzate come GPS e telerilevamento per ampliare le funzionalità disponibili, consentendo una tracciabilità accurata di lotti specifici durante la fase di distribuzione.

Oltre ai sensori, anche gli attuatori senza fili compongono una rete WSN. Tra essi, vi sono i rilevatori di suono, pressione, umidità e temperatura. In merito a quest'ultimi due fattori, (Dudina, Vasiliev e Mandrakov 2021) si

soffermano sulla creazione e relativa implementazione di uno strumento intelligente per tracciare l'umidità e la temperatura dei prodotti durante la loro distribuzione. Grazie all'uso di sensori e del sistema automatizzato, è possibile tenere traccia delle condizioni ambientali in ogni fase della distribuzione, prevenendo problemi prima che si manifestino. La nuova generazione di logger, con GPS integrato e trasmissione continua dei dati, semplifica il monitoraggio e garantisce che eventuali problemi vengano risolti rapidamente. È dimostrato, dunque, come l'implementazione di questo strumento di tracciabilità intelligente migliori significativamente i processi di qualità nel trasporto dei prodotti, riducendo le non conformità e aumentando l'efficienza del controllo logistico. La piena tracciabilità dal produttore al cliente finale riduce i rischi associati ai richiami di prodotto e migliora la reputazione aziendale grazie a una gestione più rigorosa delle condizioni di trasporto.

### Datamatrix & QR Code

Altro strumento di tracciabilità importante in tema IoT sono i codici a barre bidimensionali, come **Datamatrix e QR Code**, che rappresentano una soluzione innovativa per l'archiviazione ottica di dati. Entrambi sfruttano una matrice di moduli (punti) per codificare informazioni in modo compatto e leggibile da dispositivi elettronici. Sebbene condividano principi simili, presentano differenze sostanziali.

I Datamatrix, resi di dominio pubblico nel 1993 e standardizzati da ISO/IEC 16022, sono codici bidimensionali 2D che codificano i dati in celle bianche e nere disposte all'interno di una griglia. Diversamente dal codice a barre unidimensionale 1D in figura, i codici Datamatrix sono omnidirezionali, il che significa che possono essere letti da ogni angolo.



*Fig.18: Datamatrix*

Solitamente di forma quadrata, hanno due figure a forma di L su un lato del codice: è il cosiddetto “finder pattern” che aiuta gli scanner a localizzare questa tipologia di codice. Possono contenere fino a 3.116 caratteri numerici o fino a 2.335 caratteri alfanumerici e offrono un'elevata densità di dati in un formato robusto, rendendoli ideali per applicazioni industriali e logistiche relative alla tracciabilità della supply chain.



*Fig.19: QR Code*

Il QR Code (che sta per Quick Response), inventato nel 1994 da un'azienda giapponese e regolato dalla norma internazionale ISO/IEC 18004, è a sua volta un codice 2D che codifica dati in celle bianche e nere disposte su una griglia. Come i Datamatrix, anche i QR Code sono omnidirezionali ma vi si distinguono per una maggiore capacità di memorizzazione, potendo supportare fino a 7.089 caratteri numerici o fino a 4.296 caratteri alfanumerici.

Un codice QR consiste in un insieme di quadrati scuri o colorati disposti in una griglia su uno sfondo che fa da contrasto. Anche se spesso vengono stampati in bianco e nero, i codici QR possono avere diversi colori, l'importante è che ci sia abbastanza contrasto tra le celle. Per aiutare gli scanner ad identificarli, i codici QR includono un "finder pattern" di tre quadrati identici che si trovano negli angoli in alto a destra, in alto a sinistra e in basso a sinistra.

Relativamente ai campi applicativi, i codici QR, oltre a garantire la tracciabilità della supply chain, permettono di fornire, mediante la loro semplice scansione da smartphone, informazioni aggiuntive sui prodotti, su tutte l'origine e la qualità percepita del prodotto stesso. Nello studio svolto da (Corallo, Latino, Menegoli, e Pontrandolfo 2020) si esplicita la differenza tra una tecnologia RFID e un QR Code. Quest'ultimo, essendo statico, permette di trasferire le informazioni solo quando vengono scansionate manualmente. Viceversa, l'RFID può essere tracciato e fornire informazioni in tempo reale, in maniera più automatica e semplice, sebbene comporti dei costi maggiori rispetto al QR code, la cui generazione digitale risulta essere invece gratuita.

### Near Field Communication (NFC)



*Fig.20: IoT integrato con NFC*

Un ulteriore potente abilitatore dell'IoT è la tecnologia **NFC (Near Field Communication)**. Nato nel 2002, si tratta di un metodo di comunicazione wireless bidirezionale a corto raggio. Grazie all'NFC, è possibile scambiare informazioni tra dispositivi compatibili esclusivamente quando sono vicini.

Un esempio della vita di tutti i giorni riguarda i pagamenti contactless. Per quel che riguarda la sfera della tracciabilità alimentare, invece, ogni alimento può ricevere un tag NFC, che può essere una piccola etichetta inserita o applicata sulla confezione del prodotto. Ogni tag contiene un codice univoco che identifica in modo esclusivo quel prodotto. Durante le varie fasi della catena di approvvigionamento, i dati legati a ogni transazione che coinvolge un prodotto con tag NFC vengono registrati e salvati. Queste informazioni possono includere dettagli come la data di produzione, la scadenza, il luogo di origine, il trasporto e altre caratteristiche. Ogni punto della catena può essere dotato di lettori NFC per raccogliere i dati necessari. Inoltre, i tag NFC possono disporre di funzioni di autenticazione e crittografia per proteggere le informazioni sui prodotti alimentari. I dati raccolti vengono inviati tramite Internet a un sistema centrale, che può essere una piattaforma cloud o un server dedicato, dove vengono memorizzati, analizzati e resi accessibili per la gestione della catena di approvvigionamento. Dunque, l'NFC aumenta la trasparenza e facilita il controllo da parte delle autorità durante la fase di distribuzione del prodotto.

In (Conti 2022) viene realizzato uno studio sull'implementazione di un sistema di tracciabilità basato sulla tecnologia NFC per l'olio extra vergine di oliva (EVO), specificamente progettato per piccole e medie aziende agricole. Il lavoro propone l'uso di tag NFC nella fase di distribuzione del prodotto, con le informazioni archiviate su un database cloud, accessibile da autorità pubbliche e consumatori. Ogni operazione nel processo (raccolta, molitura, conservazione e imbottigliamento) viene registrata tramite smartphone, che scrive e legge i dati nei tag NFC. Uno degli aspetti chiave di tale studio è che il sistema proposto è a basso costo ed è facilmente accessibile per le piccole medie imprese agroalimentari. Per di più, l'NFC permette un'interazione bidirezionale tra l'azienda e il consumatore, garantendo trasparenza e autenticità dei dati. Vi è quindi un maggior coinvolgimento dei consumatori, in quanto il sistema NFC permette ai clienti finali di accedere ai dati sulla filiera tramite un'applicazione smartphone, migliorando così la fiducia nella qualità del prodotto. Un

sistema prototipale di questo genere è stato testato su due aziende agricole italiane, dimostrandone la fattibilità per le piccole realtà aziendali.

### Evoluzione moderna dell'IoT

Le cinque tecnologie sopra citate rappresentano le applicazioni tradizionali dell'Internet delle Cose. L'evoluzione dell'ecosistema IoT, in termini di mercato e di tecnologie, non si è fermata ai sistemi di tracciabilità originari descritti, anzi è tutt'oggi favorita dall'integrazione con le principali tendenze innovative che occupano la scena digitale. Tra questi, troviamo i **Big Data**, l'**Artificial Intelligence AI** e la **Blockchain**.

I Big Data costituiscono una vera e propria merce di valore che oggi rappresenta a tutti gli effetti una nuova occasione di guadagno economico e di ulteriore sviluppo tecnologico. Il tema di come valorizzare i dati, infatti, va di pari passo con la capacità di estrarre informazioni utili da essi. In questo specifico ambito di raccolta dati, l'Intelligenza Artificiale può giocare un ruolo chiave, come dimostra il lancio sul mercato di un numero crescente di nuove piattaforme IoT. Queste piattaforme, infatti, integrano tecnologie avanzate di analisi dati con algoritmi di Intelligenza Artificiale, in grado così di semplificare la gestione dei dispositivi connessi. Inoltre, l'incrocio tra il mondo IoT e quello della Blockchain ha grandi potenzialità future. La Blockchain può fungere da garante dell'identità dei diversi nodi della rete e da ente certificante della provenienza e dell'integrità dei dati raccolti dagli oggetti connessi. Questo grazie a un timbro digitale e alla registrazione dell'istanza temporale. Tra queste due tecnologie, però, ci sono anche tante difficoltà di integrazione non trascurabili, tra cui il fatto che essa può essere gestita solo esternamente rispetto a un dispositivo IoT, i quali sono tuttora limitati da alcuni vincoli tecnici.

In generale, quello dell'IoT è un paradigma che non conosce potenzialmente limiti.



*Fig.21: Paradigma, senza limiti, dell'IoT*

Da dati ricavati da uno studio effettuato dall'*Osservatorio Internet of Things del Politecnico di Milano*, emerge come nel 2023 la dimensione del mercato IoT in Italia, incluso il settore agroalimentare secondario, sia pari a 8,9 miliardi di euro, valore complessivamente in crescita del 9% rispetto al 2022.

Secondo le previsioni fornite da *International Data Corporation (IDC)*, la spesa mondiale per l'Internet delle cose passerà dagli 805 miliardi di dollari del 2023 ai mille miliardi di dollari del 2026, con un tasso di crescita annuo (CAGR 2023-2026) del 10%. A rafforzare questo studio, vi sono le parole di Carlos M. Gonzalez, responsabile della ricerca nell'area IoT per IDC, secondo cui *"la spesa in soluzioni IoT crescerà sempre di più perché le aziende hanno la necessità di poter contare sui dati e su infrastrutture digitali ben connesse in rete per migliorare il proprio business e aumentare la competitività"*.

Insomma, un paradigma in continua evoluzione, che non deve però trascurare gli aspetti legati a privacy e security. Diventa sempre più difficile mantenere l'equilibrio tra le innovazioni offerte dall'IoT e la protezione della privacy e dei dati personali. A ciò si aggiungono i rischi derivanti da attacchi hacker, che possono esporre i dati dei consumatori a ulteriori minacce. Il crescente interesse per il valore e la sicurezza di questi dispositivi sta spingendo verso un'evoluzione normativa a livello globale. Regolamenti

come il GDPR, il Cyber Resilience Act e il Data Act mirano a stabilire un quadro normativo che tuteli privacy e sicurezza dei dati personali, incentivando allo stesso tempo innovazione e competitività.

### Tracciabilità dei controlli qualità lungo il processo produttivo

All'interno di un processo di produzione, oltre a tracciare la singola MP lungo tutte le sue fasi e il singolo PF in fase di distribuzione, è di notevole importanza andare a tener conto dei controlli che vengono effettuati lungo l'intero processo produttivo, soprattutto in termini di controllo di accettazione sulle MP e sugli elementi entranti (per esempio i vasi in vetro), controllo in fase di trasformazione e controllo sul PF. Questa forma di tracciabilità può definirsi di tipo documentale, in quanto basata sulla raccolta, sulla gestione e sull'archiviazione sistematica dei dati relativi ai controlli effettuati lungo tutte le fasi della produzione. La richiesta di una migliore tracciabilità dei controlli qualità risponde ad una crescente consapevolezza da parte dei consumatori, che oggi pongono grande attenzione allo svolgimento dei controlli effettuati lungo l'intero processo di produzione. Non a caso, i clienti finali richiedono informazioni sempre più dettagliate sulla sostenibilità e trasparenza dei processi produttivi, essendo sempre più attenti agli impatti ambientali e sociali delle loro scelte di acquisto, preferendo spesso prodotti realizzati con materiali sostenibili o derivanti da filiere etiche.

Piu' precisamente, in merito al controllo di accettazione sulle MP e sugli elementi entranti, la tracciabilità documentale consente qui di registrare lotti, fornitori, date di arrivo e risultati delle analisi effettuate. Proseguendo lungo il processo, la documentazione associata ai controlli durante le fasi di trasformazione comprende registri di processo, schede di controllo e report di analisi, che permettono di ricostruire in ogni momento la cronologia degli eventi. In ultima istanza, in merito ai controlli sui PF, la documentazione generata include certificati di analisi e schede tecniche del prodotto, che sono fondamentali per dimostrare la conformità in caso di audit o richieste da parte delle autorità.

Proprio sulla base di quanto detto, sono stati implementati negli ultimi anni nuovi metodi di analisi e controllo alimentare. Si tratta di metodi rapidi, economici, portatili e semplici, che, superando le tecniche tradizionali basate su metodologie costose, lente e di laboratorio off-line, permettono la quantificazione dei contaminanti alimentari e il monitoraggio continuo real time dei parametri critici durante il processo produttivo.

### PAT e PON

Due esempi sono le tecnologie PAT e PON. Entrambe si basano sul concetto di tracciabilità metrologica, la quale si riferisce alle iniziative utilizzate per dimostrare e valutare l'accuratezza dei valori ottenuti dalle misurazioni effettuate e si basa su una catena ininterrotta di tarature che collega tali misure, realizzate su un campione alimentare, a uno standard di riferimento nazionale o internazionale. Questa catena di tarature è documentata e permette di risalire a tutte le operazioni di misura che hanno portato al risultato finale. Sono, quindi, delle tecnologie entrambe operanti nella fase di controllo del processo produttivo (Mattarozzi et al. 2023).

Più dettagliatamente, la Process Analytical Technology (PAT) ha avuto origine nei primi anni 2000 ed è stata inizialmente utilizzata nel settore farmaceutico, per poi estendersi in seconda battuta a quello alimentare. È un approccio sistematico e integrato che utilizza strumenti analitici avanzati per controllare i processi di produzione in tempo reale. Più specificatamente in ambito alimentare, mira a monitorare i parametri critici di produzione come temperatura, pH e umidità, a rilevare in tempo reale eventuali variazioni che possono compromettere la sicurezza o la qualità del prodotto e a ottimizzare i processi per ridurre scarti, migliorare la resa e aumentare la sostenibilità della produzione. Esempi di strumenti PAT sono i sensori in linea, visti ampiamente nel caso studio portato avanti nel capitolo 3.

La tecnologia Point of Need (PON), invece, ha cominciato a diffondersi più tardi, a partire dall'anno 2010, grazie ai continui progressi nella tecnologia portatile. Si riferisce all'utilizzo di sistemi di analisi e controllo direttamente nei punti in cui c'è necessità durante la catena di produzione o distribuzione

alimentare. Essi permettono di eseguire test rapidi di qualità e sicurezza in punti critici della catena alimentare, ad esempio nelle fasi di accettazione MP, di stoccaggio, di trasporto o di vendita. Inoltre, aiutano a fornire risposte rapide e accurate su aspetti come la presenza di contaminanti, allergeni, o sostanze indesiderate, oltre che a ridurre il tempo e i costi di invio dei campioni ai laboratori esterni, garantendo allo stesso tempo elevati standard di qualità e conformità.

Tuttavia, è fondamentale per entrambe le tecnologie garantire l'affidabilità e la tracciabilità metrologica dei risultati ottenuti, poiché la precisione è cruciale per mantenere una politica alimentare efficace.

Dunque, grazie alla tracciabilità documentale dei controlli qualità, ogni fase del processo produttivo può essere monitorata e ricostruita con precisione, garantendo trasparenza e affidabilità. Questo sistema risulta essenziale per gestire eventuali non conformità, permettendo di identificare rapidamente l'origine di un problema e adottare misure correttive mirate.

### [Problemi nella Agri Food Supply Chain \(AFSC\)](#)

I tradizionali sistemi di tracciabilità alimentare della tecnologia IoT sopra descritti, quali RFID, WSN, Datamatrix, QRCode e NFC, offrono dati essenziali per il monitoraggio dei prodotti e dei processi produttivi. Allo stesso tempo, però, da un punto di vista prettamente informatico, sono sistemi che si fondano su un **modello server-client centralizzato**, in cui le infrastrutture cloud, spesso gestite da terzi, rappresentano un unico riferimento per l'archiviazione, la trasmissione e la condivisione delle informazioni di tracciabilità (Rejeb et al. 2020). Questo approccio comporta che le parti coinvolte e i consumatori debbano fidarsi di un unico punto di accesso ai dati, esponendo il sistema a problemi di sicurezza e integrità, possibili perdite di dati e rischi di manipolazione, false informazioni o adulterazioni dei prodotti.

Nel contesto della filiera agroalimentare emergono, quindi, numerose problematiche che necessitano di una gestione accurata. Tra queste, come

rivelato dall'articolo *Allerte alimentari e segnalazioni di frodi in crescita in UE nel 2023*, all'interno del quale vi è il *Rapporto sulle allerte di sicurezza alimentare e sulle indagini sulle frodi agroalimentari* pubblicato dalla Commissione Europea, vi sono i rischi di furto o perdita di prodotti, adulterazioni, commercio illegale di merci scadute o contraffatte, etichettature imprecise e la difficoltà di rispondere alle aspettative dei consumatori, sempre più attenti alla trasparenza, alla tracciabilità e alla sicurezza dei prodotti.

Il Rapporto sopra citato, seguendo i passi dell'articolo, raccoglie i risultati del lavoro della Rete di Allerta e Cooperazione, attraverso cui gli stati membri condividono informazioni sui controlli ufficiali effettuati lungo la filiera agroalimentare. All'interno di questo network si inserisce anche il sistema di allerta rapida per alimenti e mangimi. Esso prende il nome di RASFF (Rapid Alert System for Food and Feed) e rappresenta uno strumento attraverso cui le autorità per la sicurezza alimentare degli stati membri del UE notificano i rischi, diretti e indiretti, per la salute dei cittadini legati a materiali a contatto con gli alimenti (Qian et al. 2022). Come riportato dall'articolo, lo scorso anno si è registrato un aumento dell'8% delle notifiche, per un totale di poco meno di 4.700. Il motivo più frequente di notifica, come si può notare in *Tabella 3* (estrapolata dal *2023 Annual Report Alert and Cooperation Network* della Commissione Europea), è stata la presenza di residui di pesticidi, seguita da rischi microbiologici, in particolare Salmonella, e micotossine. I principali Paesi notificanti sono Germania, Paesi Bassi e Belgio, mentre i più frequenti Paesi d'origine dei prodotti oggetto di allerta sono Polonia per l'UE e Turchia, Cina e USA per quelli extra UE.

HAZARD	PRODUCT CATEGORY	ORIGIN	NOTIFICATIONS
Pesticide residues	Fruits and vegetables	Türkiye	168
Salmonella	Poultry and poultry products	Poland	153
Migration	Food contact materials	China	92
Aflatoxins	Nuts, nut products and seeds	United States	85
Pesticide residues	Fruits and vegetables	Egypt	84
Pesticide residues	Herbs and spices	India	51
Pesticide residues	Cereals and bakery products	India	48
Salmonella	Nuts, nut products and seeds	Nigeria	38
Vibrio	Crustaceans and crustacean products	Ecuador	36
Pesticide residues	Cereals and bakery products	Pakistan	34

*Tabella 3: Descrizione dei rischi principali per la salute dei consumatori, Annual Report Alert and Cooperation Network UE, 2023*

Analizzando la tematica più ad ampio spettro, si può affermare come la filiera alimentare coinvolga una varietà di soggetti con funzioni specifiche, distinti in attori interni, come aziende produttrici, imprese di trasformazione, operatori logistici e punti vendita, e attori esterni, che comprendono consumatori finali ed enti regolatori. Tuttavia, ogni azienda nella catena gestisce le informazioni relative alla propria attività, il che introduce, appunto, il rischio di alterazioni e manipolazioni. Dunque, affrontare in modo efficace queste criticità è essenziale per promuovere la fiducia reciproca nella condivisione delle informazioni tra i vari partecipanti della filiera agroalimentare. Questa fiducia rappresenta un elemento chiave per il successo delle imprese che operano in questo settore.



*Fig.22: Vantaggio competitivo derivante da un sistema di tracciabilità efficiente*

In questo contesto, il sistema di tracciabilità è diventato fondamentale per ottimizzare la qualità, l'efficienza e la sicurezza delle operazioni all'interno delle filiere agroalimentari e per arrivare a fidelizzare il cliente finale. Un sistema di tracciabilità ben strutturato fornisce dati cruciali per ridurre i costi, migliorare la resa e la qualità dei prodotti, limitare gli sprechi e aumentare la produttività dei lavoratori, rendendo così l'intera catena e i suoi partecipanti più competitivi sul mercato.

Sebbene siano stati sviluppati sistemi di tracciabilità su misura per diversi settori alimentari, non esiste un sistema universale capace di adattarsi perfettamente alle esigenze di ogni filiera. Analizzando un caso studio relativo al mango colombiano (Herrera e Orjuela-Castro 2021), viene sottolineato, considerando unicamente RFID e codici a barre come strumenti di esempio per la tracciabilità, come sia vitale avere un sistema integrato tra tutti gli attori della filiera alimentare per poterne tracciare l'intero flusso. L'asimmetria dovuta a sistemi di tracciabilità isolati, secondo i quali ciascun attore della Food Supply Chain utilizza uno strumento di tracciabilità differente, provoca perdite in termini di qualità del prodotto e di maggior costi di inventario. La mancanza di standardizzazione, dunque, porta ciascun attore della catena di approvvigionamento a creare soluzioni proprietarie

non integrate, spesso incompatibili tra loro, riducendo così l'efficacia e l'efficienza complessiva e aumentando i costi.

Negli ultimi anni sono stati fatti significativi progressi verso la creazione di un sistema di identificazione standard. Un esempio è l'introduzione degli standard EAN/UCC, oggi definiti **standard GS1**, che richiedono a tutti gli attori di registrare vari elementi:

- il codice seriale delle unità logistiche (SSCC – Serial Shipping Container Code);
- I numeri identificativi dei prodotti (GTIN – Global Trade Item Number);
- I codici assegnati a luoghi fisici come imprese, negozi o enti pubblici (GLN – Global Location Number);

Inizialmente sviluppati nell'Unione Europea e successivamente armonizzati a livello globale, gli standard EAN/UCC, promossi dall'International Article Numbering Association EAN e dall'Uniform Commercial Code Council UCC, forniscono un sistema chiaro e univoco per identificare e tracciare i prodotti. Tuttavia, la standardizzazione delle informazioni va oltre la loro struttura (come codici e sintassi) e include anche l'EDI (Electronic Data Interchange), che prevede lo scambio di dati strutturati via tele-trasmissione da computer a computer usando formati standard. Un esempio di standard ampiamente utilizzato al giorno d'oggi è il GS1-128. Prima noto come EAN-128, è lo standard dei codici a barre nella logistica per lo stoccaggio e lo scambio di informazioni sui prodotti a livello internazionale. Questo standard dispone di un insieme di identificatori di applicazione (IA), ovvero, una relazione tra le cifre e il loro significato nel mondo reale, i quali garantiscono la tracciabilità del prodotto nella supply chain.

Questo ambito presenta numerose sfide, soprattutto per la complessità di creare un sistema di tracciabilità comune, utilizzabile in diverse catene del valore, ma che mantenga al contempo flessibilità, scalabilità e adattabilità, senza trascurare l'integrità, la sicurezza e la privacy dei dati.

La tecnologia Blockchain (BCT), in quanto registro decentralizzato e condiviso, offre una soluzione in merito, in modo da ridurre i problemi di fiducia tra le parti interessate, diminuire i conflitti aziendali e migliorare la trasparenza delle attività all'interno della catena di fornitura.

I dispositivi IoT, pur utili per monitorare le condizioni fisiche dei prodotti, non sono ancora integrati con la tecnologia BCT. Tuttavia, l'unione tra BCT e le tecnologie di tracciabilità digitale esistenti potrebbe trasformare radicalmente la gestione della catena di approvvigionamento alimentare, consentendo di seguire ogni alimento dal luogo di produzione fino al consumatore finale, lungo tutto il suo percorso.

### Blockchain: definizione e panoramica generale

Il termine *Blockchain* fu introdotto per la prima volta nel 2008 da un individuo o gruppo sotto lo pseudonimo di Satoshi Nakamoto, che pubblicò un documento intitolato "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System". In questo testo, Nakamoto presentava l'idea del Bitcoin e della tecnologia alla sua base, la Blockchain. Descrisse Bitcoin come *"una versione completamente peer-to-peer di moneta digitale che permette pagamenti online diretti tra utenti senza la necessità di intermediari finanziari"*.

La Blockchain è concepita come un registro digitale decentralizzato e condiviso che registra le transazioni in maniera sicura e trasparente. Essa è composta da una sequenza di blocchi, ciascuno contenente un insieme di transazioni, collegati tra loro attraverso crittografia. Questa struttura di blocchi interconnessi crea un archivio immutabile e in costante espansione.

La Blockchain ha introdotto il concetto di consenso distribuito, che permette ai nodi di una rete di concordare sullo stato del registro condiviso senza dipendere da un'autorità centrale. Questo meccanismo ha rivoluzionato la gestione della fiducia e della sicurezza nelle transazioni digitali, permettendo scambi diretti e trasparenti tra utenti senza l'intervento di intermediari tradizionali (Dakshayini, Sushma, e Spoorthi 2024).

Un elemento essenziale della Blockchain è la sua immutabilità. Una volta che i dati sono convalidati e registrati, non possono essere modificati o eliminati. Ogni blocco contiene quattro componenti chiave: un numero di identificazione, i dati del blocco, l'hash del blocco precedente e il proprio hash e una "firma digitale" che ne preserva l'integrità. Il collegamento crittografico tra i blocchi rende la Blockchain immutabile, poiché una qualsiasi alterazione dei dati cambierebbe l'hash, interrompendo la connessione con i blocchi successivi e invalidando la catena (Xu et al. 2020).

Per evitare problemi di alterazione o perdita dei dati, la Blockchain utilizza reti distribuite peer-to-peer (P2P), dove i dati sono replicati tra tutti i nodi senza un archivio centrale. In una rete P2P, ciascun blocco viene copiato su ogni nodo, garantendo la sicurezza e impedendo modifiche non autorizzate. Ogni nuovo dato inserito si distribuisce istantaneamente su tutti i nodi, rendendo le alterazioni impossibili senza il consenso della maggioranza dei partecipanti alla rete. Anche in questo caso, la cronologia dei dati rimarrebbe invariata. Con l'espandersi della rete, aumenta sia la complessità che la sicurezza della Blockchain, poiché un attacco riuscirebbe solo con il controllo del 50% dei nodi, un'impresa estremamente difficile.

(Chopra 2020) sottolinea in *Tabella 4* le differenze sostanziali che emergono nell'utilizzo tra un database centralizzato e la tecnologia Blockchain, esplicitando i principali vantaggi di ciascuno dei due sistemi. Relativamente al database centralizzato, l'autore afferma come quest'ultimo garantisca semplicità, accessibilità e una ridondanza minima dei dati. Inerentemente alla Blockchain, invece, vengono sottolineate tre caratteristiche chiave quali sicurezza, immutabilità e trasparenza.

Di seguito sono elencate le principali diversità tra i due sistemi.

	<b>Database tradizionale</b>	<b>Tecnologia Blockchain BCT</b>
<b><u>Struttura dei dati</u></b>	I dati sono organizzati in una tabella strutturata composta da righe e colonne. Ogni riga è chiamata record e un record si riferisce a un oggetto o entità (database = raccolta di record)	Le informazioni sulla transazione sono contenute all'interno dei blocchi. I blocchi hanno una specifica capacità di memorizzazione e, una volta riempiti, vengono chiusi e collegati al blocco precedentemente riempito
<b><u>Tipologia di sistema di rete</u></b>	Centralizzata	Decentralizzata
<b><u>Sistema di amministrazione</u></b>	Presente	NON presente
<b><u>Modello di registrazione</u></b>	I database registrano solo le informazioni presenti, non conservano tracce di informazioni registrate in precedenza	La Blockchain registra sia le informazioni attuali sia le tracce delle transazioni precedenti

*Tabella 4: Database tradizionale vs Tecnologia Blockchain BCT*

Dalla sua introduzione nel 2008 come fondamento del Bitcoin, la tecnologia Blockchain ha subito un'evoluzione rapidissima. Inizialmente concepita per gestire transazioni di criptovalute, ha dimostrato un potenziale applicativo molto più ampio. Autori come Don e Alex Tapscott, nel loro libro *Blockchain Revolution* (2016), hanno contribuito a popolarizzare l'evoluzione della Blockchain in tre fasi distinte:

- a) **Blockchain 1.0:** Focalizzata sulle criptovalute, la Blockchain era utilizzata principalmente come registro distribuito per supportare le

transazioni finanziarie in modo sicuro e decentralizzato.

- b) **Blockchain 2.0:** Caratterizzata da una maggiore complessità e flessibilità, ha introdotto gli smart contracts (contratti intelligenti), automatizzando l'esecuzione di accordi.
- c) **Blockchain 3.0:** Orientata all'ottimizzazione delle prestazioni, mira a garantire l'interoperabilità, la scalabilità e l'espansione delle diverse reti blockchain a settori come per esempio l'agroalimentare.

Non essendo scopo di questa tesi un'analisi esaustiva degli aspetti informatici e tecnici della tecnologia Blockchain, già ampiamente trattati in apposita letteratura specialistica, ci si limiterà ad evidenziare la diversità delle tipologie di Blockchain esistenti, ciascuna con caratteristiche peculiari che la rendono adatta a specifici contesti applicativi:

### **1. Reti Blockchain pubbliche**

Le Blockchain pubbliche sono prive di autorizzazione e permettono a chiunque di prendervi parte. Tutti i membri della Blockchain hanno gli stessi diritti di lettura, modifica e convalida della Blockchain. Le persone usano innanzitutto le Blockchain pubbliche per scambiare ed estrarre criptovalute come Bitcoin e Ethereum (Verna, Genta, e Galetto 2025).

### **2. Reti Blockchain private**

Una singola organizzazione controlla le Blockchain private, dette anche Blockchain gestite. L'autorità determina chi può essere membro e quali diritti ha nella rete. Le Blockchain private sono solo parzialmente decentralizzate, perché hanno restrizioni d'accesso. Hyperledger è un esempio di Blockchain privata (Verna, Genta, e Galetto 2025).

### **3. Reti Blockchain ibride**

Le Blockchain ibride combinano elementi delle reti private e pubbliche. Le società possono istituire sistemi privati e basati su autorizzazioni insieme a un sistema pubblico. In questo modo, controllano l'accesso a dati specifici archiviati nella Blockchain, mantenendo pubblico il resto dei dati. Utilizzano contratti intelligenti per permettere ai membri pubblici di controllare se le transazioni private sono state completate. Ad esempio, le Blockchain ibride possono garantire accesso pubblico alla valuta digitale mantenendo privata la valuta di proprietà della banca. IBM Food Trust è un esempio di Blockchain ibrida (Verna, Genta, e Galetto 2025).

### **4. Reti Blockchain di consorzio**

Le reti Blockchain di consorzio sono gestite da un gruppo di organizzazioni. Le organizzazioni prescelte condividono la responsabilità di mantenere la Blockchain e determinare i diritti di accesso ai dati. I settori in cui molte organizzazioni hanno scopi comuni e beneficiano di una responsabilità condivisa spesso preferiscono le reti Blockchain di consorzio. Ripple è un esempio di Blockchain di consorzio (Verna, Genta, e Galetto 2025).

### [Smart Contracts](#)

L'utilizzo della tecnologia Blockchain prevede l'esecuzione degli Smart Contracts, tradotti in "contratti intelligenti". Essi rappresentano una componente fondamentale nell'automazione dei processi aziendali. Questi strumenti innovativi, privi di elementi di intelligenza artificiale, sono in grado di eseguire automaticamente azioni predefinite in risposta a specifici eventi o condizioni, senza richiedere l'intervento di terze parti. Si tratta, in sostanza, di codici immutabili memorizzati su una Blockchain che, una volta attivati, interpretano e registrano dati all'interno di un registro distribuito. L'implementazione di tali contratti intelligenti avviene tramite una piattaforma open source basata su Blockchain, Ethereum, senza necessità di passare da un'autorità centrale. È importante sottolineare che, pur essendo strumenti estremamente potenti, i contratti intelligenti non

sostituiscono i contratti legali tradizionali. Il completamento e la registrazione di una transazione in un blocco ne sanciscono la conferma definitiva e l'inclusione nella Blockchain. Ciascun partecipante alla rete detiene una copia del contratto intelligente e può accedere in modo trasparente allo storico delle transazioni e allo stato corrente di tutti i contratti.

I contratti intelligenti possono essere suddivisi in due categorie principali: deterministici e non deterministici. I primi sono in grado di operare autonomamente all'interno della Blockchain, senza la necessità di input esterni, in quanto dispongono di tutte le informazioni necessarie per eseguire le azioni previste. Al contrario, i contratti non deterministici richiedono l'integrazione di dati provenienti da fonti esterne per poter prendere decisioni e attivare le azioni conseguenti.

Gli smart contract rivoluzionano il modo in cui le imprese operano, automatizzando processi complessi e ottimizzando le interazioni con fornitori, clienti e investitori. (Dakshayini, Sushma, e Spoorthi 2024) implementano un contratto intelligente chiamato "Food Safety", sviluppato in Solidity (il linguaggio di programmazione di Ethereum), che gestisce la registrazione e la certificazione dei prodotti. Ogni prodotto viene identificato con un ID univoco, e la sua certificazione viene memorizzata in maniera permanente sulla Blockchain. L'algoritmo del contratto in questione prevede specifiche funzioni per la verifica dello stato di certificazione di un prodotto, consentendo a consumatori e stakeholder di controllare se un prodotto ha superato i requisiti di sicurezza.

Integrandosi con le infrastrutture esistenti, gli smart contract consentono di monitorare in tempo reale lo stato di magazzino, verificare la conformità delle consegne e automatizzare i pagamenti, riducendo notevolmente i costi e aumentando la produttività. Tra i numerosi vantaggi offerti, si segnalano l'anonimato, l'eliminazione degli intermediari, l'esecuzione automatica e l'immutabilità dei dati registrati sulla Blockchain (Mohanta, Panda, e Jena 2018).

A tal proposito, (Prashar et al. 2020) descrivono l'implementazione di un sistema di tracciabilità e visibilità basato sulla tecnologia Blockchain per i prodotti agricoli, finalizzato a garantire la sicurezza alimentare in India. Il sistema funziona creando contratti intelligenti che registrano ogni passaggio del prodotto lungo l'intera catena di approvvigionamento. Ogni attore coinvolto nella catena (produttori, fornitori, distributori, rivenditori e consumatori finali) ha un ruolo specifico e le loro interazioni sono monitorate dalla blockchain. Le transazioni registrate sulla Blockchain includono informazioni quali dati di produzione, data di vendita e spedizione e informazioni sul trattamento e lo stoccaggio dei prodotti. Quando un prodotto viene venduto o trasferito a un nuovo attore della filiera, la transazione viene registrata nella Blockchain e può essere consultata da tutti gli attori coinvolti. Ogni transazione è sicura e immutabile, garantendo che il prodotto possa essere tracciato dal campo fino al consumatore. Il sistema è stato testato in un ambiente simulato utilizzando Amazon Web Services (AWS) per distribuire i nodi della Blockchain. Durante le simulazioni, sono stati raggiunti i seguenti risultati:

- Il throughput medio del sistema è stato di **161 transazioni al secondo (tps)**.
- Il tempo medio di elaborazione delle transazioni è stato di **4,82 secondi**.

Questi risultati mostrano che il sistema proposto, in questo caso specifico per il settore agricolo indiano, è in grado di gestire un elevato numero di transazioni in modo efficiente, garantendo al contempo la tracciabilità e la sicurezza dei prodotti.

### [Vantaggi e sfide future della Blockchain](#)

Come già in parte preannunciati di sopra, sono stati riconosciuti numerosi benefici associati all'adozione della tecnologia Blockchain, senza però dimenticare le sfide future più rilevanti ad essa associate.

Eccone di sotto una schematizzazione, con relativo approfondimento.

Vantaggi	Sfide future
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sicurezza informatica</li> <li>• Sostenibilità delle catene di approvvigionamento alimentare</li> <li>• Coinvolgimento delle comunità locali</li> <li>• Maggiore consapevolezza da parte dei consumatori</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contesto normativo</li> <li>• Interoperabilità tra diverse Blockchain e sistemi di tracciabilità digitale</li> <li>• Necessità di stabilire accordi solidi sull'archiviazione e la condivisione dei dati</li> <li>• Investimenti consistenti in infrastrutture digitali e formazione del personale</li> </ul>

Si dettagliano, in primis, i vantaggi esplicitati di sopra e, in seconda battuta, le sfide future che attendono la tecnologia Blockchain.

In primo luogo, la **sicurezza informatica** riveste un ruolo fondamentale in un contesto dove la fiducia è cruciale. Essendo in grado di prevenire alterazioni intenzionali o accidentali nei documenti e nei processi di gestione, la Blockchain risulta essere uno strumento ideale per il monitoraggio dei processi e prodotti alimentari (Bosona e Gebresenbet 2023). La sua decentralizzazione consente di superare la dipendenza da un server dati centrale, diminuendo i rischi e promuovendo una collaborazione più solida tra gli operatori della filiera. Grazie alla sua capacità di fornire una registrazione immutabile e sicura delle transazioni, la BCT permette di ottenere una cronologia dettagliata dell'origine, dei movimenti e delle fasi di lavorazione e distribuzione di ogni alimento. A tal proposito, (Cocco e Mannaro 2021) introducono una soluzione per la tracciabilità del Pane Carasau sardo, sfruttando la tecnologia Blockchain e l'Interplanetary File System (IPFS) per la memorizzazione di alcuni dati. Questa strategia mira a evitare il sovraccarico sulla catena Blockchain, sfruttando uno spazio di archiviazione "associativo", in modo da consentire la gestione di grandi quantità di informazioni senza costi eccessivi, migliorare la scalabilità del sistema di tracciabilità e risolvere al contempo problemi come la divulgazione di informazioni sensibili e la manomissione

dei dati. L'aumento di sicurezza, efficienza e prevenzione delle frodi contribuisce a mantenere elevata la qualità alimentare e permette ai consumatori di compiere scelte d'acquisto più consapevoli. In tal senso, (Pradana, Djatna, e Hermadi 2020) esplorano l'uso della tecnologia Blockchain per migliorare la tracciabilità nel sistema di supply chain dell'agroindustria del caffè, focalizzandosi sull'importanza di garantire sicurezza e trasparenza dei prodotti dal campo al consumatore finale. Per valutare la qualità del prodotto (ad esempio, contenuto di umidità dei chicchi o uniformità delle dimensioni), viene utilizzato l'algoritmo di similarità-coseno mediante il quale si riescono a confrontare i dati effettivi del prodotto con gli standard di qualità, calcolando così la somiglianza tra i valori per determinare se il prodotto soddisfa o meno i requisiti qualitativi. I risultati ottenuti dimostrano come la Blockchain si sia rivelata una tecnologia efficace per il sistema di tracciabilità nella supply chain del caffè, garantendo un'informazione sicura e immutabile e migliorando l'efficienza e la fiducia del consumatore all'acquisto. Nel lavoro di (X. Yang et al. 2021) viene proposto un sistema innovativo per la tracciabilità dei prodotti ortofrutticoli basato nuovamente sulla tecnologia Blockchain, con l'obiettivo di risolvere le attuali sfide nel settore. La soluzione si basa sull'integrazione tra Blockchain e database: i dati immutabili sono conservati sulla Blockchain, mentre quelli pubblici vengono archiviati nel database per ottimizzare le prestazioni e ridurre il carico sulla BCT, garantendo così query più rapide ed efficienti.

In secondo luogo, l'applicazione della Blockchain favorisce la **sostenibilità delle catene di approvvigionamento alimentare**, riducendo gli sprechi e le perdite (legate per esempio al ritiro dei prodotti), grazie alla possibilità di rilevare tempestivamente guasti o malfunzionamenti. Nello studio di (Ersoy et al. 2022), si esplora l'impatto della tecnologia dell'informazione e della condivisione delle conoscenze sulle catene di approvvigionamento alimentare circolari, con l'obiettivo di promuovere la crescita sostenibile delle imprese. Tale studio si concentra in particolare sull'industria della carne, dove la gestione efficiente delle risorse e la riduzione degli sprechi sono fondamentali. La condivisione delle informazioni e delle conoscenze

tra i vari attori della filiera emerge essere essenziale per migliorare la tracciabilità e l'efficienza. La ricerca sottolinea l'importanza di una solida infrastruttura tecnologica come la Blockchain e della condivisione delle conoscenze per promuovere la sostenibilità e la crescita delle imprese "green". In tal senso, si riesce anche a promuovere il commercio equo, migliorando la reputazione delle aziende coinvolte, un aspetto che può incrementare la competitività, agevolare l'accesso a nuovi mercati e rafforzare le relazioni tra produttori e consumatori lungo l'intera filiera.

Un ultimo aspetto essenziale è il **coinvolgimento delle comunità locali e la consapevolezza dei consumatori**. La trasparenza garantita dalla Blockchain può essere valorizzata per coinvolgere attivamente i consumatori, consentendo loro di verificare l'origine e la qualità dei prodotti alimentari. Promuovere l'educazione e la sensibilizzazione delle comunità locali facilita l'adozione e l'accettazione di queste nuove tecnologie. (Treiblmaier e Garaus 2023) esplorano come l'uso della Blockchain nella catena di approvvigionamento alimentare possa influenzare la percezione della qualità del prodotto da parte dei consumatori e, conseguentemente, le loro intenzioni d'acquisto. Gli autori si basano sulla teoria del segnale per spiegare come l'uso di etichette Blockchain possa migliorare la trasparenza e la fiducia dei consumatori. Si considera la familiarità del marchio come una variabile moderatrice. I risultati, ottenuti mediante due esperimenti con 151 e 152 partecipanti per testare il loro modello, indicano che l'impatto positivo delle etichette Blockchain sulla percezione della qualità è più pronunciato per i marchi meno familiari. Questo fornisce spunti interessanti per i manager, suggerendo che l'implementazione di tali etichette può aiutare a costruire la reputazione di marchi meno noti. In sintesi, è stato dimostrato come la Blockchain possa essere un meccanismo efficace per segnalare la qualità nella catena di approvvigionamento alimentare, soprattutto per i marchi meno familiari, migliorando la percezione del prodotto e aumentando l'intenzione di acquisto, e quindi la disponibilità a pagare, dei consumatori.

Allo stesso tempo, però, l'implementazione della tecnologia Blockchain nei sistemi di tracciabilità alimentari porta con sé, oltre a molteplici vantaggi, numerose sfide future da affrontare.

La necessità di modificare le pratiche consolidate nel settore agroalimentare secondario rappresenta un ostacolo significativo, in quanto la potenziale resistenza delle parti coinvolte può limitare l'adozione di soluzioni basate su blockchain. In un settore composto da numerosi attori con responsabilità distribuite, la trasformazione digitale aggiunge complessità alla gestione del cambiamento tecnologico. È, in tal senso, fondamentale tenere conto del **contesto normativo** in continua evoluzione. Le normative che regolano la filiera agroalimentare e la tecnologia Blockchain possono avere un impatto significativo sull'implementazione di queste soluzioni. Nel lavoro di (Tian 2017) viene sviluppata una soluzione mediante la quale, mantenendo un approccio decentralizzato e integrando la Blockchain con strumenti tecnologici come l'Internet delle Cose (IoT) e con strumenti normativi quali l'analisi dei rischi e dei punti critici di controllo (HAACP), si arriva ad avere una gestione più accurata ed avanzata della filiera. L'adeguamento alle leggi vigenti e la collaborazione con le autorità di regolamentazione sono quindi determinanti per il successo dell'adozione della Blockchain nel settore.

Un altro punto cruciale riguarda **l'interoperabilità tra diverse Blockchain e sistemi di tracciabilità digitale**: lo sviluppo di standard comuni e protocolli di comunicazione risulta essenziale per garantire coerenza e una condivisione efficace dei dati lungo tutta la catena di approvvigionamento, facilitando la cooperazione tra i vari attori del settore. A tal proposito, (Lin et al. 2019) propongono un sistema di tracciabilità che combina Blockchain ed EPCIS (Electronic Product Code Information Services), il quale rappresenta lo standard GS1 per fare tracciabilità in tempo reale. È uno strumento che consente di condividere le informazioni sulla vita del prodotto e sul percorso che fa lungo tutta la filiera, dal produttore, al distributore, al consumatore finale. La combinazione tra queste due tecnologie ha l'obiettivo di sviluppare un prototipo che gestisce i dati sia on-chain sia off-chain per

affrontare il problema dell'esplosione dei dati. Viene così progettato un contratto intelligente a livello aziendale per prevenire la manomissione e la divulgazione di informazioni sensibili. Dunque, è d'obbligo considerare le tendenze emergenti, come l'integrazione della Blockchain con tecnologie avanzate quali l'intelligenza artificiale e l'IoT. Questa combinazione potrebbe dare origine a soluzioni innovative per la tracciabilità e la gestione della filiera agroalimentare, incrementando ulteriormente l'efficienza e la sicurezza dei processi. Il progetto "BRUSCHETTA", esplicitato in (Arena et al. 2019), presenta un'applicazione basata proprio sull'integrazione tra blockchain e sistemi IoT per la tracciabilità e la certificazione della filiera dell'Olio Extra Vergine di Oliva (EVOO). L'obiettivo è consentire al cliente finale di accedere ad una storia del prodotto (a prova di manomissione), compresi i processi di coltivazione, raccolta, produzione, confezionamento, conservazione e trasporto.

Un ultimo aspetto critico riguarda la **necessità di stabilire accordi solidi sull'archiviazione e la condivisione dei dati**, soprattutto in contesti agroalimentari complessi ed internazionali. È essenziale proteggere i dati sensibili di ogni singola azienda, evitando con attenzione che vengano condivisi in modo inappropriato. Anche se la Blockchain può garantire l'integrità dei dati, la qualità delle informazioni inserite rimane strettamente legata all'accuratezza delle tecnologie complementari utilizzate.

L'implementazione di sistemi di tracciabilità basati su BCT comporta inoltre un onere finanziario notevole e richiede **investimenti consistenti in infrastrutture digitali e formazione del personale**. Le imprese potrebbero necessitare di incentivi governativi per affrontare il peso finanziario iniziale e superare le sfide economiche e organizzative che questa tecnologia comporta. Infine, la disparità digitale tra paesi sviluppati e paesi in via di sviluppo costituisce una sfida significativa, soprattutto in contesti agroalimentari globali laddove la questione dei costi e dell'efficacia dei sistemi di tracciabilità basati su Blockchain, in un contesto con attori economici diversificati, rappresenta un ulteriore punto di criticità (Dehghani, Popova, e Gheitanchi 2022).

Dunque, in seguito all'analisi accurata fornita sulle peculiarità tecnologiche della Blockchain, risulta evidente che la realizzazione di un sistema di tracciabilità universale per le filiere agroalimentari non è un'impresa semplice.

Negli ultimi anni, molte aziende internazionali hanno avviato progetti pilota per sviluppare soluzioni innovative in questo ambito. Per dimostrare i vantaggi dei sistemi di tracciabilità alimentare basati su Blockchain, Walmart e Kroger hanno sviluppato sistemi di applicazione di prova nelle loro catene di fornitura, applicando per la prima volta la tecnologia alla carne di maiale cinese e ai mango messicani (Qian et al. 2022). I risultati dell'applicazione hanno mostrato che, utilizzando la tecnologia BCT, il tempo impiegato per determinare la fonte e il percorso di trasporto, in questo caso del mango messicano, dalla fattoria al supermercato risulta essere di qualche secondo, rispetto ai 6,5 giorni senza l'uso della Blockchain.

Un altro esempio di successo è stato il caso di Carrefour Italia (Panzeri 2018), che è diventata la prima GDO nel nostro paese ad utilizzare la Blockchain per la tracciabilità dei beni alimentari.



*Fig.23: Carrefour adotta Blockchain*

I vantaggi per i consumatori sono chiari: una maggiore trasparenza della filiera garantisce qualità e origine dei prodotti alimentari. Per gli allevatori, c'è l'opportunità di ottimizzare la produzione e valorizzare l'immagine aziendale, aggiungendo un significativo valore comunicativo ai propri

prodotti. La grande distribuzione trae beneficio sia dall'organizzazione e dalla tracciabilità dei fornitori sia dalla possibilità di condividere un database sicuro con tutti i partner della filiera. Tuttavia, l'aspetto principale resta l'impegno verso la qualità e la certezza di offrire ai propri clienti prodotti sicuri e certificati.

Queste iniziative appaiono promettenti e potrebbero portare, in prospettiva futura, a soluzioni più efficienti per le catene di fornitura alimentare. Un'implementazione ottimale necessita di un approccio multidisciplinare, che coinvolga figure professionali con competenze sia nel settore agroalimentare sia nel settore informatico.

## CAPITOLO 3: Riprogettazione del Sistema di Tracciabilità e Controllo Qualità del processo con F.lli Saclà

Ritornando a trattare la tematica della tracciabilità e dei controlli qualità a più ampio spettro, la progettazione di un sistema tale rappresenta un approccio strategico per garantire la trasparenza e l'efficienza del processo produttivo, senza dimenticare la sicurezza alimentare e la conformità normativa, aspetti sempre più rilevanti per i consumatori e i regolatori (Betti et al. 2024).

Di conseguenza, la gestione dei processi aziendali svolge un ruolo fondamentale nell'ecosistema di un'azienda, in quanto rappresenta una leva determinante per lo sviluppo dell'impresa. Una struttura organizzativa efficace, infatti, richiede un insieme di attività strettamente interconnesse, che supportano una gestione funzionale ed operativa efficiente. Essa non si occupa solamente della definizione delle attività, degli obiettivi principali e delle persone coinvolte, ma contribuisce concretamente a ottimizzare le risorse e a migliorare la soddisfazione del cliente, creando valore aggiunto (Corallo, Latino, Menegoli, e Striani 2020).

Il metodo più utilizzato per una gestione ottimale del processo e per aumentare la produttività aziendale è la "mappatura dei processi", ovvero la creazione di uno schema o diagramma che offre una visione complessiva della struttura aziendale, con tutti i processi e le loro interconnessioni (Cruz e Miguel Rosado Cruz 2019).

La cosiddetta "Mappatura AS-IS" permette di analizzare in maniera approfondita il singolo processo per avere una fotografia il più possibile chiara ed esaustiva di tutto ciò che accade prima di arrivare al risultato finale. In questo modo si potrà quindi intervenire con modifiche mirate al fine di ottenere una maggiore produttività ed efficienza in ogni singola fase dell'intero processo.

## Mappatura AS-IS

A tal scopo, si propone di sotto uno studio oculato realizzato sui sistemi di tracciabilità e controllo qualità di un'azienda medio-grande del settore agroalimentare italiano, la F.lli Saclà.

Operando secondo una metodologia top-down, è stata presa in considerazione la produzione di uno specifico prodotto, la "Salsa Alfredo Pesto". Tramite numerose interviste ad esperti del settore e al personale interno all'azienda stessa, sono stati raccolti dati accurati e precisi sul processo produttivo in questione. Ciò ha permesso di realizzare una mappatura AS-IS del processo, il cui output risulta essere una descrizione dettagliata e mirata su ogni singola fase produttiva, un apposito diagramma concettuale BPMN e una tabella schematica sulla razionalizzazione dei controlli.

## Descrizione del Processo Produttivo della "Salsa Alfredo Pesto"

### Ricezione:

- Mp "Alimentari":

La materia prima in arrivo viene prelevata e trasportata in laboratorio, dove viene setacciata al fine di eliminare le impurità (polvere) ed uniformare le dimensioni delle particelle. Un operatore analizza i parametri rilevanti e compila una scheda di controllo in formato cartaceo. Successivamente, un secondo operatore trasferisce i dati dalla scheda su un file Excel, che viene archiviato in una cartella nominata secondo la materia prima d'interesse, all'interno della rete LAN aziendale.

### Esempio basilico:

Nel caso particolare del basilico, arrivano camion pieni di basilico (tagliato di fresco in giornata) refrigerati a 8-10 °C con volumi pari a 9600 Kg (netto), in bins da 80 kg ciascuna. L'operatore preleva la materia prima, la trasporta in laboratorio e la analizza mediante una strumentazione tecnica specifica.

Le due macroaree d'indagine sono la sicurezza alimentare e le caratteristiche organolettiche. La sicurezza alimentare riguardante il basilico prevede controlli specifici e accurati sulla temperatura della MP e sull'eventuale presenza di: principi di fermentazione, infestanti, peronospora (tende a verificarsi sulla parte posteriore della foglia). Per quel che concerne le caratteristiche organolettiche del basilico, si vanno ad analizzare principalmente parametri come: odore, colore, lunghezza gambo (ideale se  $\leq 20$  Cm) e % di foglie.

- Vasi in vetro:

I vasi in vetro arrivano allo stabilimento di produzione e vengono sottoposti ad una fase di stoccaggio. Non è previsto un controllo in accettazione sui vasi in vetro, in quanto la valutazione delle difettosità viene effettuata solamente nel momento in cui la si riscontra visivamente.

#### Fase di De-palettizzazione:

I vasi in vetro, organizzati in pallet a nove livelli, vengono posti su un de-palettizzatore, che utilizzando dei bracci meccanici con un sistema di ventose, solleva ciascun livello. I vasi vengono trasferiti da una piastra sul nastro trasportatore metallico che li conduce alle linee produttive, come mostrato in *Figura 24*.



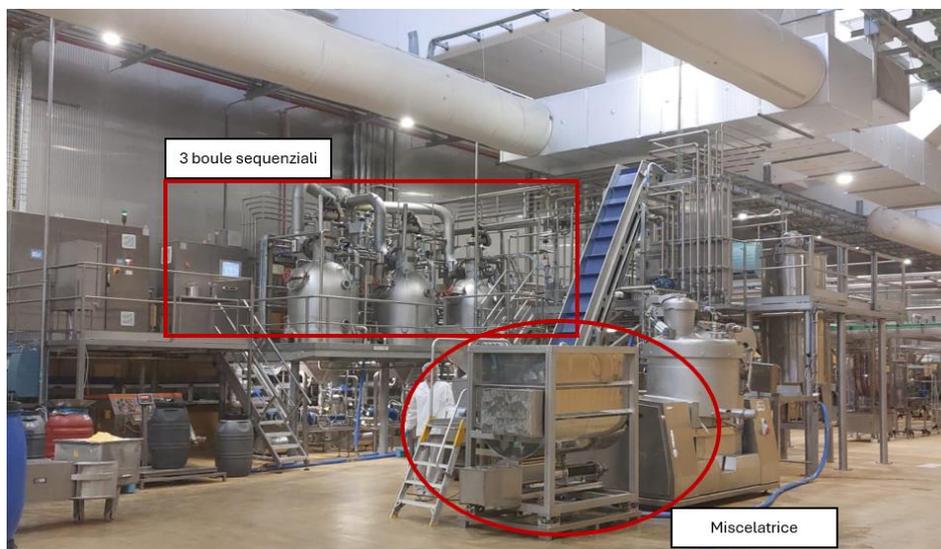
*Fig.24: Livello dei vasi in vetro*

Un controllo visivo viene eseguito da un operatore subito dopo la de-palettizzazione per assicurare l'integrità dei vasi. Questa fase è caratterizzata da un numero relativamente elevato di rotture dei vasetti.

#### Preparazione e Cottura degli Ingredienti:

Gli ingredienti come polveri setacciate, acqua, panna, burro, composto base di pesto, tuorlo d'uovo, anacardi e amidi sono preparati a inizio linea. La maggior parte arriva in fusti pressurizzati.

Il burro, dopo essere stato scongelato, viene miscelato con acqua e formaggi in un'apposita miscelatrice. Successivamente, il composto viene trasferito tramite aspirazione sottovuoto in una delle tre boule, evidenziate in *Figura 25*, che compongono il comparto "cucina", dove i liquidi vengono mantenuti ad una temperatura costante di 65°C. Avviene un monitoraggio continuo della temperatura, pressione e temperatura del vapore tramite sensori posti nella boule e controllati con PLC. Un sensore di temperatura è posto sotto la boule.



*Fig.25: Miscelatrice e tre boule sequenziali*

La miscela viene trasferita dalla boule 1 alla boule 2 dove vengono aggiunte le polveri e la base pesto tramite aspirazione.

La miscela prosegue verso la fase successiva di cottura a 90 gradi nella boule 3. Questo è fatto per cercare di assicurare una temperatura ottimale di 85°C al momento dell'inflaconamento. Un operatore esegue un campionamento della miscela direttamente dalla boule 3. Nel laboratorio adiacente alla linea produttiva, vengono condotte analisi chimiche immediate per verificare parametri quali pH (deve essere tra 5.9 e 6.30), Bostwick (parametro legato consistenza della miscela, con valori tra 10 e 20 Cm), viscosità, colore e contenuto di sale (valori compresi tra 1,30 e 1,80 %). I risultati di tali analisi vengono trascritti manualmente su apposite tabelle, che vengono poi scannerizzate, al fine di tenerne traccia nel sistema di monitoraggio del processo produttivo.

#### Linea di Riempimento:

I vasi vuoti arrivano in linea direttamente dalla fase di de-pallettizzazione, procedono verso una soffiatrice che li capovolge e li pulisce con un getto d'aria ad alta pressione, per proseguire poi verso la stazione di riempimento. I vasi vengono riempiti con la salsa proveniente dalla boule 3 mediante una riempitrice, come rappresentato in *Figura 26*.

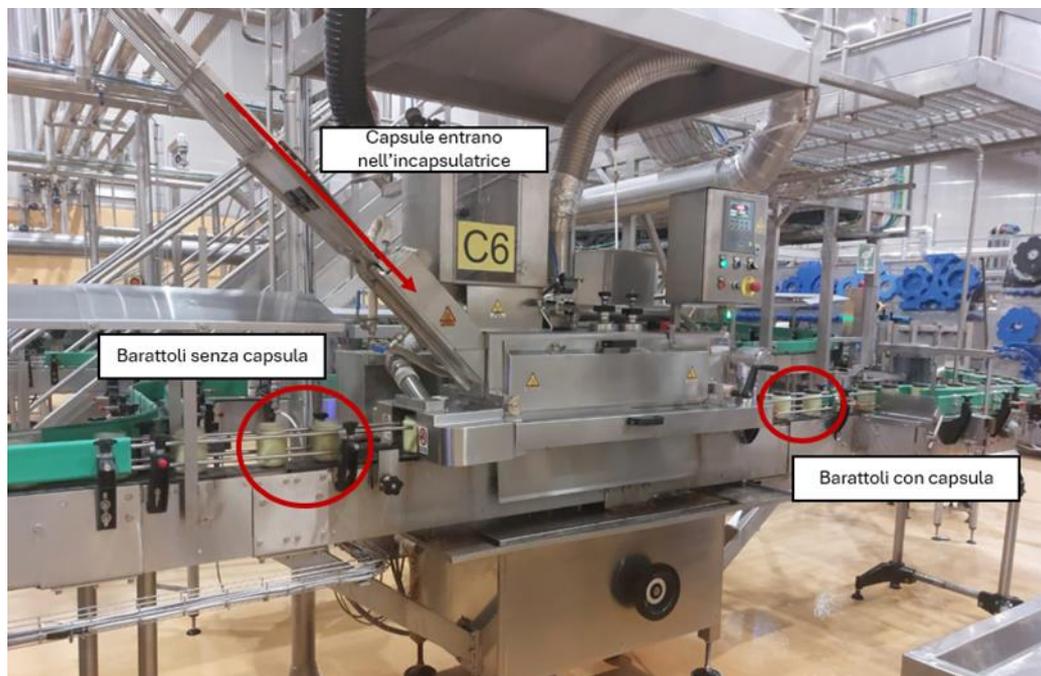


*Fig.26: Fase di riempimento*

Un controllo manuale del peso e della temperatura (monitoraggio temperatura hot filling) dei vasi riempiti viene effettuato da un operatore. In questo momento si controlla che si abbia una temperatura di 85°C del prodotto (temperatura funzionale a trattamento termico > 80 °C, altrimenti il vaso viene scartato).

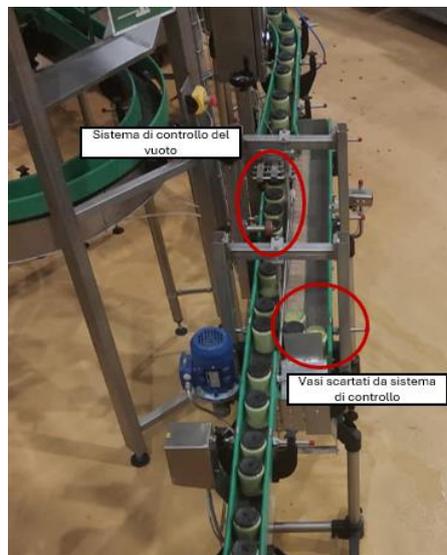
#### Incapsulamento:

I vasi vengono chiusi con coperchi (capsule) tramite un sistema di cinghie, che avita il coperchio sul barattolo, come mostrato in *Figura 27*.



*Fig.27: Incapsulamento dei vasi*

Si effettuano, rispettivamente, dei controlli di chiusura a campione (avvitamento 4-8 mm) e un controllo dell'integrità del sottovuoto (100-700 mbar) ad opera dell'operatore. Mediante il monitoraggio DUD detector pre trattamento termico, si effettua un ulteriore controllo del vuoto. Entrambi assicurano la qualità del sigillo del vaso. I vasi non conformi sono temporaneamente messi da parte, come mostrato in *Figura 28*, e successivamente reimmessi in linea, a valle di un intervento da parte di un operatore.



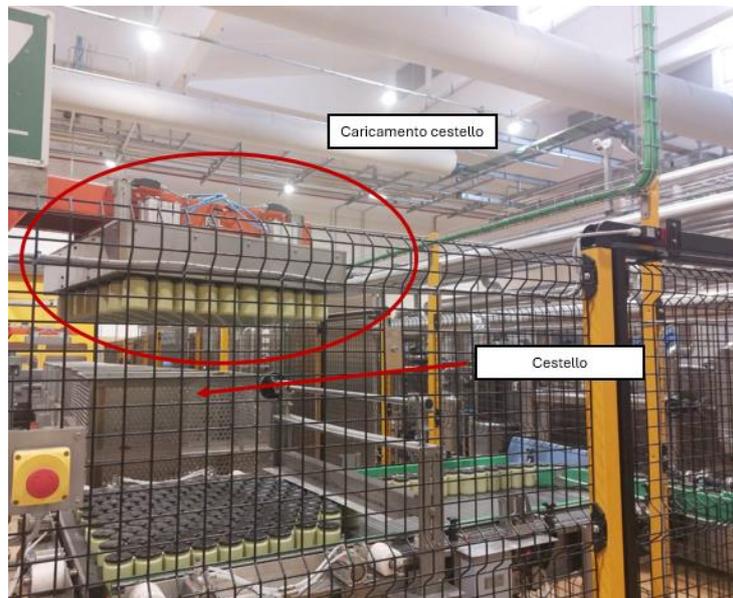
*Fig.28: Vasi non conformi temporaneamente scartati*

Codifica:

Viene applicata una codifica sui coperchi dei vasi che include informazioni come: lo stabilimento, la linea produttiva, l'anno di produzione, il giorno dell'anno, il codice prodotto e l'ora di produzione.

Sterilizzazione in autoclave:

I vasi, dopo essere stati riempiti, sigillati e codificati vengono accumulati e caricati automaticamente in cestelli multilivello. L'autoclave può contenere fino a 4000 vasi, organizzati su 6 livelli sovrapposti. Tali cestelli, come mostrato in *Figura 29* vengono poi inseriti nell'autoclave per il processo di sterilizzazione. L'autoclave è dotata di sensori interni per monitorare la pressione e la temperatura. Tali sensori sono posti vicini alle aperture e i dati sono visualizzabili su PLC esterni.



*Fig.29: Sterilizzazione in autoclave*

Il ciclo di sterilizzazione dura circa due ore e mezza, durante le quali le autoclavi operano in un range di pressione da 300 a 1600 mbar e di temperatura da 30 a 120 °C. Questo ciclo termico è essenziale per eliminare i microrganismi patogeni e garantire la conservazione del prodotto. Durante il ciclo di sterilizzazione, sono impiegate sonde spia per monitorare costantemente la temperatura all'interno dei barattoli nell'autoclave. Per ogni autoclave (fino a 4000 vasetti), viene inserita almeno una sonda nella posizione più sfavorevole, supposta essere quella più fredda e centrale, per cui la sonda è posta al centro del terzo livello, nel terzo cestello.



*Fig.30: Sonda usata nel processo di sterilizzazione*

Ogni sonda, mostrata in *Figura 30*, è in grado di registrare l'andamento della temperatura nel tempo dal quale si ricava il fattore di sterilizzazione F. I dati sono poi scaricati e analizzati alla fine del processo per verificarne la conformità. In caso di malfunzionamento o non raggiungimento del fattore F voluto si eseguono analisi per valutare l'integrità del prodotto.

#### Etichettatura e packaging finale:

Dopo la sterilizzazione, vi è nuovamente il monitoraggio da parte del DUD detector. I vasi vengono poi sottoposti al controllo manuale da parte dell'operatore sull'avvitamento (4-8 mm) e per il controllo del vuoto (100-700 mbar). Successivamente, avviene l'etichettatura mediante una linea automatizzata che applica etichette ai vasi.

N.B: Il processo di etichettatura può avvenire anche alcuni mesi dopo la produzione e il primo stoccaggio dei barattoli "nudi" (senza etichetta). In questa fase i barattoli "nudi", avvolti dall'avvolgitrice, vengono pallettizzati e stoccati in magazzino, conservati in una cella controllata a 4°C (pallettizzazione vasi nudi e applicazione bar-code a pallet nel modello concettuale BPMN di sopra). Nel momento in cui il lotto produttivo deve essere consegnato, i pallet di vasi "nudi" vengono prelevati dal magazzino, vengono riportati in linea, vengono de-pallettizzati e avviene, come mostrato



*Fig.31: Etichettatura vasi nudi*

in *Figura 31*, l'etichettatura dei singoli vasi (che precedentemente erano nudi), a cui segue poi il controllo radiogeno automatizzato.

Dopo l'etichettatura, i vasi vengono quindi sottoposti ad un controllo radiogeno a tappeto automatizzato in linea per verificare l'eventuale presenza di corpi estranei. Successivamente, i barattoli etichettati vengono raggruppati e un vassoio di cartone viene costruito attorno a essi direttamente in linea, dopodiché i barattoli e il vassoio vengono avvolti in un involucro di nylon resistente e sottoposto a termoretrazione (packaging secondario nel modello BPMN di sopra).

I prodotti finiti vengono pallettizzati in bancali, stoccati e immagazzinati. Durante i trasferimenti in magazzino, i bancali sono spostati con muletti e quindi sottoposti a sollecitazioni. Prima di essere distribuiti, i bancali vengono sottoposti ad un controllo meramente visivo.

Tutto quanto detto può essere formalmente rappresentato in un modello concettuale BPMN, di sotto esplicitato.

### [Diagramma concettuale BPMN](#)

In un contesto in cui la tracciabilità è fondamentale per rispettare le normative, migliorare la qualità del prodotto e ottimizzare le operazioni, l'utilizzo di modelli di Business Process Modelling Notation (BPMN) consente di rappresentare in modo chiaro e dettagliato i flussi di lavoro e le interazioni tra i vari attori coinvolti. Così facendo, le organizzazioni possono mappare i passaggi critici del processo, evidenziando le attività necessarie per monitorare e registrare informazioni chiave lungo tutta la filiera, dalla produzione alla distribuzione (Teixeira, Santos, e Machado 2018).

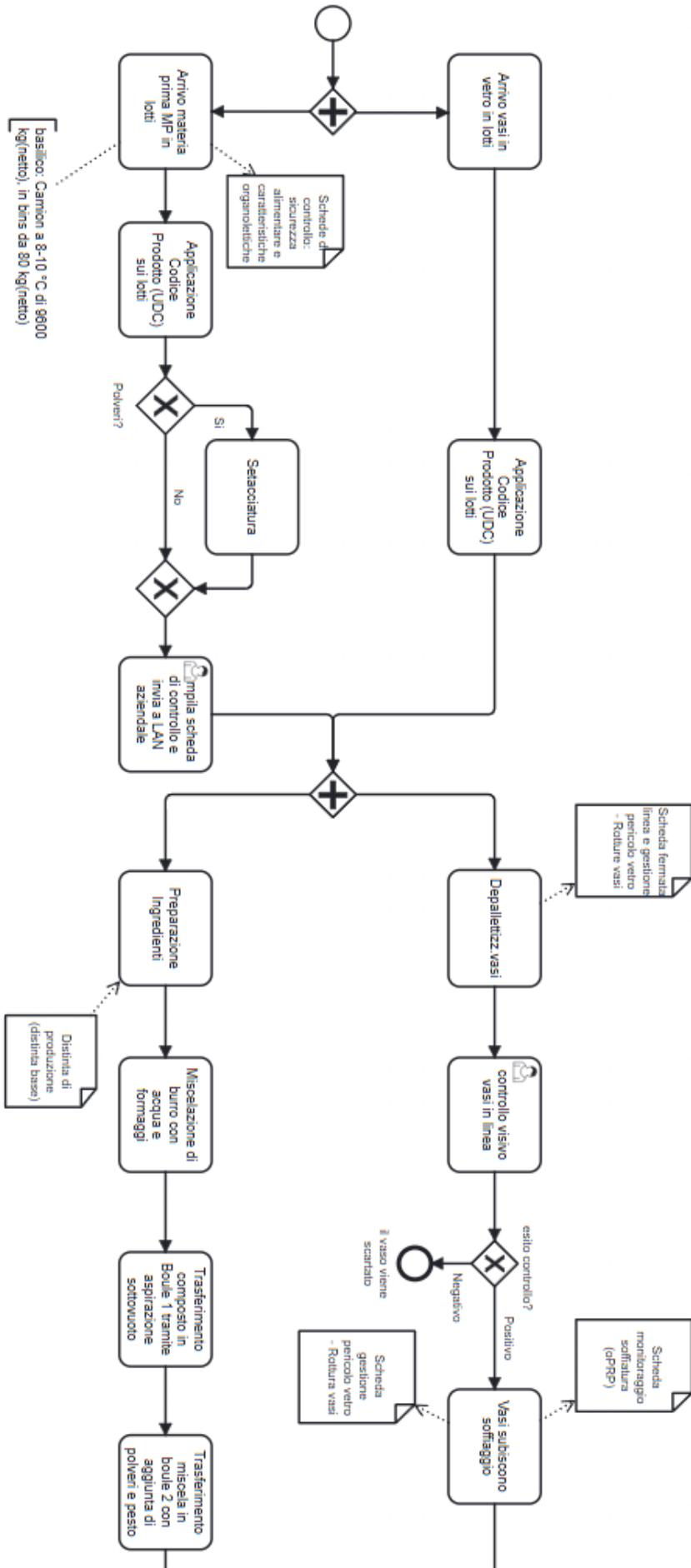
Analizzando un case study riguardante un'azienda agricola pugliese che coltiva ciliegie, (Corallo, Elena Latino, e Menegoli 2019) utilizzano il modello concettuale BPMN per tracciare le informazioni chiave nei vari punti della

catena di approvvigionamento alimentare, raccogliendo dati in modo automatico (tramite sensori) o manuale (tramite applicazioni IT). L'infrastruttura utilizza tecnologie di raccolta e analisi dei dati per monitorare i prodotti lungo tutto il loro ciclo di vita e fornire informazioni utili ai diversi attori coinvolti, quali consumatori, aziende e autorità pubbliche.

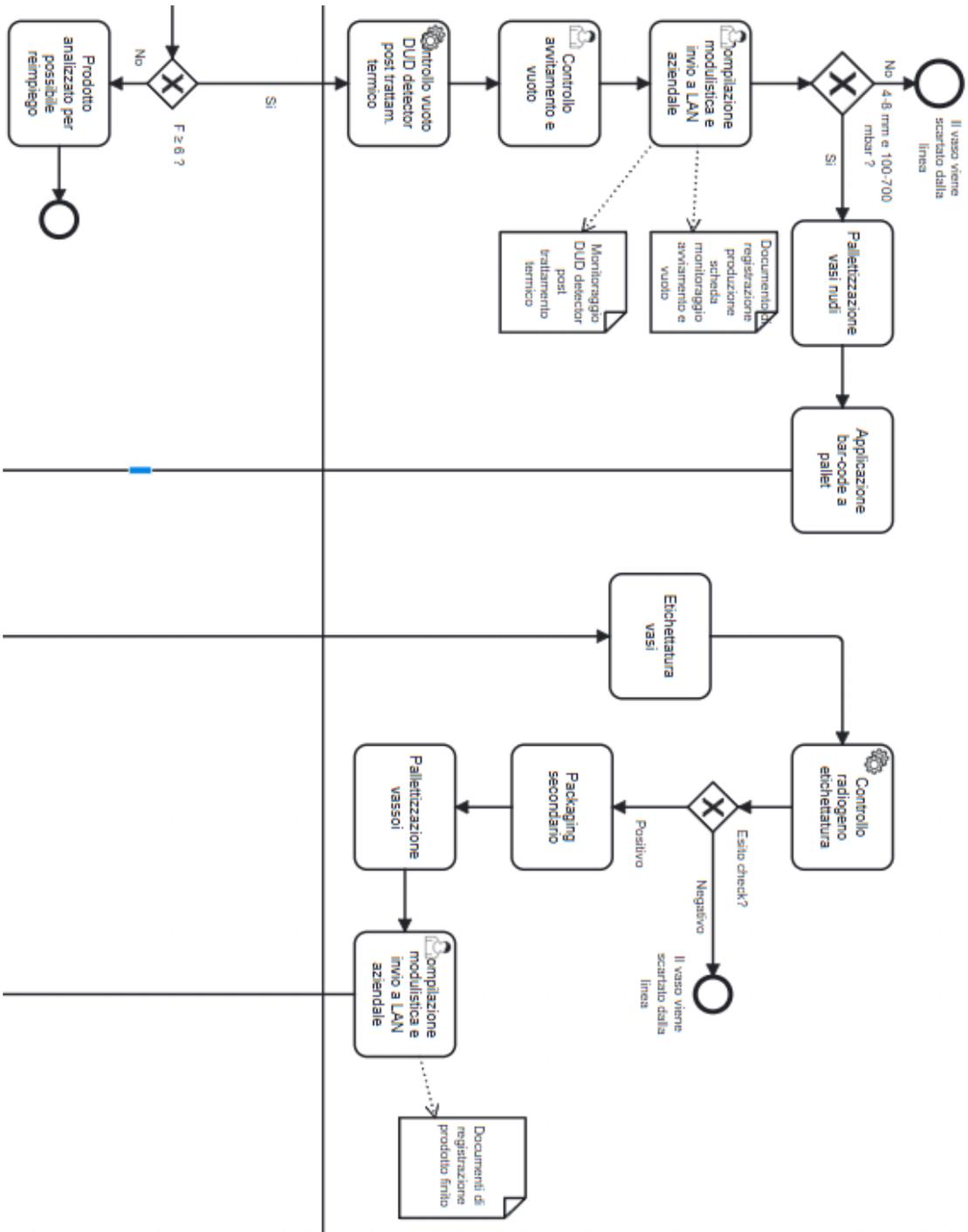
La modellazione grafica facilita la comprensione e la condivisione delle informazioni, riducendo il rischio di errori e migliorando la collaborazione tra gruppi diversi. A tal proposito, (Moreno-Montes De Oca et al. 2015) evidenziano l'importanza della qualità della modellazione dei processi aziendali, che ha un impatto diretto sullo sviluppo aziendale e sul supporto IT, affermando come buoni modelli di processo aiutino a evitare errori costosi e migliorino la comunicazione e la documentazione tra le parti interessate.

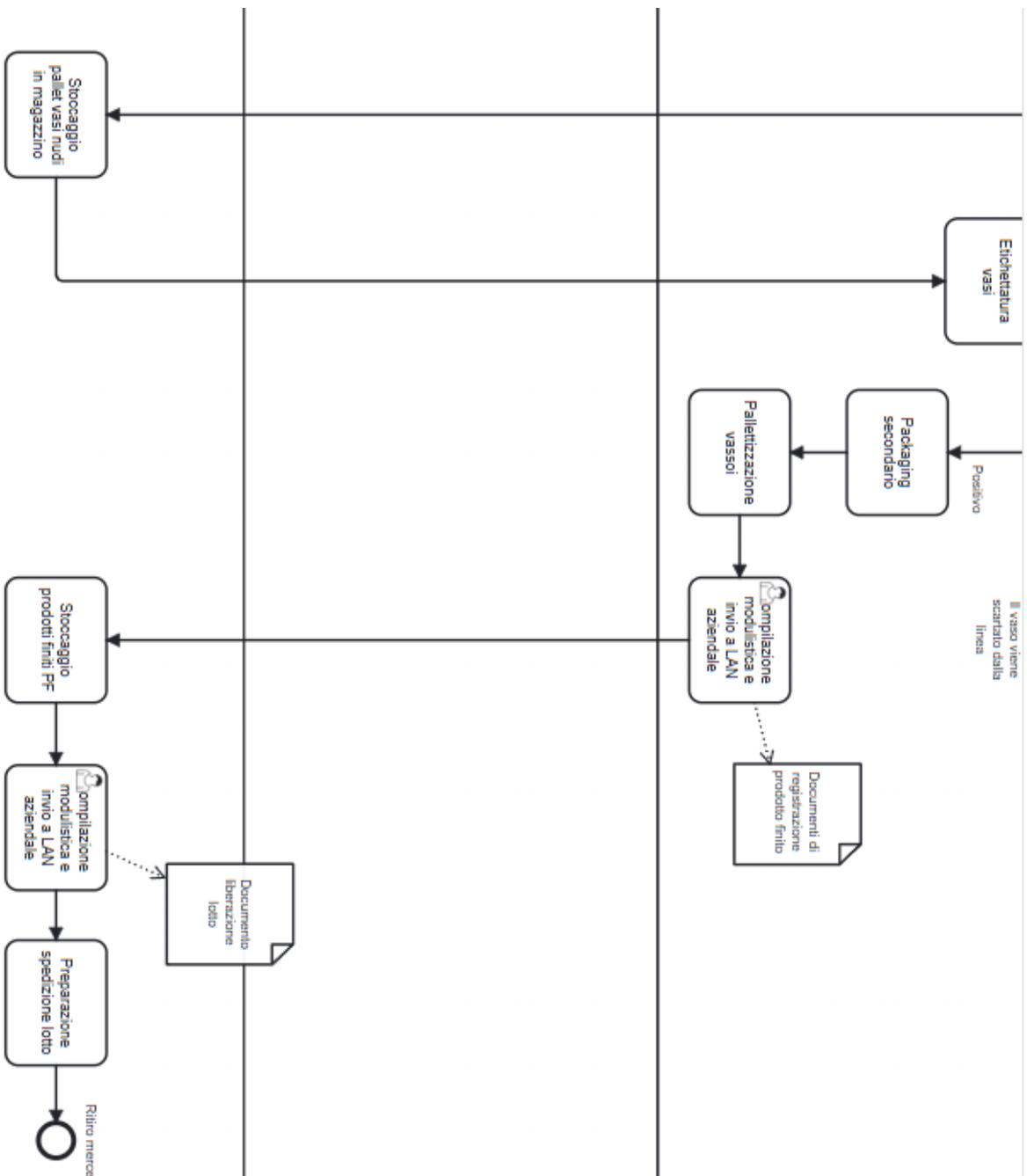
In sintesi, un modello BPMN ben progettato consente di identificare opportunità di miglioramento e ottimizzazione, contribuendo a un sistema di tracciabilità più agile e reattivo alle esigenze del mercato, essenziale per il successo aziendale in un ambiente sempre più competitivo.

Ecco di sotto il diagramma concettuale BPMN del caso studio di riferimento relativo alla Mappatura AS-IS della "Salsa Alfredo Pesto".









## Tabella sulla razionalizzazione dei controlli

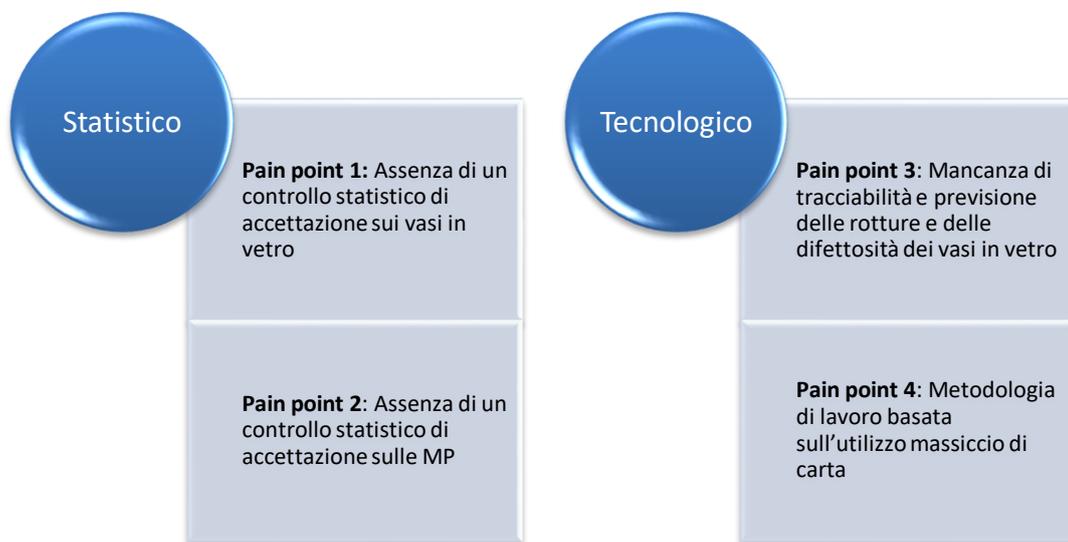
Controllo	Volumi processati	Piano di campionamento	Strumentazione tecnica	Regolamenti di rif.	Compilazione
Accettazione MP	Basilico. Camion a 8-10 °C di 9600kg(netto), in bins da 80 kg(netto).	ogni carico	Operatore, Bilancia, Righello	Regolamento 1881, Regolamento 396	manuale
Accettazione vasi	In base al lotto in arrivo	Valutazione difettosità qualora dovesse presentarsi (non è previsto controllo in accettazione)	Nessuna	Consorzio CETIE da cui i produttori di vasi prendono le specifiche	manuale
Controllo visivo vasi in linea	Totale produzione giornaliera (50.152 unità)	Nella workstation "depallottizzatore": Contr Operatore	Operatore	assente	manuale
Accettazione ingredienti input cotta	In base alla produzione	A necessità	Operatore	assente	manuale
Analisi e controllo cotta	Totale produzione giornaliera (50.152 unità)	1 controllo (250ml) per cotta, ogni cotta	Operatore	HACCP	manuale
Controllo magnetico	Totale produzione giornaliera (50.152 unità)	A tappeto	Automatizzato in linea (magneto system)	HACCP	manuale
Monitor. temperatura Hot Filling	Totale produzione giornaliera (50.152 unità)	1 controllo/h	Operatore, misuratore termico	HACCP, Regole interne	manuale
Controllo peso vasi	Totale produzione giornaliera (50.152 unità)	20 vasi/h	Bilancia, Operatore	HACCP, Regole interne	manuale
Controllo avviamento e vuoto pre	Totale produzione giornaliera (50.152 unità)	1 ogni ora pre e post trattamento termico	Operatore, vuotometro	HACCP	manuale
DUD detector pre trattam. termico	Totale produzione giornaliera (50.152 unità)	a tappeto (test funzionamento inizio-fine produzione, ogni 4 ore e cambio prodotto)	Automatizzato in linea, operatore per controllo DUD	HACCP	manuale
Controllo codifica	Totale produzione giornaliera (50.152 unità)	Ogni ora e ogni prodotto	Operatore	HACCP	manuale
Controllo parametro F per sterilizzazione	Totale produzione giornaliera (50.152 unità), 4000 vasi per autoclave, su 5/6 cestelli	Ogni autoclave	Operatore, sonda	HACCP	semi-automatizzato
DUD detector post trattam. termico	Totale produzione giornaliera (50.152 unità)	a tappeto (test funzionamento inizio-fine produzione, ogni 4 ore, cambio prodotto)	Automatizzato in linea, operatore per controllo DUD	HACCP	manuale
Controllo avviamento e vuoto post	Totale produzione giornaliera (50.152 unità)	1 campione orario	Operatore, vuotometro	HACCP	manuale
Controllo radiogeno etichettatura	Totale produzione giornaliera (50.152 unità)	a tappeto	Automatizzato in linea	HACCP	manuale
Controllo prodotti finiti	Totale produzione giornaliera (50.152 unità)	1 vaso/h, su vaso non etichettato in caso di vaso discontinuo	operatore	HACCP	manuale
Check liberazione lotto	Totale produzione giornaliera (50.152 unità)	Flag sui vari controlli	operatore	Limiti interni/limiti di legge a seconda del parametro	manuale

Tabella 5: Razionalizzazione dei controlli lungo il processo produttivo

## Identificazione criticità: i pain points del processo produttivo

Analizzando accuratamente la mappatura del processo sopra descritta, sono emerse delle criticità lungo la catena di produzione della “Salsa Alfredo Pesto”.

Sono stati identificati due grandi filoni critici all’interno del processo produttivo, rispettivamente quello statistico e quello tecnologico.



Per quel che concerne l’aspetto statistico, si è constatato che l’azienda non effettua controlli rappresentativi in ingresso sui vasi in vetro e sulle materie prime (MP). In un settore come quello dell’alimentare, la qualità dei materiali in entrata è critica per la sicurezza del prodotto finale. Effettuare controlli statistici in ingresso, infatti, è spesso una buona pratica perché consente di identificare rapidamente eventuali anomalie e di agire tempestivamente per evitare che materiali non conformi compromettano il processo produttivo. Questo tipo di controllo aiuta a prevenire costi di rilavorazione e scarti più elevati nelle fasi successive, dove i difetti sono più costosi da correggere. Con materiali di qualità stabile e garantita, il processo produttivo può essere ottimizzato, risultando più fluido e meno soggetto a fermate o variazioni impreviste.

Relativamente alle criticità tecnologiche, invece, un aspetto rilevante identificato come pain point del processo produttivo riguarda la difettosità dei vasi in vetro. Da interviste svolte con operatori interni all'azienda, è emersa una mancanza di tracciabilità in merito alla registrazione delle rotture e delle difettosità dei vasi. Non tenendone in considerazione, diventa complesso per l'azienda eseguire un'analisi delle cause (root cause analysis) per identificare dove si originano i problemi e per adottare soluzioni efficaci in modo da evitare che tale problema si ripresenti. In aggiunta, la mancanza di previsione dei difetti e delle rotture rende più difficile avere una visione accurata dei costi di produzione. Tali costi aggiuntivi non monitorati mediante un'accurata previsione possono influenzare il margine di profitto dell'azienda e compromettere l'efficienza complessiva del processo produttivo.

Inoltre, è emerso come l'azienda utilizzi tuttora una metodologia di lavoro basata prevalentemente sull'uso massiccio di carta. In particolare, le informazioni relative alla maggior parte dei controlli effettuati durante il processo produttivo vengono trascritte da un operatore su specifiche schede cartacee, per poi essere solo in un secondo momento trasferite su schede Excel. Questo comporta inevitabilmente un aumento della probabilità di errore da parte dell'operatore, che rischia di commettere imprecisioni nella trascrizione dei dati, compromettendo così parzialmente o completamente il lavoro svolto. In aggiunta, l'assenza di un supporto da parte dei sistemi informatici provoca incertezze nell'analisi e nella valutazione dei dati raccolti.

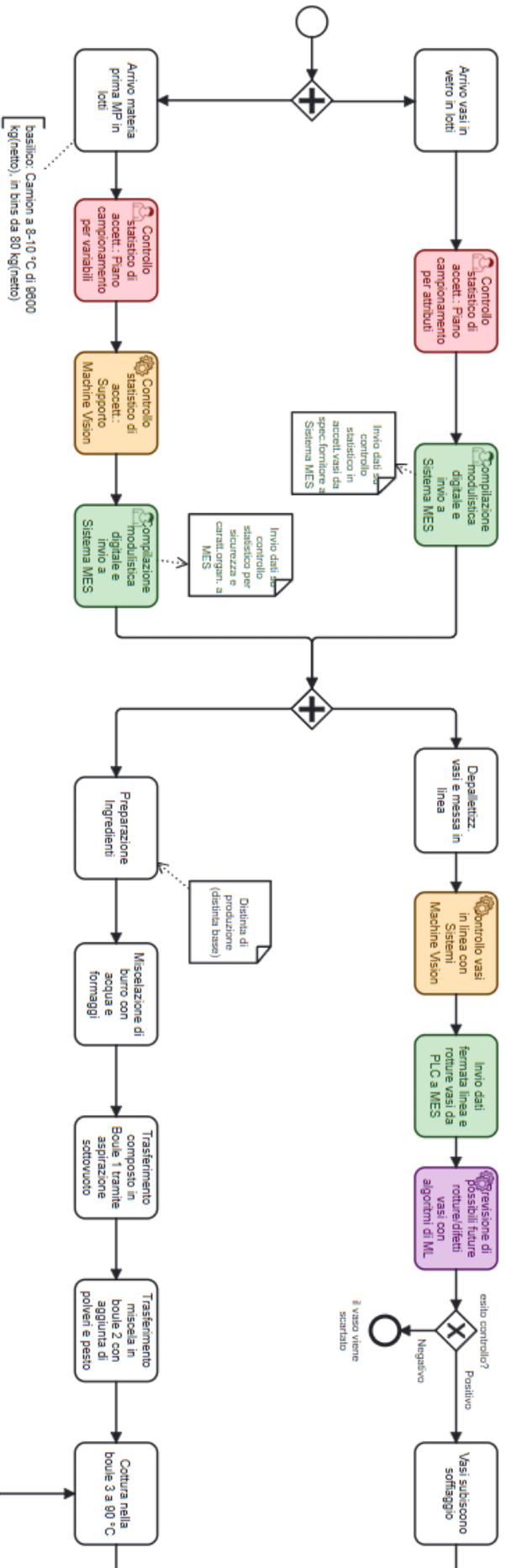
### Modello TO-BE

L'analisi delle criticità realizzata di sopra ha permesso di identificare le debolezze, le inefficienze e le vulnerabilità del processo produttivo descritto. Sulla base delle problematiche rilevate e delle esigenze emerse, viene elaborata in *Tabella 6* una proposta TO-BE, ossia un modello in grado di rispondere ai punti critici individuati con proposte concrete per l'integrazione di nuove tecnologie e metodologie, al fine di ottimizzare la funzionalità e l'efficacia del processo.

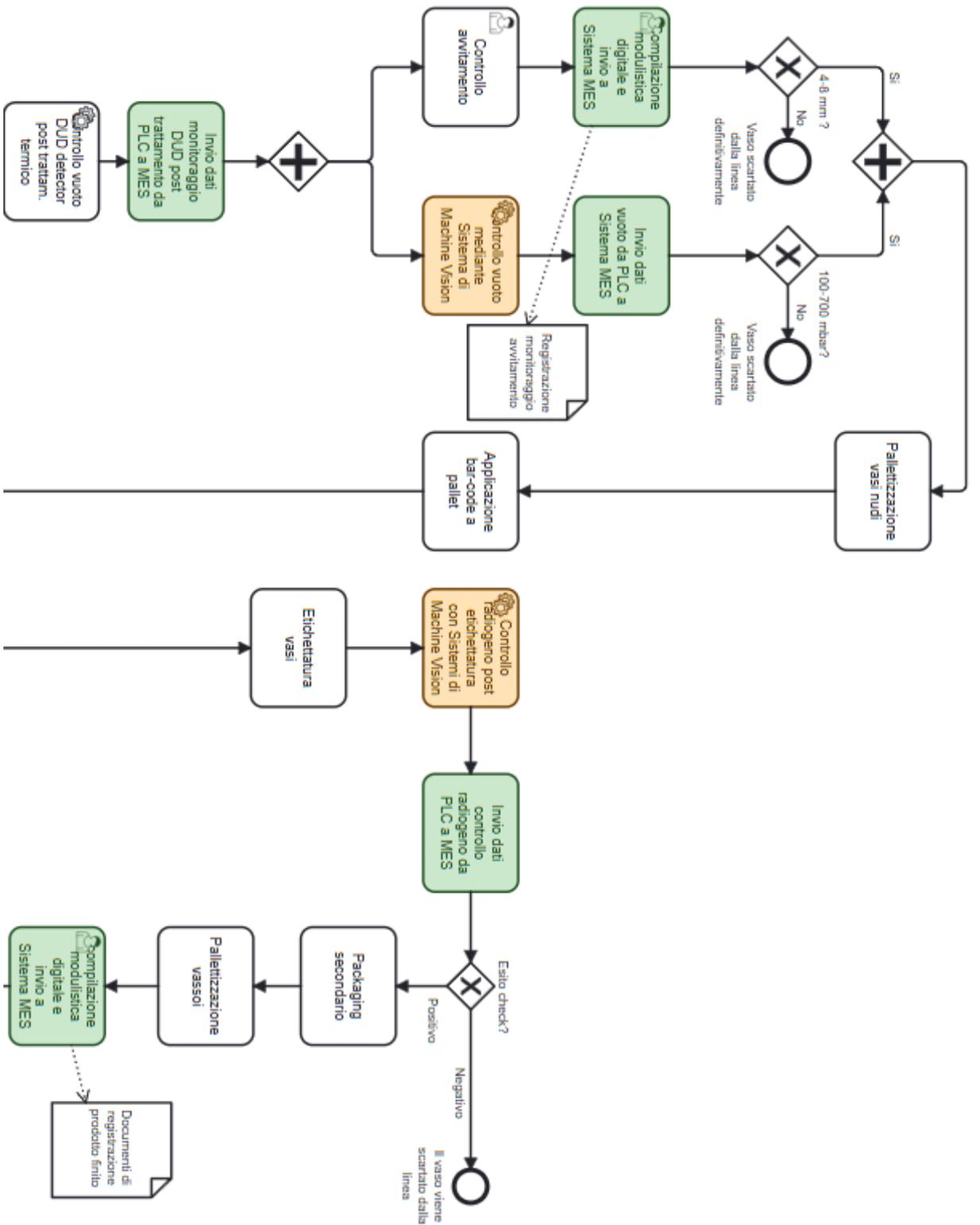
<b>Pain point</b>	<b>Soluzione</b>	<b>Riferimenti</b>
<b><u>Assenza di un controllo statistico di accettazione sui vasi in vetro</u></b>	Piano di campionamento per attributi sui vasi in vetro	(Prata et al. 2021), (Aslam et al. 2019), (Montgomery D.C. e Runger G.C., 2012), (D. C. Montgomery., 2006)
<b><u>Assenza di un controllo statistico di accettazione sulle MP</u></b>	Piano di campionamento per variabili sulle MP	(Figueiredo, Figueiredo, e Gomes, 2015), (Santos-Fernández, Govindaraju, e Jones 2014), (Sarkisyan, 2017), (Montgomery D.C. e Runger G.C., 2012), (D. C. Montgomery., 2006)
<b><u>Mancanza di tracciabilità e di previsione delle rotture e delle difettosità dei vasi in vetro</u></b>	Sistemi di Machine Vision e Algoritmi di Machine Learning	(Amani, Badak-Kerti, e Mousavi Khaneghah 2022), (Gabrova et al., 2021), (Kakani et al. 2020), (Saha e Manickavasagan 2021), (Kakani et al. 2020), (Manjubargavi e Subhashini 2023), (Puttero et al. 2024)
<b><u>Metodologia di lavoro basata sull'utilizzo massiccio di carta</u></b>	Interoperabilità dei sistemi informatici: MES e PIMS	(Shojaeinasab et al. 2022), (Jaskó et al. 2020), (T. Yang et al. 2021), (De Araujo, Lima, e Bispo 2021), (Enste, 2018)

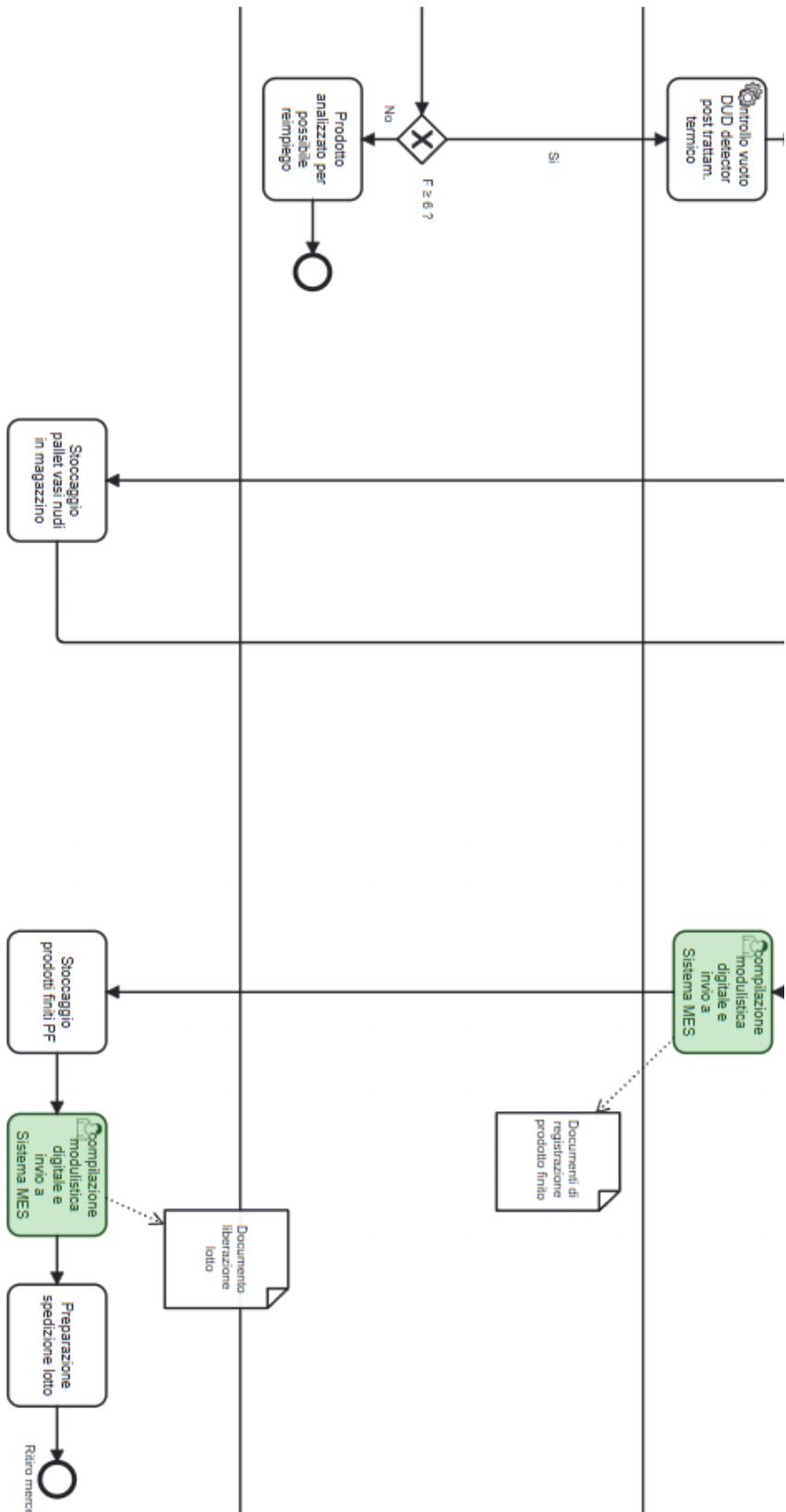
*Tabella 6: Modello TO-BE*

Si mostra di seguito tramite BPMN il re-design del sistema di tracciabilità e controllo qualità analizzato, con al suo interno l'implementazione delle soluzioni proposte in *Tabella 6*.









Come si può notare dal diagramma di flusso, rispetto alla Mappatura AS-IS, sono stati introdotti quattro tipologie di task colorati:

1. **Colore rosso:** indica un task che prevede l'implementazione di un piano di campionamento per il controllo statistico di accettazione
2. **Colore arancione:** indica un task che prevede l'implementazione di un Sistema di Machine Vision
3. **Colore viola:** indica un task che prevede l'implementazione degli Algoritmi di Machine Learning
4. **Colore verde:** indica un task che prevede l'implementazione di un sistema integrato, ad alto livello, di tracciabilità dei dati lungo il processo produttivo come MES e PIMS

Così come per la mappatura AS-IS, invece, vi sono task di tipo "user" e di tipo "service". Essi hanno un significato differente:

- "User" task: sono utilizzati quando è l'operatore a svolgere l'azione
- "Service" task: sono utilizzati quando il controllo effettuato è automatizzato in linea oppure nel caso in cui è direttamente il sistema a svolgere l'azione

Infine, la presenza dei nodi merge, così come nell'AS-IS, serve per verificare se il controllo effettuato ha avuto esito positivo o negativo.

Tramite tutte queste simbologie, si è riusciti a rappresentare graficamente le soluzioni innovative volte a risolvere le criticità, di sopra elencate, del processo produttivo.

Si presenta di seguito un approfondimento accurato relativamente alle migliori statistiche e tecnologiche sopra citate.

## Migliorie a livello di pensiero statistico

Per ovviare alla problematica riscontrata relativa ai mancati controlli statistici, una possibile soluzione potrebbe essere quella legata all'implementazione di controlli di accettazione in ingresso sui vasi in vetro e sulle MP.

## Background sui piani di campionamento

Il controllo di accettazione può essere distinto in controllo a tappeto (100%) e controllo campionario, a sua volta suddiviso in percentuale e statistico (Prata et al. 2021).

Il controllo a tappeto viene utilizzato quando non è ammessa la presenza di elementi difettosi in quanto si vanno a controllare tutti i componenti costituenti il lotto, il controllo campionario percentuale prevede a priori di controllare una % dell'intera popolazione, indipendentemente da quanto essa sia grande, con l'idea errata di ottenere un grado di protezione costante, mentre il controllo campionario statistico prevede di determinare il campione e i criteri di accettazione sulla base della numerosità e della tipologia qualitativa della popolazione.

È in quest'ultima categoria, ovvero in controllo campionario statistico, che rientra il piano di campionamento che verrà studiato ed analizzato. Un piano di campionamento viene definito, più precisamente, come un insieme di procedure e linee guida progettate per raccogliere campioni rappresentativi di un prodotto o di un lotto di alimenti al fine di verificarne la qualità, la sicurezza e la conformità agli standard normativi (Santos-Fernández, Govindaraju, e Jones 2014). Esso non rappresenta un diretto controllo di qualità e non elimina il controllo di processo in produzione, bensì serve a ridurre drasticamente le difettosità del materiale in ingresso.

Esistono delle condizioni affinché un controllo campionario statistico, dicesi piano di campionamento, possa sostituirsi ad un controllo a tappeto:

- Il controllo è di tipo distruttivo

- I costi e i tempi del controllo sono proibitivi
- Il prodotto del fornitore gode di un'ottima fama di qualità

In aggiunta, effettuare un controllo campionario statistico comporta una riduzione degli errori di ispezione e dei danneggiamenti del prodotto. Il controllo campionario percentuale, invece, rappresenta una soluzione da non implementare, priva di fondamento statistico, che può portare ad una valutazione errata finale del lotto.

Prima di analizzare le due principali tipologie di piani di campionamento, occorre definire dei parametri chiave, descritti in *Applied Statistics and Probability for Engineers* di Montgomery D.C. e Runger G.C. e riassunti di sotto in *Tabella 7*.

<b>Parametro</b>	<b>Definizione</b>
<b><u>Lotto</u></b>	Quantità di un prodotto o materiale raccolto in condizioni considerate uniformi ai fini del campionamento. La dimensione del lotto è rappresentata con il simbolo N.
<b><u>Difetto/Non conformità</u></b>	Una qualsiasi manifestazione del prodotto del non raggiungimento di una specifica
<b><u>Difettoso</u></b>	Un qualsiasi elemento che non è conforme alle specifiche: un elemento è difettoso quando presenta almeno un difetto o una non conformità. Il numero di elementi difettosi nel lotto viene indicato con $m \leq N$ .
<b><u>Percentuale di difettosi</u></b>	Rapporto tra il numero di elementi di fornitura difettosi e la dimensione del lotto. Questo valore, espresso con p, è ottenibile solo nel caso in cui si conosca il

	valore esatto di elementi difettosi $m$ presenti nel lotto.
	In simboli, $p = m / N$ con $0 \leq p \leq 1$ .
<b><u>Campione</u></b>	Insieme di elementi $n$ estratti casualmente dal lotto $N$ .
<b><u>Numero di accettazione</u></b>	Massimo numero di difettosi, indicato con $c$ , ammessi nel campione $n$ .

*Tabella 7: Definizioni relative ai controlli di accettazione*

Avendo esplicitato dettagliatamente tali parametri, diventa opportuno definire un piano di campionamento ed il suo dimensionamento; in primis, occorre scegliere il tipo di piano, dal momento che possono essere classificati in due famiglie principali:

- I piani di campionamento per attributi si basano sull'analisi della presenza di elementi difettosi o non difettosi all'interno del lotto, non è d'interesse la verifica dettagliata dell'entità del difetto. Il risultato che si ottiene è del tipo: "lotto passa, lotto non passa". Possono essere semplici, doppi, multipli, sequenziali.
- I piani di campionamento per variabili prevedono il controllo di una vera e propria variabile di qualità misurabile. In questo caso, il ragionamento sull'accettazione o sul rifiuto del lotto non dipende dalla conformità del prodotto ma si basa sul controllo dei valori assunti dalla distribuzione della variabile considerata.

Analizzando più precisamente le differenze presenti tra i due metodi statistici, il piano di campionamento per attributi risulta più semplice da implementare, comporta costi minori ma allo stesso tempo richiede, a parità di curva caratteristica operativa (OC), un campione di numerosità maggiore rispetto al piano di campionamento per variabili. Quest'ultimo basandosi sulla misura di una variabile di qualità, permette di avere più informazioni sul processo che si sta osservando, risultando più efficiente perché

permette di conoscere meglio il processo da cui provengono i lotti che si analizzano. Inoltre, essi possono lavorare in maniera accettabile anche con livelli di AQL molto bassi; infatti, pur lavorando con livelli di AQL molto bassi i campioni richiesti sono ancora di numerosità gestibili (mentre usando i piani per attributi le numerosità esploderebbero). Dall'altra parte, ha lo svantaggio, rispetto al piano per attributi, di dover necessariamente conoscere la distribuzione della variabile di qualità considerata, al fine di evitare una distribuzione inappropriata dei dati. Per questo motivo, la variabile di qualità che considero è spesso basata sulla storia del processo di produzione (Aslam et al. 2019).

Ecco riassunte in *Tabella 8* le principali differenze:

<b>Caratteristica</b>	<b>Piano di campionamento per attributi</b>	<b>Piano di campionamento per variabili</b>
<b><u>Tipo di analisi</u></b>	Conforme/non conforme	Quantitativa (misurazione dei valori)
<b><u>Efficienza statistica</u></b>	Richiede campioni più grandi	Richiede campioni più piccoli
<b><u>Costo iniziale</u></b>	Basso	Moderato-alto
<b><u>Costo operativo</u></b>	Moderato, cresce con (n)	Inferiore, grazie a campioni ridotti
<b><u>Applicabilità</u></b>	Universale	Limitata a caratteristiche misurabili
<b><u>Requisiti tecnici</u></b>	Bassi	Alti
<b><u>Informazione fornita</u></b>	Limitata	Dettagliata (media, varianza, ecc.)

*Tabella 8: Differenza tra piano per attributi e piano per variabili*

A prescindere dalla tipologia di piano di campionamento implementata, la modalità di formazione del lotto incide direttamente sui risultati del campionamento. A tal proposito, viene definito un requisito fondamentale affinché il campionamento possa definirsi correttamente eseguito, ossia quello relativo al fatto che il lotto deve essere omogeneo, ovvero la “Salsa Alfredo Pesto” deve essere prodotta sempre sotto le stesse condizioni, quali stessi macchinari, stesse procedure, stesse MP e possibilmente stessi operatori (Santos-Fernández, Govindaraju, e Jones 2014).

In generale, è preferibile avere lotti di dimensioni maggiori rispetto a quelli piccoli (poiché risultano economicamente più vantaggiosi) che siano conformi alle modalità d'uso del fornitore e del committente, e gli imballaggi devono essere organizzati in modo da semplificare il campionamento, evitando di mescolare lotti tra loro differenti.

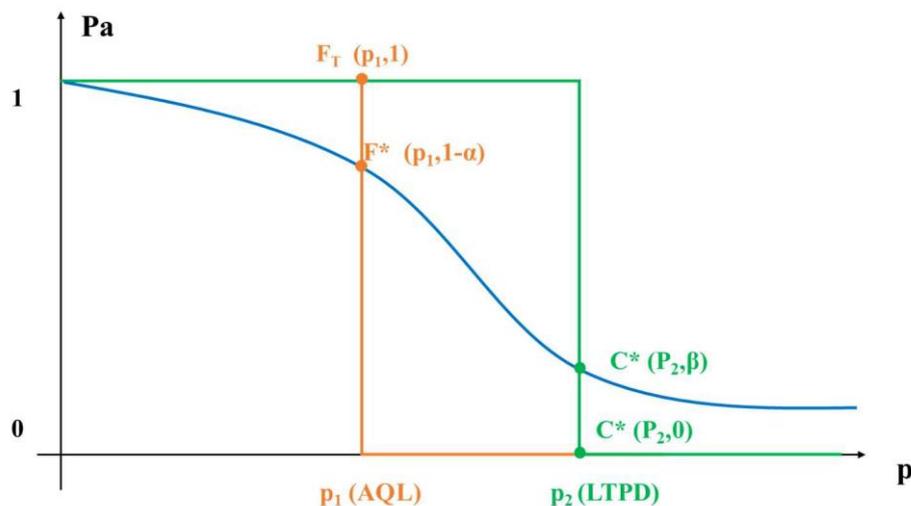
Un altro aspetto cruciale riguarda la selezione dei campioni. Le unità prelevate devono essere scelte in modo casuale e rappresentare adeguatamente il lotto. Se questo principio non viene rispettato, si rischia di introdurre un bias, ossia una distorsione sistematica durante la fase di campionamento (Sarkisyan, 2017). Per esempio, se chi effettua il controllo dei vasi in entrata preleva i vasi esclusivamente dalla parte superiore del pallet e il fornitore posiziona i pezzi conformi in cima e quelli difettosi sul fondo, il lotto potrebbe essere erroneamente considerato conforme anche se in realtà non lo è. La stessa identica cosa vale per la selezione del campione di MP.

Adottando un punto di vista più operativo, per poter implementare un piano di campionamento e definirne la relativa curva OC, occorre determinare quattro valori cardini:

- $\alpha$ , comunemente denominato Errore di I specie, indica la probabilità di rifiutare un lotto che in realtà andrebbe accettato.  $(1-\alpha)$  rappresenta la probabilità di accettazione  $P_a$

- $\beta$ , comunemente denominato Errore di II specie, indica la probabilità di accettare un lotto che in realtà andrebbe rifiutato
- **AQL**, acronimo di Acceptance Quality Level, indica il livello di qualità accettabile del lotto per il quale il fornitore ammette un rischio alfa, ossia il valore limite della percentuale di difettosi nel lotto, al di sopra del quale il fornitore è disposto a vedersi rifiutare il lotto da parte del committente (con un rischio pari a  $\alpha$ )
- **LTPD**, acronimo di Lot Tolerance Percentage Defectives, indica la percentuale massima di difettosi che il committente è disposto ad accettare nel lotto, ossia il valore limite della percentuale di difettosi nel lotto, al di sotto del quale il committente è disposto ad accettare il lotto (con un rischio pari a  $\beta$ ). Vale sempre  $AQL \leq LTPD$

Questi valori, tra di loro accoppiati in (AQL;  $1-\alpha$ ) e (LTPD;  $\beta$ ), creano, su un piano bidimensionale, la Curva Caratteristica Operativa (OC) sopra citata e mostrata in *Figura 32*.



*Fig.32: Curva Caratteristica Operativa OC tratta dal Volume “Controllo statistico della qualità” di Douglas C. Montgomery.*

Essa rappresenta la probabilità di accettazione del lotto in funzione della frazione di unità difettose. Esprime la capacità discriminatoria del piano di campionamento, mostrando la probabilità che un lotto sottoposto a

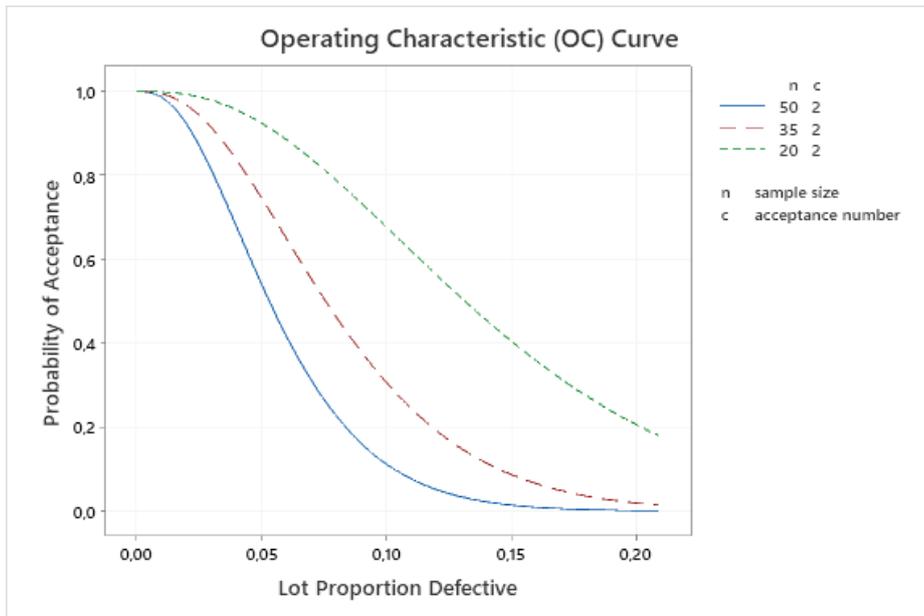
ispezione e che presenta una certa frazione di elementi difettosi sia accettato o rifiutato (Aslam et al. 2019).

Da un punto di vista teorico, la OC ideale è la funzione a gradino rappresentata in verde in *Figura 32*. Essa prevede una probabilità di accettazione pari a 1, con valori di  $\alpha$  e  $\beta$  prossimi a 0, tipici di un controllo a tappeto. Aumentando i valori di  $\alpha$  e  $\beta$ , si arriva ad ottenere la curva OC generica blu, con il punto  $F^*(AQL, 1-\alpha)$  che rappresenta la posizione pratica del fornitore e il punto  $C^*(LTPD, \beta)$  che rappresenta la posizione pratica del committente.

La OC, e il suo relativo andamento, dipende strettamente dai parametri  $n$  e  $c$ . In particolare,  $n$  esprime la selettività della curva in termini di pendenza della stessa mentre  $c$  ne definisce la severità in termini di spostamento della stessa.

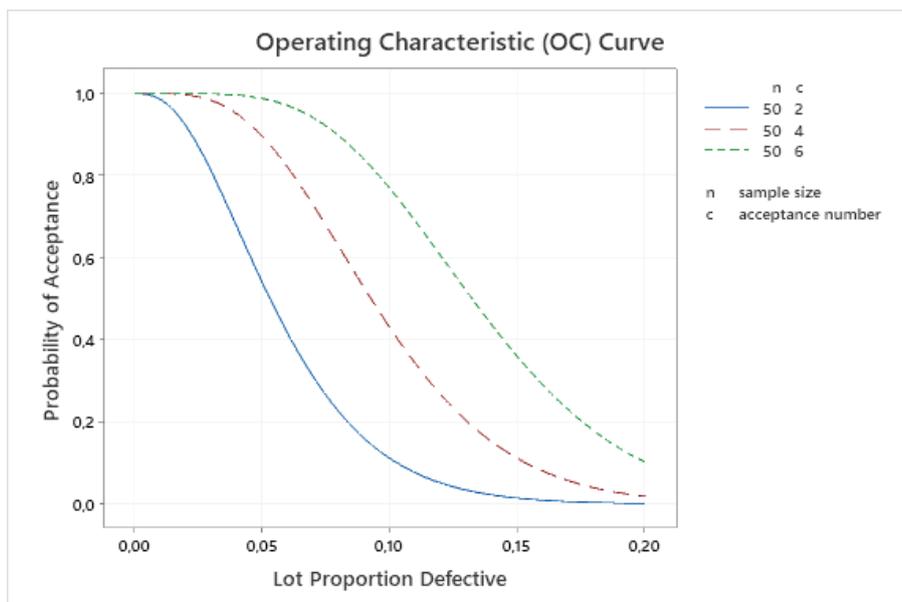
A tal proposito, per mostrarne la diretta correlazione, si è deciso di prendere a titolo di esempio i seguenti valori:  $AQL = 0,015\%$ ,  $\alpha = 5\%$ ,  $LTPD = 0,1\%$  e  $\beta = 10\%$ . A partire da questi, si analizza l'andamento della OC al variare di  $n$  e al variare di  $c$ , mediante l'utilizzo del software statistico di calcolo Minitab.

In *Figura 33*, è mostrato l'effetto della numerosità del campione  $n$  sulla OC. Presi d'esempio tre campioni rispettivamente di numerosità  $n_1 = 50$ ,  $n_2 = 35$  e  $n_3 = 20$ , si nota come, al diminuire di  $n$  e con un valore di  $c$  fissato pari a 2, la curva OC tende a diventare meno selettiva, ossia più morbida. Viceversa, all'aumentare di  $n$ , la curva sarebbe divenuta più selettiva, ossia in grado di selezionare meglio tra lotti buoni e lotti cattivi, con una forma maggiormente a gradino. In generale, più il campione di numerosità  $n$  si avvicina al lotto  $N$ , più la curva OC risulterà essere selettiva, fino al punto in cui, per  $n = N$ , la curva sarà completamente a scalino (caso ideale).



*Fig.33: Effetto della numerosità del campione n sulla OC (Minitab)*

Dall'altra parte, in *Figura 34*, si nota l'effetto del numero di accettazione c sulla OC. Preso un campione di esempio con n fissato pari a 50, all'aumentare di c la curva tende a spostarsi verso destra, diventando meno severa, con una Pa più alta. Viceversa, al diminuire di c, la curva si sarebbe spostata verso sinistra, diventando più severa, con una Pa più bassa.



*Fig.34: Effetto del numero di accettazione c sulla OC (Minitab)*

Da un punto di vista pratico, si deve ricordare come la progettazione dei piani di campionamento possa avvenire secondo diverse modalità:

- Progettazione di piani ad hoc
- Progettazione secondo norme (i.e. ISO, MIL STD 105E)

Questa differenziazione verrà analizzata solamente all'interno del piano di campionamento per attributi.

Si analizzano, di sotto, i piani di campionamento implementati, rispettivamente per attributi e per variabili, relativi all'azienda medio-grande di riferimento del settore agroalimentare italiano.

### Piano di campionamento per attributi sui vasi in vetro

Effettuare un piano semplice per attributi significa fare un solo campionamento e, in base ai risultati ottenuti dall'analisi di quel campione  $n$ , decidere se accettare o meno l'intero lotto  $N$ .

Relativamente ai vasi in vetro, si applica di seguito un piano di campionamento semplice per attributi, andando a valutare sia una progettazione ad hoc del piano sia una progettazione secondo la norma UNI ISO 2859-1, sigla nazionale ed internazionale della MIL STD 105E.

### Progettazione Piano ad hoc

Il modello di riferimento per la progettazione di un piano di campionamento semplice ad hoc è la distribuzione ipergeometrica. In *Figura 35*, è mostrata l'espressione della probabilità di accettazione  $P_a$ , data una percentuale di difettosità  $p$  in entrata.

Siano  $N$  la dimensione del lotto  
 $n$  la dimensione del campione estratto  
 $c$  numero massimo di elementi difettosi  
che possono essere presenti nel  
campione

La probabilità di  
accettazione  
di un lotto (che ha una  
difettosità  $p$ ) vale:

$$P_{N,n,c,p} = \sum_{i=0}^c \frac{\binom{N-Np}{n-i} \binom{Np}{i}}{\binom{N}{n}}$$

Fig.35: Probabilità di accettazione con distribuzione Ipergeometrica

Tutti i passi da seguire elencati di seguito sono stati analizzati dal Volume *Controllo statistico della qualità* di Douglas C. Montgomery.

Operativamente, il fornitore e il committente si accordano per definire uno specifico piano di campionamento: sulla base dei valori di AQL, LTPD,  $\alpha$  e  $\beta$ , si dovranno determinare la numerosità del campione da estrarre ( $n$ ) e il numero di accettazione ( $c$ ).

Ciò può essere fatto risolvendo il seguente sistema:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 - \alpha = \frac{\sum_{i=0}^c \binom{N - N^* AQL}{n-i} \binom{N^* AQL}{i}}{\binom{N}{n}} \\ \beta = \frac{\sum_{i=0}^c \binom{N - N^* LTPD}{n-i} \binom{N^* LTPD}{i}}{\binom{N}{n}} \end{array} \right.$$

Fig.36: Sistema con distribuzione Ipergeometrica per calcolo di  $(n,c)$

Esso si trova imponendo il passaggio della curva operativa OC per le posizioni di committente e fornitore. Quindi, quando  $p = AQL$  devo ottenere

$1-\alpha$ , mentre quando  $p = \text{LTPD}$  devo ottenere  $\beta$ . Questo sistema, però, non è risolvibile in forma chiusa. Esiste un metodo più approssimato per risolvere il sistema ma occorre fare un passaggio aggiuntivo.

Nelle situazioni in cui  $n \leq N/10$  (cioè  $N$  è molto grande), la distribuzione ipergeometrica può essere approssimata dalla distribuzione binomiale, perchè è come se attingessimo da una popolazione infinita. In letteratura, quando si usa la distribuzione ipergeometrica si parla di curva caratteristica operativa di tipo A, mentre quando si parla di approccio approssimato tramite l'uso della Binomiale si parla di curva caratteristica operativa di tipo B. L'ipotesi che si assume è che ogni unità del lotto sottoposta al controllo non influisce sul numero di elementi difettosi esistenti nel lotto stesso. In questo modo, cambia la probabilità di accettazione  $P_a$ , che diverrà quella mostrata in *Figura 37*, dove  $N$  non è presente perché considerato molto grande.

$$P_{n,c,p} = \sum_{i=0}^c \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i}$$

*Fig.37: Probabilità di accettazione con distribuzione Binomiale*

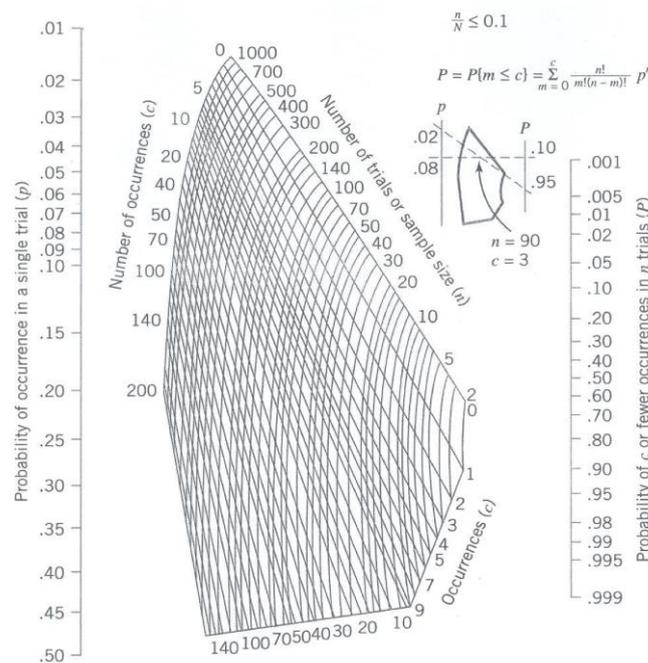
Data questa approssimazione, il sistema può essere ridotto in:

$$\begin{cases} 1 - \alpha = \sum_{i=0}^c \binom{n}{i} \text{AQL}^i (1 - \text{AQL})^{n-i} \\ \beta = \sum_{i=0}^c \binom{n}{i} \text{LTPD}^i (1 - \text{LTPD})^{n-i} \end{cases}$$

*Fig.38: Sistema con distribuzione Binomiale per calcolo di  $(n,c)$*

La risoluzione del sistema, sebbene sia complessa e spesso non agevole, consente di determinare le caratteristiche del piano di campionamento semplice desiderato (n, c).

Solitamente, per questa tipologia di piani di campionamento, si preferisce utilizzare il metodo grafico, ovvero il Nomogramma di Montgomery, illustrato in *Figura 39*, che consente una risoluzione semplice del sistema.



*Fig.39: Nomogramma di Montgomery per piani di campionamento per attributi*

Esso può essere utilizzato soltanto se la distribuzione considerata è di tipo Binomiale e non Ipergeometrica. Prevede sulla scala di sx i valori di p, ossia AQL e LTPD, mentre sulla scala di dx i valori di Pa, ossia i valori corrispondenti a  $(1-\alpha)$  e  $\beta$ . La scala nella parte alta del nomogramma rappresenta n mentre la scala nelle parti laterali del nomogramma rappresenta c. Con questo metodo, incrociando le coppie di valori (AQL,  $1-\alpha$ ) e (LTPD,  $\beta$ ), trovo la numerosità campionaria (n) e il numero di accettazione (c).

Nel nostro caso studio, non verrà implementato nessuno di questi tre metodi per calcolare i parametri (n,c), bensì si utilizzerà un software statistico apposito quale Minitab.

E' bene precisare che vengono fatte delle ipotesi sostanziali al fine di studiare il problema nel dettaglio. In particolare, viene ipotizzata una dimensione media del lotto di consegna pari a 30.000 vasi. A tal proposito, si ipotizza che la fase di stoccaggio non influisca sulla qualità del vaso stesso.

Piu' precisamente, i valori di  $\alpha$  e  $\beta$  considerati sono solitamente così fissati in letteratura, il valore di AQL viene fornito dall'azienda in questione e varia a seconda del tipo di difetto da analizzare (critico: danni al consumatore, primario: deterioramento prodotto, maggiore: interruzione linee di riempimento e minore: natura estetica). Nell'esempio descritto, si considera il difetto come critico e quindi un valore di AQL pari a 0,015%. Il valore del LTPD, invece, è tipico del settore di riferimento considerato, come descritto nel Volume *Controllo statistico della qualità* di Douglas C. Montgomery.

Fatte tali considerazioni, i parametri operativi in input del piano di campionamento sono i seguenti:

- $N = 30.000$  unità (numero medio di vasi del lotto di produzione in arrivo dal fornitore. Si ipotizza che la fase di stoccaggio e di conservazione non influiscono sulla qualità del vaso in vetro)
- $\alpha = 5\%$
- $\beta = 10\%$
- $AQL = 0,015\%$
- $LTPD = 0,05\%$

Dato  $N$  molto grande, si approssima la distribuzione Ipergeometrica con la distribuzione Binomiale. Progettando il piano di campionamento sulla base delle premesse sopra esposte, si ottiene il risultato illustrato in *Figura 40*, accompagnato dalla relativa curva OC riportata in *Figura 41*.

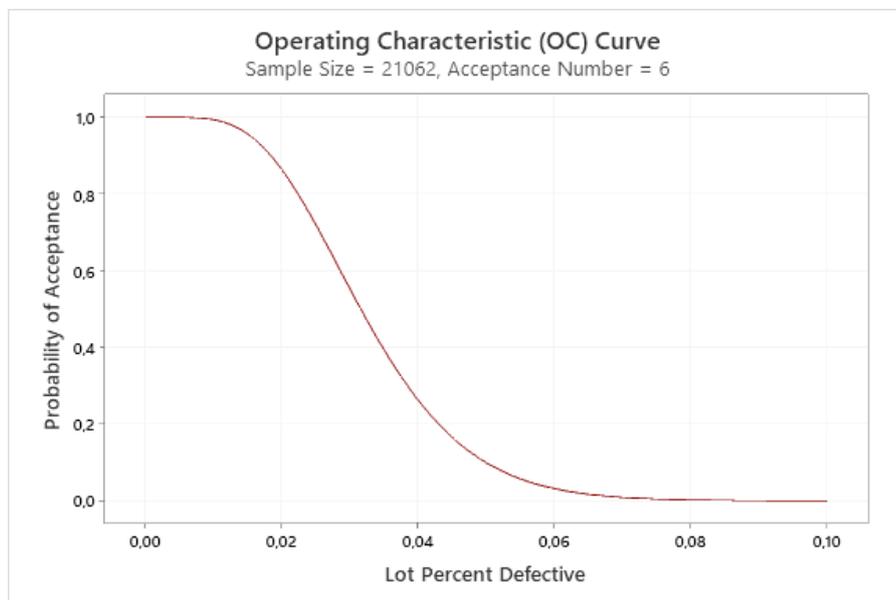
### Generated Plan(s)

Sample Size 21062  
Acceptance Number 6

*Accept lot if defective items in 21062 sampled  $\leq$  6; Otherwise reject.*

Percent Defective	Probability Accepting	Probability Rejecting
0,015	0,958	0,042
0,050	0,100	0,900

*Fig.40: Risultato di un Piano di Campionamento semplice per Attributi  
(Elaborazione su software Minitab)*



*Fig.41: Curva Caratteristica Operativa OC ottenuta con un Piano di  
Campionamento semplice per Attributi (Minitab)*

I risultati evidenziano:

- Dimensione del campione (n) richiesta: 21.062 unità
- Numero massimo di difettosi accettabili (c): 6 unità

## Progettazione Piano secondo la norma MIL STD 105E

Poiché l'applicazione di un piano di campionamento ad hoc risulti complessa sebbene rappresenti la metodologia più rigorosa dal punto di vista statistico, viene indagata un'alternativa: la norma MIL STD 105E.

Tale norma nasce durante la Seconda Guerra Mondiale, per le applicazioni del controllo di qualità in ambito bellico. La prima edizione pubblicata è del 1950 (versione MIL STD 105A). Oggi, siamo arrivati alla versione E ed è la norma più utilizzata al mondo per il controllo di accettazione per attributi; a livello internazionale la MIL STD 105E è stata recepita nella norma ISO 2859-1.

È costituita da una serie di schemi di campionamento combinati in maniera opportuna, in modo da poter essere utilizzati pur non avendo una solida base statistica. La cosa importante è che se si decide di applicare la norma non bisogna fare variazioni, proprio perché la norma si basa su ragionamenti statistici, per cui anche piccole variazioni possono portare a conseguenze importanti sul risultato. Anche in questo caso, gli step da intraprendere seguono quanto affermato in *Controllo statistico della qualità* da Douglas C. Montgomery.

Applicando tale norma, per poter implementare un piano di campionamento, il primo strumento da utilizzare è la seguente tabella, illustrata in *Figura 42*.

Lot or Batch Size	Special Inspection Levels				General Inspection Levels		
	S-1	S-2	S-3	S-4	I	II	III
2 to 8	A	A	A	A	A	A	B
9 to 15	A	A	A	A	A	B	C
16 to 25	A	A	B	B	B	C	D
26 to 50	A	B	B	C	C	D	E
51 to 90	B	B	C	C	C	E	F
91 to 150	B	B	C	D	D	F	G
151 to 280	B	C	D	E	E	G	H
281 to 500	B	C	D	E	F	H	J
501 to 1200	C	C	E	F	G	J	K
1201 to 3200	C	D	E	G	H	K	L
3201 to 10000	C	D	F	G	J	L	M
10001 to 35000	C	D	F	H	K	M	N
35001 to 150000	D	E	G	J	L	N	P
150001 to 500000	D	E	G	J	M	P	Q
500001 and over	D	E	H	K	N	Q	R

*Fig.42: Livelli speciali e standard di ispezione al variare della numerosità del lotto*

Per caratterizzare meglio la curva operativa caratteristica OC, e quindi per definire un piano più o meno severo e più o meno selettivo, ci si basa sui livelli di ispezione (basso I, normale II, alto III) e poi, per campioni molto piccoli, vengono definiti dei livelli di ispezione speciali (S1, S2, S3, S4). La tabella si usa identificando la numerosità del lotto e poi definendo il livello di ispezione desiderato. Entrambi sono valori che, insieme all'AQL, vengono decisi da colui che progetta il piano. L'incrocio tra la numerosità del lotto e il livello di ispezione è una lettera, che viene usata in una successiva tabella, mostrata in *Figura 43*, per determinare la progettazione del piano (numerosità del campione n, livello di accettazione c, livello di rifiuto r).

La norma prevede tre tipi di campionamento (singolo, doppio, multiplo) e tre tipologie di ispezione (normale, rinforzata, ridotta). Le tipologie di ispezione fanno parte del percorso di applicazione del piano di campionamento: secondo la norma, una volta definita la lettera incrociando la numerosità del lotto N e il livello di ispezione nella tabella precedente, si parte con una ispezione di tipo normale; se poi ci si accorge che la qualità dei lotti è piuttosto scarsa si passa ad una ispezione di tipo rinforzato, mentre se ci si

accorge che la qualità dei lotti è piuttosto buona allora si passa ad una ispezione ridotta.

La tabella relativa all'ispezione normale è la seguente:

Sample size Code letter	Sample size	Acceptable Quality Levels (normal inspection) (AQL)																				Table 2 A					
		0.010	0.015	0.025	0.040	0.065	0.10	0.15	0.25	0.40	0.65	1.0	1.5	2.5	4.0	6.5	10	15	25	40	65	100	150	250	400	650	1000
		Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re	Ac/Re
A	2	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
B	3	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
C	5	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
D	8	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
E	13	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
F	20	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
G	32	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
H	50	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
J	80	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
K	125	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
L	200	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
M	315	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
N	500	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
P	800	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
O	1250	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
R	2000	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓

↓ = Use first sampling plan below arrow. If sample size equals, or exceeds, lot or batch size, do 100 percent inspection.  
 ↑ = Use first sampling plan above arrow.

Ac = Acceptance number.  
 Re = Rejection number.

Fig.43: Tabella relativa all'ispezione normale secondo MIL STD 105E

Nel concreto, i passi da eseguire per applicare la norma sono i seguenti:

- I. Selezionare il valore di AQL
- II. Selezionare il livello di ispezione, che può essere generale (I, II o III) o speciale (S1, S2, S3 o S4). I livelli speciali vengono utilizzati per campioni piccoli, caratterizzati da un alto livello di rischio
- III. Definire la numerosità del lotto N, in modo da estrarre un codice letterale dalla tabella in Figura 42, che consentirà di definire i valori di n
- IV. Selezionare il tipo di piano desiderato (semplice, doppio, multiplo)
- V. Consultare la tabella dell'ispezione normale (Figura 43) per definire i valori di n, c e r (numero di rifiuto).

Anche nel caso della norma MIL STD 105E, è bene precisare che vengono fatte delle ipotesi sostanziali al fine di studiare il problema nel dettaglio. In particolare, viene ipotizzata una dimensione media del lotto di consegna pari a 30.000 vasi. A tal proposito, si ipotizza che la fase di stoccaggio non

influisca sulla qualità del vaso stesso. Inoltre, si considera sempre il difetto come critico e quindi viene mantenuto il valore di AQL pari a 0,015%.

Fatte queste premesse, operativamente si considerano i seguenti parametri in entrata:

- AQL = 0,015%
- Livello di ispezione generale di tipo II
- N = 30.000 unità (numero medio di vasi del lotto di produzione in arrivo dal fornitore. Si ipotizza che la fase di stoccaggio e di conservazione non influiscono sulla qualità del vaso in vetro)
- Piano di campionamento singolo

Dal secondo e dal terzo valore, utilizzando la Tabella di *Figura 42*, si ottiene la lettera M. Passando alla Tabella di *Figura 43* relativa all'ispezione normale, incrociando il valore di AQL (0,015%) con la lettera M, si trova:

- Dimensione del campione (n) richiesta: 315 unità
- Numero di accettazione (c): 0 unità
- Numero di rifiuto (r): 1 unità

### Confronto e analisi

Come si può notare, con l'applicazione della norma si ottiene un valore di n pari a 315 unità, il quale risulta essere molto diverso da quello ottenuto con il piano di campionamento progettato ad hoc, pari a 21.062 unità. Per cercare di comprendere meglio tale differenza, si effettuano delle considerazioni sull'utilizzo della MIL STD 105E, secondo quanto riportato da Douglas C. Montgomery in *Controllo statistico della qualità*, in merito all'implementazione di piani di campionamento per attributi.

Innanzitutto, la norma è impostata esclusivamente sulla base del valore di AQL. Questo è un difetto normativo molto rilevante, che permette di trascurare la posizione del committente, e quindi il valore di LTPD, generando errori in chi progetta il piano di campionamento (Figueiredo,

Figueiredo, e Gomes, 2015). Inoltre, le numerosità campionarie proposte dalla norma sono limitate, diversamente dalle numerosità che possono venire fuori da campionamenti ad hoc. La numerosità campionaria è legata alla numerosità del lotto e i calcoli per le probabilità di accettazione (cioè per le curve caratteristiche operative OC) sono fatti usando sempre la distribuzione binomiale, quindi sono sempre curve di tipo B. Per di più, le regole di passaggio dal livello di ispezione normale a quello rinforzato, e viceversa, sono altamente criticabili: sono regole di buon senso e non regole rigorose. Questo fa sì che si verifichi spesso un abuso delle regole di passaggio nei livelli di ispezione, da normale a rinforzata, e viceversa, e da normale a ridotta, e viceversa (Aslam et al. 2019).

Se ci si sofferma più dettagliatamente sul confronto tra i due risultati ottenuti, emerge la seguente situazione, raffigurata numericamente in *Figura 44* e graficamente in *Figura 45*.

#### Compare User Defined Plan(s)

Sample Size(n)	Acceptance Number(c)	Percent Defective	Probability Accepting	Probability Rejecting
315	0	0,015	0,954	0,046
315	0	0,050	0,854	0,146
21062	6	0,015	0,958	0,042
21062	6	0,050	0,100	0,900

*Accept lot if defective items in n sampled  $\leq$  c; Otherwise reject.*

*Fig.44: Confronto Piano ad hoc con Piano con MIL STD 105E  
(Elaborazione su software Minitab)*

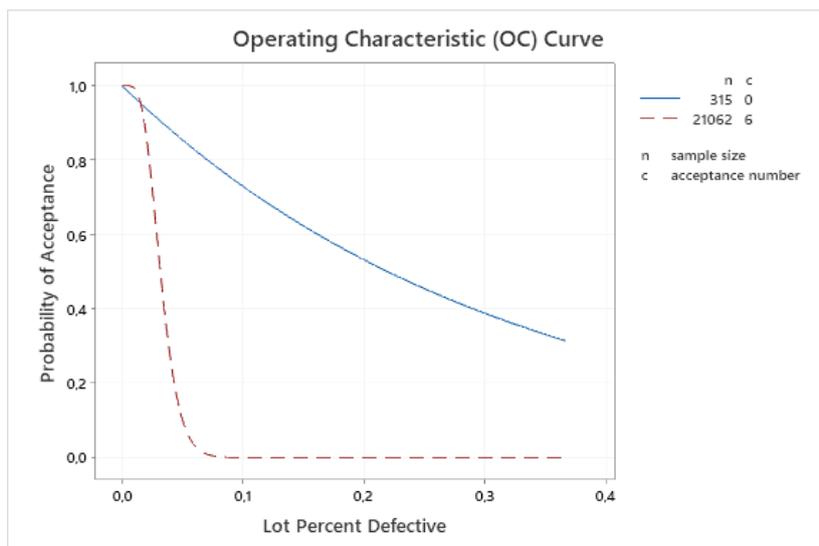


Fig.45: Confronto Curve OC dei due piani (Minitab)

Osservando quanto raffigurato, si può notare come, dati i valori di AQL,  $\alpha$ ,  $\beta$  e LTPD, il piano ad hoc risulti essere più severo ed economicamente molto più oneroso rispetto al piano realizzato mediante la normativa. Più specificatamente, il piano ad hoc genera un valore molto alto di  $n$  a causa di valori estremamente piccoli sia di AQL sia di LTPD mentre, dal canto suo, il piano secondo la norma risulta essere comunque costoso ma più tollerante in termini di  $n$ , dati quei valori in input di AQL e LTPD.

Come si nota in *Figura 44*, nel caso della norma, quando la percentuale di difettosità è pari al valore di AQL = 0,015%, la Pa è 0,954 mentre quando la percentuale di difettosità è pari al valore di LTPD = 0,05%, la Pa è 0,854, dunque si ha un rischio di accettazione alto, di circa il 15%, ed è ciò che ci si può aspettare dalla norma, ossia una probabilità di rifiuto molto bassa. Nel caso del piano ad hoc, invece, quando la percentuale di difettosità è pari al valore di AQL = 0,015%, la Pa è 0,958 mentre quando la percentuale di difettosità è pari al valore di LTPD = 0,05% la Pa diventa 0,100. È proprio per questo motivo che con il piano ad hoc si ottiene una numerosità nettamente più alta.

La differenza principale tra i due piani dipende, quindi, strettamente dal valore del LTPD, il quale risulta essere estremamente piccolo per il caso del

piano ad hoc. In particolare, con il piano secondo la normativa, dato il valore di LTPD in ingresso pari a 0,05%, ottengo un valore di  $\beta$  del 85,4%, molto distante rispetto al 10% ipotizzato con il piano ad hoc. Di conseguenza, con la norma non si sta rispettando il valore in input del LTPD, dato il valore di  $\beta$  ottenuto estremamente alto.

Occorre, quindi, sempre capire come gestire i valori di  $\beta$  e di LTPD. Se si ragiona con la norma, i costi sono fissati perché ho  $n = 315$  vasi da campionare, di conseguenza l'equilibrio da trovare per aver un piano basato sulla normativa non è dato dai costi ma dal trade-off tra il rischio  $\beta$  e la % di difettosi massima (LTPD). Se invece si opera con un piano ad hoc, si eseguono più tentativi variando i valori di  $\beta$  e di LTPD, ottenendo così diversi valori di  $n$ . In questo caso, si avrà un equilibrio tra  $\beta$ , LTPD e i costi (rappresentati da  $n$ ), col fine di ottenere un  $n$  non troppo costoso, un  $\beta$  non troppo rischioso e un LTPD né troppo basso né troppo alto.

In sintesi, il piano ad hoc richiederebbe un campionamento di 21.062 unità per garantire un LTPD dello 0,05%, il che rappresenterebbe un costo non ragionevole per l'azienda. L'alternativa con l'implementazione della norma MIL STD 105E, invece, sebbene abbassi significativamente la numerosità del campione, porterebbe ad una probabilità di accettazione del lotto difettoso troppo alta, rendendo il controllo non adeguato e inefficiente.

Le soluzioni che si prospettano per il caso di studio sarebbero, a questo punto, le seguenti:

- Rivedere, internamente all'azienda, i parametri di AQL e LTPD trovando un bilanciamento tra costo e affidabilità del piano di campionamento
- Affidarsi al fornitore dei vasi in vetro, richiedendo certificazioni di qualità e sessioni di audit al fine di ridurre il numero di controlli in ingresso

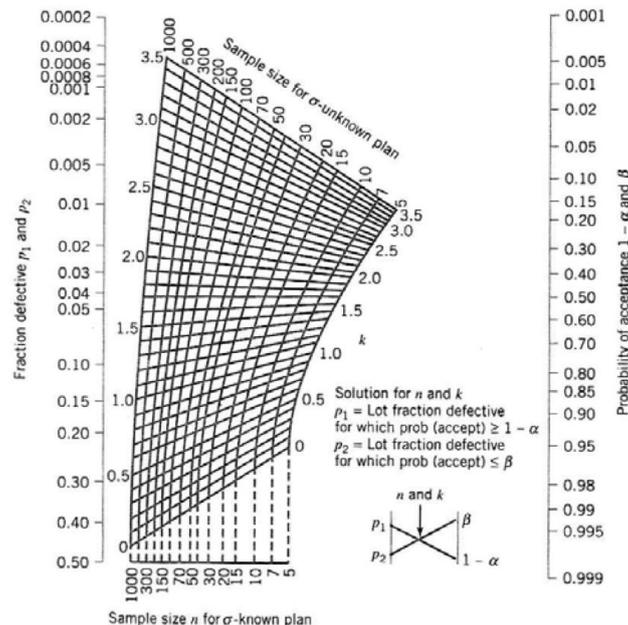
In conclusione, si può affermare che le norme rappresentano una soluzione implementabile se non si conosce la statistica ma, nel momento in cui si costruiscono delle basi statisticamente più rigorose e corrette, è meglio progettare campionamenti ad hoc.

## Piano di campionamento per variabili su MP

Spostando il focus dai vasi in vetro alle MP, si propone di seguito un piano di campionamento per variabili.

Il primo passo richiede, come per il piano di campionamento ad hoc per attributi analizzato di sopra, la definizione di quattro valori quali AQL, LTPD,  $\alpha$  e  $\beta$ . Una volta definiti, occorre determinare i valori della numerosità campionaria ( $n$ ) e del termine ( $k$ ). Quest'ultimo prende il posto del numero di accettazione ( $c$ ) visto per il piano per attributi e rappresenta la distanza tra la media della distribuzione della variabile di qualità considerata e il limite di specifica inferiore/superiore di riferimento (Santos-Fernández, Govindaraju, e Jones 2014).

Per determinare ( $n$ ) e ( $k$ ), si può utilizzare il metodo analitico, complesso da risolvere in forma chiusa, oppure il metodo grafico mediante nomogramma (illustrato in *Figura 46*), più semplice e intuitivo.



*Fig. 46: Nomogramma per i piani di campionamento per variabili*

Quest'ultimo prevede sulla scala di sx i valori di  $p$ , ossia AQL e LTPD, mentre sulla scala di dx i valori di  $P_a$ , ossia i valori corrispondenti a  $(1-\alpha)$  e

$\beta$ . La scala nella parte alta del nomogramma rappresenta (n) con valore di  $\sigma$  non noti mentre nella parte bassa (n) con valore di  $\sigma$  noti. La scala nelle parti laterali del nomogramma rappresenta (k). In aggiunta rispetto al piano per attributi, vi è la presenza di  $\sigma$  che rappresenta una misura di dispersione, più precisamente la deviazione standard della distribuzione della variabile di qualità considerata. Conoscere la  $\sigma$  implica avere un campione di numerosità (n) minore e viceversa, mentre il fattore (k), così come la probabilità di accettazione  $P_a$ , non ne sono influenzati (Santos-Fernández, Govindaraju, e Jones 2014).

Nel caso studio, non verrà implementato nessuna delle due metodologie per calcolare i parametri (n,k), bensì si utilizzerà, anche in questo caso, il software Minitab.

Verranno esaminate due possibilità di piano, rispettivamente uno senza  $\sigma$  nota e uno avente il valore di  $\sigma$  nota, che evidenzieranno la differenza in termini di numerosità campionaria (n) ottenuta.

Partendo dal caso con  $\sigma$  NON nota, dai valori mostrati in *Figura 47.a*, si ottengono i valori rappresentati in *Figura 47.b*, con la relativa curva OC in *Figura 48*.

#### Method

Upper Specification Limit (USL)	25
Acceptable Quality Level (AQL)	0,015
Producer's Risk ( $\alpha$ )	0,05
Rejectable Quality Level (RQL or LTPD)	0,05
Consumer's Risk ( $\beta$ )	0,1

*Fig.47.a: Piano di campionamento per variabili con  $\sigma$  NON nota  
(Elaborazione su software Minitab)*

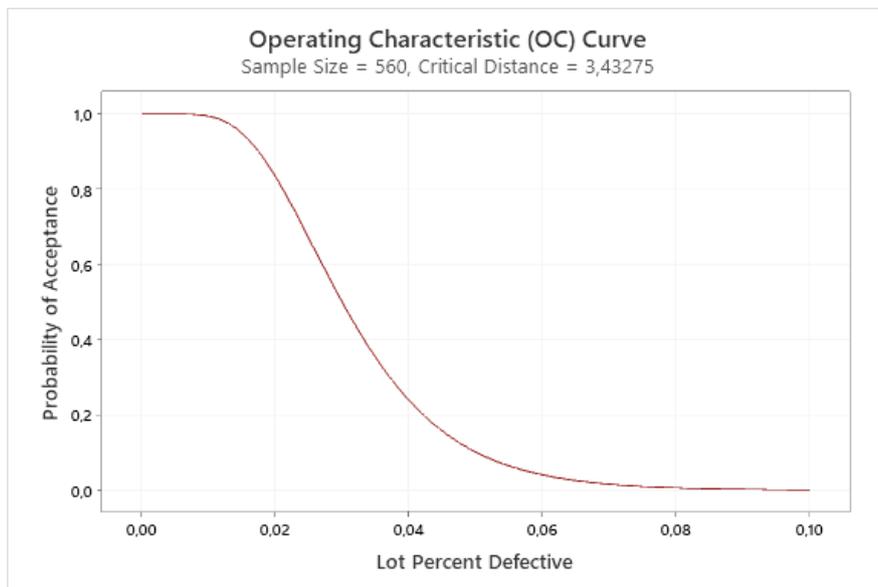
### Generated Plan(s)

Sample Size 560  
Critical Distance (k Value) 3,43275

$Z_{USL} = (\text{upper spec} - \text{mean}) / \text{standard deviation}$   
Accept lot if  $Z_{USL} \geq k$ ; otherwise reject.

Percent Defective	Probability Accepting	Probability Rejecting
0,015	0,951	0,049
0,050	0,102	0,898

*Fig.47.b: Piano di campionamento per variabili con  $\sigma$  NON nota  
(Elaborazione su software Minitab)*



*Fig.48: Curva operativa OC relativa al piano di campionamento per variabili con  $\sigma$  NON nota (Minitab)*

Il caso, invece, con  $\sigma$  nota è il seguente, raffigurato in *Figura 49.a, 49.b e 50.*

### Method

Upper Specification Limit (USL)	25
Historical Standard Deviation	1,04
Acceptable Quality Level (AQL)	0,015
Producer's Risk ( $\alpha$ )	0,05
Rejectable Quality Level (RQL or LTPD)	0,05
Consumer's Risk ( $\beta$ )	0,1

Fig.49.a: Piano di campionamento per variabili con  $\sigma$  nota (Elaborazione su software Minitab)

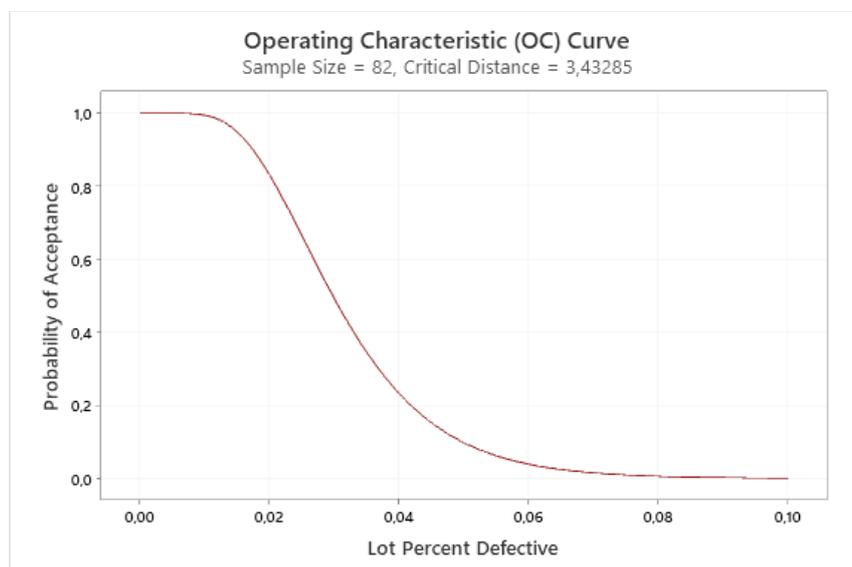
### Generated Plan(s)

Sample Size	82
Critical Distance (k Value)	3,43285

$Z_{USL} = (\text{upper spec} - \text{mean}) / \text{historical standard deviation}$   
Accept lot if  $Z_{USL} \geq k$ ; otherwise reject.

Percent Defective	Probability Accepting	Probability Rejecting
0,015	0,951	0,049
0,050	0,099	0,901

Fig.49.b: Piano di campionamento per variabili con  $\sigma$  nota (Elaborazione su software Minitab)



*Fig.50: Curva operativa OC relativa al piano di campionamento per variabili con  $\sigma$  nota (Minitab)*

Come si può notare dalle *Figure 47.a e 49.a*, vi è il valore di USL (Upper Specification Limit) fissato a 25. Questo dato rappresenta il limite di specifica superiore relativo alla variabile misurabile di qualità considerata.

Nel caso studio analizzato, la materia prima (MP) oggetto di valutazione è il basilico, la cui lunghezza del gambo, misurata mediante l'utilizzo di un righello rigido, rappresenta la variabile di qualità presa in considerazione. Il basilico rappresenta una delle materie prime fondamentali per la produzione della "Salsa Alfredo Pesto".

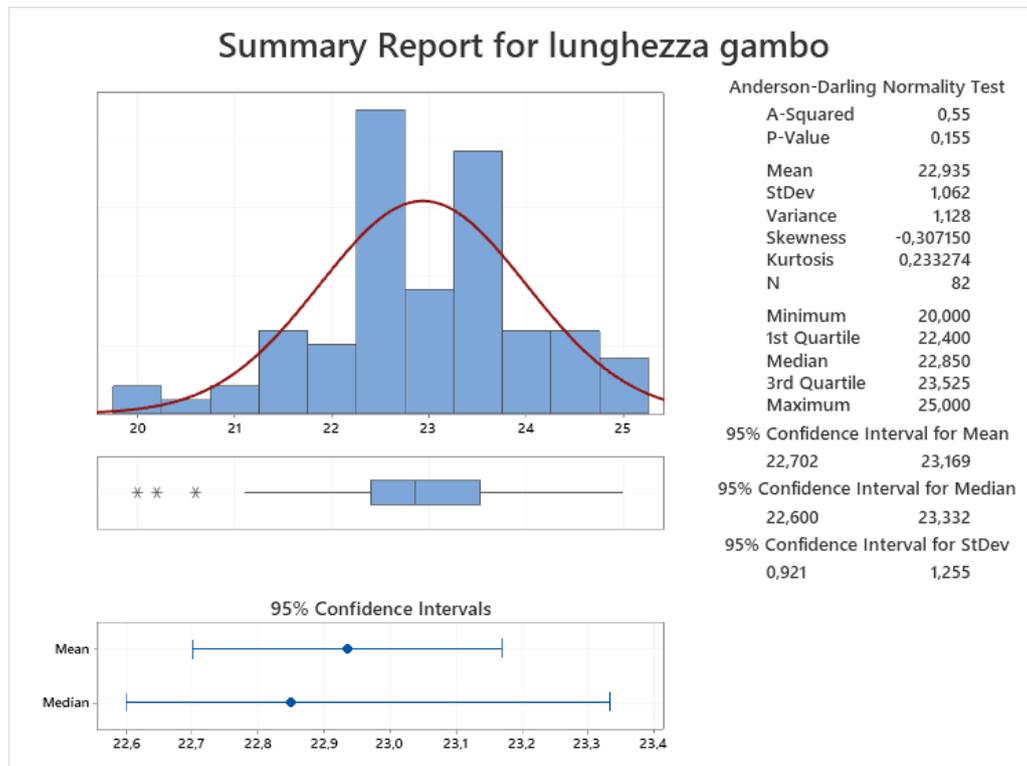
In particolare, tramite interviste svolte con gli operatori del laboratorio di controllo qualità dell'azienda in questione, è emersa una correlazione significativa tra la lunghezza del gambo e l'età della pianta: un gambo più lungo indica una pianta più matura, ossia una pianta eccessivamente vecchia che compromette le qualità organolettiche del prodotto finito. A tal proposito, è stato stabilito che la lunghezza massima accettabile del gambo sia di 25 cm, limite oltre il quale la pianta viene ritenuta potenzialmente non idonea alla produzione della salsa.

Nel presente studio, si farà riferimento esclusivamente al caso in cui la deviazione standard ( $\sigma$ ) sia nota. Il valore di  $\sigma$  considerato, pari a 1,040, è stato determinato sulla base delle misurazioni storiche effettuate dall'azienda.

### Test di normalità della variabile di qualità

Una volta determinati i valori di (n) pari a 82 unità e (k) pari a 3,43285, e assumendo una deviazione standard ( $\sigma$ ) nota pari a 1,040, la procedura prevede l'esecuzione di un test di normalità relativo alle misurazioni effettuate sugli n gambi di basilico. Tale passaggio è fondamentale per verificare se la variabile in esame segue una distribuzione normale.

Ipotizzare a priori la normalità della distribuzione potrebbe portare, in casi di non gaussianità, a commettere errori significativi nella progettazione e nell'attuazione del piano di campionamento. Dunque, eseguendo il test di normalità partendo dai valori raffigurati in *Figura 49.b*, si è ottenuto quanto descritto in *Figura 51.a* e *Figura 51.b*.



*Fig.51.a: Test di normalità “Lunghezza gambo basilico” (Elaborazione su software Minitab)*

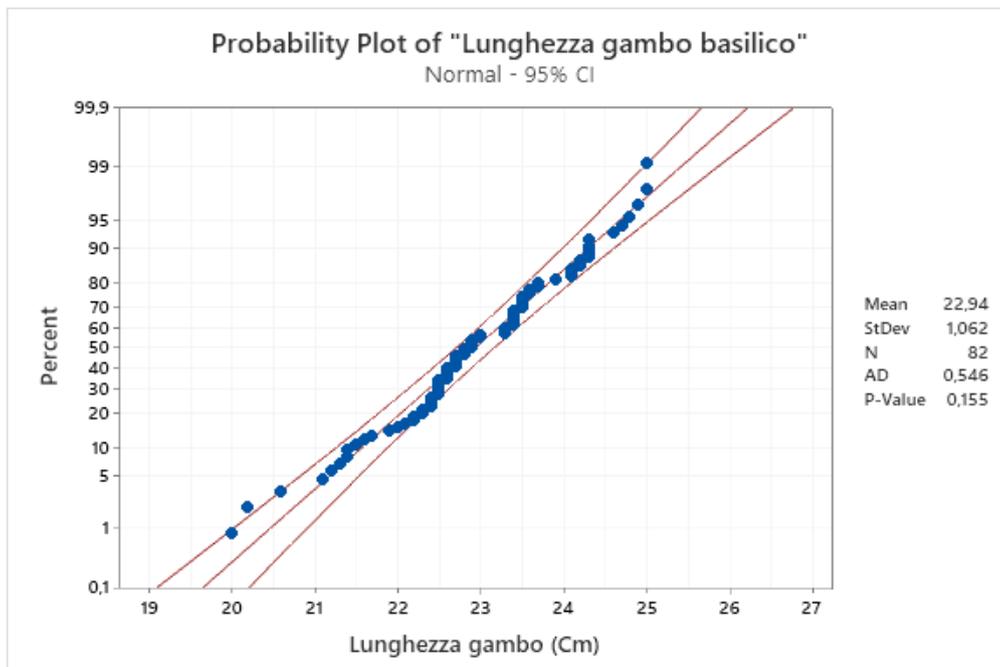


Fig.51.b: Probability Plot of "Lunghezza gambo basilico" con livello di confidenza al 95% (Elaborazione su software Minitab)

Come si può notare, l'analisi è stata condotta utilizzando il software Minitab che impiega, per impostazione predefinita, il test di normalità di Anderson-Darling. Questo test è considerato uno dei più efficaci nel gestire la distribuzione delle code, ossia i valori estremi inferiori e superiori delle misurazioni. Come affermato da Montgomery D.C. e Runger G.C. in *Applied Statistics and Probability for Engineers*, l'ipotesi nulla  $H_0$  considera che la variabile osservata segua una distribuzione normale. Il test statistico ha restituito un valore di p-value pari a 0.155. Poiché tale valore è superiore al livello di significatività  $\alpha = 0.05$  (corrispondente a un livello di confidenza del 95%), non vi sono prove sufficienti per rifiutare l'ipotesi nulla. Pertanto, con un livello di rischio del 5%, non si può escludere che la variabile segua una distribuzione normale. Inoltre, il ridotto scostamento tra media e mediana supporta ulteriormente l'ipotesi di normalità dei dati.

Quanto detto permette, dunque, di affermare che i dati raccolti relativamente alla lunghezza del gambo di basilico seguono una distribuzione gaussiana. Qualora il test avesse dato esito negativo, si

sarebbe potuto implementare soltanto il piano per attributi e non quello per variabili.

### Test sulla Deviazione Standard

Una volta eseguito il test di normalità, avendo la storicità in termini di dispersione  $\sigma$  dei gambi di basilico pari a 1,040, occorre effettuare un ulteriore test di ipotesi, questa volta sulle deviazioni standard, per confrontare la  $\sigma$  storica con quella stimata dal campione, mediante test di normalità, pari a  $\sigma = 1,062$ . Si evidenzia, di seguito, in *Figura 52* il test sulla sigma, con relativo risultato finale in *Figura 53*. E' stato considerato esclusivamente il test del "Chi-Square" in quanto, a differenza del test "Bonett" valido qualunque sia il tipo di distribuzione, è valido solamente per dati distribuiti normalmente.

#### Descriptive Statistics

N	StDev	Variance	95% CI for $\sigma$	
			using Bonett	using Chi-Square
82	1,06	1,13	(0,91; 1,27)	(0,92; 1,26)

*Fig.52: Test sulla deviazione standard  $\sigma$  (Elaborazione su software Minitab)*

#### Test

Null hypothesis  $H_0: \sigma = 1,04$   
 Alternative hypothesis  $H_1: \sigma \neq 1,04$

Method	Test		
	Statistic	DF	P-Value
Bonett	—	—	0,785
Chi-Square	84,47	81	0,748

*Fig.53: Risultato test sulla deviazione standard  $\sigma$  (Elaborazione su software Minitab)*

Come si può notare in *Figura 53*, mediante test di ipotesi, si ottiene un p-value del 74,8%, quindi non si può rifiutare l'ipotesi nulla secondo cui le deviazioni standard analizzate, rispettivamente quella storica pari a 1,040 e quella calcolata sul campione di  $n = 82$  pari a 1,062, sono uguali. Qualora si fosse dovuta rifiutare  $H_0$ , ciò avrebbe implicato troppa dispersione nei gambi di basilico analizzati e quindi un conseguente rifiuto del lotto in entrata.

La conferma della validità del test sulla deviazione standard, unita alla normalità della distribuzione dei dati, consente ora di applicare due possibili procedure per decidere se accettare o rifiutare il lotto: il Metodo K e il Metodo M. In questo lavoro, si decide di applicare il Metodo K e di non approfondire il Metodo M.

### Applicazione del Metodo K

Per poter applicare tale metodo, partiamo dai dati raccolti dal piano di campionamento e dal test di normalità, considerando come deviazione standard quella storica. Essi sono:

- Numerosità campionaria  $n = 82$
- Fattore  $k = 3,43285$
- USL (Upper Specification Limit) = 25 Cm
- Media  $\mu = 22,935$
- Deviazione standard storica  $\sigma = 1,040$

Da qua, si calcola il valore di  $Z_{USL} = (USL - \mu) / \sigma$ .

Il criterio decisionale è il seguente:

- Se  $Z_{USL} \geq k$  si accetta il lotto
- Se  $Z_{USL} < k$  si rifiuta il lotto

Nel caso di studio, da dati simulati, si ottiene un valore di  $Z_{USL} = 1,9855$ . Esso risulta essere minore del valore di  $(k)$  pari a 3,43285, dunque il lotto in questione sarebbe da rifiutare.

In sintesi, la procedura da applicare per implementare correttamente un piano di campionamento per variabili dipende strettamente dalla deviazione standard ( $\sigma$ ). Nel nostro caso, se non si disponesse di una  $\sigma$  nota, i controlli da effettuare sarebbero 560, viceversa il campionamento richiesto scenderebbe a soli 82 controlli se si considerasse una sigma storica consolidata pari a 1,040.

Disponendo di una sigma storica, oltre al test di normalità, si dovrebbe anche verificare che la sigma trovata con il campionamento sia compatibile con quella storica. Qualora il test sulle deviazioni standard venisse superato, allora si procederebbe con il piano di controllo applicando il Metodo K, al fine di decidere se accettare o rifiutare il lotto proveniente dal fornitore.

### Analisi e considerazioni

Sulla base di quanto descritto ed analizzato relativamente all'implementazione dei piani di campionamento per i controlli di accettazione, si evidenziano di seguito possibili considerazioni.

Sicuramente, il controllo statistico di accettazione rappresenta una fase cruciale per garantire la qualità dei lotti ricevuti da fornitori o prodotti internamente. Uno dei principali vantaggi di questi controlli risiede nella loro economicità iniziale. Essi comportano investimenti contenuti, limitati principalmente alla formazione degli operatori e all'acquisto di strumenti di misura, quali righelli rigidi e bilance. Inoltre, offrono un'elevata flessibilità, risultando applicabili a diverse tipologie di prodotto e parametri di qualità e, essendo normativamente validati, assicurano un'accettabilità tecnica e giuridica.

In questo specifico lavoro, sono state analizzate due tipologie di piani, rispettivamente per attributi sui vasi in vetro e per variabili sulle materie prime MP.

Relativamente ai vasi in vetro, è stato adottato un piano di campionamento per attributi poiché l'esito finale del piano doveva basarsi sul numero di unità difettose presenti nel lotto fornito. Tale approccio ha permesso l'applicazione di due sotto-tipologie di piano, rispettivamente piano di campionamento ad hoc e piano di campionamento secondo la norma MIL STD 105E, garantendo un controllo in uscita di tipo "passa - non passa". Entrambi hanno mostrato criticità: se da un lato il piano di campionamento ad hoc è risultato non praticabile da un punto di vista economico per valori in input estremamente bassi di AQL e LTPD, il piano secondo la normativa è risultato statisticamente inefficiente a causa di una probabilità  $\beta$  di accettazione del lotto difettoso troppo alta. Per ovviare a tali criticità, si dovrebbe in prima battuta effettuare una revisione interna dei parametri AQL e LTPD, individuando un equilibrio ottimale tra il costo e l'affidabilità del piano di campionamento, e, in un secondo istante, collaborare con il fornitore dei vasi in vetro, richiedendo certificazioni di garanzia di qualità e prevedendo sessioni di audit al fine di ridurre il numero di controlli in ingresso.

Per quanto concerne le materie prime MP, invece, è stato implementato un piano di campionamento per variabili, necessario per definire una variabile di qualità misurabile al fine di garantire un controllo basato sulla distribuzione dei dati ottenuti. L'analisi condotta ha permesso di verificare, mediante l'esecuzione di due test statistici, la normalità della distribuzione della variabile di qualità considerata e le deviazioni standard (storica vs campionaria), con il fine ultimo di applicare, soltanto dopo esito positivo di entrambi i test, il Metodo K. Nel nostro caso, una volta effettuato il campionamento con la  $\sigma$  nota e validati entrambi i test statistici, l'applicazione del metodo K ha portato al rifiuto del lotto proveniente dal fornitore.

Pertanto, alla luce delle considerazioni esposte, risulterebbe preferibile per l'azienda in esame adottare un approccio statistico rispetto a quello meramente normativo. L'adozione di piani di campionamento statistici non solo consente di ottimizzare risorse ed efficienza, ma rappresenta anche una strategia a lungo termine per ridurre costi, migliorare la qualità e garantire la conformità agli standard più avanzati. Questo approccio permette all'azienda di rimanere competitiva, innovativa ed allineata alle migliori pratiche internazionali.

### Migliorie in ottica tecnologica

È doveroso, a questo punto del lavoro, continuare la trattazione con l'obiettivo di introdurre delle soluzioni tecnologicamente innovative che possano ovviare alle problematiche riscontrate di sopra nel paragrafo relativo ai pain points del processo produttivo, quali la mancanza di tracciabilità e previsione delle rotture e delle difettosità dei vasi in vetro e l'utilizzo massiccio di carta durante le metodologie di lavoro.

### Sistemi di Machine Vision e Algoritmi di Machine Learning

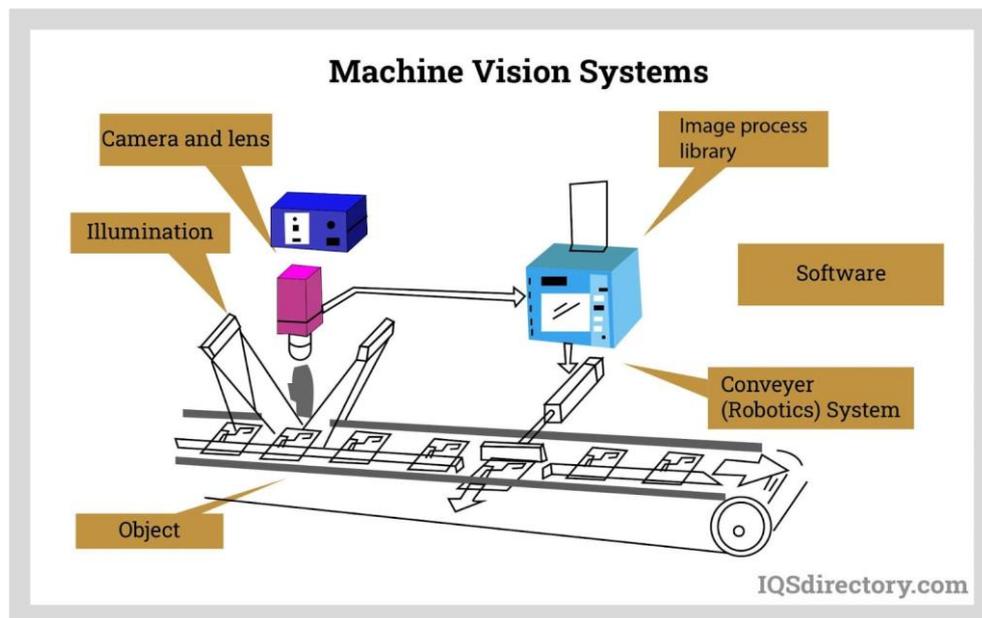
È a partire dall'approccio statistico, più precisamente dai piani di campionamento con campioni dai grandi volumi, che si introduce una tecnologia innovativa, quale i **Sistemi di Machine Vision (MV)**, che permettono di ovviare all'eccessivo tempo d'esecuzione dovuto alla raccolta e all'analisi di campioni aventi una numerosità molto elevata.

Con l'incremento della domanda di prodotti alimentari di elevata qualità, si assiste a un'esigenza sempre più pressante di metodologie rapide ed accurate per la valutazione dei parametri qualitativi dei prodotti. Tali parametri risultano intrinsecamente legati a caratteristiche estetiche, quali dimensione, morfologia, texture visiva e cromaticità, le quali possono essere analizzate e monitorate attraverso tecniche avanzate di valutazione visiva e sofisticati sistemi di elaborazione delle immagini (Amani, Badak-Kerti, e Mousavi Khaneghah 2022).

Il sistema di visione artificiale rappresenta una tecnologia avanzata e versatile, in quanto utilizza sistemi basati su telecamere e algoritmi di processamento delle immagini per ispezionare automaticamente i prodotti. La tipologia di telecamera utilizzata dipende da vari fattori come:

- Tipo di difetto da rilevare: superficiale, dimensionale o interno
- Velocità della linea produttiva: più alta è la velocità, maggiore è la necessità di telecamere ad alte prestazioni
- Ambiente operativo: avere esigenze di robustezza o resistenza a polvere è diverso che avere esigenze di robustezza ad alte temperature o umidità
- Budget a disposizione

In generale, si mostra in *Figura 54* il funzionamento di un sistema di Machine Vision.



*Fig.54: Funzionamento di un Sistema di Machine Vision*

L'acquisizione dell'immagine mediante telecamera avviene in un ambiente sottoposto ad illuminazione controllata, per eliminare riflessi, ombre e/o variazioni di colore causate dalla luce ambientale. Una volta acquisita l'immagine, essa viene pre-elaborata per migliorarne la qualità e facilitarne

l'analisi. Durante la fase di pre-elaborazione, si ha la riduzione del rumore tramite l'impiego di filtri digitali che eliminano potenziali disturbi che potrebbero interferire con l'analisi, con la procedura di normalizzazione mediante la quale si va a standardizzare l'immagine per uniformare parametri come contrasto, luminosità e scala, e con la procedura di segmentazione tramite la quale il sistema identifica e separa l'oggetto di interesse (ad esempio il vaso o la MP) dal fondo (Gabrova et al., 2021).

Successiva alla pre-elaborazione, vi è l'analisi delle caratteristiche, la fase cosiddetta di Feature Extraction. In essa, il software estrae specifici parametri visivi che descrivono l'oggetto in questione come forma, dimensione, colore, texture, contorni e bordi. Una volta analizzati tali parametri, il sistema confronta i dati estratti con modelli predefiniti e/o specifiche standard ed è così in grado di rilevare eventuali difetti e difformità. In base ai risultati dell'analisi effettuata, il sistema assegna un'etichetta di "conforme" o "difettoso" al prodotto: se conforme prosegue lungo il processo produttivo, se difettoso viene automaticamente scartato o separato dalla linea produttiva. Arrivati a questo punto, i risultati delle analisi vengono archiviati in un database, con l'obiettivo di consentire un'integrazione interoperabile globale tra il controllo effettuato e il sistema di tracciabilità del processo produttivo, condizione necessaria al fine di permettere un monitoraggio in tempo reale della qualità dei prodotti lungo l'intera linea produttiva (Kakani et al. 2020).

Questo approccio, rispetto ai piani di campionamento analizzati di sopra, consente un'ispezione completa del lotto (eliminando così i rischi associati al campionamento), permette di ispezionare decine o centinaia di elementi al minuto e prevede analisi consistenti, oggettive e prive di variabilità dovute all'errore umano. Tale tecnologia offre, dunque, vantaggi significativi in termini di rapidità, automazione ed adattabilità, consolidandosi come una tecnica non invasiva di grande utilità. Lato costi, i Sistemi di Machine Vision richiedono un investimento iniziale elevato (acquisto di telecamere ad-hoc, hardware dedicato, sviluppo di algoritmi specifici per l'elaborazione delle immagini e per l'integrazione con le linee e i sistemi di produzione), anche

se, una volta compiuta l'installazione, i costi operativi risultano relativamente bassi essendo questo un sistema autonomo che richiede poca supervisione, se non prevalentemente in fase di manutenzione (aggiornamenti software e sostituzione di componenti). In genere, se il livello di produzione è molto elevato ed è richiesta una precisione assoluta, i Sistemi di Machine Vision risultano essere più vantaggiosi nel lungo termine. Viceversa, se si hanno produzioni di medio volume e/o budget iniziali limitati, i piani di campionamento possono essere un'opzione economicamente più sostenibile (Gabrova et al., 2021).

Si riassumono di sotto le principali differenze in *Tabella 9*.

<b>Caratteristica</b>	<b>Piani di campionamento</b>	<b>Sistemi di Machine Vision</b>
<b><u>Principio di funzionamento</u></b>	Basati sull'estrazione e sull'analisi di campioni rappresentativi prelevati da un lotto, utilizzando metodi analitici statistici	Basati sull'acquisizione e l'elaborazione di immagini digitali per analizzare l'intero lotto in tempo reale
<b><u>Tipo di analisi</u></b>	Può essere distruttiva o non distruttiva	Non distruttiva, prevalentemente visiva
<b><u>Non conformità rilevabili</u></b>	Limitate ai parametri analizzati nel campione (es. microbiologici nel caso della MP)	Ampia gamma di difetti estetici o morfologici (es. colore, forma, dimensioni, texture)
<b><u>Velocità di esecuzione</u></b>	Relativamente lenta, specialmente per campioni dai volumi elevati	Molto rapida, consentendo l'analisi in tempo reale di un intero lotto
<b><u>Copertura dell'analisi</u></b>	Limitata al campione selezionato, con margini di errore legati alla	Potenzialmente completa, poiché permette di analizzare l'intera

	rappresentatività del campione	produzione senza campionamento
<b><u>Accuratezza</u></b>	Dipende dalla qualità del campionamento e dalla precisione degli strumenti di misura, quali righello rigido, bilancia etc	Elevata, grazie alla precisione degli algoritmi di elaborazione delle immagini e alla riduzione di variabili umane
<b><u>Costi operativi</u></b>	Minori inizialmente, ma aumentano con la frequenza delle analisi di campionamento e con i costi di personale e di laboratorio (costi di manodopera)	Alti costi iniziali per l'implementazione, ma costi operativi ridotti grazie all'automazione e alla scalabilità del sistema (costi di manutenzione)
<b><u>Flessibilità</u></b>	Limitata, in quanto richiede tempi di adattamento per cambiare parametri o tipi di analisi	Altamente flessibile, in quanto i sistemi possono essere aggiornati mediante modifiche software per riconoscere nuovi parametri
<b><u>Affidabilità</u></b>	Sensibile a errori umani e a variazioni nelle procedure di campionamento	Altamente affidabile, con riduzione dell'intervento umano e standardizzazione dei processi
<b><u>Impatto sulla produttività</u></b>	Potenziabile rallentamento della produzione dovuto ai tempi necessari per i controlli	Miglioramento della produttività, riducendo i tempi morti e ottimizzando i processi

<b><u>Integrazione con altre tecnologie</u></b>	Limitata, in quanto richiede processi separati per diverse tipologie di analisi	Alta, in quanto facilmente integrabile con sensori e sistemi di tracciabilità innovativi
<b><u>Evoluzione tecnologica</u></b>	Relativamente stabile, con miglioramenti limitati a nuovi strumenti analitici	In rapida evoluzione, grazie ai progressi in intelligenza artificiale e hardware di acquisizione immagini

*Tabella 9: Piani di campionamento vs Sistemi di Machine Vision*

Addentrando più precisamente la narrazione nel caso studio di riferimento, i sistemi di Machine Vision potrebbero rappresentare una soluzione tecnologicamente innovativa da implementare in vari punti del processo produttivo, per ottimizzare i controlli di qualità migliorandone l'efficienza e riducendone gli sprechi. Facendo riferimento alla Mappatura AS-IS del processo, rappresentata mediante il diagramma concettuale BPMN sopra illustrato, le criticità che emergono sono relative principalmente ai controlli che vengono effettuati durante l'intera filiera.

In primis, il controllo relativo alla messa in linea dei vasi in vetro, post controllo statistico di accettazione mediante piano di campionamento per attributi, potrebbe avvenire mediante un sistema di MV, soprattutto in presenza di volumi molto elevati, accompagnato dalla supervisione dell'operatore. In questo caso, si impiegherebbe la **Telecamera Industriale Line Scan** con illuminazione adeguata e risoluzione 5MP o superiore, in grado di acquisire immagini in linea con oggetti in continuo movimento. In tal modo, si andrebbero a riscontrare i difetti di varia natura (suddivisi dall'azienda in questione in difetto critico: danni al consumatore, difetto primario: deterioramento prodotto, difetto maggiore: interruzione linee di riempimento, difetto minore: natura estetica) in maniera più rapida ed accurata, riducendo i costi operativi e migliorando la precisione dell'ispezione.

La stessa procedura potrebbe essere applicata al controllo statistico di accettazione delle MP. In questo caso, verrebbero utilizzate le **Telecamere Multispettrali**, in grado di acquisire immagini in diverse bande dello spettro elettromagnetico (visibile, infrarosso, ultravioletto). Quest'ultima tipologia, a differenza della prima citata, permette l'identificazione di proprietà chimico-fisiche come la presenza di contaminanti nei prodotti alimentari, quali polveri, macchie, ammaccature, muffe e altre imperfezioni che possono compromettere la qualità del prodotto, fornendo un'analisi avanzata grazie all'integrazione di dati spettrali con dati visivi. In questo modo, tale sistema andrebbe ad affiancare la figura dell'operatore, che in origine verificava senza alcun supporto tecnologicamente avanzato la qualità delle MP in laboratorio mediante solamente un'analisi visiva con apposita strumentazione manuale regolamentata.

Un caso di successo è quello relativo all'azienda Amadori S.P.A., una fra le più importanti Protein Company internazionali. Per rispondere alle crescenti esigenze dei consumatori, che richiedono una tracciabilità del prodotto sempre più trasparente e qualitativa, l'azienda ha scelto di adottare un sistema di visione artificiale per il controllo delle MP in entrata. Utilizzando quattro Telecamere Multispettrali, questo sistema consente un'ispezione a 360° del prodotto, garantendo così un controllo in tempo reale estremamente accurato ed elevando ulteriormente gli standard di monitoraggio e gestione della qualità lungo l'intera catena produttiva.

Proseguendo lungo la mappatura dei controlli, il controllo che attualmente viene svolto con il magnete, tecnologia ormai obsoleta, potrebbe essere eseguito con un sistema di visione artificiale. In particolare, si andrebbe ad utilizzare una **combinazione di tecnologie**: da un lato una **Telecamera Line Scan** di visione tradizionale, con illuminazione adeguata, per ispezionare la superficie esterna del vaso e monitorare la presenza di difetti visibili, dall'altro dei **sensori magnetici (come sensori a Effetto Hall o ad induzione)**, integrati nel Sistema di Machine Vision, utili a rilevare corpi estranei di attrazione magnetica all'interno del vaso. Sostituendo il magnete, tale sistema, dotato di algoritmi avanzati, è in grado di rilevare

con affidabilità corpi estranei, quali metallo, vetro, plastica e contaminanti organici, garantendo maggiore sicurezza e non compromettendo la velocità di produzione lungo la linea produttiva. Una procedura simile potrebbe essere implementata nel momento in cui, post etichettatura, avviene il controllo radiogeno a tappeto in linea per verificare l'eventuale presenza di corpi estranei.

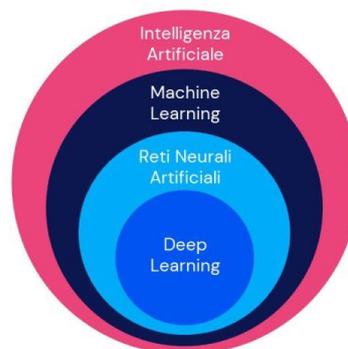
Inoltre, il controllo che attualmente viene effettuato sul vuoto sia pre-sterilizzazione sia post-sterilizzazione, in prima battuta dall'operatore e in seconda battuta dal DUD detector, potrebbe essere accompagnato da un sistema di MV, che sostituendo così l'operatore e affiancando il sistema DUD, andrebbe in maniera ancora più precisa a verificare il giusto livello di riempimento, e il relativo livello di vuoto, del vaso. In questo caso la soluzione più adatta sarebbe quella di adottare una **Telecamera Industriale ad Area Scan ad alta risoluzione (5 MP o superiore) che permette Retroilluminazione**, una particolare forma di illuminazione che consente di verificare la presenza di bolle d'aria all'interno del vaso e il conseguente livello di vuoto.

Infine, in merito al controllo seguente relativo alla codifica, i sistemi di visione artificiale potrebbero sostituirsi all'operatore umano, in quanto possono rapidamente verificare date di scadenza, numeri di lotto e altre informazioni critiche, minimizzando gli errori, facilitando una gestione efficace della catena di approvvigionamento e garantendo un sistema di tracciabilità e conformità maggiormente accurato. A tal scopo, la tipologia di telecamera più appropriata da utilizzare è una **Smart Camera con OCR integrato**. OCR sta per Optical Character Recognition ed è un software integrato nella telecamera che permette di leggere e riconoscere testi stampati o incisi su prodotti, etichette o confezioni, in questo caso vasi in vetro.

Realizzata un'analisi dettagliata di come poter implementare i Sistemi di Machine Vision nel caso studio di riferimento, si amplia ora la trattazione a dei sistemi tecnologici che permettono l'applicazione diretta dei sistemi di

visione artificiale: si sta parlando degli **Algoritmi di Machine Learning (ML)**, strumenti operativi locali di grande innovazione tecnologica.

Il Machine Learning, tradotto come apprendimento automatico, è emerso come un sottocampo sofisticato dell'intelligenza artificiale (IA) e si distingue per l'impiego di algoritmi capaci di estrarre conoscenze significative dai dati, utilizzandole per migliorare autonomamente le proprie capacità di classificazione o previsione. L'obiettivo di tali algoritmi è sviluppare tecniche ricercate per insegnare alle macchine ad apprendere in maniera del tutto autonoma, al fine di eseguire compiti particolarmente complessi. La sua crescente popolarità è attribuibile all'elevata accuratezza e affidabilità dimostrate. L'evoluzione congiunta dei componenti hardware e software nei sistemi di visione artificiale, le cui applicazioni utilizzano il machine learning per elaborare accuratamente dati in modo da identificare gli oggetti, ha ulteriormente potenziato gli algoritmi di apprendimento automatico, consentendo un'elaborazione dei dati più rapida e l'emissione di decisioni affidabili in tempi significativamente ridotti (Saha e Manickavasagan 2021).



*Fig.55: AI, ML, ANN, DL*

Vi sono quattro diversi tipi di algoritmi di Machine Learning suddivisi in quattro diversi stili di apprendimento a seconda dell'output atteso e del tipo di input: Machine learning supervisionato, non supervisionato, semi supervisionato e per rinforzo.

In questo lavoro, ci si soffermerà sulla prima tipologia menzionata. In particolare, algoritmi avanzati relativi alle tecniche di Machine Learning, tra cui le reti neurali artificiali (ANN), sono stati diffusamente adottati per affrontare le sfide del settore agroalimentare secondario. Le ANN sono modelli computazionali ispirati al funzionamento del cervello umano. Sono composte da unità elementari chiamate neuroni artificiali, organizzati in strati e collegati tra loro tramite connessioni ponderate. L'obiettivo principale di una rete neurale è elaborare dati, apprendere dai pattern presenti nei dati stessi e fornire previsioni, classificazioni o decisioni.

L'evoluzione delle ANN è rappresentata, come si nota di sopra in *Figura 55*, dall'apprendimento profondo, il cosiddetto **Deep Learning (DL)**, una sotto-disciplina dell'apprendimento automatico che si basa su reti neurali artificiali con molteplici strati nascosti, dette reti profonde (Deep Neural Networks, DNN). Le DNN permettono al Deep Learning di eccellere nell'analisi di dataset di grandi dimensioni, grazie alla loro capacità di apprendere caratteristiche gerarchiche nei dati. Per esempio, in un'immagine di un prodotto alimentare, i primi strati potrebbero identificare linee e bordi, mentre gli strati successivi riconoscono difetti specifici o la forma complessiva.

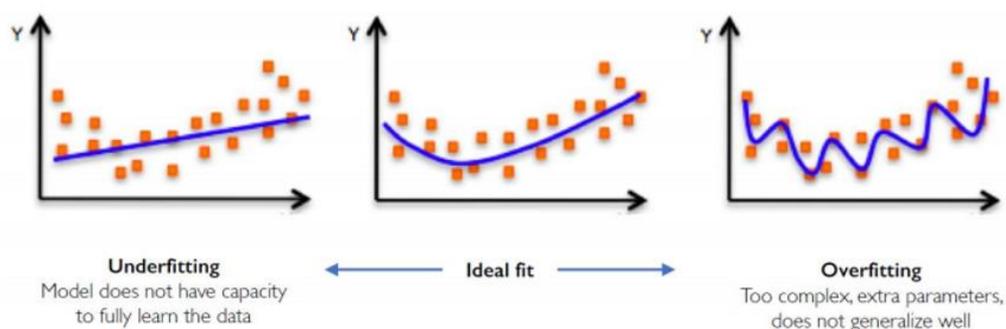
Esistono diversi tipi avanzati di reti nel Deep Learning:

- Reti Convoluzionali (Convolutional Neural Networks, CNN): vengono utilizzate per il riconoscimento di immagini e oggetti
- Reti Ricorrenti (Recurrent Neural Networks, RNN): vengono progettate per dati sequenziali come serie temporali o testo

Opportunamente addestrato, l'apprendimento profondo ha mostrato prestazioni in grado di eguagliare o addirittura superare quelle umane in contesti specifici, consolidando il suo ruolo come tecnologia di punta nell'analisi visiva avanzata. E' proprio grazie al Deep Learning, e in particolare alle reti convoluzionali CNN, se i Sistemi di Machine Vision si sono evoluti nel tempo, trasformandosi da semplici strumenti di elaborazione delle immagini in sofisticati dispositivi capaci di identificare e rilevare con precisione oggetti d'interesse (Kakani et al. 2020).

Riferendosi più precisamente al caso studio di riferimento, occorre trovare una soluzione tecnologicamente avanzata per ovviare alla mancata previsione delle difettosità e delle rotture dei vasi in vetro. Per far ciò, l'obiettivo è quello di realizzare, mediante algoritmi di Machine Learning, proprio una previsione delle difettosità e delle rotture dei vasi.

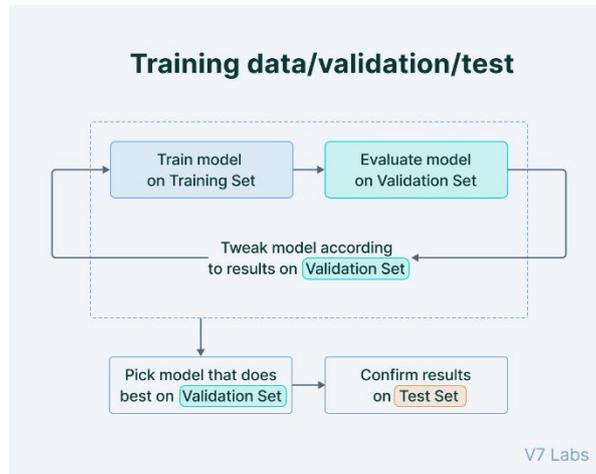
Per far ciò, si utilizza un'integrazione tra le reti convoluzionali (CNN) e le reti ricorrenti (RNN) di deep learning per analizzare sia i pattern visivi statici (con CNN) che le sequenze temporali di dati (con RNN). Al fine di ottenere un tale approccio combinato, occorre in primis disporre di un dataset rappresentativo contenente molteplici immagini dei vasi in vetro acquisite in tempo reale lungo la linea produttiva. Le immagini raccolte vengono aumentate mediante la tecnica di Data Augmentation, migliorando così l'accuratezza del rispettivo modello. Più immagini contiene il dataset, più l'efficienza del modello di previsione aumenta. Queste immagini sono state ampliate per aumentare la varietà delle immagini e le variazioni nelle immagini. In tal modo, si va ad ampliare il dataset di addestramento (training) e a prevenire il fenomeno dell'overfitting, mostrato in *Figura 56*, causato dall'incapacità di generalizzare i dati a disposizione, in questo caso immagini di vasi in vetro (Manjubargavi e Subhashini 2023).



*Fig.56: Differenza tra Underfitting e Overfitting*

A questo punto, il modello previsionale è pronto per essere addestrato. Si parte con la fase di training, per passare poi alla fase di validation e arrivare

alla fase di testing per valutare le prestazioni del modello previsionale, come illustrato in *Figura 57*.



*Fig.57: Training, validation, test*

Durante la fase di training (addestramento), il modello apprende i pattern e le relazioni nelle immagini fornite, ottimizzando i suoi parametri per minimizzare l'errore. Generalmente, il dataset di training costituisce il 70-80% dei dati totali raccolti. In questo caso specifico, deve includere immagini e dati temporali di vasi conformi, con difetti e con rotture. Ciascun esempio è associato a un'etichetta reale (es. "conforme", "difettoso", "rottura"). A questo punto, il modello viene inizializzato con pesi casuali. I dati di input (immagini e sequenze temporali) vengono forniti al modello e quest'ultimo genera un output previsionale. Viene calcolata la differenza tra l'output e l'etichetta reale utilizzando una funzione di perdita e gli errori vengono propagati attraverso il modello per aggiornare i pesi, utilizzando un algoritmo di ottimizzazione. Questo processo viene ripetuto per diverse epoche (iterazioni su tutto il dataset di training), finché la funzione di perdita non raggiunge un livello soddisfacente (Manjubargavi e Subhashini 2023). Tramite tale fase, il modello apprende i parametri ottimali per distinguere i vasi in vetro conformi da quelli con probabilità di rottura.

Alla fase di training, segue la fase di validation del modello previsionale. In essa, vengono valutate le prestazioni del modello su un set di dati che non è stato utilizzato durante il training, ma che appartiene allo stesso dominio,

al fine di prevenire l'overfitting e di ottimizzare l'architettura del modello. In questo caso, il dataset di validation costituisce il 10-15% dei dati totali e non viene utilizzato per aggiornare i pesi del modello. Le metriche di valutazione, come accuratezza e precisione, vengono monitorate per individuare quando il modello smette di migliorare: se le prestazioni sul dataset di validazione iniziano a peggiorare mentre quelle sul dataset di training continuano a migliorare, si verifica overfitting, situazione in cui un modello si adatta così tanto bene ai dati di training tale da perdere la capacità di generalizzare su nuovi dati mai visti (Puttero et al. 2024). L'obiettivo di tale fase è far sì che il modello venga ottimizzato per generalizzare meglio ai dati nuovi.

In ultima battuta, vi è la fase di testing, che permette di valutare le prestazioni finali del modello su un set di dati completamente nuovo e mai visto prima, fornendo così un'indicazione reale dell'accuratezza del modello previsionale nel mondo reale. Anche in questo caso, il dataset di dati costituisce il 10-15% dei dati totali, ma a differenza della fase di validation, deve essere rappresentativo delle condizioni operative reali. Il modello viene applicato al dataset di test per generare previsioni, le quali vengono confrontate con le etichette reali utilizzando metriche di valutazione come accuratezza (percentuale di previsioni corrette) e precisione (percentuale di vasi classificati correttamente come difettosi o rotti rispetto a tutti quelli classificati come tali). Eventuali discrepanze tra le performance sul dataset di test e sul dataset di validation indicano problemi di generalizzazione o rappresentatività dei dati. Ciò che si ottiene è un'analisi dettagliata delle prestazioni del modello previsionale, utile per decidere se esso è pronto per essere implementato in produzione (Kakani et al. 2020). Nel caso in cui il modello non raggiungesse le prestazioni desiderate, potrebbe essere necessario tornare alla fase di addestramento (training) con un dataset più ampio o rivedere l'intera architettura del modello.

Relativamente al caso studio specifico analizzato, questo approccio combinato CNN-RNN viene impiegato all'inizio del BPMN del Modello TO-BE, subito dopo la depallettizzazione dei vasi in vetro con la relativa messa

in linea, per fornire previsioni robuste anche in presenza di variabili complesse e di rumore nei dati. Tale combinazione permette di ottenere un sistema predittivo avanzato, capace di prevenire difetti e rotture, migliorando l'efficienza produttiva e la qualità del prodotto finale e rendendo i processi produttivi sempre più sostenibili, affidabili e flessibili.

### Interoperabilità dei sistemi informatici: MES e PIMS

Per poter diminuire l'utilizzo massiccio di carta nelle metodologie di lavoro, si è pensato, infine, ad una soluzione basata sull'interoperabilità dei sistemi informatici.

Il sistema informatico è un sottoinsieme del sistema informativo. Il sistema informativo è una componente di alto livello, fondamentale per ogni organizzazione: è l'insieme dei processi che gestiscono la risorsa informazione. Come definito da Gordon B. Davis in *Management Information Systems: Conceptual Foundations, Structure, and Development*, pubblicato nel 1974, un sistema informativo è “una combinazione strutturata di risorse, umane e materiali, e di procedure che raccolgono, elaborano, memorizzano e distribuiscono informazioni per supportare il processo decisionale e operativo in un'organizzazione”. Ogni organizzazione, per il suo funzionamento, deve disporre di informazioni accurate e deve poterle elaborare tempestivamente. Poiché questo aspetto è di grande importanza, la risorsa informazione viene isolata dalle altre risorse e trattata con particolare attenzione tramite, appunto, il sistema informativo aziendale.

All'interno del sistema informativo vi è il sistema informatico, anche detto sistema informativo automatizzato. Con tale termine si intende *quella parte del sistema informativo che è realizzata con tecnologie informatiche, cioè l'insieme delle applicazioni software e degli strumenti hardware che gestiscono i dati e i flussi informativi.*



*Fig.58: Sistema informativo vs Sistema informatico*

Avendo definito la differenza tra i due sistemi, diventa ora più semplice spiegare cosa significa “interoperabilità dei sistemi informatici”.

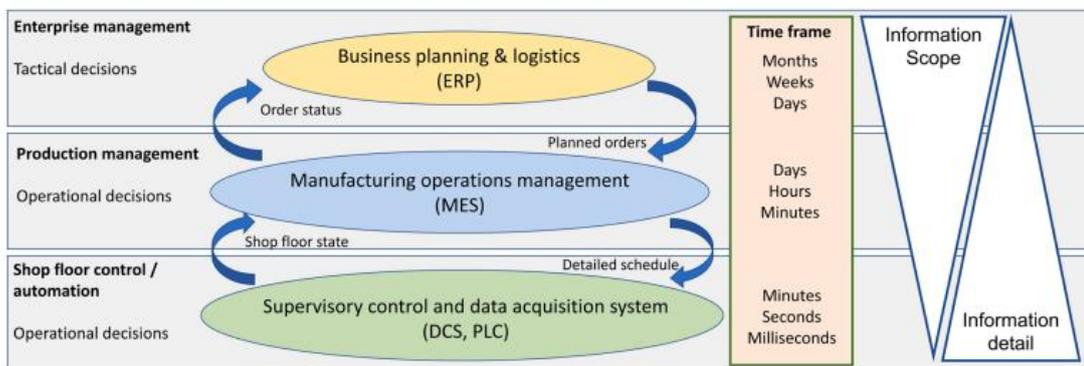
A livello macro, l’azienda in questione utilizza un sistema informativo aziendale ERP (Enterprise Resource Planning) che funge da colonna portante per la gestione e la pianificazione delle risorse aziendali. Esso integra tutte le funzioni di business essenziali, come la contabilità, le risorse umane, la produzione, la supply chain, le vendite, il marketing e molti altri aspetti, in un unico sistema coerente. Oltre all’ERP, per la gestione dei consumatori finali, vi è il sistema CRM (Customer Relationship Management) che permette di automatizzare e integrare i dati dei clienti e le attività rivolte ai clienti come vendite, marketing e assistenza personale.

A livello di linea produttiva, invece, ciascuna stazione dispone di appositi dispositivi PLC (Programmable Logic Controller). Si tratta di dispositivi elettronici (facenti capo ad unico sistema software di supervisione SCADA) utilizzati per il controllo logico dei processi, in questo caso tablet attaccati al macchinario che, dotati di sensoristica, permettono di rilevare i dati di produzione. I PLC sono programmati per eseguire istruzioni definite dall’operatore e controllare una varietà di funzioni produttive quali avvio/arresto di macchinari, regolazione di parametri e sequenze operative.

Nella realtà ciò che avviene è quanto segue: mediante sistemi PLC vengono rilevati dati di controllo dalla linea produttiva. I valori ottenuti vengono trascritti inizialmente su carta per poi essere trasferiti dall'operatore, in seconda battuta, su schermate Excel, che però risultano essere sconnesse tra loro. Tra l'ERP (SAP, Oracle Peoplesoft, Microsoft Dynamics etc) e i PLC manca, quindi, un sistema informatico integrato di alto livello che sappia gestire e monitorare tutte le attività di produzione in tempo reale.

Di conseguenza, è qui che emerge il concetto di interoperabilità, ossia la capacità di un sistema informatico di cooperare e scambiare informazioni con altri sistemi in maniera completa e priva di errori, nel caso specifico mettere in connessione il sistema gestionale aziendale ERP con i sistemi di controllo delle macchine PLC.

Più propriamente si parla di **MES (Manufacturing Execution System)**, definito come un sistema informatico di gestione a livello macro-aziendale.



*Fig. 59: Information and management systems for planning and control*  
(Shojaeinasab et al. 2022)

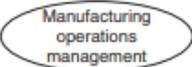
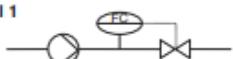
Il collegamento previsto dal MES tra ERP e PLC è di tipo bidirezionale: il MES raccoglie i parametri di interesse dalle macchine e li invia all'ERP e, contemporaneamente, gli ordini provenienti dall'ERP sono trasferiti alle macchine.

Il MES è un sistema informatico creato per gestire e monitorare l'intero ciclo produttivo in tempo reale, partendo dall'arrivo dell'ordine fino alla spedizione

del prodotto finito. Grazie al MES, ogni fase della produzione può essere tracciata, inclusi tempi e costi di lavorazione, qualità dei prodotti, gestione delle scorte di materie prime e prodotti finiti e performance delle macchine. In merito al monitoraggio del rendimento di produzione, il MES permette di calcolare l'indice di efficienza globale dell'impianto OEE (Overall Equipment Effectiveness), un ottimo strumento per efficientare i flussi, ottimizzando i costi e riducendo gli sprechi di produzione, e per ottenere di più dalle proprie risorse. Inoltre, il MES consente di ridurre i tempi di configurazione delle macchine attraverso una programmazione precisa, riducendo così le scorte intermedie e i costi di magazzino (Jaskó et al. 2020).

Un'applicazione tipica del MES è nel controllo qualità: esso raccoglie dati da macchinari e sensori per monitorare la conformità dei prodotti agli standard. In presenza di anomalie o variazioni dei parametri qualitativi stabiliti, il sistema invia avvisi per consentire ispezioni e correzioni tempestive, diminuendo gli scarti e le rilavorazioni. Così facendo, il MES ottimizza l'uso di risorse umane e materiali, pianificando le attività in base a priorità e disponibilità, aumentando così la flessibilità del processo produttivo (Mantravadi e Møller 2019).

Nell'ottica del miglioramento continuo del processo produttivo, uno strumento di supporto al MES è il PIMS (Plant Information Management System), mostrato di sotto in *Figura 60*.

	Function	Time frame	User	System
<b>Level 4</b>  Business planning and logistics	Basic plant schedule for: production, material use, delivery, shipping, inventory, and so on	Months Weeks Days	Site manager Plant logistic Plant manager	ERP SCM
<b>Level 3</b>  Manufacturing operations management	Work flow management dispatching, production optimization detailed production scheduling production analysis and reporting	Days, shifts Hours Minutes Seconds	Production Engineer Plant manager	MES PIMS
<b>Level 2</b>   Batch control      Continuous control	Work flow management dispatching, production optimization detailed production scheduling production analysis and reporting	Hours Minutes Seconds Subseconds	Plant operator	DCS PLC
<b>Level 1</b>  Sensing and manipulating the production process	Sensing and manipulating the production process		Plant operator Maintenance	Sensors Actuators

*Fig.60: Functional hierarchy of production-oriented IT systems (Enste 2018)*

Il PIMS, anch'esso a metà tra ERP e PLC, è progettato principalmente per raccogliere, archiviare, elaborare e analizzare i dati relativi ai processi produttivi. Questo sistema acquisisce in tempo reale una vasta gamma di dati dalla produzione, come il consumo energetico, parametri di processo, allarmi e guasti, oltre a informazioni storiche sui trend produttivi, aiutando i responsabili a prendere decisioni basate su dati concreti e storici. Ad esempio, il PIMS consente di effettuare analisi di trend che rivelano inefficienze nei processi, evidenziando aree di potenziale miglioramento. Grazie ad analisi predittive, il sistema può anticipare guasti alle apparecchiature, permettendo interventi di manutenzione proattivi e riducendo i tempi di inattività. Il PIMS rappresenta quindi un valido strumento strategico per lo sviluppo progressivo del processo, offrendo approfondimenti sulla performance dell'impianto (Enste 2018).

Per chiarire la complementarità tra MES e PIMS, si può pensare a una variazione improvvisa della domanda di mercato: il MES si occupa di riadattare rapidamente la programmazione della produzione per rispondere alle nuove richieste, mentre il PIMS analizza come questa variazione influisca sul consumo energetico e sui processi, suggerendo ottimizzazioni per mantenere la competitività (De Araujo, Lima, e Bispo 2021).

Dunque, il MES agisce come un coordinatore che sincronizza in tempo reale gli elementi della produzione, mentre il PIMS è un analista che elabora i dati raccolti per guidare la strategia di miglioramento. Il primo si concentra sull'operatività, il secondo sull'ottimizzazione e sull'efficienza (T. Yang et al. 2021). L'implementazione di questi due sistemi ha l'obiettivo di rendere i reparti produttivi paperless, eliminando i passaggi cartacei e circoscrivendo il più possibile il rischio di errore umano. Ciò significa che i dati registrati dai reparti produttivi vengono messi immediatamente a disposizione dei decisori di tutti i sistemi integrati, in modo da informare il processo decisionale in real time. Di conseguenza, l'integrazione tra ERP, MES,

PIMS, PLC e CRM fornisce una soluzione di tracciabilità completa, efficiente ed affidabile attraverso la condivisione e la sincronizzazione dei dati in tempo reale.

Sicuramente, come anche affermato da (Shojaeinasab et al. 2022), la realizzazione di un sistema MES porta con sé numerose sfide da fronteggiare. Su tutte, l'acquisto e la relativa implementazione possono essere complessi e richiedere molto tempo, in termini di pianificazione, configurazione, integrazione con i sistemi esistenti e personalizzazione per allinearsi ai processi di produzione specifici. Inoltre, tematiche come la resistenza al cambiamento e la sicurezza dei dati sono tutt'altro che superflue. È fondamentale adottare adeguate strategie di gestione del cambiamento, tra cui la formazione e la comunicazione, per superare le ostilità e contribuire a garantire una transizione e un'accettazione senza intoppi del sistema MES. Inoltre, dal momento in cui i sistemi MES gestiscono grandi volumi di dati di produzione sensibili, tra cui quelli legati a proprietà intellettuale, parametri di processo e informazioni sulla qualità, impegnarsi a garantire la sicurezza dei dati e la protezione da accessi non autorizzati o minacce informatiche è altrettanto importante. Per mitigare i rischi è necessario, quindi, adottare solide misure di sicurezza, come la crittografia dei dati, i controlli degli accessi degli utenti e le protezioni di rete.

### Considerazioni Modello TO-BE

Quanto descritto di sopra evidenzia l'insieme delle soluzioni innovative volte a migliorare e risolvere le problematiche riscontrate con la Mappatura AS-IS del processo produttivo.

Si mostra di seguito in *Figura 61* l'architettura logica relativa all'output finale del Modello TO-BE con tutte le migliorie rappresentate.

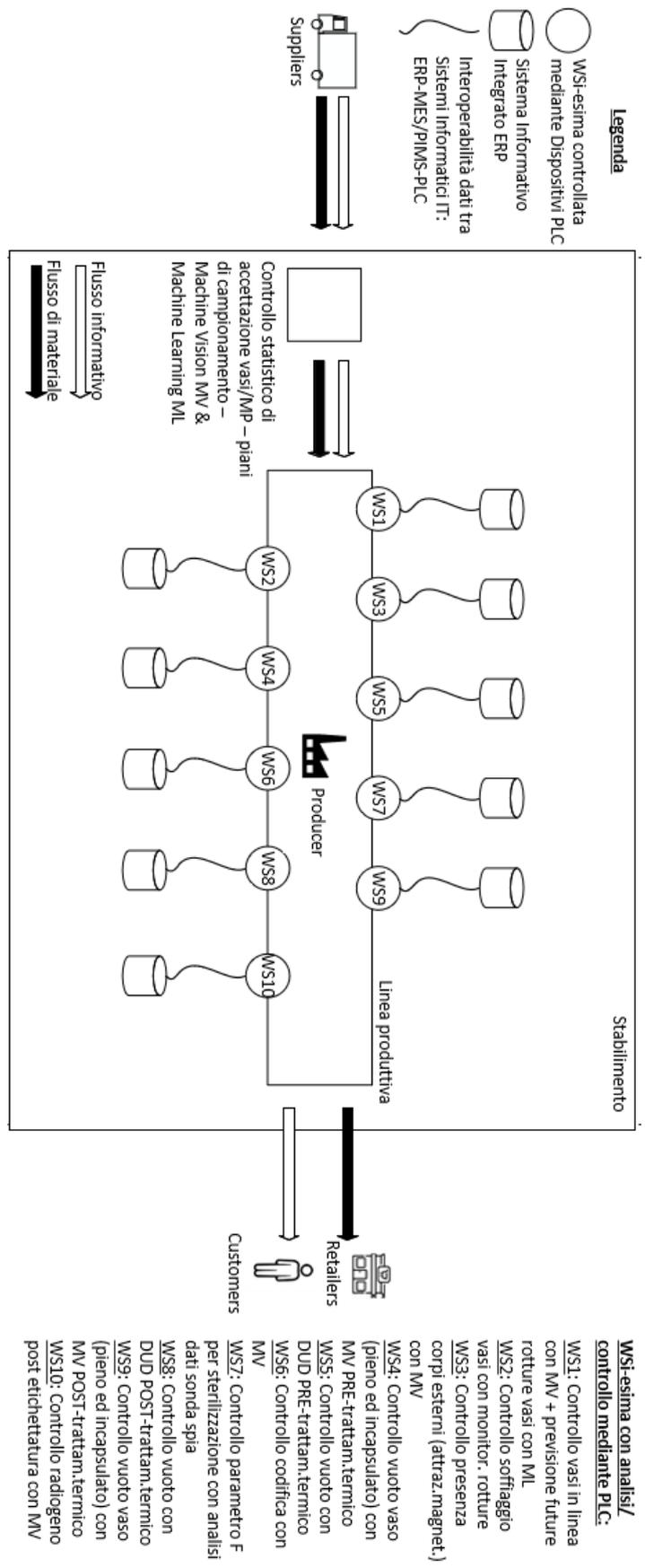


Fig.61: Architettura logica Modello TO-BE

In tale framework, si è optato per la seguente scelta di rappresentazione: non si è deciso di raffigurare tutti i macchinari presenti lungo la linea ma solamente quei macchinari che prevedono un'analisi o un controllo mediante dispositivo PLC lungo la stessa. Per esempio, non è stata modellata la macchina relativa all'incapsulamento del vaso, bensì n'è stato raffigurato il controllo sul vuoto.

Dunque, preso il Modello TO-BE di sopra espresso sottoforma di BPMN, sono stati identificati i task che prevedono uno scambio integrato di dati (interoperabilità diretta) tra PLC e ERP mediante MES. Tali task, nello schema finale, compaiono sottoforma di Workstation i-esime in grado di prevedere dei controlli ed eseguire analisi mediante dispositivi PLC.

Si tratta di un'architettura logica che, così implementata, permetterebbe un cambiamento significativo in termini statistici e tecnologici. Tuttavia, bisogna ricordare che tutte le trasformazioni comportano delle sfide difficili da superare e che solamente con il giusto approccio questi ostacoli possono essere oltrepassati. La convergenza di tutti questi sistemi innovativi, in conclusione, permette di ottenere una visione d'insieme e sinergica che spinge l'impresa verso un'eccellenza operativa e che la rende in grado di affrontare le sfide di un contesto produttivo sempre più complesso e variabile.

## Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha evidenziato l'importanza strategica della tracciabilità e del controllo qualità di processo nell'industria agroalimentare secondaria, con particolare riferimento alla produzione industriale di pesti e sughi destinati alla grande distribuzione. L'adozione di metodologie statistiche di controllo, quali piani di campionamento, e di sistemi tecnologici e informatici avanzati, quali tecnologie di visione artificiale, algoritmi di apprendimento automatico e sistemi integrati di gestione a livello macro-aziendale, rappresentano una risposta efficace alle crescenti esigenze dei consumatori in termini di sicurezza, trasparenza e qualità del prodotto e del processo produttivo. Questo lavoro sottolinea come un approccio strutturato

e innovativo alla gestione dei processi di produzione non solo garantisce la conformità agli standard normativi, ma contribuisca anche a rafforzare la fiducia del mercato e a ottimizzare l'efficienza operativa. Le prospettive future prevedono un crescente impiego di tecnologie intelligenti, quali l'intelligenza artificiale e il machine learning, per migliorare ulteriormente la capacità di prevenzione, previsione e gestione dei rischi, aprendo così nuovi orizzonti per l'innovazione sostenibile nel settore agroalimentare secondario.

## Bibliografia

Amani, Hanieh, Katalin Badak-Kerti, e Amin Mousavi Khaneghah. 2022. «Current Progress in the Utilization of Smartphone-Based Imaging for Quality Assessment of Food Products: A Review». *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 62 (13): 3631–43. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1867820>.

Arena, Antonio, Alessio Bianchini, Pericle Perazzo, Carlo Vallati, e Gianluca Dini. 2019. «BRUSCHETTA: An IoT Blockchain-Based Framework for Certifying Extra Virgin Olive Oil Supply Chain». In *2019 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*, 173–79. Washington, DC, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/SMARTCOMP.2019.00049>.

Aslam, Muhammad, Saminathan Balamurali, Jeyadurga Periyasamyandian, e Ali Hussein AL-Marshadi. 2019. «Plan for Food Inspection for Inflated-Pareto Data Under Uncertainty Environment». *IEEE Access* 7:164186–93. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2951019>.

Benatia, M. A., V. E. De Sa, D. Baudry, H. Delalin, e P. Halftermeyer. 2018. «A framework for big data driven product traceability system». In *2018 4th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ATSIP.2018.8364340>.

- Betti, Gianni, Daniela Evangelista, Francesca Gagliardi, Emanuele Giordano, e Angelo Riccaboni. 2024. «Towards Integrating Information Systems of Statistical Indicators on Traceability, Quality and Safety of Italian Agrifood Systems for Citizens, Institutions and Policy-Makers». *Sustainability* 16 (15): 6330. <https://doi.org/10.3390/su16156330>.
- Bosona, Techane, e Girma Gebresenbet. 2023. «The Role of Blockchain Technology in Promoting Traceability Systems in Agri-Food Production and Supply Chains». *Sensors* 23 (11): 5342. <https://doi.org/10.3390/s23115342>.
- Bougdira, Abdesselam, Abdelaziz Ahaitouf, e Ismail Akharraz. 2019. «Conceptual Framework for General Traceability Solution: Description and Bases». *Journal of Modelling in Management* 15 (2): 509–30. <https://doi.org/10.1108/JM2-12-2018-0207>.
- Bougdira, Abdesselam, Ismail Akharraz, e Abdelaziz Ahaitouf. 2019. «Fuzzy Approach to Enhance Quality Control within Intelligent Traceability Systems». In *2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, 1–10. Fez, Morocco: IEEE. <https://doi.org/10.1109/WITS.2019.8723764>.
- Čapla, Jozef, Peter Zajác, Jozef Čurlej, Ľubomír Belej, Miroslav Kročko, Marek Bobko, Lucia Benešová, Silvia Jakobová, e Tomáš Vlčko. 2020. «Procedures for the Identification and Detection of Adulteration of Fish and Meat Products». *Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences* 14 (ottobre):978–94. <https://doi.org/10.5219/1474>.
- Chopra, Ashok. 2020. «Blockchain Technology in Food Industry Ecosystem». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 872 (1): 012005. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/872/1/012005>.
- Cocco, Luisanna, e Katuscia Mannaro. 2021. «Blockchain in Agri-Food Traceability Systems: A Model Proposal for a Typical Italian Food Product». In *2021 IEEE International Conference on Software Analysis*,

*Evolution and Reengineering (SANER)*, 669–78. Honolulu, HI, USA: IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/SANER50967.2021.00085>.

Conti, Massimo. 2022. «EVO-NFC: Extra Virgin Olive Oil Traceability Using NFC Suitable for Small-Medium Farms». *IEEE Access* 10:20345–56. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3151795>.

Corallo, Angelo, Maria Elena Latino, e Marta Menegoli. 2019. «A Business Process Modelling Approach for Supporting Traceability in Food Industry». In *2019 8th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*, 265–69. Cambridge, United Kingdom: IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/ICITM.2019.8710657>.

Corallo, Angelo, Maria Elena Latino, Marta Menegoli, e Pierpaolo Pontrandolfo. 2020. «A Systematic Literature Review to Explore Traceability and Lifecycle Relationship». *International Journal of Production Research* 58 (15): 4789–4807.  
<https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1771455>.

Corallo, Angelo, Maria Elena Latino, Marta Menegoli, e Fabrizio Striani. 2020. «What Factors Impact on Technological Traceability Systems Diffusion in the Agrifood Industry? An Italian Survey». *Journal of Rural Studies* 75 (aprile):30–47. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.02.006>.

Corallo, Angelo, Roberto Paiano, Anna Lisa Guido, Andrea Pandurino, Maria Elena Latino, e Marta Menegoli. 2018. «Intelligent Monitoring Internet of Things Based System for Agri-Food Value Chain Traceability and Transparency: A Framework Proposed». In *2018 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS)*, 1–6. Salerno: IEEE. <https://doi.org/10.1109/EESMS.2018.8405814>.

Cruz, Estrela, e António Miguel Rosado Cruz. 2019. «A Food Value Chain Integrated Business Process and Domain Models for Product Traceability and Quality Monitoring: Pattern Models for Food Traceability Platforms». In *Proceedings of the 21st International Conference on Enterprise*

*Information Systems*, 285–94. Heraklion, Crete, Greece: SCITEPRESS - Science and Technology Publications.

<https://doi.org/10.5220/0007730502850294>.

Dakshayini, M, H P Sushma, e S Spoorthi. 2024. «Blockchain Based Traceability System for Food Safety». In *2024 International Conference on Emerging Technologies in Computer Science for Interdisciplinary Applications (ICETCS)*, 1–6. Bengaluru, India: IEEE.

<https://doi.org/10.1109/ICETCS61022.2024.10543664>.

De Araujo, Willy R., Fernando V. Lima, e Heleno Bispo. 2021. «Dynamic and Statistical Operability of an Experimental Batch Process». *Processes* 9 (3): 441. <https://doi.org/10.3390/pr9030441>.

Dehghani, Milad, Anna Popova, e Shahin Gheitanchi. 2022. «Factors Impacting Digital Transformations of the Food Industry by Adoption of Blockchain Technology». *Journal of Business & Industrial Marketing* 37 (9): 1818–34. <https://doi.org/10.1108/JBIM-12-2020-0540>.

Dudina, Diana A., Victor A. Vasiliev, e Egor S. Mandrakov. 2021. «Smart Tool for Tracing Humidity and Temperature of Products During Transportation». In *2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*, 279–81. Yaroslavl, Russian Federation: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITQMIS53292.2021.9642796>.

Enste, Udo. 2018. «Information Technology and Structuring of Information for Resource Efficiency Analysis and Real-Time Reporting». In *Resource Efficiency of Processing Plants*, a cura di Stefan Krämer e Sebastian Engell, 1<sup>a</sup> ed., 159–79. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527804153.ch7>.

Ersoy, Pervin, Gülmüş Börühan, Sachin Kumar Mangla, Jorge Hernandez Hormazabal, Yigit Kazancoglu, e Çisem Lafcı. 2022. «Impact of Information Technology and Knowledge Sharing on Circular Food Supply

Chains for Green Business Growth». *Business Strategy and the Environment* 31 (5): 1875–1904. <https://doi.org/10.1002/bse.2988>.

«EU Agri-Food Trade Stays on Course - European Commission». 2024. 28 ottobre 2024. [https://agriculture.ec.europa.eu/news/eu-agri-food-trade-stays-course-2024-09-03\\_en](https://agriculture.ec.europa.eu/news/eu-agri-food-trade-stays-course-2024-09-03_en).

Figueiredo, Fernanda, Adelaide Figueiredo, e M Ivette Gomes. s.d. «Acceptance Sampling Plans for Inflated Pareto Processes».

Gabrova, Radoslava, Vladimira Ganchovska, Hristina Andreeva, e Angel Danev., 2021 «DETERMINATION OF THE CHANGE IN VOLUME AND STABILITY OF BEER FOAM BY DIGITAL IMAGE PROCESSING».

Guido, Rosita, Enrico Palermo, Vittorio Solina, 2020. «A Framework for Food Traceability: Case Study – Italian Extra-Virgin Olive Oil Supply Chain». *International Journal of Industrial Engineering and Management* 11 (1): 50–60. <https://doi.org/10.24867/IJIEM-2020-1-252>.

Herrera, Milton M., e Javier Orjuela-Castro. 2021. «An Appraisal of Traceability Systems for Food Supply Chains in Colombia». *International Journal on Food System Dynamics* Vol 12 (marzo):37-50 Pages. <https://doi.org/10.18461/IJFSD.V12I1.74>.

Jaskó, Szilárd, Adrienn Skrop, Tibor Holczinger, Tibor Chován, e János Abonyi. 2020. «Development of Manufacturing Execution Systems in Accordance with Industry 4.0 Requirements: A Review of Standard- and Ontology-Based Methodologies and Tools». *Computers in Industry* 123 (dicembre):103300. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103300>.

Jose, Arun, e PrasannaVenkatesan Shanmugam. 2019. «Supply Chain Issues in SME Food Sector: A Systematic Review». *Journal of Advances in Management Research* 17 (1): 19–65. <https://doi.org/10.1108/JAMR-02-2019-0010>.

Kakani, Vijay, Van Huan Nguyen, Basivi Praveen Kumar, Hakil Kim, e Visweswara Rao Pasupuleti. 2020. «A Critical Review on Computer Vision and Artificial Intelligence in Food Industry». *Journal of Agriculture and Food Research* 2 (dicembre):100033.

<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100033>.

Kalaitzis, Panagiotis, e Zeina El-Zein. 2016. «Olive Oil Authentication, Traceability and Adulteration Detection Using DNA-based Approaches». *Lipid Technology* 28 (10–11): 173–76.

<https://doi.org/10.1002/lite.201600048>.

Kamann, Dirk-Jan F, José A Alfaro, e Szabolcs Szilárd Sebrek. s.d. «28 Years of Traceability Management: Trends, Bottlenecks and Opportunities».

Kurnia, Sherah, Mingye Li, Libo Liu, Tingru Cui, Wen Li, Guilherme Tortorella, Martin Palmer, e Mazen Ali. 2023. «Investigating the Impacts of Digital Food Supply Chain Traceability on Sustainability: An Australian Study».

Liberati, A., D. G Altman, J. Tetzlaff, C. Mulrow, P. C Gotzsche, J. P A Ioannidis, M. Clarke, P J Devereaux, J. Kleijnen, e D. Moher. 2009. «The PRISMA Statement for Reporting Systematic Reviews and Meta-Analyses of Studies That Evaluate Healthcare Interventions: Explanation and Elaboration». *BMJ* 339 (jul21 1): b2700–b2700.

<https://doi.org/10.1136/bmj.b2700>.

Liberty, Jacob Tizhe, Ernest Habanabakize, Paul Inuwa Adamu, e Samuel Mshelia Bata. 2024. «Advancing Food Manufacturing: Leveraging Robotic Solutions for Enhanced Quality Assurance and Traceability across Global Supply Networks». *Trends in Food Science & Technology* 153 (novembre):104705. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104705>.

- Lin, Qijun, Huaizhen Wang, Xiaofu Pei, e Junyu Wang. 2019. «Food Safety Traceability System Based on Blockchain and EPCIS». *IEEE Access* 7:20698–707. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2897792>.
- Manjubargavi, S, e J Subhashini. 2023. «Quality Analysis of Tomato for Ketchup Manufacturing Industry Using Deep Learning». In *2023 International Conference on Recent Advances in Electrical, Electronics, Ubiquitous Communication, and Computational Intelligence (RAEEUCCI)*, 1–5. Chennai, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/RAEEUCCI57140.2023.10134207>.
- Mantravadi, Soujanya, e Charles Møller. 2019. «An Overview of Next-Generation Manufacturing Execution Systems: How Important Is MES for Industry 4.0?» *Procedia Manufacturing* 30:588–95. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.083>.
- Mattarozzi, Monica, Eleni Laski, Alessandro Bertucci, Marco Giannetto, Federica Bianchi, Claudia Zoani, e Maria Careri. 2023. «Metrological Traceability in Process Analytical Technologies and Point-of-Need Technologies for Food Safety and Quality Control: Not a Straightforward Issue». *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 415 (1): 119–35. <https://doi.org/10.1007/s00216-022-04398-5>.
- Mohanta, Bhabendu Kumar, Soumyashree S Panda, e Debasish Jena. 2018. «An Overview of Smart Contract and Use Cases in Blockchain Technology». In *2018 9th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, 1–4. Bangalore: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT.2018.8494045>.
- Moreno-Montes De Oca, Isel, Monique Snoeck, Hajo A. Reijers, e Abel Rodríguez-Morffi. 2015. «A Systematic Literature Review of Studies on Business Process Modeling Quality». *Information and Software Technology* 58 (febbraio):187–205. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2014.07.011>.

- Page, Matthew J, David Moher, Patrick M Bossuyt, Isabelle Boutron, Tammy C Hoffmann, Cynthia D Mulrow, Larissa Shamseer, et al. 2021. «PRISMA 2020 Explanation and Elaboration: Updated Guidance and Exemplars for Reporting Systematic Reviews». *BMJ*, marzo, n160. <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>.
- Panzeri, Giovanni. 2018. «Carrefour, la prima GDO in Italia che utilizza la blockchain per tracciare gli alimenti di qualità».
- Pradana, I Gusti Made Teddy, Taufik Djatna, e Irman Hermadi. 2020. «Blockchain Modeling for Traceability Information System in Supply Chain of Coffee Agroindustry». In *2020 International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS)*, 217–24. Depok, Indonesia: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICACSIS51025.2020.9263214>.
- Prashar, Deepak, Nishant Jha, Sudan Jha, Yongju Lee, e Gyanendra Prasad Joshi. 2020. «Blockchain-Based Traceability and Visibility for Agricultural Products: A Decentralized Way of Ensuring Food Safety in India». *Sustainability* 12 (8): 3497. <https://doi.org/10.3390/su12083497>.
- Prata, Emille Rocha Bernardino De Almeida, José Benício Paes Chaves, Silvane Guimarães Silva Gomes, e Frederico José Vieira Passos. 2021. «Statistical Quality Control in the Food Industry: A Risk-Based Approach». *International Journal of Quality & Reliability Management* 38 (2): 437–52. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-08-2019-0272>.
- Puttero, Stefano, Elisa Verna, Gianfranco Genta, e Maurizio Galetto. 2024. «Improved Quality Control and Sustainability in Food Production by Machine Learning». *Procedia CIRP* 122:533–38. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.078>.
- Qian, Jianping, Bingye Dai, Baogang Wang, Yan Zha, e Qian Song. 2022. «Traceability in Food Processing: Problems, Methods, and Performance Evaluations—a Review». *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 62 (3): 679–92. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1825925>.

Reddy, T. Taranya, Y. Rama Devi, e G. Kavita. 2023. «Logistics, Traceability in Food Supply Chain Management». A cura di S.K. Tummala, S. Kosaraju, P.B. Bobba, e S.K. Singh. *E3S Web of Conferences* 391:01075. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339101075>.

Rejeb, Abderahman, John G. Keogh, Suhaiza Zailani, Horst Treiblmaier, e Karim Rejeb. 2020. «Blockchain Technology in the Food Industry: A Review of Potentials, Challenges and Future Research Directions». *Logistics* 4 (4): 27. <https://doi.org/10.3390/logistics4040027>.

Saha, Dhritiman, e Annamalai Manickavasagan. 2021. «Machine Learning Techniques for Analysis of Hyperspectral Images to Determine Quality of Food Products: A Review». *Current Research in Food Science* 4:28–44. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.01.002>.

Santos-Fernández, Edgar, K. Govindaraju, e Geoff Jones. 2014. «A New Variables Acceptance Sampling Plan for Food Safety». *Food Control* 44 (ottobre):249–57. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.03.051>.

Sarkisyan, Varuzhan, 2017, «Chapter 11 - Raw Materials Analysis and Quality Control».

Shojaeinasab, Ardeshir, Todd Charter, Masoud Jalayer, Maziyar Khadivi, Oluwaseyi Ogunfowora, Nirav Raiyani, Marjan Yaghoubi, e Homayoun Najjaran. 2022. «Intelligent Manufacturing Execution Systems: A Systematic Review». *Journal of Manufacturing Systems* 62 (gennaio):503–22. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.01.004>.

Teixeira, Juliana, Maribel Yasmina Santos, e Ricardo J. Machado. 2018. «Business Process Modeling Languages and their Data Representation Capabilities». In *2018 International Conference on Intelligent Systems (IS)*, 685–91. <https://doi.org/10.1109/IS.2018.8710586>.

Tian, Feng. 2017. «A supply chain traceability system for food safety based on HACCP, blockchain & Internet of things». In *2017 International*

*Conference on Service Systems and Service Management*, 1–6.

<https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2017.7996119>.

Treiblmaier, Horst, e Marion Garaus. 2023. «Using Blockchain to Signal Quality in the Food Supply Chain: The Impact on Consumer Purchase Intentions and the Moderating Effect of Brand Familiarity». *International Journal of Information Management* 68 (febbraio):102514.

<https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2022.102514>.

Turan, Cansu, e Yucel Ozturkoglu. 2022. «A Conceptual Framework Model for an Effective Cold Food Chain Management in Sustainability Environment». *Journal of Modelling in Management* 17 (4): 1262–79.

<https://doi.org/10.1108/JM2-09-2020-0239>.

Verna, Elisa, Gianfranco Genta, e Maurizio Galetto. 2025. «Enhanced Food Quality by Digital Traceability in Food Processing Industry». *Food Engineering Reviews*, gennaio. <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09392-4>.

Xu, Jie, Shuang Guo, David Xie, e Yaxuan Yan. 2020. «Blockchain: A New Safeguard for Agri-Foods». *Artificial Intelligence in Agriculture* 4:153–61.

<https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2020.08.002>.

Yang, Tao, Xinlei Yi, Shaowen Lu, Karl H. Johansson, e Tianyou Chai. 2021. «Intelligent Manufacturing for the Process Industry Driven by Industrial Artificial Intelligence». *Engineering* 7 (9): 1224–30.

<https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.04.023>.

Yang, Xinting, Mengqi Li, Huajing Yu, Mingting Wang, Daming Xu, e Chuanheng Sun. 2021. «A Trusted Blockchain-Based Traceability System for Fruit and Vegetable Agricultural Products». *IEEE Access* 9:36282–93.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062845>.

Yujun, Yang, Yang Yimei, Zhou Wang, Xiao Hongbo, e Li Liyun. 2021. «Research On The Construction of Agricultural Product Quality

Maintenance And Quality Traceability System Based On Big Data». In *2021 18th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)*, 655–59. Chengdu, China: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCWAMTIP53232.2021.9674175>.

### Allegati (Figure)

*Fig.1: Standard di qualità da seguire*

*Fig.2: Sistema HACCP*

*Fig.3: HACCP vs HARPC*

*Fig.4: Certificazione ISO 22000*

*Fig.5: Certificazione ISO 22005*

*Fig.6: Certificazione FSSC 22000*

*Fig.7: Certificazione BRCS*

*Fig.8: Certificazione IFS*

*Fig.9: Certificazioni Halal e Kosher*

*Fig.10: Certificazioni IGP e DOP*

*Fig.11: Applicazione Metodo PRISMA*

*Fig.12: Tracciabilità vs Rintracciabilità*

*Fig.13: Regolamento CE n.178/2002*

*Fig.14: IoT integrato con i sistemi robotici*

*Fig.15: Livelli tecnologici in un sistema di tracciabilità basato sull' IoT*

*Fig.16: IoT integrato con tecnologia RFID*

*Fig.17: IoT integrato con tecnologia WSN*

*Fig.18: Datamatrix*

*Fig.19: QR Code*

*Fig.20: IoT integrato con NFC*

*Fig.21: Paradigma, senza limiti, dell'IoT*

*Fig.22: Vantaggio competitivo derivante da un sistema di tracciabilità efficiente*

*Fig.23: Carrefour adotta Blockchain*

*Fig.24: Livello dei vasi in vetro*

*Fig.25: Miscelatrice e tre boule sequenziali*

*Fig.26: Fase di riempimento*

*Fig.27: Incapsulamento dei vasi*

*Fig.28: Vasi non conformi temporaneamente scartati*

*Fig.29: Sterilizzazione in autoclave*

*Fig.30: Sonda usata nel processo di sterilizzazione*

*Fig.31: Etichettatura vasi nudi*

*Fig.32: Curva Caratteristica Operativa OC*

*Fig.33: Effetto della numerosità del campione  $n$  sulla OC (Minitab)*

*Fig.34: Effetto del numero di accettazione  $c$  sulla OC (Minitab)*

*Fig.35: Probabilità di accettazione con distribuzione Ipergeometrica*

*Fig.36: Sistema con distribuzione Ipergeometrica per calcolo di  $(n,c)$*

*Fig.37: Probabilità di accettazione con distribuzione Binomiale*

*Fig.38: Sistema con distribuzione Binomiale per calcolo di  $(n,c)$*

*Fig.39: Nomogramma di Montgomery per piani di campionamento per attributi*

*Fig.40: Risultato di un Piano di Campionamento semplice per Attributi (Elaborazione su software Minitab)*

*Fig.41: Curva Caratteristica Operativa OC ottenuta con un Piano di Campionamento semplice per Attributi (Minitab)*

*Fig.42: Livelli speciali e standard di ispezione al variare della numerosità del lotto*

*Fig.43: Tabella relativa all'ispezione normale secondo MIL STD 105E*

*Fig.44: Confronto Piano ad hoc con Piano con MIL STD 105E  
(Elaborazione su software Minitab)*

*Fig.45: Confronto Curve OC dei due piani (Minitab)*

*Fig.46: Nomogramma per i piani di campionamento per variabili*

*Fig.47.a: Piano di campionamento per variabili con  $\sigma$  NON nota  
(Elaborazione su software Minitab)*

*Fig.47.b: Piano di campionamento per variabili con  $\sigma$  NON nota  
(Elaborazione su software Minitab)*

*Fig.48: Curva operativa OC relativa al piano di campionamento per variabili con  $\sigma$  NON nota (Minitab)*

*Fig.49.a: Piano di campionamento per variabili con  $\sigma$  nota (Elaborazione su software Minitab)*

*Fig.49.b: Piano di campionamento per variabili con  $\sigma$  nota (Elaborazione su software Minitab)*

*Fig.50: Curva operativa OC relativa al piano di campionamento per variabili con  $\sigma$  nota (Minitab)*

*Fig.51.a: Test di normalità "Lunghezza gambo basilico" (Elaborazione su software Minitab)*

*Fig.51.b: Probability Plot of "Lunghezza gambo basilico" con livello di confidenza al 95% (Elaborazione su software Minitab)*

*Fig.52: Test sulla deviazione standard  $\sigma$  (Elaborazione su software Minitab)*

*Fig.53: Risultato test sulla deviazione standard  $\sigma$  (Elaborazione su software Minitab)*

*Fig.54: Funzionamento di un Sistema di Machine Vision*

*Fig.55: AI, ML, ANN, DL*

*Fig.56: Differenza tra Underfitting e Overfitting*

*Fig.57: Training, validation, test*

*Fig.58: Sistema informativo vs Sistema informatico*

*Fig.59: Information and management systems for planning and control*

*Fig.60: Functional hierarchy of production-oriented IT systems*

*Fig.61: Architettura logica Modello TO-BE*

## Allegati (Tabelle)

*Tabella 1: Certificazioni nell'industria agroalimentare secondaria*

*Tabella 2: Sistemi di tracciabilità in fase di distribuzione del prodotto nell'industria agroalimentare secondaria*

*Tabella 3: Descrizione dei rischi principali per la salute dei consumatori, Annual Report Alert and Cooperation Network UE, 2023*

*Tabella 4: Database tradizionale vs Tecnologia Blockchain BCT*

*Tabella 5: Razionalizzazione dei controlli lungo il processo produttivo*

*Tabella 6: Modello TO-BE*

*Tabella 7: Definizioni relative ai controlli di accettazione*

*Tabella 8: Differenza tra piano per attributi e piano per variabili*

*Tabella 9: Piani di campionamento vs Sistemi di Machine Vision*

## Ringraziamenti

Questa tesi è realizzata nell'ambito del progetto NODES, finanziato dal MUR sui fondi M4C2 – Investimento 1.5 Avviso “Ecosistemi dell'Innovazione, nell'ambito del PNRR finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU (Grant agreement Cod. n.ECS00000036).

## Ringraziamenti personali

Ebbene sì, sono qua a scrivere i ringraziamenti della mia tesi di Laurea Magistrale. Il momento tanto atteso è arrivato, oggi si conclude un percorso iniziato cinque anni e mezzo fa.

Che dire, provo a ripercorrerlo. Tutto comincia il 27 settembre 2019, dopo esser uscito con il 100 dalla maturità pensavo di viver di rendita, e invece mi sbagliavo di grosso. È stato un percorso tortuoso e complicato, che non è cominciato benissimo: nei primi cinque mesi, 1 solo esame passato e tanti pianti fatti per la frustrazione di non sentirsi in grado di frequentare un'università del genere, ma dentro di me ero profondamente convinto del fatto che fosse solo una questione di adattamento e di tempo. Infatti, a distanza di 5 anni, posso dire di aver avuto ragione, la dedizione, la costanza avuta e il sacrificio fatto sono stati ripagati e sono convinto che mi ripagheranno per il resto della vita.

È stato un percorso estremamente difficile ma allo stesso stimolante ed avvincente, che non avrei mai potuto affrontare senza il sostegno quotidiano della mia Famiglia. Sì, ho scritto Famiglia con la F maiuscola perché sono fortunato ad aver una famiglia così.

In primis, devo ringraziare i miei genitori, Mamma Cristina e Papà Silvio, senza i quali nulla di tutto questo sarebbe stato possibile. Siete due genitori meravigliosi, mi avete spronato sin dal primo giorno in qualunque cosa io abbia fatto, mi avete insegnato i giusti valori di vita che un ragazzo deve avere e mi siete sempre stati vicino in ogni mia scelta, di tutto questo non potrò mai ringraziarvi abbastanza, grazie di esserci sempre, vi amo.

Dopo di voi, un ringraziamento va fatto ai miei tre fratelli: Laura, Sofia e Stefano. Vi ringrazio per avermi supportato in questi cinque lunghi anni. Sono conscio del fatto che ci possano essere stati dei momenti in cui sono stato veramente insopportabile, mi tocca chiedervi scusa e ringraziarvi nuovamente per la pazienza avuta. Grazie di esserci sempre, siete parte di me, vi voglio tanto bene.

A questo punto, continuo ringraziando i nonni: ringrazio nonna Anna, nonna Lella, nonno Rino e nonno Damiano, che, se anche oggi non è qui con me, io lo sento vicino. Siete dei nonni magnifici, grazie degli insegnamenti che mi avete dato sin dai primi anni di vita e grazie per tutti i momenti che abbiamo passato e che continueremo a passare insieme. Ah dimenticavo, un grazie infinito per tutti i pasti che mi avete offerto e cucinato, grazie grazie e ancora grazie.

Ora vengono gli zii: ringrazio Zia Ele e Zio Ivan, due monumenti sacri per la mia Famiglia, due zii con la Z maiuscola, sono fiero di esser vostro nipote. Ringrazio anche Zia Dani, Zia Rita e Zio Gio per tutto quello che in questi anni avete fatto per me.

Ora viene forse il momento più difficile: ringrazio mia madrina Francesca, ringrazio te Mina. Oggi non sei qui con me, in tutti questi anni non l'ho fatto vedere perché su queste cose sono molto introverso ma continuo da 13 anni a questa parte a chiedermi il perché tu ne sia andata così presto, la vita con te è stata bastarda ed ingiusta ma fortunatamente ti ha permesso di dare alla luce una bambina splendida, di nome Costanza, che oggi è qui

con me e che per me sarà sempre la tua versione di donna più piccola. Un enorme grazie va anche a Pietro, tuo compagno di viaggio sin da quando ti ho conosciuto, grazie dei momenti che abbiamo condiviso insieme Piè, e grazie di tutto Mina, grazie di tutto quello che mi hai insegnato, mi manchi tanto. Mi raccomando, non ti commuovere da lassù.

Dulcis in fundo, venite voi amici miei: il Gruppo Scurre Piemonte, senza di voi la vita non sarebbe così bella.

Parto da voi due, Morris e Antonio. Ormai sono 10 anni che ci conosciamo, che dire, ce ne sarebbero di cose da dire: ci siamo conosciuti su un campo da calcio, manco a dirlo, alla fine c'è sempre il calcio di mezzo. Siamo cresciuti insieme, in ogni minimo dettaglio, abbiamo passato momenti indimenticabili che porterò sempre con me, quante notti ho passato a casa vostra mamma mia, non potrò mai ringraziarvi abbastanza per tutti i pranzi, le cene e le dormite fatte da voi.

Se devo far un ringraziamento personale, grazie Morris per esserci sempre stato e per avermi spronato nei momenti più difficili, e grazie Anto per la perseveranza e la dedizione che hai sempre mostrato e che mi hai trasmesso nel corso degli anni, sei un esempio di vita, vi voglio bene.

Ora tocca a voi: Matteo, Lorenzo, Gabriele, Giorgio, Enrico e Fabio.

Grazie Matte per tutti quei momenti passati a ridere e a scherzare insultandoci come se avessimo 10 anni, grazie della tua generosità quotidiana, grazie dei discorsi fatti in macchina alle 3 del mattino e soprattutto grazie di metter sempre sta benedetta casa almeno 1 giorno a settimana, hai un cuore grande, ti voglio bene.

Grazie Lollo per tutte le conversazioni fatte nei momenti più delicati, sei un ragazzo con una voglia di fare immensa, sono convinto che arriverai in alto, ti voglio bene.

Grazie Gabri per avermi trasmesso quella leggerezza che tutti i giorni ti contraddistingue, pensare che forse potremmo diventare colleghi di scrivania mi fa ridere ma allo stesso tempo sarebbe stupendo, ti voglio bene.

Grazie Gio per i momenti passati assieme e per la sincerità che mi hai sempre mostrato, sono convinto che pian piano tutto si sistemerà, ti voglio bene.

Grazie Enri per la dedizione al lavoro e al sacrificio trasmessa, sei un'aziendalista, farai strada perché te lo meriti, ti voglio bene.

Grazie Fa per la tua semplicità, sei tornato e ora ti do un consiglio: non far più l'errore di andartene, ti voglio bene.

Siete un gruppo di amici fantastico, senza di voi non sarei la persona che sono, grazie e ancora grazie. Ah, dimenticavo, mi tocca dirlo: Forza Juventus, Inter merda, fino alla fine.

Ringrazio i miei compagni di università, con i quali ho condiviso bellissime esperienze, siete stati degli ottimi compagni di viaggio, grazie di tutto. Infine, ringrazio il Prof. Galetto e il Dottorando Alberto per il sostegno e l'aiuto fornitomi durante l'intero percorso di tesi.

Credo di aver terminato qua, mi auguro di non aver dimenticato nessuno, nel caso mi scuso e lo ringrazio.

Concludo ringraziandovi ancora una volta per esser tutti qui oggi, questo è un giorno per me indimenticabile e sono fiero di poterlo condividere con voi.

Un grazie infinito,

Giampaolo