



UNIVERSITÀ DI PISA

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA DEI SISTEMI  
DEL TERRITORIO E DELLE COSTRUZIONI**

**RELAZIONE PER IL CONSEGUIMENTO DELLA  
LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA GESTIONALE**

***Manutenzione Predittiva 4.0 di una Linea di  
Assemblaggio Automatica mediante  
l'Implementazione di un Gemello Digitale***

**SINTESI**

---

RELATORI

Prof. Andrea Bonaccorsi  
*Dipartimento di Ingegneria dell'Energia  
Dei Sistemi del Territorio e delle Costruzioni*

Alessio Papucci  
*Chief Digital Officer (CDO) &  
Advanced Technology Team Leader  
Vitesco Technologies Italy*

IL CANDIDATO

Francesco Agostini  
fraghost@hotmail.it

## **Sommario**

Questa tesi è il risultato del tirocinio della durata di sette mesi svolto presso Vitesco Technologies (Fauglia, Pisa), ed ha come oggetto la progettazione e l'esecuzione del progetto che prevede la realizzazione di un Gemello Digitale della "Comboline Linea 7" che assembla elettro-iniettori in modo automatizzato in uno scenario afferente al paradigma Industria 4.0. Il primo macro-obiettivo consiste nella digitalizzazione degli asset fisici della Linea al fine di creare un Gemello Digitale con una copertura di almeno l'85% del processo di assemblaggio. Il secondo macro-obiettivo riguarda il lancio di un progetto pilota di Machine Learning con riduzione del Machine Downtime del 6% in ottica manutenzione predittiva. Successivamente ad una fase preliminare di progettazione in ottica PDCA e di rassegna della letteratura scientifica, le attività operative iniziano con lo studio dei 13 moduli che compongono la Linea finalizzato alla selezione del modulo sul quale lanciare il progetto pilota, fino ad arrivare alla stesura della specifica tecnica contenente i requisiti e l'architettura di sistema che il Gemello Digitale dovrà soddisfare per l'implementazione di pratiche di Manutenzione Predittiva. Infine, i risultati ottenuti vengono applicati ad un caso studio discutendo la transizione dalla manutenzione a guasto a quella predittiva.

## **Abstract**

This thesis work is the result of a seven-month internship carried out at Vitesco Technologies (Fauglia, Pisa). It deals with the design and execution of a project, which has the aim to create a Digital Twin of the "Comboline Line 7" that assembles electric injectors through an automated process, in an Industry 4.0 scenario. The first macro-target is the digitalization of the physical assets of the Line 7 through the creation of a Digital Twin, covering at least 85% of the whole process. The second macro-target is the launch of a Machine Learning pilot project, with the goal of achieving a reduction of the machine downtime by 6% using a Predictive Maintenance technique. After a preliminary phase of PDCA design and review of the scientific literature, the operational activities start with the study of 13 modules composing the Line 7. The study is aimed at selecting the module for the launch of the pilot project, up to the drafting of the technical specification, containing the requirements and the system architecture that Digital Twin should satisfy to implement Predictive Maintenance. Finally, the results will be applied to a case study to discuss the transition from failure maintenance to predictive maintenance.

## 1. INTRODUZIONE

### 1.1 Vitesco Technologies ed il Contesto del Settore Automotive

Vitesco Technologies è una realtà industriale presente nel territorio pisano dal 1987, leader mondiale nei componenti per sistemi di iniezione. Lo stabilimento di Pisa progetta, industrializza, produce e valida componentistica per il settore automobilistico, in particolare tre famiglie di prodotti: Iniettori, Fuel Rail e RDU. Nel 2019, la casa madre tedesca ha annunciato di voler uscire dal comparto dei componenti benzina/diesel e di perseguire una strategia principalmente dedicata alla mobilità elettrica. Per potersi aggiudicare lo sviluppo e la produzione di nuovi componenti elettrici occorre puntare sull'innovazione tecnologica rendendo lo stabilimento competitivo sotto gli aspetti di produttività e riduzione delle emissioni inquinanti. Per questo motivo, la sede pisana di Vitesco è fortemente impegnata nella ricerca e sviluppo di soluzioni innovative in ambito *Industria 4.0* e *Green Plant*, trovandosi ad affrontare un periodo di transizione che coinvolge tutto il mercato e la filiera automotive con la trasformazione della mobilità verso l'elettrico.

### 1.2 Motivazioni del Progetto

La *manutenzione predittiva* è uno dei pilastri del quarto paradigma industriale: monitorando e analizzando lo stato di salute della macchina è possibile programmare la manutenzione in maniera mirata e prima del verificarsi di un guasto che potrebbe causare cali consistenti di produttività, e, come sostiene Yan (2017): "I guasti alle apparecchiature e i brevi tempi di fermo del processo di produzione causano spesso enormi perdite economiche per un'impresa". Quanto appena affermato trova un elevato riscontro in una realtà aziendale come Vitesco: le circa 200 ore/anno di fermo della Comboline Linea 7 comportano una perdita economica elevata, considerando un tempo ciclo di circa 5 secondi per ogni iniettore. Recuperando il 6% di tale tempo sarebbero prodotti circa 10.000 iniettori, e, considerato il prezzo medio, non applicare pratiche di manutenzione predittiva porta ad un mancato fatturato annuo nell'ordine del milione di euro.

## 2. IL PROGETTO DI DIGITAL TWIN PER LA MANUTENZIONE PREDITTIVA

Dalle suddette motivazioni nasce l'esigenza di sviluppare un sistema atto a ridurre i downtime macchina. La soluzione individuata da Vitesco prevede l'utilizzo di pratiche di **manutenzione predittiva** mediante la realizzazione di un **gemello digitale** della linea di assemblaggio automatica in esame. Il progetto è reso possibile dall'enorme quantità di dati presenti nei database Vitesco, che, ad oggi, non vedono sfruttato a fondo il loro potenziale di

valore per l'azienda. Grazie all'applicazione di principi di Industrial Internet of Things (IIoT) e di Cyber-Physical System (Fig. 1) è possibile estrapolare i dati utili per analizzarli e creare un DB al quale applicare tecniche di machine learning, per restituire in real-time cosa sta accadendo al processo e per la predizione di guasti. Un esempio più "pratico" di tale obiettivo è di seguito descritto. Ipotizziamo che un modulo che compone la Linea 7 rallenti a tal punto da non far rispettare il tempo ciclo dell'intero processo di assemblaggio a causa dell'aumento del tempo impiegato dal cilindro 1 nella movimentazione dal punto A al punto B. Il tempo ciclo anomalo viene già mostrato sulle dashboard presenti in produzione, però, per esempio, nei 1000 cicli precedenti del cilindro 1, il tempo di percorrenza ha iniziato ad avere un trend preoccupante: questi dati sono già presenti all'interno dei sistemi aziendali ma ad oggi non sfruttati. Uno dei punti chiave del progetto è quindi quello di riuscire ad estrapolare tutti questi dati, analizzarli ed intervenire in tempo in modo tale da non comportare un aumento del tempo ciclo.

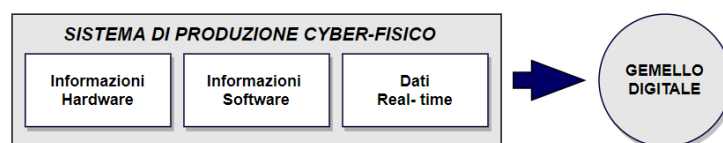


Figura 1: Sistema di produzione Cyber-Fisico

### 3. METODOLOGIA DI ANALISI

Delineato il progetto, è necessaria una progettazione delle attività che verranno eseguite per la sua realizzazione. Soprattutto per progetti di ampie dimensioni<sup>1</sup> e complessità, come nel caso oggetto di tesi, risulta fondamentale definire preliminarmente tali attività, e quindi adottare un approccio *plan-driven* con un *up-front-planning* elevato. Il framework di riferimento è il **PDCA** (Plan-Do-Check-Act): dopo aver definito lo scope del progetto, gli stakeholders ed i requisiti del prodotto, si pone l'attenzione sulla stesura della WBS contenente le attività che dovranno essere svolte, identificando preliminarmente deliverables, milestone e responsabilità. Vengono inoltre, già in questa prima fase, individuati gli indicatori, di processo e di risultato, che verranno utilizzati rispettivamente per controllare l'avanzamento del progetto e per misurare gli obiettivi raggiunti. Infine, vengono individuati i rischi legati al progetto. Tutte le attività di progettazione e operative riportate nel presente documento, ad eccezione degli aspetti tecnici relativi all'architettura di sistema

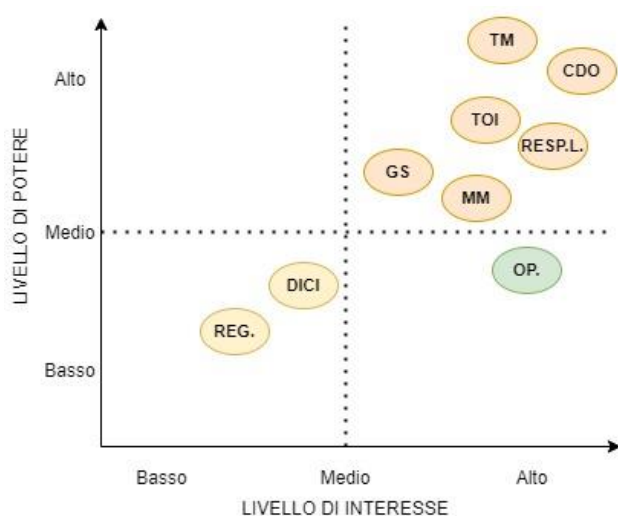
---

<sup>1</sup> Il progetto di tesi è il primo Obiettivo Operativo di un progetto più ampio della durata di 2 anni in ambito *Industria 4.0* e *Green Plant* denominato RISEE 4.0 "Ricerca ed Innovazione per uno Stabilimento Ecologico ed Efficiente in ambito Industria 4.0".

e dello sviluppo dell'algoritmo di machine learning, sono state svolte dal candidato (se necessario in collaborazione con il personale aziendale).

### 3.1 Identificazione degli Stakeholders

Vista l'elevata complessità del progetto, ed il coinvolgimento di enti esterni all'azienda, occorre identificare fin da subito tutti gli stakeholders che compongono l'ecosistema in cui si svilupperà. La loro identificazione preliminare, la definizione dei metodi di comunicazione, delle tempistiche di svolgimento delle attività, nonché del loro coinvolgimento quando ritenuto opportuno sono tutti accorgimenti necessari per il successo del progetto. Una volta identificati e stratificati (ad es. interni ed esterni all'azienda ecc.) vengono disposti nella matrice Potere-Interesse (Fig. 2) al fine di determinare azioni specifiche da intraprendere.



**LEGENDA**  
**TM:** Top Management.  
**CDO:** Chief Digital Officer.  
**RESP.L.:** Responsabile Linea 7.  
**TOI:** TOI (Zerynth srl) – Principale stakeholder esterno la cui attività è focalizzata sul paradigma Industria 4.0 e in particolare sui processi di digitalizzazione dei macchinari industriali.  
**GS:** Gestore del sistema “Shopfloor” (MES).  
**MM:** Masmec (fornitore dei macchinari delle linee).  
**OP:** Operatori e manutentori Linea 7.  
**DICI:** Dipartimento dell’Università di Pisa.  
**REG:** Regione Toscana (il progetto rientra in un bando regionale).

Figura 2: Matrice Stakeholders Potere - Interesse

Particolare attenzione è stata posta verso gli operatori della Linea, in quanto le loro mansioni potranno variare a seguito dell'implementazione del progetto<sup>2</sup>. Risulta quindi fondamentale informarli e soprattutto consultarli per lo sviluppo dello stesso, onde evitare ripercussioni negative e opposizioni al cambiamento in futuro.

### 3.2 Definizione delle Attività

Partendo dai macro-obiettivi del progetto RISEE 4.0 è possibile decomporre progressivamente il progetto fino a determinare le attività operative (riassunte in Tab. 1) che saranno svolte le quali dovranno risultare pianificabili, eseguibili e controllabili.

1) Analisi Preliminare del Sistema	2) Definizione Specifica Tecnica	3) Sviluppo SW e Installazione
<b>A) Individuazione del modulo su cui effettuare lo studio preliminare:</b> -Studio del processo di assemblaggio di Linea 7;	<b>A)</b> Definizione delle potenziali architetture. <b>B)</b> Stesura della specifica tecnica.	<b>A)</b> Progettazione del SW del sistema di monitoraggio per il modulo pilota. <b>B)</b> Configurazione unità SW 4ZeroBox per

<sup>2</sup> Vitesco adotta un approccio alla manutenzione di tipo TPM (*Total Productive Maintenance*): l'operatore è un pilastro fondamentale ed è pertanto parte attiva del processo di manutenzione.

-Individuazione KPIs; -Analisi della complessità dei moduli. <b>B) Analisi approfondita del modulo:</b> -Analisi Input/Output PLC e taggatura delle avarie; -Analisi delle principali avarie.	<b>C) Aggiornamento e validazione della specifica tecnica.</b>	acquisizione dati e backend device manager, sviluppo dashboard modulo pilota e interfaccia con applicativi aziendali. <b>C) Installazione sul campo del sistema di monitoraggio e test delle funzionalità.</b>
---	--	---

**Tabella 1: Attività di progetto**

### 3.3 Rischi di Progetto

I principali rischi di progetto individuati soprattutto facendo riferimento alle attività pianificate e agli stakeholders sono riassunti nella Tabella 2.

Rischio	Potenziale soluzione
Estrazione dei dati presenti nei PLC dei moduli che compongono la Linea 7 resa difficile da SW proprietari chiusi e/o dalla vastità di codice.	Utilizzare protocolli standardizzati e in alternativa retrofittare il modulo con sensoristica adeguata per catturare le variabili di processo più rilevanti.
Diffidenza da parte degli operatori di linea circa la collaborazione e la necessaria condivisione di conoscenza e di problemi attinenti Linea 7.	Gestione del cambiamento: condividere le finalità del progetto e le modalità di svolgimento delle attività, coinvolgimento del personale di linea e ascolto.
Definizione del modello con un'astrazione dal mondo reale corretta e utilizzo dell'apposito strumento informatico.	Mantenere un livello di dettaglio semplice del modello; valutare l'intercambio dei dati nella fase preliminare; non escludere l'utilizzo di più modelli simulativi canalizzati in seguito in un master unico.

**Tabella 2: Rischi di progetto**

### 3.4 Indicatori di Processo e di Risultato

Definiti i target di progetto è possibile identificare i principali indicatori di risultato (Tab. 3).

<b>Copertura del Digital Twin</b>	$\frac{\text{Numero asset fisici digitalizzati} * 100}{\text{Numero asset fisici totali da digitalizzare}} \geq 85\%$	Il target è raggiungere una copertura minima dell'85% degli asset fisici della Linea 7.
<b>Riduzione del Downtime</b>	$\frac{(DTi - DTf) * 100}{DTi} \geq 6\%$	DTi: Downtime iniziale. DTf: Downtime post implementazione progetto.
<b>% PdM</b>	$\frac{\#Int. man. predittiva * 100}{\#Int. man. pred. + \#Int. a guasto} \geq 30\%$	# Int.: numero interventi.

**Tabella 3: Indicatori di risultato**

Per quanto concerne gli indicatori di processo, viene tenuta sotto controllo la copertura progressiva dei moduli nel tempo: ci si aspetta che la copertura dei moduli successivi al modulo oggetto del progetto pilota richieda meno tempo per motivi di replicabilità, a tempo zero, del lavoro e per l'esperienza accumulata sul processo in esame. Inoltre, sarà monitorato il grado di collaborazione del personale di linea (indicatore calcolato in modo quantitativo) mediante proxy quali la prontezza nel fornire le informazioni necessarie per l'avanzamento del progetto nonché la collaborazione da un punto di vista più generale.

## 4. RISULTATI

### 4.1 Individuazione del Modulo su cui Effettuare lo Studio Preliminare

Il primo obiettivo consiste nel selezionare il modulo su cui lanciare il progetto pilota, pertanto, la prima attività eseguita ha riguardato lo studio della Linea 7, composta da 13 moduli automatici (disposti come in



Figura 3: Layout Comboline Linea 7

Fig. 3), la quale assembla 2 tipologie diverse di iniettori, ed è per questo definita “Comboline”. La linea, totalmente automatica, è caratterizzata da un tempo ciclo inferiore a 5 secondi e sono presenti 2 operatori supervisor. Dopo lo studio di tutte le operazioni eseguite dai 13 moduli e dell’architettura di rete (Fig. 4), è stato possibile determinare la

**complessità** dei moduli facendo riferimento a:

- Parte fisica*: numero e tipologia delle operazioni, robot e sensori;
- Parte digitale*: numero e tipologia dei segnali I/O del PLC;
- Caratteristiche critiche del modulo*: KPIs (tempo ciclo ecc.), numero e tipologia delle avarie riscontrate in passato.

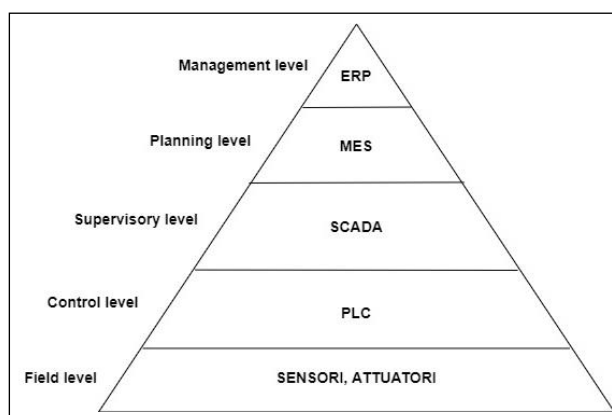


Figura 4: Livelli gerarchici di controllo aziendale

In seguito alla suddetta analisi la scelta ricade sul modulo M80.

#### 4.2 Analisi del Modulo M80

Il modulo M80 (Fig. 5) è caratterizzato da una complessità medio-alta<sup>3</sup>, e dai dati presenti nel sistema aziendale è possibile notare come in passato siano stati riscontrati molti problemi circa il tempo ciclo ed il numero di avarie accadute. Il modulo è composto da 6 stazioni (Tab. 4) e da una tavola rotante centrale. Le principali operazioni consistono nella saldatura Laser (sono presenti 2 stazioni di saldatura per motivi di tempo ciclo) e nella verifica della stessa.

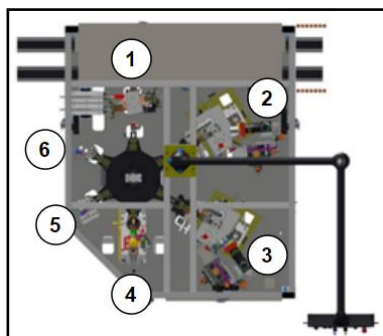


Figura 5: Modulo M80

Stazione	Breve descrizione
#1	Stazione Onload/Offload dell’iniettore da rotaia automatica.
#2	Stazione #1 di saldatura Valve Body – O-Ring Adapter.
#3	Stazione #2 di saldatura Valve Body – O-Ring Adapter.
#4	Stazione con sistema di visione per controllo saldatura.
#5	Stazione check quota H dell’iniettore.
#6	Stazione per azzeramento quota dell’iniettore.

Tabella 4: Stazioni del modulo M80

<sup>3</sup> La sua scelta è anche dovuta al fatto che iniziare lo studio con un modulo caratterizzato da una complessità troppo bassa potrebbe portare ad avere troppi problemi nell’estensione dello studio preliminare a moduli con complessità maggiore.

#### 4.2.1 Analisi Input/Output del PLC e Taggatura delle Avarie

Lo step successivo ha riguardato l'analisi degli I/O del PLC del modulo M80. In particolare, sono presenti circa 190 Input (provenienti dai sensori), 130 Output (attuazioni) e 470 possibili avarie (Tab. 5). Un I/O può avere diversi tipi di avarie. Per le avarie dovute all'attuazione di un movimento all'interno del modulo, esse vengono constatate dal sensore, il quale non rileva il completamento dell'attuazione e, dopo un certo lasso di tempo, genera un allarme. La prima problematica riscontrata è stata relativa alla loro **taggatura**, ovvero il processo atto a far

ESEMPI DI INPUT/OUTPUT		
Nome	Coordinata	Descrizione
Z3-ST00	E 0.0	Z2 CABINET TEMPERATURE OK
BF551	E 55.1	#2 Welding check
SP561	E 56.1	Check Argon presence
YV325	A 32.5	#11 2C2 - Pallet stop work
ESEMPI DI AVARIE		
Codice	Descrizione avaria	
8000245	[E0.0] - ST00 - TEMPERATURA CABINA Z2 NON OK	
8002232	SP561 - PRESENZA ARGON NON RILEVATO	

Tabella 5: Esempi I/O e Avarie

corrispondere l'avarìa al relativo I/O. Infatti, come è possibile vedere dalla Tab. 5, non è presente la colonna "Coordinata<sup>4</sup>" nelle avarie. Inoltre, non in tutte le descrizioni delle avarie è presente il riferimento al relativo I/O. Il processo di taggatura (supportato da Excel) ha portato ad un match di circa il 70%, ed è stato il seguente:

Avaria → Estrazione valori alfanumerici dell'avarìa (se presente, ad es. SP561) → Ricerca I/O relativo → Estrazione coordinata da I/O → Assegnazione coordinata all'avarìa.

#### 4.2.2 Analisi delle Principali Avarie

Dall'analisi del Downtime Report del modulo M80 è possibile identificare le avarie che hanno comportato un tempo di fermo macchina maggiore. Inoltre, grazie alla presenza di informazioni circa la stazione coinvolta, è possibile graficare (Fig. 6) il match avaria-stazione/tavola rotante con indicato il corrispondente downtime (in questo caso indicato con un valore generico V).

SUB_MODULE	MOD M80_ST1 Onload/Offload Valve Group		V					V1			V			
	MOD M80_ST2 ORA To Valve Group Laser Weld			V		V			V					
	MOD M80_ST3 ORA To Valve Group Laser Weld	V		V			V			V	V		V	
	MOD M80_ST4 Welding Joint Vision Check				V		V2			V	V			
	MOD M80_ST5 H Dimension Measurement		V							V				
	MOD M80_ST6 Reset	V			V			V					V	
	MOD M80 Tavola Rotante			V3		V				V	V	V	V	V
		Avaria 1	Avaria 2	Avaria Profinet/Profibus	Avaria 4	Avaria 5	Eccessivi scarti	Avaria 7	Pick&Place in avaria	Avaria 9	Avaria 10	Avaria 11	...	Avaria N
		DOWNTIME_CAUSE												

Figura 6: Corrispondenza Avaria-Stazione Modulo M80

<sup>4</sup> La coordinata è essenziale per identificare la locazione fisica all'interno del PLC.



La principale avaria di interesse risulta essere “**Eccessivi scarti**”: se la stazione #4 di controllo saldatura scarta troppo, l’M80 genera un’avaria (decine di ore/anno). L’obiettivo, in ottica manutenzione predittiva, risiede nel comprendere i parametri controllabili in tempo reale, soprattutto nelle stazioni #2 e #3 di saldatura, al fine di evitare gli scarti e le conseguenti avarie generate dalla stazione #4. Inoltre, è possibile monitorare l’andamento nel tempo dei parametri controllati da tale staz.: la posizione, lo spessore e la continuità della saldatura. I parametri (staz. #2,3), individuati analizzando gli I/O del PLC, che incidono maggiormente sulla bontà della saldatura sono: velocità di rotazione del mandrino, rotazione del mandrino, posizione meccanica torcia, pressione argon, pressione aspirazione fumi, rampa laser, pinza mandrino. Il loro valore nel tempo sarà tenuto sotto controllo dal sistema DT al fine di rilevare possibili derive in modo tale da intervenire prima del potenziale guasto.

#### 4.3 Definizione dei Requisiti e dell’Architettura del Sistema di Monitoraggio Digital Twin

Dall’analisi della letteratura scientifica<sup>5</sup> e dalla collaborazione con TOI è stato possibile identificare i **requisiti** (R) (Tab. 6) che il DT dovrà rispettare, prendendo a riferimento il modulo pilota M80 ma senza perdere di vista la sua implementazione futura su tutta Linea 7.

<b>R1 – Acquisizione dati:</b> Acquisire con una frequenza di 10 Hz lo stato degli I/O tramite interrogazione dei PLC impiegati per il controllo dei moduli della linea, implementando un prefiltraggio e una preelaborazione dei dati al fine di gestire eventuali campionamenti incompleti, non coerenti o mancati.
<b>R2 – Acquisizione dati:</b> Acquisire lo stato dei moduli della linea e i dati di output a fine ciclo (tempo lavorazione singolo pezzo, esito lavorazione, risultati test ecc.) tramite interrogazione del sistema di raccolta dati Shopfloor (MES):
<b>R3 – Elaborazione dati:</b> Elaborare i dati raccolti per ottenere il tempo ciclo complessivo e i tempi parziali corrispondenti alle diverse fasi attuate da ogni modulo.
<b>R4 – Identificazione failure:</b> Elaborare i dati per rilevare eventuali scostamenti dai valori attesi dei tempi ciclo.
<b>R5 – Storicizzazione dati:</b> Storicizzare i dati raccolti ed elaborati in un database dedicato.
<b>R6 – Visualizzazione dei risultati:</b> Visualizzare su una dashboard dedicata l’andamento dei tempi ciclo parziali dei moduli evidenziando le eventuali derive temporali e mostrando indicazioni sui componenti ritenuti la causa dello scostamento temporale.
<b>R7 – Integrazione I4.0:</b> Esporre delle interfacce software per l’integrazione con gli applicativi aziendali finalizzate alla notifica di eventi di allarme.

Tabella 6: Requisiti del Sistema di Monitoraggio Digital Twin

I requisiti si riflettono in una **architettura di sistema** (Fig. 7), creata ad hoc per questa specifica applicazione, composta da: un software di acquisizione dati per ciascun modulo

<sup>5</sup> L’interrogazione del database “Scopus” ha restituito circa 45 articoli. La query principale ha contenuto i termini “Predictive Maintenance” e “Industry 4.0” (e sinonimi).

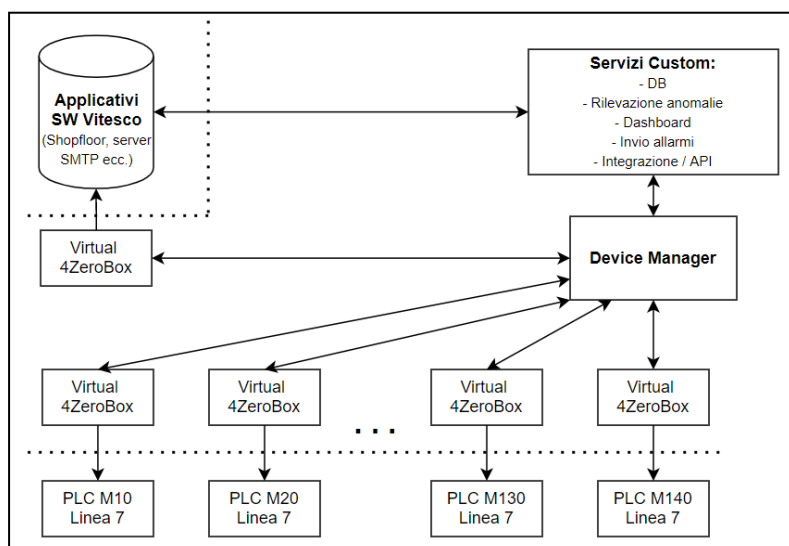


Figura 7: Architettura del sistema di monitoraggio Digital Twin

della linea e uno per l'interrogazione del sistema Shopfloor, denominato **Virtual 4ZeroBox**, il quale contiene la logica di elaborazione (calcolo tempi ciclo ecc.); un software di aggregazione e gestione dei dati raccolti, denominato **Device Manager**, per tutti i 4ZeroBox istanziati; un **set di software personalizzati** relativi ai servizi di storicizzazione, elaborazione, visualizzazione e allarmistica richiesti per l'implementazione del sistema Digital Twin. L'utilizzo di un duplice punto di prelievo dati (PLC e MES) è dovuto al fatto che l'estrazione dati dai soli PLC avrebbe comportato una modifica al software di tali dispositivi.

#### 4.3.1 Il Modello Predittivo per la Predizione delle Failure

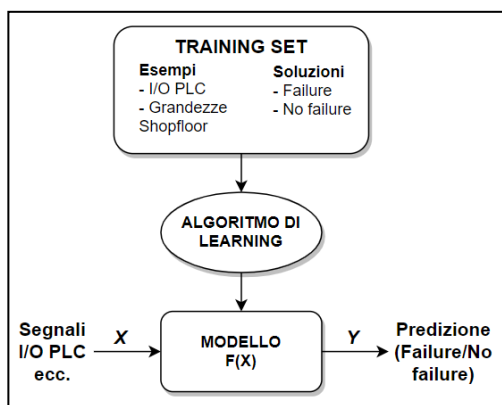


Figura 8: Il modello predittivo

Il modello predittivo si baserà su tecniche di Machine Learning Supervisionato (Fig. 8), ovvero con la presenza di soluzioni nell'insieme dei dati dell'addestramento (training set). L'obiettivo è quello di stimare la funzione  $F(x)$  (incognita) che collega le variabili di input  $X$  a una variabile di output  $Y$ :  $Y = F(x)$ . Le variabili di input sono i segnali macchina provenienti dai PLC dei

moduli di Linea 7 e da Shopfloor, mentre le variabili output sono gli eventi di failure generati dal macchinario, al fine di identificare in modo automatico andamenti anomali dei segnali caratteristici delle failure. Il training set sarà quindi composto da un insieme di coppie input/output contenenti il comportamento del sistema.

#### 4.4 Logica di Funzionamento del Sistema di Monitoraggio Digital Twin

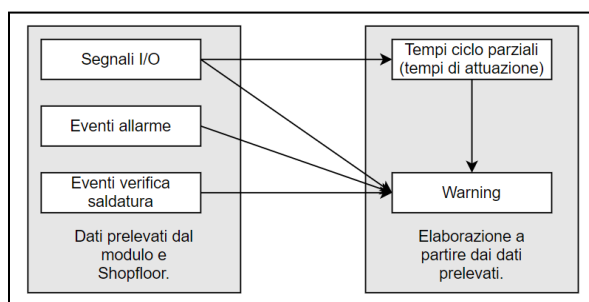


Figura 9: Logica di funzionamento del Digital Twin

In riferimento al modulo M80 e alla rispettiva avaria "Eccessi scarti", i segnali I/O verranno prelevati dal PLC mediante l'interrogazione da parte del 4ZeroBox dedicato, così come gli eventi di allarme e gli eventi di verifica saldatura saranno prelevati dal sistema MES.

Dall'analisi dei suddetti segnali sarà possibile ricavare i tempi ciclo parziali delle varie componenti del modulo e, di conseguenza, il tempo ciclo complessivo dell'M80. Infine, i segnali I/O, gli eventi di allarme e di verifica saldatura (riferiti alla stazione #4) ed i tempi ciclo saranno analizzati dal Digital Twin ed utilizzati per generare eventuali warning (Fig. 9).

### 5. CASO STUDIO: DALLA MANUNTEZIONE CORRETTIVA A QUELLA PREDITTIVA

Il problema è stato riscontrato sulla stazione di saldatura del modulo M80. Un elemento fondamentale è il vetrino posto a protezione dell'ottica dal sistema Laser. Al suo consueto

cambio (ogni 500 cicli di saldatura), esso è risultato eccessivamente sporco. Dopo aver controllato più componenti ed effettuato svariati test, il problema è stato risolto con la regolazione della “lama d’aria” disposta a protezione del vetrino. Analizzando gli I/O del PLC di tale stazione, si nota come sia presente la corrispondente attuazione e avaria (Tab. 7):

<b>OUTPUT</b>	NOME: YV1612	COORD: A 161.2	#2 Enable air blade for optical protection
<b>AVARIA</b>	CODICE: 8002019	[COD 19] - [YV1612 - -----] ----- LAMA D'ARIA	

**Tabella 7: Attuazione lama d’aria e relativa avaria**

Il sistema attuale però non ha segnalato alcuna avaria, in quanto non è presente un controllo (sensore) sulla sua corretta attuazione. Una possibile soluzione consiste nell’installare un sensore di portata, retro-fittando la macchina, ed avere così in Input, a livello di PLC, dati crono-referenziati da tenere sotto controllo tramite il sistema di monitoraggio Digital Twin, in modo tale da intervenire per tempo quando si nota un trend non comune, passando così dalla manutenzione a guasto a quella predittiva, ed evitando il downtime di circa un’ora che tale guasto ha comportato. Per analizzare l’impatto della transizione dalla manutenzione a guasto a quella predittiva (preventiva), occorre distinguere 2 tipologie di interventi manutentivi: intervento eseguito direttamente dall’operatore e intervento eseguito dal manutentore. Dall’analisi delle bolle di manutenzione e grazie alla collaborazione con l’apposito reparto aziendale è stato possibile stimare l’incidenza dei tempi parziali di manutenzione nei due casi (Tab. 8).

<b>Tempi parziali di manutenzione (durata media intervento: 25 minuti)</b>	<b>Int. Manutentore (30% dei casi) - Incidenza media</b>	<b>Int. Operatore (70% dei casi) - Incidenza media</b>
Tempo di attesa manutenzione	34%	2%
Tempo di diagnosi	16%	13%
Tempo di intervento (Accesso/smontaggio, rimozione, attesa ricambio, riparazione/sostituzione)	32%	70%
Tempo di chiusura	2%	2%
Tempo di prove e controlli	16%	13%

**Tabella 8: Incidenza % dei tempi parziali di manutenzione**

In particolare, con l’attuazione di pratiche di manutenzione predittiva, vi è il passaggio dalla manutenzione a guasto a preventiva, e quindi pianificata. Questo comporta la disponibilità della risorsa umana che effettua l’intervento (↓Tempo attesa manutenzione). Grazie alle informazioni presenti nel sistema di monitoraggio Digital Twin è possibile individuare prima dell’inizio dell’intervento manutentivo la/le causa/e del guasto (↓Tempo diagnosi). Pertanto, l’intervento è mirato direttamente sulla componente che ha causato il problema. Inoltre, il tempo di attesa ricambio diminuirebbe in quanto la risorsa (componentistica ecc.)

sarebbe disponibile ad inizio dell'intervento manutentivo nella maggior parte dei casi (↓Tempo intervento). Avendo precedentemente individuato la causa del guasto grazie al sistema di monitoraggio Digital Twin, il tempo dedicato a prove e controlli di altre componenti viene evitato in quanto non responsabili del guasto (↓Tempo prove e controlli). Il tempo di chiusura resta invariato. Complessivamente, il tempo totale di fermo macchina diminuirebbe e l'incidenza delle singole voci varierebbe in favore ad attività manutentive a maggior valore aggiunto. Il beneficio maggiore in termini di risparmio di tempo si presenta nel caso in cui l'intervento di manutenzione a guasto sarebbe stato eseguito dal manutentore, data l'alta incidenza percentuale del tempo di attesa manutenzione.

## **6. CONCLUSIONI, SVILUPPI FUTURI E PROBLEMATICHE RISCONTRATE**

Il presente studio ha condotto alla selezione e all'analisi approfondita del modulo oggetto del progetto pilota per poi redigere la specifica tecnica contenente i requisiti e l'architettura del sistema di monitoraggio Digital Twin. Le successive attività riguarderanno lo sviluppo del modello predittivo fino ad arrivare all'installazione del sistema in produzione e al testing delle funzionalità, per poi valutare l'estensione del progetto su tutta la Comboline Linea 7.

### **6.1 Estrazione dei Dati dal Sistema Shopfloor (MES)**

In riferimento al requisito #2 della specifica tecnica, l'estrazione diretta dei dati dal sistema MES potrebbe portare a problemi di sicurezza industriale e, nel worst-case, ad un sovraccarico che potrebbe comportare un fermo della produzione. Una soluzione consiste nell'adozione di un database intermedio, nel quale riversare ad una certa cadenza i dati di interesse, al posto dell'interrogazione diretta del sistema Shopfloor da parte del 4ZeroBox.

### **6.2 Taggatura Automatica delle Avarie**

Il processo di taggatura delle avarie seguito risulta essere eccessivamente time-consuming, presenta un'elevata probabilità di errore, non porta ad un matching completo avarie/input-output del PLC e non è scalabile. Per ovviare a tali problematiche, una possibile soluzione, soprattutto per una futura estensione del progetto a nuove linee, consiste nel creare un software del PLC ad hoc per la loro taggatura automatica.

### **6.3 Retrofit della macchina**

Dall'analisi dell'intervento a guasto si è notato come non sia presente un controllo sul corretto funzionamento di ogni attuazione. Pertanto, un'analisi Input/Output per ogni avaria potrebbe essere utile per capire quali sensori sono già presenti e quali invece dovrebbero essere aggiunti, andando così a retro fittare la macchina con un'apposita componentistica atta a tenere sotto controllo nel tempo la/e variabile/i di processo desiderata/e.