



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale**

**OTTIMIZZAZIONE DI UN LAYOUT AZIENDALE**

**ATTRAVERSO SIMULAZIONE**

Layout optimization through simulation

*Relatore: Chiar.mo*

**Prof. Filippo Emanuele Ciarapica**

*Tesi di Laurea di:*

**Gabriele Ficcadenti**

**Anno Accademico 2018/19**

*Ai miei genitori, a cui devo tutto,  
a mia sorella, senza la quale il mio mondo sarebbe più grigio,  
ai miei nonni, e al resto della famiglia, inesauribile fonte di saggezza,  
ai miei amici, i cui legami hanno spianato strade,  
e alla mia ragazza, per tenermi la mano in questo viaggio.*

# INDICE

INTRODUZIONE .....	11
CAPITOLO I: STATO DELL' ARTE .....	13
1.1 SOFTWARE DI SIMULAZIONE .....	13
1.2 SIMULAZIONE NEI PROCESSI PRODUTTIVI.....	16
1.2.1 Passi e procedure.....	16
1.2.2 Elementi caratteristici di un modello di simulazione.....	17
CAPITOLO II: L'IMPLEMENTAZIONE DELLE TECNICHE SIMULATIVE.....	19
2.1 OTTIMIZZAZIONE BASATA SULLA SIMULAZIONE (SBO).....	19
2.2.1 Sistemi di supporto dediti all'efficienza.....	20
2.2 ATTIVITÀ SVOLTE .....	22
CAPITOLO III: PANORAMICA SUGLI STRUMENTI ADOTTATI .....	24
CAPITOLO IV: IL CASO ARSTECH .....	29
4.1 ANALISI DI PROCESSO .....	29
4.1.1 Raccolta dei dati.....	30
4.1.2 Analisi degli sprechi.....	39
4.1.3 Obiettivo della simulazione.....	42
4.2 COSTRUZIONE DEL MODELLO AS-IS .....	43
4.2.1 Il modello virtuale .....	47
4.2.2 Analisi dei tempi di movimentazione.....	57
4.3 SIMULAZIONE VIRTUALE DEGLI SCENARI PRODUTTIVI.....	63
4.3.1 Riorganizzazione del layout dei magazzini intraoperazionali (A).....	63
4.3.2 Introduzione di un deposito dedicato (B).....	66
4.3.3 Split di un'operazione (C).....	68
4.3.4 Analisi della manutenzione (D) .....	70
4.4 VALUTAZIONE DEI RISULTATI.....	79
4.4.1 Risultati ottenuti.....	81
4.4.2 Analisi dei costi.....	86

4.5 CONSIDERAZIONI SUL CASO DI STUDIO ARSTECH .....	88
CAPITOLO V: IL CASO MARELLI .....	91
5.1 STUDIO DEL PROCESSO PRODUTTIVO .....	91
5.2 RACCOLTA DEI DATI.....	94
5.2.1 Il layout .....	95
5.2.2 Tempo ciclo.....	98
5.2.3 I dati di produzione .....	99
5.3 ELABORAZIONE DEI DATI .....	101
5.3.1 MTBF e MTTR.....	103
5.3.2 Disponibilità della singola macchina .....	104
5.3.3 Disponibilità della linea .....	106
5.3.4 MTBM.....	106
5.4 ANALISI DEI DATI .....	108
5.5 SVILUPPO DEL MODELLO DI SIMULAZIONE .....	109
5.5.1 Modello di simulazione.....	110
5.5.2 Definizione dei KPIs .....	118
5.5.3 Algoritmo per il calcolo automatico dei KPI .....	122
5.6 SIMULAZIONE VIRTUALE DI DIVERSI SCENARI PRODUTTIVI .....	134
5.6.1 Simulazione ideale (A).....	135
5.6.2 Simulazione reale (B).....	137
5.6.3 Simulazioni basate sulla manutenzione preventiva (C) .....	139
5.6.4 Simulazioni basate sugli aspetti energetici (D).....	144
5.3.5 Simulazioni di diversi scenari produttivi (E) .....	147
5.7 VALUTAZIONE DEI RISULTATI.....	151
5.8 CONSIDERAZIONI SUL CASO MARELLI.....	167
CAPITOLO VI CONCLUSIONI .....	170
6.1 IL DIGITAL TWIN .....	170
6.2.1 La fabbrica intelligente (Smart Manufacturing).....	170
6.2.2 Tecnologie per la creazione del gemello digitale.....	174

6.3 RIFLESSIONI FINALI E SVILUPPI FUTURI .....	176
APPENDICE: LA SIMULAZIONE NEGLI ECOSISTEMI MR.....	178
A.1 AR, VR E MR.....	178
A.1.1 Differenze tra le tecnologie AR, VR MR.....	179
A.1.2 Interazione nei sistemi 3R.....	180
A.2 APPLICAZIONI DEI SISTEMI 3R .....	181
A.2.1 Assemblaggio immersivo .....	181
A.2.1 Interfacce per operatori .....	182
A.3 GLI ENGINE GRAFICI COME S.W. SIMULATIVI.....	184
BIBLIOGRAFIA:.....	186
RINGRAZIAMENTI .....	190

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 Immagine del buco nero M87 .....	15
Figura 2.1. Sistema della restituzione virtuale .....	23
Figura 2.2. Metodo di sviluppo di un modello di simulazione.....	23
Figura 3.1. Interfaccia del software Plant Simulation di Simens .....	24
Figura 3.2. Toolbox “Material Flow” di Plant Simulation.....	26
Figura 3.3. Toolbox “Information Flow” di Plant Simulation .....	26
Figura 3.4. Toolbox “Resources” di Plant Simulation .....	27
Figura 3.5. Toolbox “User Interface” di Plant Simulation.....	27
Figura 4.1. Metodo di sviluppo di un modello di simulazione: La prima fase.....	30
Figura 4.2. Prodotto Crash Box F3-R Tatuus.....	31
Figura 4.3. Flusso generalizzato dello scenario a forte incidenza manuale .....	32
Figura 4.4. Diagramma produttivo dell’azienda Ars Tech.....	33
Figura 4.5. Flusso produttivo: Reparto 1 .....	34
Figura 4.6. Flusso produttivo: Reparto 2.....	36
Figura 4.7. Flusso produttivo: Reparto 3 .....	37
Figura 4.8. Flusso produttivo: Reparto 4.....	38
Figura 4.9. Dettaglio della tipologia di scarto del prodotto Crash Box Tatuus.....	40
Figura 4.10. Muda e focus dell’attività di simulazione .....	42
Figura 4.11. Priorità operative dell’attività di simulazione .....	43
Figura 4.12. Metodo di sviluppo di un modello di simulazione: La seconda fase .....	43
Figura 4.13. Planimetria dell’azienda Ars Tech.....	45
Figura 4.14. Interfaccia del software per l’inserimento di oggetti .....	46
Figura 4.15. Interfaccia “Create Factory Walls” .....	46
Figura 4.16. Interfaccia per la modifica delle proprietà 3D .....	47
Figura 4.17. Struttura esterna del modello .....	47
Figura 4.18. Pianta del modello in Plant Simulation.....	48
Figura 4.19. Dettaglio Workerpool .....	48
Figura 4.20. Dettaglio del kit di materie prime .....	49
Figura 4.21. Modello di macchina CNC .....	49
Figura 4.22. Operatore che trasporta il pezzo.....	50
Figura 4.23. Dettaglio pezzo nel deposito .....	51
Figura 4.24. Dettaglio reparto 1 .....	52
Figura 4.25. Dettaglio reparto 2 .....	52
Figura 4.26. Dettaglio reparto 3 .....	53

Figura 4.27. Dettaglio reparti 4 e 5.....	53
Figura 4.28. Il modello e gli scarti del reparto autoclave .....	54
Figura 4.29. Il reparto qualità qualità e gli scarti produttivi.....	55
Figura 4.30. Il reparto qualità e gli scarti produttivi: l'interfaccia .....	55
Figura 4.31. Il sistema di manutenzione del reparto autoclave .....	56
Figura 4.32. Il sistema di manutenzione del CNC.....	57
Figura 4.33. Il sistema di manutenzione del CNC.....	58
Figura 4.34. Value Stream Mapping attuale.....	62
Figura 4.35. Metodo di sviluppo di un modello di simulazione: La terza fase .....	63
Figura 4.36. Modifiche Reparto_Laminazione .....	64
Figura 4.37. Modifiche Reparto_Laminazione .....	64
Figura 4.38. Modifiche Reparto_Estrazione .....	65
Figura 4.39. Modifiche Stazioni per la Laminazione .....	65
Figura 4.40. Magazzino dedicato .....	67
Figura 4.41. Stazioni ravvicinate.....	67
Figura 4.42. Split dell'operazione di laminazione.....	69
Figura 4.43. Analisi dell collo di bottiglia.....	70
Figura 4.44 Tool "Experiment manager" .....	71
Figura 4.45. Impostazione dei dati in Input.....	72
Figura 4.46. Impostazione degli esperimenti .....	72
Figura 4.47. Gli output della simulazione .....	73
Figura 4.48. Distribuzione statistica dei failures del reparto Autoclave .....	74
Figura 4.49. Distribuzione statistica dei failures del reparto CNC.....	75
Figura 4.50. Distribuzione statistica del numero di interventi nel reparto Autoclave.....	76
Figura 4.51. Distribuzione statistica del numero di interventi nel reparto CNC.....	76
Figura 4.52. Distribuzione statistica del tempo di lavorazione del reparto Autoclave.....	77
Figura 4.53. Distribuzione statistica del tempo di lavorazione del reparto CNC.....	77
Figura 4.54. Distribuzione statistica dei pezzi in output nel reparto Autoclave.....	78
Figura 4.55. Distribuzione statistica dei pezzi in output nel reparto CNC.....	79
Figura 4.56. Metodo di sviluppo di un modello di simulazione: La quarta fase.....	79
Figura 4.57. Andamento di tempo dell'Autoclave .....	84
Figura 4.58. Andamento di tempo del CNC .....	85
Figura 4.59. Andamento pezzi/guasti.....	85
Figura 5.1. Motore Ibrido .....	91
Figura 5.2. Pompa di alimentazione .....	92

Figura 5.3. Layout della linea ad elevata automazione .....	92
Figura 5.4. Sistema Blackbox.....	93
Figura 5.5. Studio del processo produttivo.....	94
Figura 5.6. Vista dall'alto delle linea di montaggio.....	95
Figura 5.7. Andamento della produzione oraria.....	100
Figura 5.8. Distribuzione della produzione .....	101
Figura 5.9. Interfaccia utente: gli attributi.....	110
Figura 5.10. Interfaccia utente: le statistiche.....	111
Figura 5.11. Toolbox: il flusso di materiale .....	111
Figura 5.12. Interfaccia utente: il controllore.....	112
Figura 5.13. Interfaccia utente: i tempi .....	113
Figura 5.14. Interfaccia utente: i guasti .....	114
Figura 5.15. Interfaccia utente: le statistiche.....	115
Figura 5.16. Esempio del grafico delle statistiche.....	115
Figura 5.17. La linea produttiva .....	116
Figura 5.18. Dettaglio della linea produttiva.....	117
Figura 5.19. Toolbox: le risorse lavorative .....	117
Figura 5.20. Generatore, metodo e tabella dati .....	122
Figura 5.21. Specifica degli istanti di tempo per il reperimento dei dati .....	124
Figura 5.22. Data collection .....	124
Figura 5.23. Data parts .....	125
Figura 5.24. Estrazione dati da Plant Simulation ad Excel .....	126
Figura 5.25. Estrazione dati da Plant Simulation ad Excel .....	126
Figura 5.26. Estrazione dati da Plant Simulation ad Excel .....	127
Figura 5.27. VBA: Dichiarazione dei fogli .....	128
Figura 5.28. VBA: Aggregazione dei dati.....	128
Figura 5.29. VBA: Elaborazione dei dati .....	130
Figura 5.30. VBA: Elaborazione dei dati .....	131
Figura 5.31. VBA: Calcolo della disponibilità.....	131
Figura 5.32. VBA: Calcolo del tempo operativo.....	132
Figura 5.33. VBA: Calcolo dell'OEE.....	132
Figura 5.34. KPIs: l'OEE .....	133
Figura 5.35. KPIs: Consumo energetico e costi .....	134
Figura 5.36. KPIs: i costi ed il consumo energetico.....	134
Figura 5.37. Le statistiche del modello ideale.....	136



Figura 5.38. Statistiche di lavoro delle singole stazioni del modello ideale .....	136
Figura 5.39. Il Tempo Ciclo del modello ideale.....	137
Figura 5.40. Le statistiche del modello reale.....	138
Figura 5.41. Statistiche di lavoro delle singole stazioni del modello reale .....	138
Figura 5.42. Statistiche di lavoro delle singole stazioni della manutenzione preventiva (800 pz) .....	139
Figura 5.43. le statistiche della manutenzione preventiva (800 pz) .....	140
Figura 5.44. Statistiche di lavoro delle singole stazioni della manutenzione preventiva (900 pz) .....	141
Figura 5.55. Statistiche di lavoro delle singole stazioni della manutenzione preventiva (1100 pz) .....	142
Figura 5.46. Statistiche di lavoro delle singole stazioni della manutenzione preventiva (1200 pz) .....	142
Figura 5.47. Interfaccia utente della manutenzione preventiva (Range).....	143
Figura 5.48. Statistiche di lavoro delle singole stazioni della manutenzione preventiva (Range) .....	143
Figura 5.49. Distribuzione 3D dei consumi.....	144
Figura 5.50. Valori numerici del consumo tabellati .....	144
Figura 5.51. Layout della linea di produzione REALE.....	145
Figura 5.52. Percentuale del consumo di energia.....	146
Figura 5.53. Distribuzione del consumo di energia caso.....	146
Figura 5.54. Buffer su tutta la linea .....	147
Figura 5.55. Buffer nelle regioni critiche .....	148
Figura 5.56. Processo parallelo .....	149
Figura 5.57. Dettaglio processo parallelo nella linea .....	149
Figura 5.58. Schermata Failures (interventi) aggiornata .....	151
Figura 5.59. Il costo della manutenzione dell'OP40 .....	156
Figura 5.60. Distribuzione delle attività OP50 .....	160
Figura 5.61. Dati di produzione con due lavoratori.....	163
Figura 5.62. Percentuale del consumo di energia con due lavoratori.....	164
Figura 5.63. Statistiche di produzione .....	165
Figura 5.64. Statistiche di consumo energetico .....	166
Figura 5.65. Occupazione magazzini .....	166
Figura 5.66. Statistiche energetiche stazione OP110 .....	167
Figura 6.1 Overview della Smart Manufacturing.....	171

Figura 6.2 Flusso direzionale di dati .....	173
Figura 6.3 CPS e IoT a raffronto .....	175
Figura 6.4 MTConnect per il DT .....	176
Figura A.1 Rappresentazione prestazionale dei sistemi 3R con flussi informativi .....	180
Figura A.2 Operatore e AR .....	181
Figura A.3 Assemblaggio Robot-Operatore tramite AR System .....	182
Figura A.4 Interfaccia virtuale macchina/operazione.....	183
Figura A.5 Fabbrica virtuale con operatore in attività totalmente immersiva.....	183
Figura A.6 Restituzione 3d di una fabbrica tramite Unreal Engine .....	185
Figura A.7 Linea di assemblaggio automobili “Mini” (BMW) in Unreal Engine .....	185

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 4.1. Specifiche flusso produttivo: Reparto 1 .....	35
Tabella 4.2. Specifiche flusso produttivo: Reparto 2 .....	36
Tabella 4.3. Specifiche flusso produttivo: Reparto 3 .....	37
Tabella 4.4. Specifiche flusso produttivo: Reparto 4 .....	38
Tabella 4.5. Specifiche flusso produttivo: Reparto 5 .....	39
Tabella 4.6. Percentuali di scarti e rilavorazioni annue .....	41
Tabella 5.7 Dettaglio della movimentazione del reparto Laminazione.....	59
Tabella 5.8. Dettaglio della movimentazione del reparto Autoclave .....	59
Tabella 5.9. Dettaglio della movimentazione del reparto Estrazione.....	60
Tabella 5.10. Dettaglio della movimentazione del reparto Finitura .....	60
Tabella 5.11. Dettaglio dei tempi di movimentazione restituite dal software.....	61
Tabella 5.12. “Availabilty” degli esperimenti .....	72
Tabella 5.13. Tempi di movimentazione - Case study 1 e 2 .....	81
Tabella 5.14. Tempi di movimentazione - Case study 3 .....	82
Tabella 5.14. Velocità di movimentazione.....	83
Tabella 5.15. Scenari della manutenzione preventiva .....	83
Tabella 5.16. Costo della manodopera per pezzo.....	86
Tabella 5.17. Costo delle materie prime per pezzo .....	87
Tabella 5.18. Costo di movimentazione per pezzo.....	87
Tabella 5.19. FlowEfficiency di ogni case study .....	87
Tabella 5.1. Le lavorazioni della linea PHP4 .....	97
Tabella 5.2. Tempo Ciclo delle singole macchine .....	98
Tabella 5.3. Produzione oraria per turno di lavoro.....	99
Tabella 5.4 Struttura tabella MTTR e MTBF.....	103
Tabella 5.5. Tempo medio di riparazione e tempo medio tra i guasti .....	104
Tabella 5.6. Parametri divisi per operazione .....	105
Tabella 5.7. Resoconto dell’elaborazione dei dati.....	106
Tabella 5.8. Analisi dei guasti correnti.....	108
Tabella 5.9. Estratto di una tabella relativa ai guasti giornalieri .....	109
Tabella 5.10. Time Machine Stopped per ogni stazione .....	109
Tabella 5.11. Target degli indici a livello industriale.....	121
Tabella 5.12. Aggregazione dei dati.....	130
Tabella 5.13. Legenda delle simulazioni con descrizioni.....	151
Tabella 5.14. Pezzi prodotti per simulazione .....	152

Tabella 5.15. Tempi per il calcolo OEE .....	153
Tabella 5.16. OEE per simulazione .....	153
Tabella 5.17. Consumi e costi per simulazioni.....	154
Tabella 5.18. Costi manutenzione semplice (cambio utensile) .....	156
Tabella 5.19. Visione globale dei risultati ottenuti dalla simulazione base .....	158
Tabella 5.20. Statistiche di lavoro .....	159
Tabella 5.21. Statistiche consumo energetico .....	161
Tabella 5.22. Valori di consumo elettrico .....	162

# INTRODUZIONE

Questo progetto di tesi nasce come risultato dell'esperienza maturata durante il tirocinio svolto presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell' Università Politecnica delle Marche.

In occasione delle ore fruttuose spese in laboratorio ho potuto interfacciarmi con un mondo dalle potenzialità immense: la simulazione.

Oltre a lavorare con strumenti totalmente nuovi, ho avuto modo di interagire con il lavoro svolto da precedenti tirocinanti (Margherita Bastianelli e Marco Arbuatti) e con membri della Community di Siemens per risolvere problematiche inerenti al software, i quali, pur distanti, hanno contribuito a rendere valido il lavoro svolto. Questo perché spesso, restituire una casistica della realtà, seppur intuitivamente banale o semplice, presenta delle caratteristiche che ne possono complicare la rappresentazione.

La morale è che spesso, pur trovandoci di fronte un problema apparentemente poco complesso, possono esserci in gioco molte variabili che l'occhio umano da per scontato. Per sorpassare questo ostacolo è necessario ottenere quante più informazioni possibili dai dati disponibili, senza contare l'obbligatoria comprensione assoluta dello strumento che si sta utilizzando.

Solo una volta realizzata la struttura virtuale, ci si è potuti concentrare sull'aspetto focale trattato in questo documento, ovvero l'ottimizzazione del layout.

I processi e le operazioni nell'impianto produttivo necessitano di continui controlli ed, ove possibile, devono essere effettuate delle modifiche allo scopo di evolvere il layout di fabbrica verso la miglior performance possibile.

La continua ricerca dell'ottimizzazione perfetta è rallentata dal fatto che nella maggior parte dei casi modificare il layout per osservare i risultati del cambiamento, non è possibile oppure danneggia gravemente la produttività della linea o dello stesso impianto, per non parlare poi di potenziali ricadute economiche sulle spalle dell'azienda.

Ecco perché l'utilizzo dei sistemi simulativi forniscono un aiuto inequivocabile per questo genere di operazioni e permettono altresì di prevedere casistiche o eventi potenziali che ad occhio nudo sarebbero invisibili o non tracciabili. Sotto un certo punto di vista questi strumenti possono essere utilizzati non solo per attività operative, ma anche per definire strategie e decisioni relativamente alle previsioni osservate in fase di analisi dei dati raccolti.

Nei prossimi capitoli si confermerà quanto appena detto e dopo una breve introduzione alle tecnologie e strumenti adottati, si tratteranno due casi oggetto: l'impianto dell'azienda Arstech e della linea Marelli.

Dalle osservazioni svolte si trarranno delle importanti conclusioni, e con estrema umiltà di uno studente, dei possibili interventi su come poter ottimizzare il layout dei relativi contesti.



# CAPITOLO I: STATO DELL' ARTE

Esistono molteplici tecniche simulative quante almeno gli ambiti applicativi.

In generale, per simulazione, si intende una rappresentazione della realtà che può predire il comportamento di entità a seguito di condizioni nell'eventualità e dello svolgersi dinamico degli eventi. Col senno del poi, è intuibile che le condizioni possono essere dettate dal costruttore del modello rappresentativo o da un utente incaricato ad analizzare e o modificare il costrutto simulativo.

A tal proposito, per far sì che il modello segua il più possibile lo stato reale, esso deve essere quanto più dettagliato possibile.

Lo stato "AS IS", è infatti impossibile da restituire poiché un ecosistema fisico non può essere tradotto completamente in un modello, ed è per questo motivo che si parla di "rappresentazione" e di "modello ideale".

I modelli rappresentativi variano le loro fattezze concettuali in base alle esigenze di visualizzazione e di analisi; a tal proposito, in questo capitolo si vedranno brevemente le fattezze della tipologia di simulazione adottata.

## 1.1 SOFTWARE DI SIMULAZIONE

Si tratta essenzialmente di un programma che consente all'utente di osservare un'operazione attraverso la simulazione senza eseguire effettivamente tale operazione. Il software di simulazione è ampiamente utilizzato per progettare apparecchiature in modo che il prodotto finale sia il più vicino possibile alle specifiche di progettazione senza costose modifiche al processo. Il software di simulazione con risposta in tempo reale viene spesso utilizzato nell'industria ludica, ma ha anche per importanti applicazioni industriali o quando il costo per un funzionamento improprio è costoso, come piloti di aeroplani, operatori di centrali nucleari o operatori di impianti chimici, un modello del pannello di controllo effettivo è collegato a una simulazione in tempo reale della risposta fisica, offrendo una preziosa esperienza di allenamento senza temere esiti disastrosi

Programmi informatici avanzati possono simulare il comportamento dei Power Systems, condizioni meteorologiche, circuiti elettronici, reazioni chimiche, meccatronica, pompe di calore, i sistemi di controllo del feedback, le reazioni atomiche e persino i processi biologici complessi. In teoria, qualsiasi fenomeno che può essere ridotto a dati matematici ed equazioni può essere simulato su un computer. La simulazione può essere difficile perché la maggior parte dei fenomeni naturali sono soggetti a un numero quasi infinito di influenze. Uno dei trucchi per lo sviluppo di simulazioni utili è determinare quali sono i fattori più importanti che influenzano gli obiettivi della simulazione.

Oltre a imitare i processi per osservare come si comportano in condizioni diverse, le simulazioni vengono utilizzate anche per testare nuove teorie. Dopo aver creato una teoria delle relazioni causali, si possono codificare le relazioni sotto forma di un programma per computer. Se il programma si comporta allo stesso modo del processo reale, ci sono buone probabilità che le relazioni proposte siano corrette.

I pacchetti di simulazione generali rientrano in varie categorie principali.

Una distinzione può essere l'evoluzione temporale:

- **Modelli continui:** le variabili variano in modo uniforme ed il loro valore è definito in ogni istante (Deller & Hansen, 2005);
- **Modelli discreti:** il valore delle variabili cambia in istanti di tempo ben definiti. In questi casi il valore è definito ad ogni evento processato dal sistema e il tempo è discretizzato (Laubenbacher & Mendes, 2006).

▪

Le simulazioni di eventi discreti vengono utilizzate per modellare eventi statistici come i clienti che arrivano in coda presso una banca. Correlando correttamente le probabilità di arrivo con il comportamento osservato, un modello può determinare il conteggio delle code ottimale per mantenere i tempi di attesa della coda a un livello specificato. I simulatori continui vengono utilizzati per modellare una vasta gamma di fenomeni fisici come traiettorie balistiche, respirazione umana, risposta del motore elettrico, comunicazione dei dati in radiofrequenza, generazione di energia della turbina a vapore ecc. Inoltre, vengono utilizzate nella progettazione del sistema iniziale per ottimizzare la selezione dei componenti e i guadagni dei controller industriali, come nonché nei sistemi di progettazione basata sul modello, la quale simulazione è utile per generare il codice di controllo incorporato.

Un altro criterio è legato alla differenza tra:

- **Modelli statici:** rappresentano un sistema in un particolare momento. Un modello è statico quando non è influenzato dallo scorrere del tempo e quindi da ciò che potrebbe accadere (Alexandrov, 2008).
- **Modelli dinamici:** rappresentano un sistema in evoluzione nel tempo. I modelli dinamici differiscono dai modelli statici in quanto guidati da eventi. Il verificarsi di un evento può cambiare il valore delle variabili usate nel calcolo, e lo stato del modello cambia nel tempo secondo un "*Simulation Clock*" (Saeid et al., 2019).

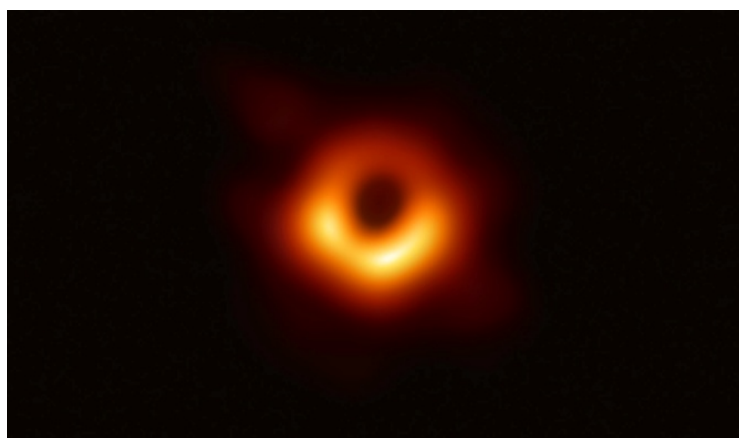


Ed infine un'ultimo criterio distintivo tratta i:

- **Modelli deterministici:** non contengono componenti probabilistiche e variabili casuali. Nella pratica, un modello deterministico non permette di effettuare un'analisi accurata delle perturbazioni del sistema, inoltre i risultati ottenuti saranno relativi a valori medi, senza nessuna indicazione della loro variabilità (es. deviazione standard, valori minimi e massimi) (Walrand & Pravin, 2000).
- **Modelli stocastici:** presentano elementi soggetti ad aleatorietà e una o più variabili casuali provenienti da distribuzioni aleatorie. La variabile non ha un valore specifico, ma piuttosto un range di valori appartenenti a una distribuzione. In tali casi, le distribuzioni sono la fonte di variabilità introdotta nel modello (Maymon, 2018).

Un ulteriore criterio è legato al rapporto tra il tempo reale e quello simulato, ovvero Simulazione Real Time (ove un minuto simulato corrisponde ad un minuto nella realtà), Simulazione Fast Time (dove la simulazione evolve più rapidamente della realtà e si possono simulare mesi e anni in poco tempo) o Simulazione Slow Time (nella quale serve più tempo per completare i calcoli della simulazione di quanto ne trascorra nella realtà); in realtà abbiamo anche la distinzione tra Simulazione Paced (ritmata) e Unpaced nel caso che gli intervalli di tempo sul simulatore siano proporzionali a quelli nella realtà (il caso specifico 1:1 corrisponde alla Simulazione Real Time) oppure che non vi sia correlazione fra il tempo simulato (regolato dalla mole computazionale generata nell'esecuzione sul computer) rispetto a quello reale.

Un esempio di una simulazione Slow Time è quella proposta dalla NASA e dall'equipe del progetto Event Horizon Telescope, in concomitanza della recente pubblicazione del modello rappresentativo del buco nero M87 della galassia Virgo A, oggetto dell'avveniristica fotografia della sua ombra, ottenuta da più di 6000 TeraByte di dati.



*Figura 1.1 Immagine del buco nero M87*

## 1.2 SIMULAZIONE NEI PROCESSI PRODUTTIVI

Nell'ambito delle simulazioni, acquisisce notevole importanza la simulazione del funzionamento dei processi produttivi e logistici. Tali sistemi sono infatti caratterizzati da elevata complessità, numerose interrelazioni tra i diversi processi che li attraversano, guasti dei segmenti, indisponibilità, stocasticità dei parametri del sistema. Si consideri, ad esempio, un impianto semplice per la produzione di un unico articolo, con solamente due macchine automatiche ed imballaggio manuale; in questo semplice sistema l'arrivo delle materie prime, la durata delle lavorazioni, il tempo necessario agli operatori per imballare sono tutte variabili stocastiche, in quanto il ritmo produttivo e di arrivo non è costante; inoltre, le macchine sono soggette a guasti e manutenzione, gli operatori possono non essere sempre disponibili etc.

Il progettista degli impianti industriali e il responsabile delle operazioni possono certamente avere interesse a valutare con anticipo l'effetto delle loro scelte su tali sistemi complessi, in termini, ad esempio, di capacità di produzione, tempo di attraversamento, scorte, blocchi. Possono inoltre avere dei problemi riguardo al dimensionamento di macchine, magazzini, flotta dei carrelli trasportatori e simili.

La simulazione, consentendo l'analisi della realtà a un elevato livello di dettaglio e padroneggiando facilmente la complessità del sistema, fa sì che alla fine sia possibile ottenere un gran numero di informazioni utili. Il prezzo da pagare per tale completezza è ovviamente il tempo; le operazioni di programmazione sono infatti assai lunghe, affinché si possano ottenere dei dati sufficientemente sensati e tali da dare la possibilità di ottenere un modello della realtà ad essa aderente.

### 1.2.1 PASSI E PROCEDURE

Al fine di poter procedere correttamente per avere un modello di simulazione utile e funzionante è opportuno procedere con una serie di passi:

1. *Definizione degli obiettivi e delle problematiche da esaminare*: un'attenta analisi del problema consente di circoscriverne l'esame riducendo il successivo tempo di analisi;
2. *Stesura di un modello concettuale*: consiste nella comprensione e modellazione del sistema produttivo che si intende simulare; questa fase è particolarmente importante in quanto definirà il comportamento dei diversi flussi di materiale e di informazioni che attraverseranno il modello.
3. *Validazione del modello concettuale*: si tratta di un confronto con la direzione dell'impresa e con gli operatori per assicurarsi della capacità del modello di offrire un'immagine consistente della realtà.

4. *Analisi dei dati in ingresso*: la raccolta e l'analisi dei dati che diverranno la base per la definizione dei parametri di funzionamento del sistema (ad esempio: i diversi tempi di lavoro di una singola macchina). Attraverso le tecniche del calcolo delle probabilità diviene possibile definire una distribuzione di probabilità per ogni parametro, da inserire all'interno del modello.
5. *Scrittura del modello in termini matematici*
6. *Calibrazione e valutazione*
7. *Definizione di un piano degli esperimenti*: una singola iterazione ("run") di simulazione non ha alcun significato; rappresenta solo una delle possibili evoluzioni del sistema. È quindi opportuno effettuare diverse "run" per poi analizzare i parametri in uscita. La lunghezza della singola iterazione e il numero delle iterazioni vengono determinate in questa fase.
8. *Analisi dei dati in uscita*: dopo aver raccolto i dati relativi ai parametri, depurati da eventuali transitori è possibile creare degli intervalli di confidenza ovvero stimare il "range" di valori in cui i parametri che analizzano il problema proposto al primo passaggio possono oscillare.

### 1.2.2 ELEMENTI CARATTERISTICI DI UN MODELLO DI SIMULAZIONE

**Entità**: Le entità sono gli elementi "trattati" dal processo; tali "oggetti" hanno la caratteristica di essere "temporanei", e di subire passivamente le trasformazioni. Ad esempio, in un'impresa di lavorazioni meccaniche, i semilavorati e le materie prime, che devono essere fresati, spianati etc possono essere modellizzati come "entità". Naturalmente, è possibile simulare anche processi in cui la produzione non riguardi un bene fisico, ma un servizio: in questo caso, le entità rappresenteranno informazioni, documenti, clienti, a seconda delle necessità.

Le entità, all'interno del modello, possono essere considerate a loro volta come:

- **Anonime**: nella maggior parte dei casi, non interessa tenere traccia del singolo pezzo in lavorazione o in generale in transito nel sistema. Pertanto le entità non sono caratterizzate, e vengono considerate come un "flusso" indistinto.
- **Personalizzate**: caso duale del precedente, si presenta quando l'analista, spesso per il numero esiguo di pezzi in lavorazione, ha interesse a considerare i parametri di lavorazione del singolo pezzo.

**Operazione**: rappresenta una delle trasformazioni che avranno luogo sull'entità.

Possono essere individuati due cicli di operazioni:

- Il ciclo macchina: attinente agli stati (vedi) ed operazioni che la macchina attraverserà, ovvero l'insieme di tutte le possibili successioni di operazioni e attese.
- Il ciclo pezzo: rappresenta il percorso delle entità nel sistema, le macchine visitate e le operazioni subite

**Macchine:** rappresentano gli elementi "fissi" del sistema, la cui definizione degli stati definisce univocamente la situazione generale del sistema, e delle quali sono di rilevanza per l'analista soprattutto le prestazioni. Le macchine possono essere fisiche, ed in questo caso ci si riferisce a macchine realmente presenti nel sistema da modellizzare, o "logiche", ed in questo caso compiono operazioni "fittizie" fisicamente, ma presenti logicamente nel sistema (ad esempio, il controllo di quantità in ingresso nell'impianto non ne provoca trasformazioni "fisiche" ma lo "trasforma" da "lotto da controllare" a "lotto controllato").

**Stati:** gli stati sono delle variabili (di tipo vario: possono essere numeri o valori logici) che descrivono lo stato del sistema e delle sue componenti, per ogni istante di tempo.

**Eventi:** fenomeni che modificano lo stato del sistema (ad esempio, la fine di una lavorazione modifica lo stato di una macchina da "occupata" a "libera").

**Code:** insiemi di entità che non possono accedere alle trasformazioni successive in quanto la macchina risulta occupata.

**Attributi:** proprietà permanenti di un insieme di entità o di una macchina.

**Orologio locale:** orologio che contiene, a livello di singola macchina, l'istante di tempo che identifica la fine della lavorazione in corso.

**Orologio generale:** orologio che regola lo scorrere generale del tempo di simulazione.

# **CAPITOLO II: L'IMPLEMENTAZIONE DELLE TECNICHE SIMULATIVE**

In un contesto gestionale, la simulazione dei processi si afferma come strumento dal potenziale immenso, considerato l'obiettivo di ottimizzare il layout aziendale.

In breve, adottare strumenti di questo genere come spunto aggiuntivo per la presa di coscienza del comportamento e delle potenziali evoluzioni del processo e dell'impianto in generale, permette non solo di convalidare le ipotesi effettuate in un contesto decisionale, ma di analizzare scenari non previsti. Di seguito verrà mostrato come questi strumenti possono fungere da certificazioni per validare i processi e renderli molto più affidabili per stabilire criteri decisionali e strategie esatte.

## **2.1 OTTIMIZZAZIONE BASATA SULLA SIMULAZIONE (SBO)**

L'ottimizzazione basata sulla simulazione (SBO) nella progettazione del layout è riconosciuta come un'attività stimolante con un impatto significativo sulle prestazioni di produzione, le cui sfide sono aumentate da alti livelli di incertezza associati all'introduzione di nuovi processi di produzione.

L'evidenza empirica mostra che l'incertezza è inerente e ha un effetto moderatore sui risultati operativi dell'innovazione di processo. Ciò ha motivato un crescente interesse nello studio dell'incertezza sull'innovazione di processo, che aderisce alla definizione di incertezza in quanto la differenza tra l'informazione che si ha e l'informazione di cui si ha bisogno per completare un compito è onnipresente ed è necessario che sia ridotta al minimo. L'innovazione, come concetto industriale, supera la configurazione dei sistemi di produzione, incluso il layout della struttura, per esprimere sia la probabilità che i presupposti fatti durante la progettazione possano essere errati sia che i fatti necessari per la progettazione siano del tutto sconosciuti.

Per ottenere i vantaggi dell'innovazione di processo, recenti pubblicazioni sottolineano la necessità di ridurre il livello di incertezza prima di assumere impegni a lungo termine.

Secondo la teoria della contingenza, il trasferimento da un livello di incertezza superiore a inferiore viene realizzato attraverso attività iterative organizzate incentrate sulla generazione di accordi e sull'acquisizione di informazioni che convertono l'incertezza in un rischio calcolato.

I risultati forniscono nuove informazioni che possono aiutare a comprendere le attività di modellazione concettuale di SBO per la progettazione di layout di strutture in condizioni di elevata incertezza. In condizioni di elevata incertezza, le attività di modellazione concettuale per la progettazione del layout delle strutture sono determinate dai criteri di caratterizzazione e dalla quantità e qualità delle informazioni.

Pertanto, i criteri di caratterizzazione di obiettivi strategici, prodotti, mercato, processi di produzione e interrelazione decisionale, specificano le attività del modello concettuale ed in

particolare di criteri di input, output e ambito del modello. Inoltre, il livello di incertezza sotto forma di divario quantitativo di informazioni sui criteri di caratterizzazione, specifica il livello di dettaglio e le ipotesi per l'attuazione di un modello concettuale. Dall'altro lato l'accordo qualitativo sul tipo di informazione considerato determina le semplificazioni sostenute nel modello concettuale e quindi è possibile restituire una simulazione intuitiva e dalle fattezze semplici.

In secondo luogo, lo sviluppo di modelli concettuali di SBO per la progettazione di layout di strutture richiede il trasferimento da un livello di incertezza superiore a inferiore prima dell'inizio del modello concettuale. Per fare ciò, il lavoro di progettazione dovrebbe includere un accordo su ciò che costituisce gli obiettivi strategici, i prodotti, i mercati e l'interrelazione decisionale nelle modifiche al layout della struttura. Questo è seguito dall'acquisizione di informazioni che portano l'ambiguità in obiettivi strategici, prodotti, mercati e interrelazione decisionale a un livello in cui questi non sono né inconoscibili né del tutto sconosciuti.

Le implicazioni gestionali di questi aspetti aiutano a identificare quando e se un criterio di ottimizzazione è esatto o meno, soprattutto per la progettazione (o riprogettazione) del layout delle strutture e quali criteri contano per raggiungere questo scopo quando si affrontano condizioni di elevata incertezza.

Tenendo conto della mancanza di informazioni nelle casistiche visionate, i risultati delle ottimizzazioni proposte possono comunque essere utili poiché mirano ad aumentare la competitività della produzione. Per questo, per avvalorare e stabilizzare la simulazione stessa, occorre prestabilire un sistema dedito ai vari criteri decisionali previsti.

### **2.2.1 SISTEMI DI SUPPORTO DEDITI ALL'EFFICIENZA**

Nel settore manifatturiero e industriale l'efficienza è un requisito fondamentale per garantire un'adeguata produttività all'azienda e, proprio per questo motivo, è oggetto di un'attenta analisi che mira ad ottenerne valori attendibili e rappresentativi della realtà (Phillips et al., 2019). A tal proposito, in letteratura è possibile trovare numerose e differenti definizioni del termine “*simulazione*”. In ambito scientifico, Bernard et al. (2000) lo definisce come ogni procedimento atto a studiare il comportamento di un sistema in determinate condizioni, che si basa sulla riproduzione dell'ambiente in cui esso deve operare. Pritsker (1984) lo descrive come la tecnica di risolvere problemi attraverso l'osservazione della prestazione (performance), nel tempo, del modello dinamico di un sistema; mentre Banks (1998) intende l'imitazione delle operazioni eseguite nel tempo da un sistema o processo reale. La direttiva 3633 del VDI (Verein Deutscher Ingenieure, Association of German Engineers), invece, definisce la simulazione come emulazione di un sistema, compresi i suoi processi dinamici, in un modello per la sperimentazione.

*La simulazione è di fatto la riproduzione della realtà tramite l'utilizzo di modelli su computer: essa permette di costruire un ambiente virtuale implementando scenari dinamici con lo scopo di aumentare l'efficienza e l'efficacia di un sistema reale.*

Oggi la tecnologia di modellazione e simulazione svolge un ruolo insostituibile nel processo di sviluppo dell'informatizzazione della produzione ed è ampiamente applicata in tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto contenente progettazione, produzione, test, manutenzione, approvvigionamento e vendite (Zhang, L., et al. 2019). Le tecniche di simulazione in genere sono dotate di elevata versatilità e velocità di realizzazione, a differenza della sperimentazione diretta che risulta invece costosa e spesso praticamente impossibile. Attraverso la simulazione si generano dunque la **storia artificiale di un sistema** e si tracciano le **informazioni operative** utili a prendere le decisioni. Dunque, il principio della simulazione si applica come sistema di supporto decisionale, o **Decision Support System** (DSS), supplementare in relazione ai sistemi *Enterprise Resource Planning* ERP (“pianificazione delle risorse d’impresa”). L’obiettivo è quello di esaminare rapidamente politiche e scelte progettuali alternative, studiare il comportamento di un sistema nel tempo, e ridurre il rischio di investimento in attività inefficaci. Tali processi sono svolti attraverso la costruzione e l’analisi di modelli, ovvero rappresentazioni teoriche della realtà, che permettono di affrontare le difficoltà e i limiti che la sola modellazione matematica non riuscirebbe a superare, portando a risultati ben precisi.

Di seguito alcuni esempi dei campi di applicazione delle tecniche di simulazione in ambito scientifico:

- Diminuizione delle inefficienze e dei costi di produzione (Imbergamo, et al. 2014);
- Analisi dell’influenza del fattore umano nei processi (Dan, et al. 2016);
- Bilanciamento della linea produttiva (Jude et al., 1990; Pontevedra, 2019; Guner & Unal, 2008; Saeheaw et al., 2009);
- Progettazione del layout (Greasley, 2008; Pourhassan & Raissi, 2017);
- Pianificazione della produzione (Zhu & Gonza, 2009; Yang et al., 2016);
- Previsione dei guasti per la pianificazione dell’attività manutentiva (Szczerbicki & White, 2010);
- Ottimizzazione delle prestazioni (Nagi et al., 2017; Stief et al., 2018);

Di norma, un’attività di simulazione prevede le seguenti fasi (Fig. 1):

- **Comprensione** dell'impianto del mondo reale che si desidera studiare, e raccolta dei dati utili alla creazione del modello di simulazione.
- **Estrazione** del layout del mondo reale e creazione del modello di simulazione in base agli obiettivi prefissati.

- **Esecuzione** degli esperimenti e delle corse di simulazione al fine di produrre una serie di risultati, come ad esempio la frequenza con cui le macchine si guastano o si bloccano, i tempi di movimentazione, il tasso di utilizzo, ecc.
- **Interpretazione** dei dati prodotti dalle simulazioni ed ottimizzazione dei parametri.

## 2.2 ATTIVITÀ SVOLTE

Con il presente elaborato si illustra l'attività di simulazione dello scenario di fabbrica a forte incidenza manuale e di una automatizzata,. I casi di studio analizzati sono 2:

- 1) La linea produttiva dello stabilimento *Ars Tech* di Controguerra, in provincia di Teramo, che si occupa della produzione di componenti compositi ad alte prestazioni per telai, parti strutturali e carrozzerie, in particolare in fibra di carbonio.
- 2) La linea di assemblaggio di *Magneti Marelli* di Modugno in provincia di Bari che si occupa, per la linea visionata, di eseguire in linea delle attività specializzate di produzione ed assemblaggio dei componenti di pompe di alimentazione.

Le due aziende sono partner coinvolti insieme all'Università Politecnica delle Marche per il progetto REACT, a cui si è dedicata una piccola porzione dell'attività di tirocinio riguardante lo studio di possibili ottimizzazioni dei layout.

Lo studio di simulazione ha previsto come prima fase la raccolta dei dati utili, cui segue la costruzione del modello *AS – IS*, in grado di rappresentare il funzionamento reale del sistema in esame.

Dopo aver studiato il processo produttivo ed individuato le criticità, in accordo con i responsabili, sono stati definiti il tema e gli obiettivi dell'attività di simulazione.

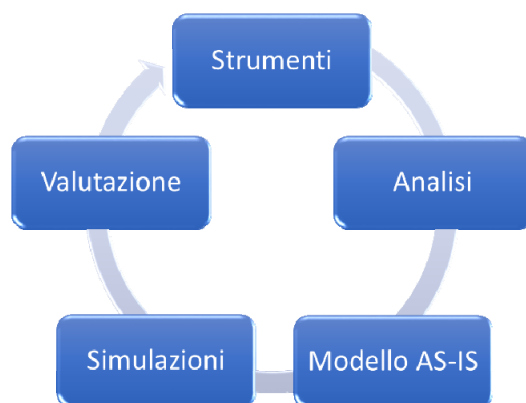
Nel dettaglio, l'attività svolta ha previsto:

- **Scelta e predisposizione degli strumenti** utili presso i centri di ricerca (sistemi di Virtual Manufacturing di Siemens);
- **Simulazione dei vari scenari possibili** in funzione del settore produttivo e delle scelte da poter fare per implementare la piattaforma ed i sistemi software specifici;
- **Definizione delle specifiche** e delle funzionalità dei sistemi.

In questo elaborato si propongono il modello di simulazione virtuale dello scenario produttivo, e l'analisi dettagliata delle modifiche da poter implementare al fine di ridurre le attività a non valore aggiunto, o *Non Value Adding Activity* (NVA). Nei casi studiati è stata proprio sfruttata la possibilità di poter ricostruire diversi scenari, semplicemente variando i parametri e le



caratteristiche del modello implementato, svolgere le relative campagne simulate, ed analizzare i risultati ottenuti in termini degli obiettivi prefissati.



*Figura 2.1. Sistema della restituzione virtuale*



*Figura 2.2. Metodo di sviluppo di un modello di simulazione*

Al fine di effettuare una simulazione corretta è necessario creare un **modello semplificato** che rispecchi in maniera accurata e fedele la realtà; tuttavia, ciò non sempre è possibile a causa di costi e/o tempi elevati di realizzazione necessari per la raccolta dei dati e della loro corretta implementazione. A tal proposito, l'analista di processo deve sapere come intervenire e fino a quale livello di dettaglio spingersi con l'analisi basandosi in primis sugli obiettivi che si vogliono ottenere.

Infine, la simulazione di un processo produttivo consente la misurazione delle prestazioni di una linea di produzione senza il bisogno di metterla realmente in funzione. Questo vantaggio permette di abbattere in maniera esponenziale i tempi e i costi, di osservare "realisticamente" il sistema in evoluzione e, in alcuni casi, di elaborare automaticamente i dati. Oggi, tra gli strumenti di simulazione disponibili in commercio ci sono: GoldSim (come software per il metodo Monte Carlo), SimTec, AnyLogic, Plant Simulation, Arena (utilizzato in molti articoli scientifici quali Altiok & Melamed (2007) e Suryahatmaja (2015)), e molti altri.

Da qui in poi il documento scenderà in un dettaglio pratico, che ha visto la realizzazione di modelli concettuali e da essi di ipotetiche soluzioni per i layout in esame.

# CAPITOLO III: PANORAMICA SUGLI STRUMENTI ADOTTATI

Seguirà ora una breve panoramica agli strumenti utilizzati in modo da introdurre il lettore ad alcuni elementi base necessari per costituire il sistema di analisi adottato.

Con il termine “sistema”, Geoffrey (2010) intende un insieme di oggetti, riuniti da regole di interazione o interdipendenza, che rappresentano virtualmente gli elementi presenti nell’ambiente reale; l’evoluzione nel tempo del sistema stesso genera una serie di attività delle risorse modellate che vengono registrate e valutate. Al fine di realizzare un sistema virtuale, la scelta e la predisposizione degli strumenti utili è un’attività di fondamentale importanza.

A tal proposito, ogni studio preventivo (la simulazione, la visualizzazione, l’analisi e l’ottimizzazione) è stato affiancato da *strumenti grafici* e *software* che hanno permesso di raggiungere gli obiettivi prefissati in maniera più veloce ed uniforme. Di seguito, una breve descrizione degli strumenti utilizzati:

- **Tecnomatix - Plant Simulation**
- **Excel**

Per la rappresentazione virtuale dell’impianto è stato scelto “**Tecnomatix - Plant Simulation**” di Siemens. Si tratta di un sistema di Virtual Manufacturing che, oltre al monitoraggio dei flussi, delle tempistiche e dei costi, permette anche l’implementazione grafica attraverso modelli in 3D.



Figura 3.1. Interfaccia del software Plant Simulation di Siemens

Generalmente la realizzazione di un modello è influenzata da diversi aspetti, tra cui:

- scenario produttivo,

- vantaggi della simulazione,
- modello del sistema,
- caratteristiche del software utilizzato.

A tal proposito, lo sviluppo di un modello può avvenire con diverse finalità a seconda dello scenario che si vuole simulare:

- Ricreare lo schema della linea produttiva già esistente e funzionante, **Current State Map** (mappatura dello stato attuale), che permette di rivelare offline problematiche e criticità della linea produttiva in diversi ambiti, come ad esempio:
  - Manutenzione (Sawhney et al., (2009); Kannan et al., (2007); Kasava et al., (2015); Ennhaili et al., (2015)),
  - Trasporto (Villarreal (2012); Teichgräber and Bucourt (2012)).
- Costruire un modello simulativo in ottica di progettazione **Future State Map** (mappatura dello stato futuro) (Seyed. and Ebr., 2015; Key. and Loch., 2004) permette di bilanciare i tempi di lavorazione degli operatori/macchine per evitare ritardi e colli di bottiglia, organizzare il layout della linea considerando sulla base dei vincoli costruttivi, confrontare i risultati derivanti da diverse scelte produttive per valutare quella migliore.

Inoltre, tra i vantaggi più significativi della simulazione ci sono:

- **Riduzione dei costi di investimento**, senza compromettere il processo produttivo, durante le fasi di sperimentazione e di analisi statistica dell'output del progetto, è possibile infatti provare scenari alternativi e quantificare l'impatto degli stessi sulle prestazioni del sistema.
- **Ottimizzazione delle prestazioni** dei sistemi produttivi esistenti, adottando misure che sono state già verificate in un ambiente di simulazione prima dell'implementazione stessa.

*Quest'ultimo punto è per noi di grande interesse poiché ci permette, inserendo i dati dell'azienda in esame, di individuare il collo di bottiglia e di simulare soluzioni successive per il suo efficientamento.*

*Per quanto riguarda il caso Ars Tech, si considera un modello con simulazione di eventi discreti.*

Il software Plant Simulation consente di creare rapidamente modelli di simulazione in maniera autonoma, oppure utilizzando componenti presi da librerie fruibili dalla rete selezionando la voce “*Librerie*” - “*Frame*” - “*Modelli*”.

Gli oggetti del software utilizzati ci sono:

- **Frame:** oggetto in cui si crea il modello di simulazione inserendo gli oggetti di flusso di materiale in entrata e uscita, e gli oggetti che rappresentano le stazioni dell’ impianto.

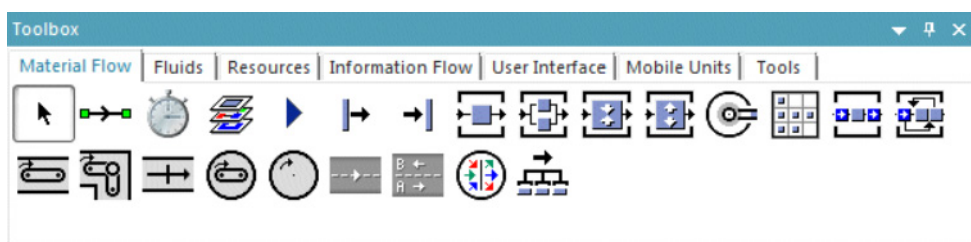


Figura 3.2. Toolbox “*Material Flow*” di Plant Simulation

- **MU:** oggetti mobili, ovvero le parti, trasportate e elaborate all’interno dei modelli di simulazione.
- **Method:** elenchi e tabelle che assicurano uno scambio casuale di informazioni tra tutti gli oggetti.

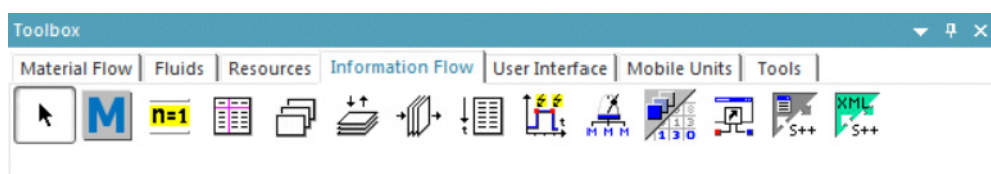


Figura 3.3. Toolbox “*Information Flow*” di Plant Simulation

- **Event Controller:** esegue la simulazione ovvero consente di avviarla, arrestarla e reimpostarla.
- **Workers:** lavoratori specializzati all’interno della filiera, possono essere integrati al processo ed assegnati alle diverse stazioni utilizzando i comandi nella barra *resources* presenti nella *Toolbox*.

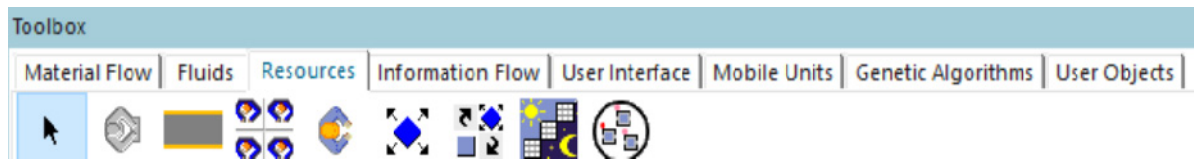


Figura 3.4. Toolbox “Resources” di Plant Simulation

- **Bottleneck Analyzer:** analizza e valuta i risultati forniti dalla simulazione.
- **Graphic:** consente di visualizzare graficamente i valori statistici del flusso di materiale raccolti durante la simulazione.

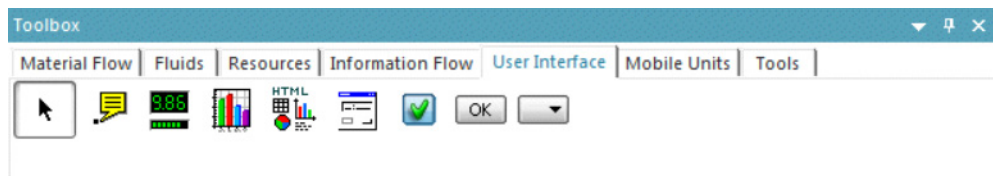


Figura 3.5. Toolbox “User Interface” di Plant Simulation

Inoltre, il software Plant Simulation, oltre alla visualizzazione grafica 2D e 3D, consente di settare diversi parametri caratteristici di un prodotto/processo, tra cui:

- Tempi di lavorazione,
- Percentuale di rottura,
- Quantità di materiale utilizzato,
- Valore della potenza necessaria,
- Vettore energetico,
- Numero e caratteristiche dei lavoratori utilizzati,
- Tempi di movimentazione,
- Tempi di set-up.

Intuitivamente una rappresentazione coerente dei reparti dell’azienda, oltre ad essere appetibile all’occhio, fornisce anche un miglior supporto alla creazione del modello in termini di realistica. A tal proposito, la piattaforma di progettazione **GrabCAD** risulta particolarmente utile per il reperimento dei modelli 3D. Si tratta di una biblioteca per la grafica computerizzata di file CAD: le

dimensioni degli oggetti, le distanze tra essi e la loro forma influiscono effettivamente sui risultati della simulazione, pertanto, quanto più si scende nel dettaglio, tanto più ci si avvicina al risultato esatto, seppur per una coerenza maggiore, è consigliabile costruire i modelli 3d da zero tramite programmi appositi (es. Autodesk Maya, Blender, ecc).

Con le aziende Arstech e Marelli, ci troviamo di fronte ad un modello di rappresentazione piuttosto semplice, dove le singole stazioni risultano essere per lo più tavoli da lavoro manuale. GrabCAD è stato utilizzato, non solo per l'elevato livello di dettaglio degli oggetti importati (come l'autoclave e i tavoli da lavoro), ma soprattutto perché ha ridotto i tempi del processo di rappresentazione dei modelli 3d.

Sia per Arstech che per Marelli è stato inoltre utilizzato il programma **Excel** al fine di confrontare i vari scenari produttivi, attraverso l'utilizzo di indicatori di performance, o *Key Performance Indicators* (KPI).

## **CAPITOLO IV: IL CASO ARSTECH**

Svolgere un'analisi del flusso produttivo richiede la conoscenza di elementi come i confini del sistema in analisi, gli intervalli temporali che si considerano, e le specifiche aree aziendali da studiare. Nello specifico, l'attività di simulazione della linea produttiva inizia con l'obiettivo di reperire tutte le informazioni utili, nonché la visione della linea oggetto dell'analisi. A tal proposito, per una migliore comprensione del flusso produttivo ed il reperimento dei dati, sono state organizzate diverse riunioni con l'azienda Ars Tech.

Il primo incontro è servito principalmente a capire qual era la situazione di partenza e a definire gli obiettivi da raggiungere, per poter poi individuare i dati utili all'attività di simulazione. Durante un primo colloquio in azienda è stato definito l'oggetto di studio per poi proseguire con la visita del reparto, di cui il responsabile di produzione ne ha illustrato dettagliatamente il processo produttivo e le problematiche principali. A questo punto è stata stilata, e fornita ai partners del progetto REACT, una relazione in merito alla lista di informazioni richieste durante l'incontro. Poiché l'azienda Ars Tech lavora principalmente su commessa e con lotti sempre diversi e di piccole dimensioni, si è deciso di prendere in esame il prodotto con domanda annua maggiore e, generalmente, ciclica.

L'Università Politecnica Delle Marche, dopo aver studiato il percorso produttivo del prodotto in esame, ha individuato e richiesto all'azienda Ars Tech alcune specifiche, tra cui i dettagli degli scarti produttivi. In questa fase del progetto REACT, è stato di fondamentale importanza studiare accuratamente la struttura dell'azienda, nonché il layout di ogni reparto Ars Tech. Tuttavia, per una corretta riproduzione virtuale è stato necessario organizzare una riunione, al fine di individuare con maggiore dettaglio le caratteristiche di ogni reparto produttivo d'interesse, come ad esempio:

- la disposizione dei macchinari e/o le postazioni di lavoro,
- il numero di operatori per ogni postazione,
- il flusso dei materiali.

Di seguito si andrà ad osservare i dati reperiti e sulla base di essi, collaudare una simulazione rappresentante lo stato attuale, per poi andare a modificare il layout sotto criteri di ottimizzazione.

### **4.1 ANALISI DI PROCESSO**

La rappresentazione della situazione AS-IS dell'azienda Ars Tech, quanto più realisticamente possibile. Il reperimento dei dati è stato di fondamentale importanza anche per poter poi individuare le principali aree di miglioramento da analizzare con tecniche di simulazione. L'incontro è risultato particolarmente utile per entrare nel dettaglio del processo produttivo, degli operatori coinvolti, della disposizione delle postazioni di lavoro, nonché dei buffer, delle aree di stoccaggio e/o dei magazzini che vengono utilizzati, e loro struttura. Infine, dopo una serie di contatti con l'azienda,

sono state definite e raccolte le ultime informazioni, come le azioni sugli scarti produttivi, la distanza tra i reparti, e il consumo dei materiali.

Di seguito la descrizione dettagliata della raccolta dati:

- Caratteristiche del prodotto
- Layout della catena produttiva e descrizione del flusso;
- Caratteristiche della linea: turni, numero di lavoratori;
- Caratteristiche delle singole stazioni: Tempo del ciclo, tempi di movimentazione, scarti produttivi.

#### 4.1.1 RACCOLTA DEI DATI



*Figura 4.1. Metodo di sviluppo di un modello di simulazione: La prima fase*

La A.R.S. Tech è un'azienda orientata alla produzione di parti in fibra di carbonio ad alte prestazioni, con focus nella realizzazione e nel prototyping di chassis in fibra di carbonio, parti strutturali e carrozzerie esclusive e custom.

La produzione dell'azienda Ars Tech avviene **su commessa**: si tratta di prodotti ad elevatissima specificità, spesso profondamente diversi l'uno dall'altro per dimensioni e funzionalità, realizzati su precise esigenze del cliente, con caratteristiche molto spesso uniche e poco ripetibili; anche la progettazione è, di volta in volta, diversa e realizzata ex-novo.

A tal proposito, poiché spesso i prodotti hanno scarsa ripetibilità, l'oggetto di studio dell'attività di simulazione riguarda nello specifico uno dei prodotti di punta dell'azienda: il **Crash Box F3-R Tatuus** (Fig. 4.1). Il Crash Box F3-R Tatuus è un componente denominato "musetto", che si trova nella parte anteriore di un'autovettura di formula 3, e si compone di due sezioni, una delle quali rinforzata con del Kevlar di tipo 280.

Domanda annua: 150 pezzi/anno.

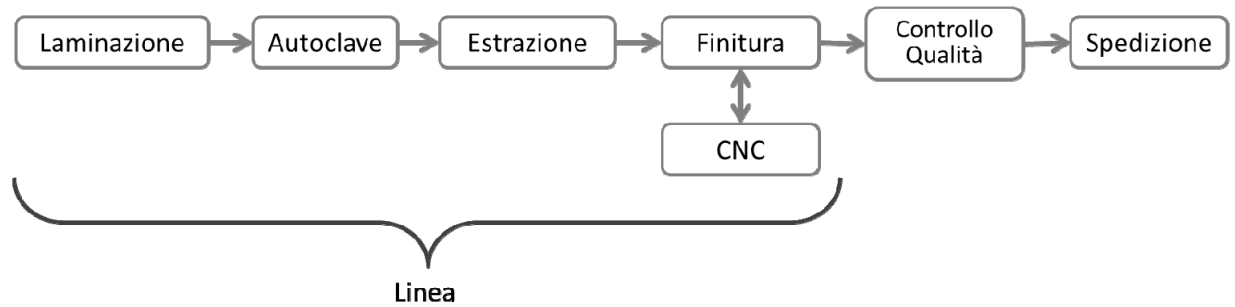




*Figura 4.2. Prodotto Crash Box F3-R Tatuus*

Poiché è uno dei componenti più richiesti dell'azienda, esso necessita di postazioni di lavoro dedicate nei reparti. Come rappresentato in Fig. 4.2, cinque sono i reparti adibiti alla lavorazione del prodotto e delle materie prime che lo compongono, mentre uno è adibito al controllo qualità.

I diversi reparti vengono considerati come le stazioni della linea produttiva e per ognuna di esse viene riportata la lista delle fasi che portano alla stazione successiva, queste vengono indicate come operazioni "elementari" ma in realtà riassumono un insieme di operazioni manuali che l'operatore esegue sul pezzo.



*Figura 4.3. Flusso generalizzato dello scenario a forte incidenza manuale*

La produzione manifatturiera si può pensare generalmente come una successione di fasi di fabbricazione\approvvigionamento e assemblaggio, separate da eventuali buffers di scorte. Tali fasi possono procedere in parallelo o in serie per poi congiungersi.

Un sistema di gestione di tipo **PULL** ha il paradigma del suo funzionamento nelle considerazioni appena citate; esso crea, prima e dopo ogni reparto produttivo, dei buffer di materiali di disaccoppiamento il cui scopo è quello di garantire il D time, o tempo di consegna, richiesto dal reparto immediatamente a valle.

Nei sistemi pull, il tutto inizia con l'ordine che tira la produzione di cellula in cellula. Come specificato precedentemente, ogni reparto si compone di diverse postazioni di lavoro di cui alcune specifiche per la realizzazione del prodotto Crash Box Tatuus.

In Fig. 4.3, si evidenzia la composizione dettagliata di ogni reparto.

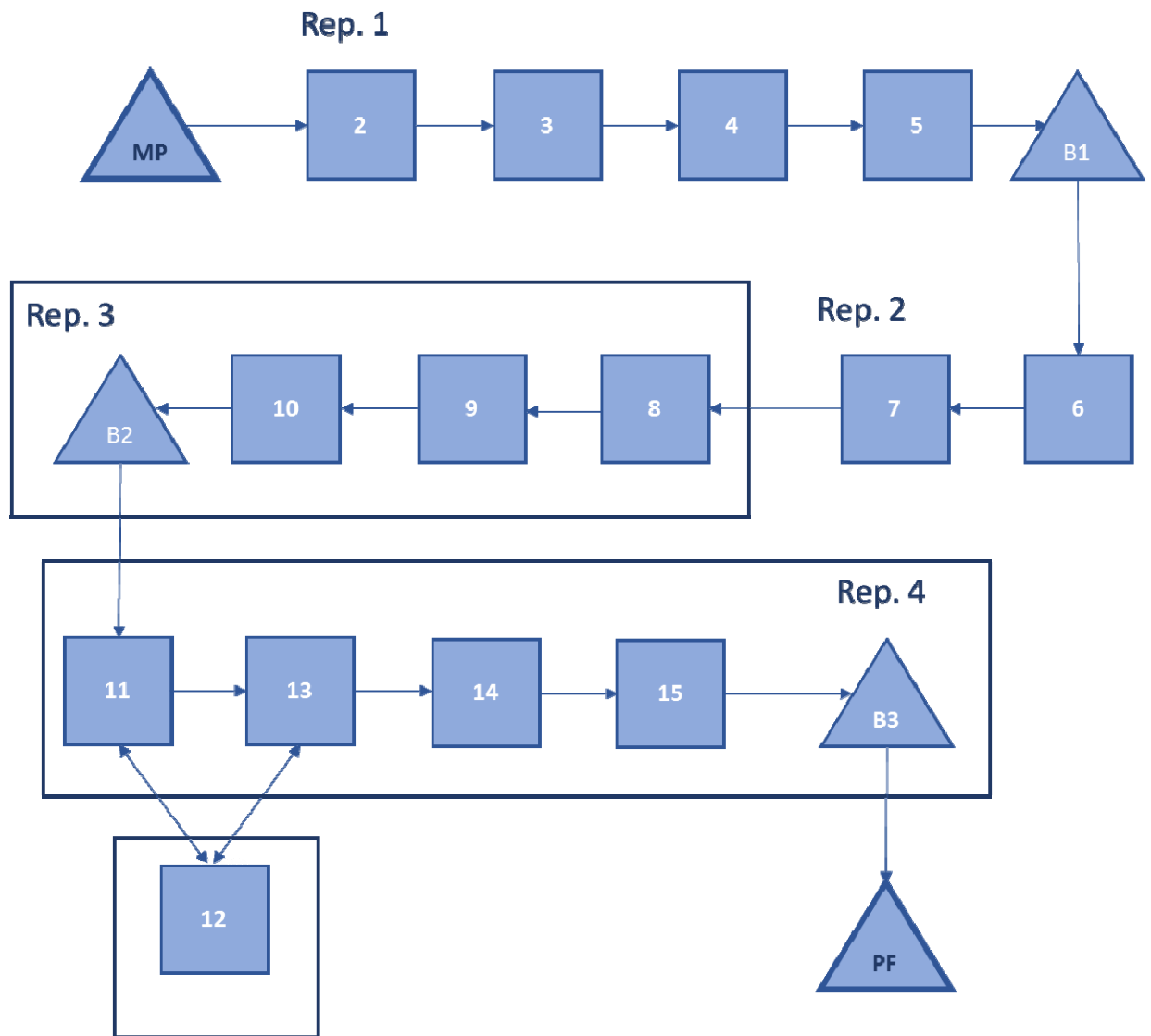


Figura 4.4. Diagramma produttivo dell'azienda Ars Tech

Con

*MP = Materie Prime*

*B = Buffer/Magazzino verticale*

*PF = Prodotto Finito*

Di seguito la descrizione del processo divisa per reparto produttivo, in termini di:

- a. Flusso produttivo,
- b. Numero di riferimento dell'operazione i-esima (corrispondente a quello in Fig. 4.4),
- c. Tipologia di lavorazione,
- d. Tempo ciclo, ossia l'intervallo di tempo necessario ad una macchina per compiere la lavorazione programmata (Turpin, 2018).

## Reparto 1) Laminazione

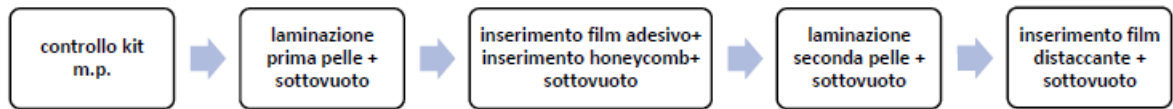


Figura 4.5. Flusso produttivo: Reparto 1

Dapprima si procede al controllo delle materie prime che sono in parte stoccate in frigorifero. Queste sono suddivise in semplici kit, perciò sono già pronte quando si inizia la lavorazione vera e propria. Queste sono di seguito elencate e descritte:

- *Fibra di carbonio*: il foglio del materiale composito viene srotolato, tagliato nelle dimensioni necessarie ed ispezionato onde evitare che siano presenti malformazioni.
- *Kevlar k280*: materiale composito rinforzante la sezione del Crash box che costituisce la parte bassa del musetto.
- *Film adesivo*: Anche qui avviene lo stesso tipo d'ispezione, appurando che il foglio non sia srotolato, scollato o che in generale, non abbia perso le sue proprietà adesive. È necessario nelle prime fasi di sottovuoto.
- *Honeycomb 5052*: è una lastra metallica ad alte prestazioni, resistente a temperatura e pressione elevate. La lastra è una struttura d'alluminio a nido d'ape chiuso (non ci sono fori). Esistono diverse sezioni di cellule e densità, come anche di spessore, che in questo caso misura 15 mm. Viene stoccato in magazzino ed è necessaria per la cottura in autoclave.
- *Fabric Breather*: è un materiale che permette l'isolamento della fibra di carbonio dal sacco di plastica. Utilizzato durante processi in sottovuoto. Questo deve essere, naturalmente, omogeneo ed uniforme. È detto anche film distaccante.
- *Film per il sottovuoto*: è generalmente un sacco di plastica resistente che copre il pezzo nelle fasi di compressione nel reparto laminazione e in autoclave.

Si procede con la laminazione (o taglio) del primo strato di fibra di carbonio: Il tessuto viene tagliato in un foglio unico e successivamente viene impregnato della resina che permette di adagiare la fibra allo stampo senza incollarla ad esso, si tratta infatti, di un liquido antiaderente polivinilico.

Le parti in eccesso vengono tagliate e successivamente viene inserita la honeycomb per i processi successivi. Tutto ciò viene effettuato sul tavolo di lavoro dedicato.

*Tabella 4.1. Specifiche flusso produttivo: Reparto 1*

<b>N</b>	<b>Tipo operazione k-esima</b>	<b>Tk-esima (min)</b>
<b>1</b>	<b>Controllo kit materia prima</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Laminazione prima pelle + sottovuoto</b>	<b>165</b>
<b>3</b>	<b>Inserimento film adesivo + inserimento honeycomb + sottovuoto</b>	<b>120</b>
<b>4</b>	<b>Laminazione seconda pelle + sottovuoto</b>	<b>160</b>
<b>5</b>	<b>Inserimento film distaccante + sottovuoto</b>	<b>30</b>
<b>T tot. Laminazione= 480 (min)</b>		

A questa prima fase segue la stessa lavorazione per l'altra sezione del Crash box, ovvero quella costituita di kevlar. Le due sezioni vengono coperte da film di plastica fissati con adesivo e l'intero costruito viene coperto dal fabric breather, che separerà il materiale da un ulteriore film di plastica ultraresistente. Questa procedura avviene per entrambe le sezioni, le quali vengono stoccate nel **deposito laminazione B1**.

## Reparto 2) Autoclave



Figura 4.6. Flusso produttivo: Reparto 2

L'operatore del reparto autoclave raggiunge lo scaffale (o deposito laminazione) e trasporta le sezioni laminate sino al tavolo in cui è presente il sistema ad aria compressa. Successivamente avviene la procedura di messa in sottovuoto. L'operazione è a tempo variabile perché c'è bisogno di un ulteriore check del sacco prima di procedere alla lavorazione dei pezzi. La composizione viene trasportata in autoclave dove viene "cotta" per 3 ore e 15 minuti ad una pressione elevata per donare alle sezioni un'altra resistenza.

Se il sacco di una delle sezioni si rompe, essa viene inserita in un nuovo sacco e viene rilavorato per un tempo che oscilla da un minimo di 10 a più di 20 minuti. Se la rottura supera un certo grado di danno, il pezzo viene scartato. La percentuale di scarto dovuta alla rottura del sacco è stimata al 2%).

Tabella 4.2. Specifiche flusso produttivo: Reparto 2

N	Tipo operazione k-esima	Tk-esima (min)
6	Sottovuoto	70
7	Cottura in autoclave	195
<b>T tot. Autoclave= 265 (min)</b>		

A lavorazione terminata, il pezzo viene trasportato direttamente nel **buffer B2** del reparto estrazione.

### Reparto 3) Estrazione

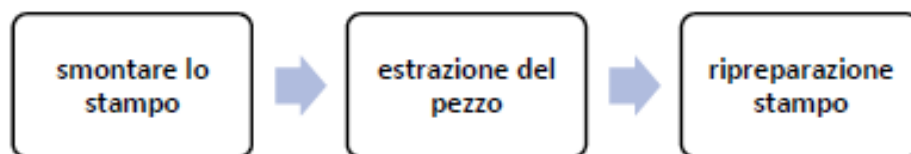


Figura 4.7. Flusso produttivo: Reparto 3

Qui il costruito pezzo-stampo viene privato della plastica e del film distaccante e solo poi viene rimosso lo stampo. Questa è l'operazione più delicata perché l'operatore deve "martellare" il pezzo di materiale composito affinché questo si distacchi dallo stampo. Statisticamente è questo il reparto che produce difettosità estetiche e dimensionali che tuttavia possono essere rilavorate nel reparto finitura.

In ogni circostanza, il pezzo viene portato al deposito estrazione B2 dallo stesso operatore che ha effettuato il distacco. Egli poi tornerà nel proprio reparto per riparare lo stampo e portarlo nuovamente nel reparto laminazione per un nuovo pezzo.

Tabella 4.3. Specifiche flusso produttivo: Reparto 3

N	Tipo operazione k-esima	Tk-esima (min)
8	Smontare lo stampo	5
9	Estrazione del pezzo	15
10	Riparazione stampo	20
<b>T tot. Estrazione= 40 (min)</b>		

## Reparto 4\_Finitura

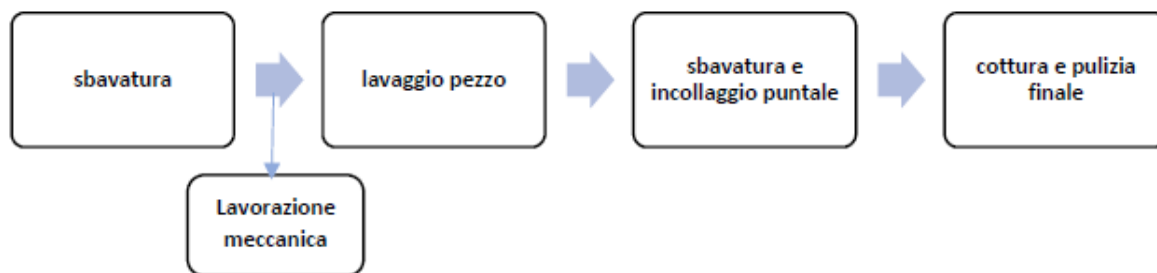


Figura 4.8. Flusso produttivo: Reparto 4

Qui avvengono le lavorazioni di sbavatura e di lavaggio delle due sezioni, comprese lavorazioni meccaniche mediante CNC per consolidare ulteriormente le prestazioni del pezzo in relazione alla sua struttura, alle dimensioni ed estetica. Segue l'incollaggio e la cottura dei sotto-assemblati.

Tabella 4.4. Specifiche flusso produttivo: Reparto 4

<b>N</b>	<b>Tipo operazione k-esima</b>	<b>Tk-esima (min)</b>
<b>11</b>	<b>Sbavatura</b>	<b>15</b>
<b>13</b>	<b>Lavaggio pezzo</b>	<b>10</b>
<b>14</b>	<b>Sbavatura e incollaggio puntale</b>	<b>30</b>
<b>15</b>	<b>Cottura + pulizia finale</b>	<b>75</b>
<b>T tot. Finitura= 130 (min)</b>		



## Reparto 5\_Area CNC

Come evidenziato in Fig. 16, dopo l'operazione di sbavatura il pezzo prosegue con la lavorazione meccanica e a seguire lavaggio, sbavatura e incollaggio puntale.

Tabella 4.5. Specifiche flusso produttivo: Reparto 5

<b>N</b>	<b>Tipo operazione k-esima</b>	<b>Tk-esima (min)</b>
<b>12</b>	<b>Lavorazione e meccanica</b>	<b>60</b>
<b>T tot. Lavorazione meccanica= 60 (min)</b>		

### 4.1.2 ANALISI DEGLI SPRECHI

Dopo aver studiato e chiarito il flusso produttivo dell'azienda si prosegue con l'**analisi degli sprechi**. Le cause di spreco possono derivare da diversi muda (Rubrich & Watson, 2004):

1. *Eccessiva produzione*: eccesso di produzione a causa di un sistema di produzione inefficiente;
2. *Coode*: prodotti in coda e in attesa di essere lavorati o consegnati al cliente;
3. *Scorte*: scorte di materie prime, semilavorati e prodotti finiti in attesa di essere elaborati;
4. *Scarti*: prodotti non conformi e difettosi;
5. *Micro-Movimenti*: dei lavorati o delle macchine (danneggiamenti, usure, problemi di sicurezza);
6. *Processamento*: usare risorse più costose del necessario (es. operatori con qualifica superiore alla mansione svolta);
7. *Spostamenti*: sono tutte quelle inefficienze del trasporto, ad esempio in termini di perdite di tempo

La simulazione punta ad ottenere un flusso operativo il più possibile veloce, in generale i campi di azione per l'individuazione delle attività a non valore aggiunto rispecchiano il Lean Thinking (Caldera et al., 2017).

Di seguito, si riporta il dettaglio di ogni muda nel caso del prodotto Crash Box Tatuus preso in esame:

### **Eccessiva produzione**

La produzione del Crash Box Tatuus, e in generale di tutti i prodotti dell'azienda in esame, è di tipo PULL. In questo tipo di gestione, la decisione di implementare la produzione di un dato bene in una determinata quantità, quindi dare il via a tutta la sequenza di attività a partire dall'approvvigionamento, avviene *a posteriori* all'insorgere di un fabbisogno. Duqne, in questo caso l'ingresso dei prodotti in produzione non è anticipato rispetto agli ordini (Wang et al., 2018).

### **Code**

La domanda annua del Crash Box Tatuus è di 150 unità distribuite durante l'anno lavorativo. A tal proposito l'azienda Ars Tech non rileva particolari problematiche dovute a prodotti in coda e in attesa di essere lavorati.

### **Scorte**

L'azienda Ars Tech opera secondo il principio del Just-In-Time (JIT) è un metodo logistico-produttivo che si basa sul concetto di *produrre solo quando serve*, vale a dire quando si manifesta la domanda del cliente che sta immediatamente a valle seguendo il flusso del processo. Questo modo di organizzare il lancio della produzione, elimina o riduce drasticamente lo stazionamento del materiale fermo in attesa di essere lavorato, riducendo quindi il tempo totale di attraversamento che passa da giorni a ore.

### **Scarti**

In Fig. 4.9 si evidenziano le tipologie di scarti produttivi del prodotto Crash box Tatuus, ovvero la rottura del sacco a valle del reparto autoclave, scarti di tipo produttivo dopo l'estrazione, e scarti estetici e dimensionali rilevati durante la fase del controllo qualità.



Figura 4.9. Dettaglio della tipologia di scarto del prodotto Crash Box Tatuus

Tuttavia, essendo il processo a forte incidenza manuale, da una riunione con l'azienda in esame è emerso che più che di "scarti" si parla di "rilavorazioni" del prodotto. Questo perché le operazioni

avvengono manualmente ed artigianalmente dunque si parla di errori sporadici per lo più di tipo umano, errori a cui si trova facilmente soluzione grazie all'esperienza dei lavoratori.

Tabella 4.6. Percentuali di scarti e rilavorazioni annue

SCARTI DOVUTI ALLA ROTTURA SACCO	SCARTI PRODUTTIVI	SCARTI ESTETICI E DIMENSIONALI
2%	6/ 213 Pz. → 2.82%	1/213 Pz. → 0.47%
CONTROLLO SACCO PRIMA DI INSERIRLO IN AUTOCLAVE= 5 min		

### **Micro-movimenti**

Gli spostamenti del prodotto Cras Boxh Tatuus sono per lo più manuali dunque poco soggetti ad usura, danni e ritardi.

### **Processamento**

Dallo studio del processo si evince che non sono presenti attività che non introducono alcuna trasformazione al prodotto che il cliente sia disposto a pagare, e che possono causare danni, ritardi etc.

### **Spostamenti**

Gli spostamenti risultano essere per lo più manuali, con conseguente possibilità di riduzione dei tempi di movimentazione.

Sulla base di quanto analizzato, dopo aver studiato il dettaglio del flusso produttivo in esame, si individua il campo di azione, nonché il focus delle simulazioni, insieme ai responsabili della produzione (Fig. 4.10).

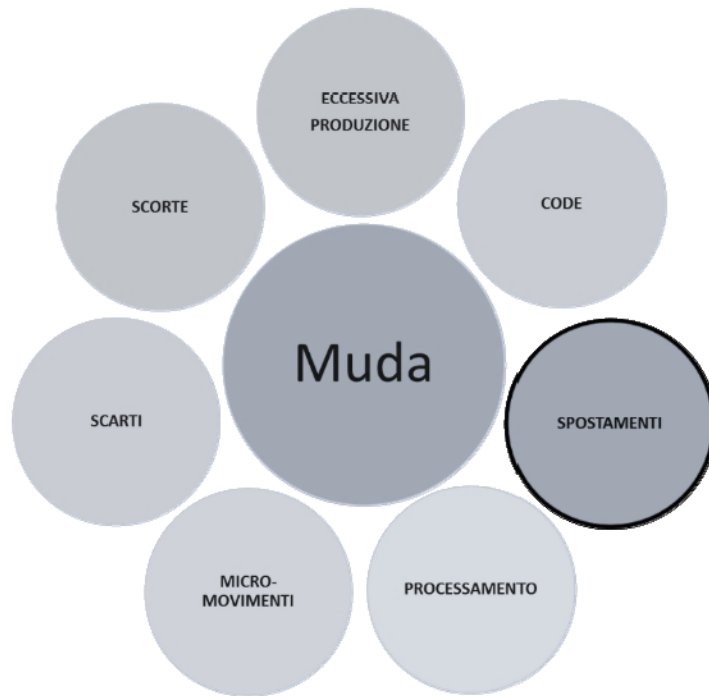


Figura 4.10. Muda e focus dell'attività di simulazione

#### 4.1.3 OBIETTIVO DELLA SIMULAZIONE

Generalmente, con la logica PULL attraverso l'eliminazione degli sprechi, si migliorano le performance complessive del processo sia in termini di efficacia che di efficienza.

Attraverso l'attività di simulazione si vuole quindi raggiungere i seguenti risultati:

- **Modellare** la linea produttiva in maniera veritiera creando uno scenario che risponda dinamicamente alle variazioni di parametri di *qualità, performance e affidabilità* delle singole stazioni della catena di montaggio.
- **Monitorare** il volume di produzione.
- **Osservare** la variazione di indicatori di efficienza legati ad aspetti di materiale, movimentazione, manutenzione e tempo.
- **Quantificare** l'impatto degli sprechi delle movimentazioni e delle attività manutentive in termini di costo del flusso produttivo e flow efficiency.
- **Verificare** soluzioni correttive al fine di favorire una produzione più snella.

### Focus dell'attività di simulazione:

*Analisi dei tempi di movimentazione/attraversamento del prodotto Cras Box Tatuus e delle attività di manutenzione, con conseguente individuazione delle attività a non valore aggiunto (NVA) e miglioramento dell'efficienza di flusso (Fig. 4.11).*



*Figura 4.11. Priorità operative dell'attività di simulazione*

## 4.2 COSTRUZIONE DEL MODELLO AS-IS

Il metodo di studio intrapreso fornisce una base di analisi dei processi produttivi finalizzata alla creazione di un modello virtuale con caratteristiche simili a quello reale, sul quale realizzare interventi correttivi finalizzati all'aumento dell'efficienza di flusso, o **Flow Efficiency (FE)**. Si tratta di un processo di analisi di flusso finalizzato ad ottenere un ciclo di miglioramento continuo attraverso l'identificazione di correzioni mirate a promuovere diversi campi di azione.



*Figura 4.12. Metodo di sviluppo di un modello di simulazione: La seconda fase*

Lo sviluppo del modello di simulazione è un processo **ciclico** ed **evolutivo**. Si inizia con una prima bozza del modello, si perfeziona e si modifica sulla base dei risultati forniti dalle simulazioni. Infine, dopo diversi cicli, si arriva al modello ottimale. Una volta terminato il processo di raccolta

delle informazioni utili all'interno del sistema, si passa alla creazione di un modello sul quale effettuare studi simulativi.

*La strategia top-down è caratterizzata da un modello strutturato in modo approssimativo da abbattere passo dopo passo. Più raffinato è il modello, più dettagliato diventa.*

Per quanto riguarda la nostra tipologia di analisi, andremo a considerare un modello con simulazione discreta di eventi. Con il termine “*evento*” si intende l'istante di tempo in cui avviene un cambiamento di stato del sistema; è l'istante, nel tempo simulato, che delimita una particolare attività nell'evoluzione di stato dell'ambiente (ad esempio l'inizio o la fine di un processo). Il tempo varia al passaggio da un evento al successivo. Lo sviluppo del modello viene generalmente diviso nella costruzione di *sotto-modelli* parziali dell'impianto da simulare in modo da avere una decomposizione gerarchica di tutte le singole attività.

*Nel nostro caso vengono inizialmente modellate le singole stazioni e, dopo la loro validazione e le sperimentazioni, i sotto-modelli vengono integrati nel modello generale, comprendente i magazzini interlinea (se presenti) e le logiche gestionali di interazione tra i vari reparti.*

Nello specifico, per la creazione del modello, essendo formato dalla produzione del solo prodotto Cras Box Tatuus, abbiamo prima riportato le caratteristiche delle singole stazioni in modo tale da **discretizzare il processo**, per poi considerare l'intera catena produttiva.

L'interfaccia grafica del programma permette di familiarizzare subito con le varie funzioni e di vedere direttamente l'evoluzione del progetto.

Nel rispetto dei dati e informazioni in possesso, come prima cosa si è dovuto:

- Restituire la **planimetria**, rispettando le distanze.
- Inserire il numero esatto di **stazioni** nelle posizioni esatte in cui si presentano in azienda. Le stazioni immesse sono le sole dedicate al Crash Box, quindi si escludono quelle non necessarie alla realizzazione del prodotto.
- Per ogni stazione k-esima, indicare il **tempo di lavorazione k-esimo**.
- Introdurre gli **operatori** che utilizzeranno un certo numero di stazioni e che movimenteranno i materiali.

Per restituire una versione fedele della Ars Tech è stato richiesto all'azienda stessa il layout dell'impianto indicando i singoli reparti e i depositi (Fig. 4.13), inoltre, visitando la struttura è stato possibile verificare visivamente la posizione dei reparti, delle macchine e le postazioni di lavoro.

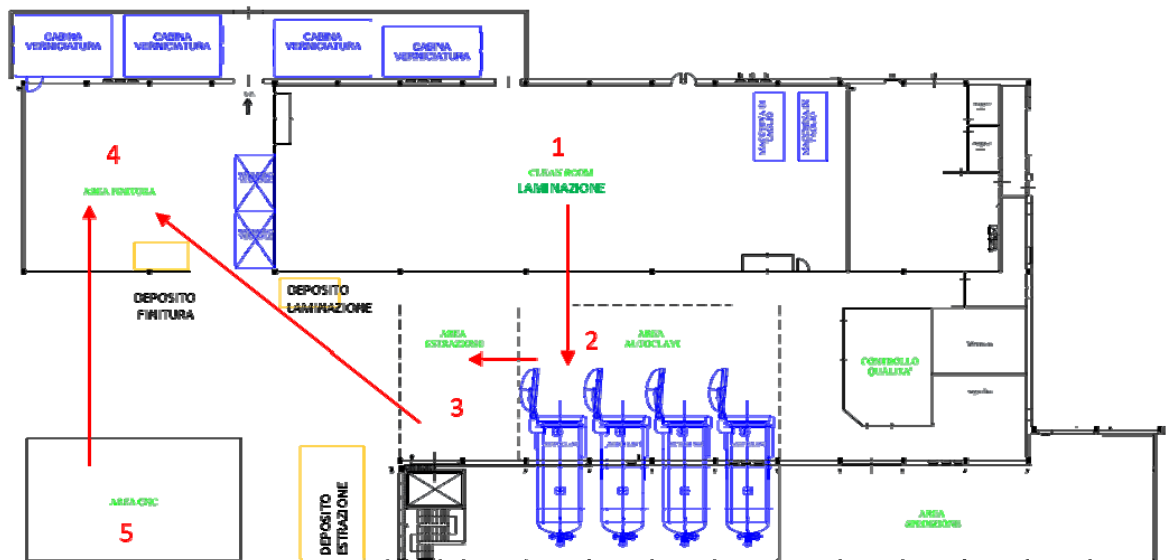


Figura 4.13. Planimetria dell'azienda Ars Tech

Dopo aver studiato il layout aziendale, è stato ricostruito all'interno del programma Plant Simulation. Nello specifico sono state inserite le pareti di fabbrica e definite le varie aperture e passaggi. Per far ciò il programma mette a disposizione alcuni oggetti utilizzando la scheda “**Edit**” nel Visualizzatore 3D, che devono essere poi configurati in base alle caratteristiche del caso studio. Di seguito si descrive dettagliatamente la procedura della costruzione del moello di simulazione.

Si strutturano vari gruppi di appartenenza degli oggetti (*modelli, tools, ecc*); per un maggior ordine, ogni gruppo possiede oggetti omogenei. Ad esempio:

- Al gruppo “*Walls*” sono assegnati le mura esterne ed il pavimento.
- Ad “*Internal Walls*” i muri interni.
- A “*deco*” le decorazioni come recinti, scale e macchine non utilizzate.

- “Default” è invece il gruppo relativo agli oggetti necessari alla simulazione (stazioni, buffer, link, ecc).

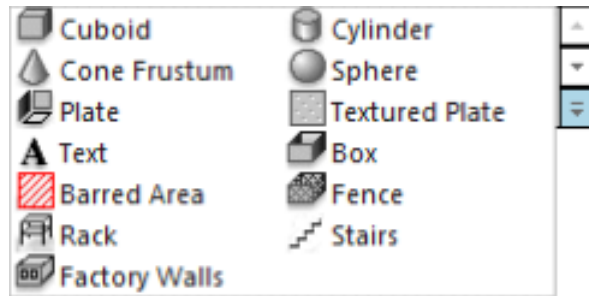


Figura 4.14. Interfaccia del software per l’inserimento di oggetti

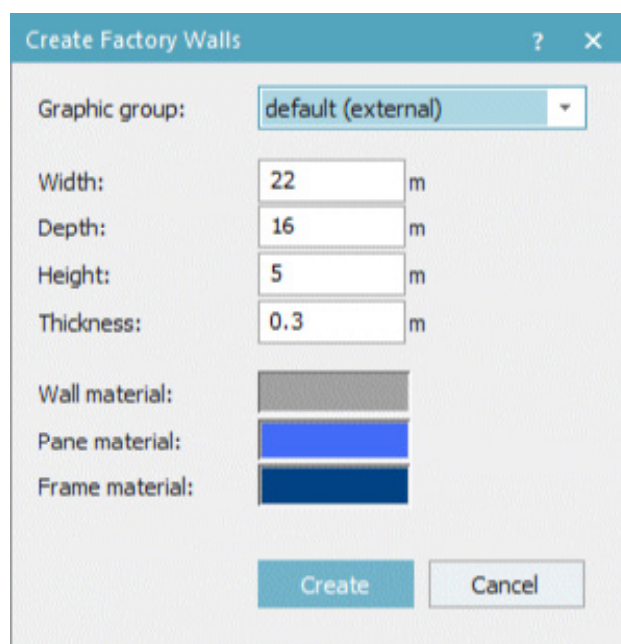


Figura 4.15. Interfaccia “Create Factory Walls”

Nel passaggio successivo sono state modificate le proprietà 3D, al fine di regolare le dimensioni e la posizione della struttura in modo che corrispondano in modo realistico all'edificio della fabbrica.



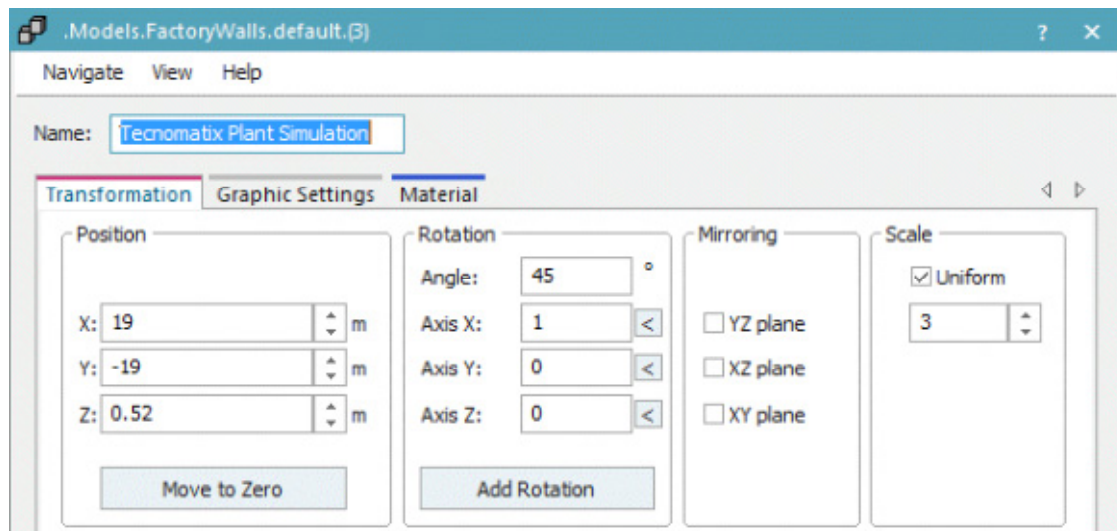


Figura 4.16. Interfaccia per la modifica delle proprietà 3D

## 4.2.1 IL MODELLO VIRTUALE

La struttura esterna del modello di simulazione si presenta come in Fig. 4.17.

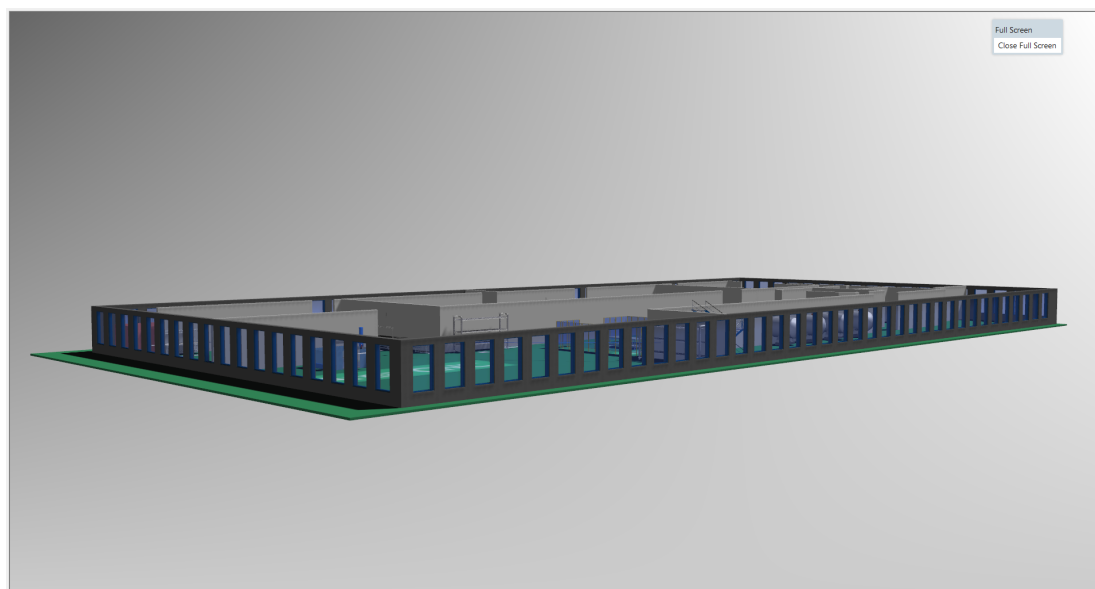


Figura 4.17. Struttura esterna del modello

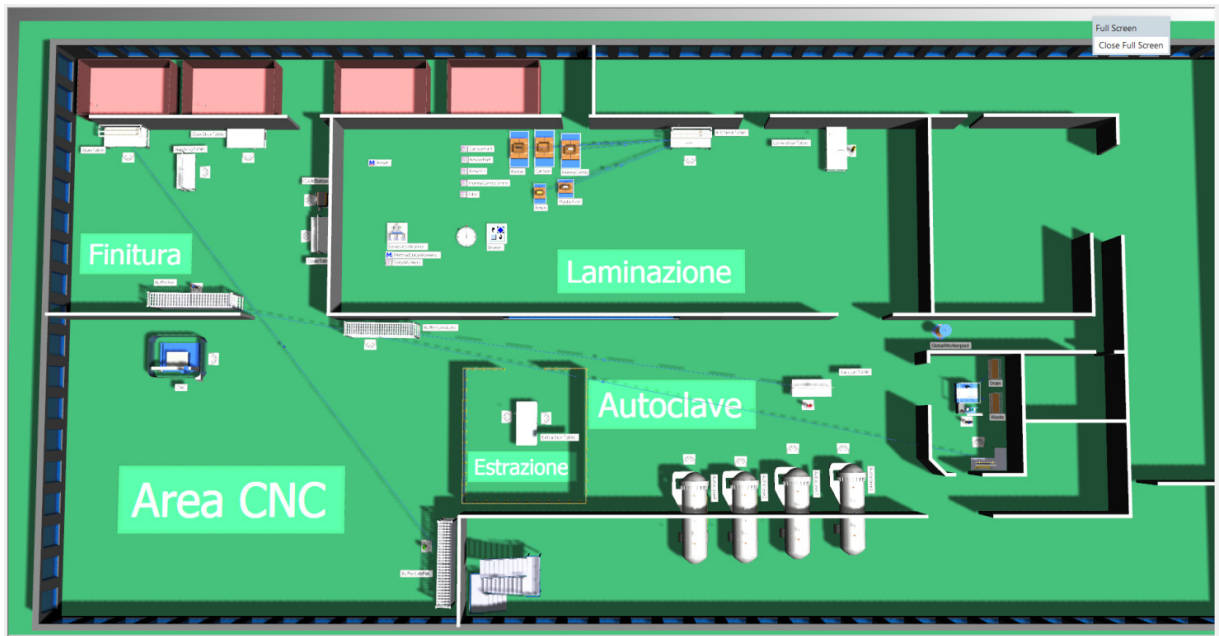


Figura 4.18. Pianta del modello in Plant Simulation

A questo punto bisogna, innanzitutto, creare la postazione di lavoro (*worker place*) della risorsa umana (*worker*) ed assegnarla ad una stazione. Il software permette di posizionare una stazione di riposo (*worker pool*) dalla quale i singoli lavoratori escono per dirigersi alle varie postazioni e poi ritornarvi, dopo aver concluso la lavorazione.

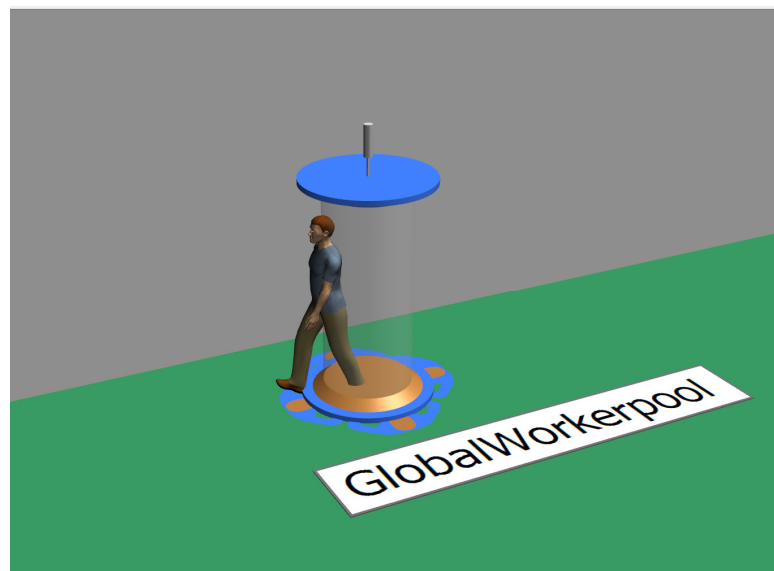


Figura 4.19. Dettaglio Workerpool

Il *tool* settaggio dei comandi (*broker*) permette di stabilire le varie caratteristiche dei lavoratori come turni di lavoro, capacità di svolgere determinate mansioni, tempi di pausa, efficienza, postazioni di lavoro dedicate, velocità di movimento, ecc.

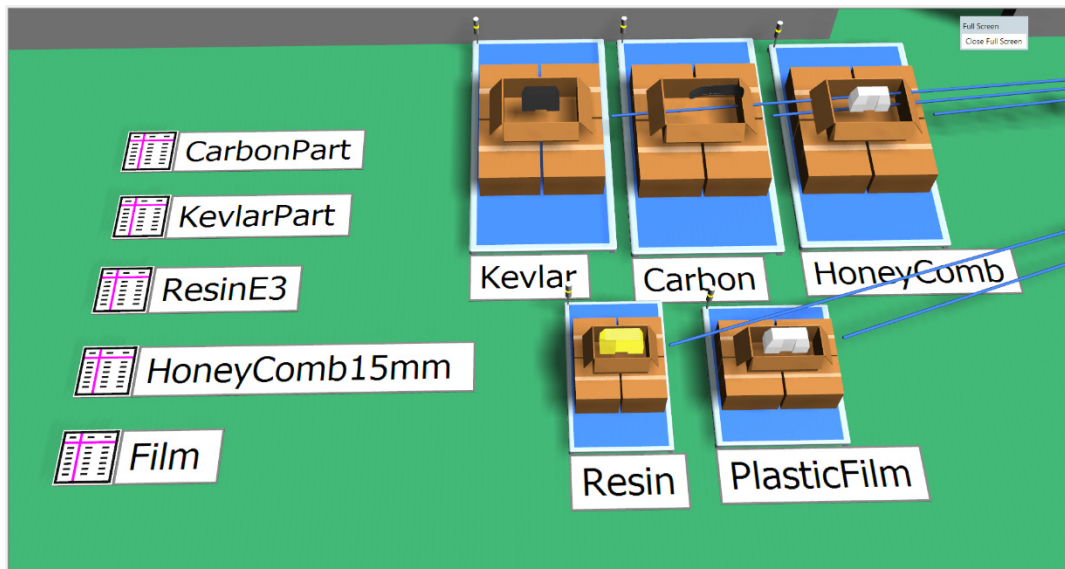


Figura 4.20. Dettaglio del kit di materie prime

Oltre all'autoclave, al CNC ed al sistema di lavaggio, si trattano i tavoli da lavoro come stazioni cosicché il software riconosca le lavorazioni attuate.

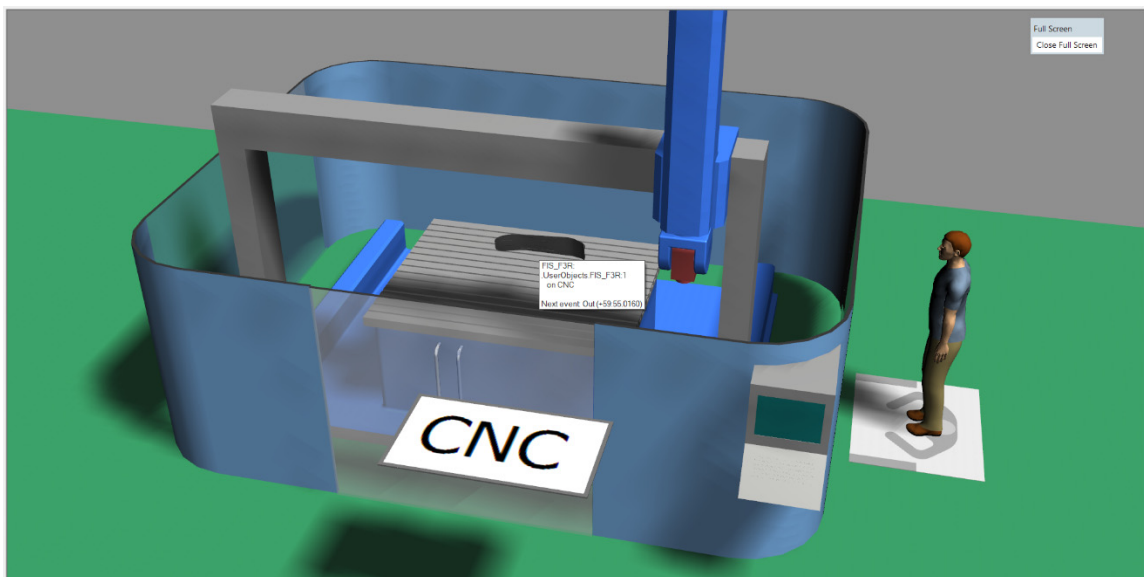


Figura 4.21. Modello di macchina CNC

Per le operazioni manuali è stato opportuno indicare quali stazioni avessero bisogno degli utenti durante le fasi di lavorazione. Stazioni come CNC ed autoclave non necessitano dell'operatore durante il processo poiché la lavorazione non è manuale e quindi è compiuta dalla macchina stessa. Le movimentazioni sono altresì compiute dagli operatori e sono animate prevedendo che i singoli

operatori (1 per reparto) si muovano liberamente nell'area, evitando ovviamente gli ostacoli (macchine, muri e zone non ammesse). Definendo dei “services” o servizi specifici ed assegnandoli ad ogni operatore è stato possibile definire “**quali operatori devono fare cosa**”. Ad esempio, il service “*Carrylam*” è il servizio relativo alla movimentazione tra le stazioni del reparto laminazione, il service “*Vacuumprocess*” è il servizio relativo alla messa in sottovuoto del pezzo.



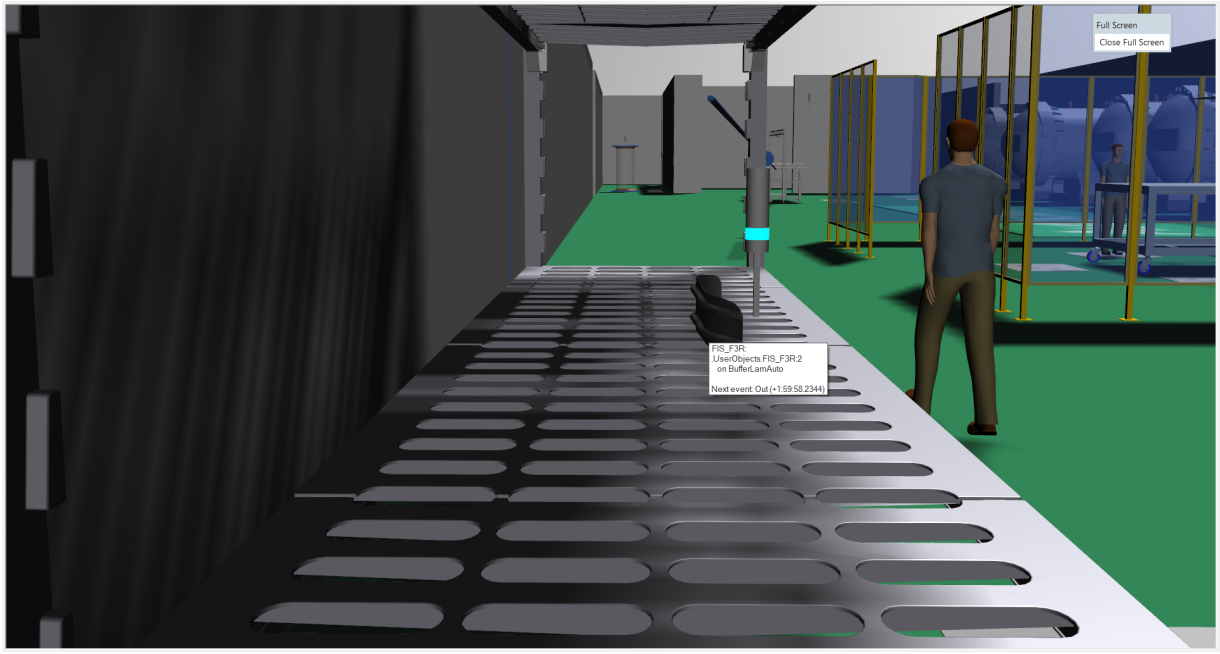
Figura 4.22. Operatore che trasporta il pezzo

È da chiarire che i “services” sono dei **link tra operatore e le stazioni** perciò ogni service indicato nelle fasi di lavorazione e di trasporto devono combaciare con quelle designate ad ogni operatore. Se inoltre non si è fornito alla stazione l’obbligo di utilizzare l’operatore durante il processo, o per trasportare il pezzo da un luogo all’altro, la macchina opera senza operatore, come avviene ad esempio per l’autoclave e per il CNC, che necessitano delle sole operazioni di movimentazione da parte dell’utente.

*Ogni operatore conclude la fase di lavoro di reparto consegnando il pezzo nel relativo deposito.*

Tuttavia ci sono alcuni vincoli:

- Solo i pezzi che fuoriescono dal reparto autoclave vanno direttamente al reparto estrazione.
- Solo il reparto Autoclave non necessita del deposito, poiché i pezzi sono direttamente trasportati al reparto Estrazione.



*Figura 4.23. Dettaglio pezzo nel deposito*

Ogni deposito è stato trattato come un buffer poiché il software riconosce gli “storage” come punti di accumulazione e quindi come solo punto di arrivo, perciò, se avessimo utilizzato uno store al posto del buffer, da essi non sarebbe stato possibile trasportare il pezzo al reparto successivo. Non ci sono differenze visibili tra buffer e store, solo a livello di codice il software distingue le relative funzioni. I due termini non si distinguono all’interno del software anche perché ad entrambi può essere applicato un nuovo modello 3D, quindi non hanno mai una forma definita, solo quando li si inserisce per la prima volta hanno un modello standard (il buffer è rappresentato da un recinto mentre lo store da uno scaffale).

All’interno del software, ciò che è importante è la **funzione di attesa**, possibile solo con il buffer in quanto lo store serve la scrittura di un codice complesso.

Inoltre, la funzionalità di trasporto tramite operatore dal buffer alla macchina successiva non è consentito, perciò è stato necessario legare il buffer alla stazione con un “**connettore**” che fa in modo di inviare il pezzo in maniera diretta. Questo è da considerarsi come un punto a sfavore per la restituzione “AS IS” dell’impianto, poiché in questa fase la movimentazione del pezzo non fornisce alcun dettaglio temporale o della viabilità.

Infine, i tempi di movimentazione e della distanza percorsa dai depositi alla stazione sono stati calcolati con Excel osservando le distanze nella pianta di simulazione e l’andatura media dell’operatore, che di base risulta essere 1,6 m/s (metri al secondo).

Di seguito si riportano le immagini relative al dettaglio dei vari reparti:

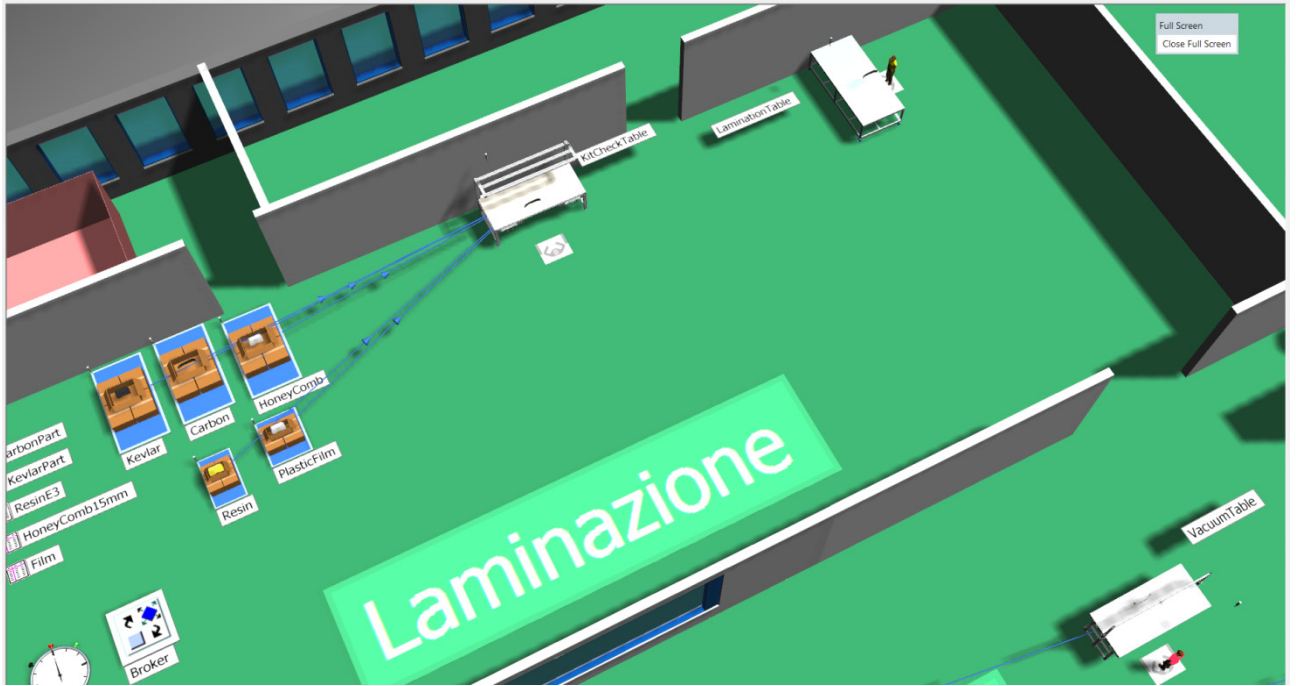


Figura 4.24. Dettaglio reparto 1

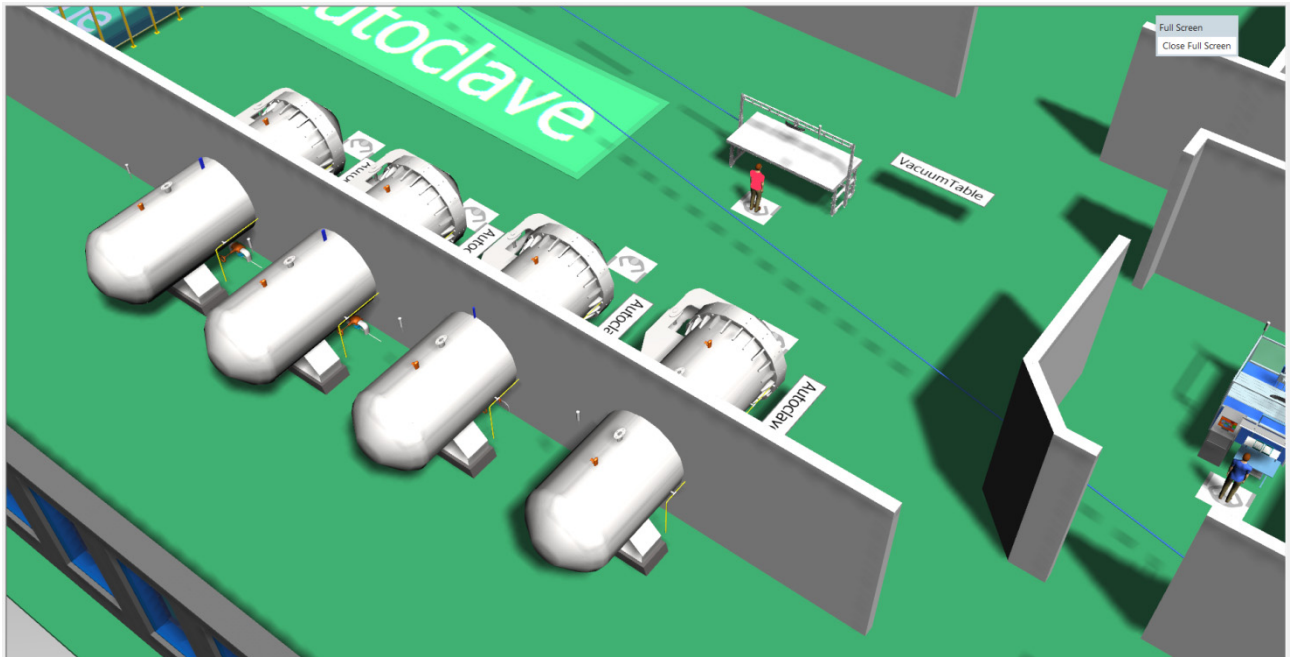


Figura 4.25. Dettaglio reparto 2

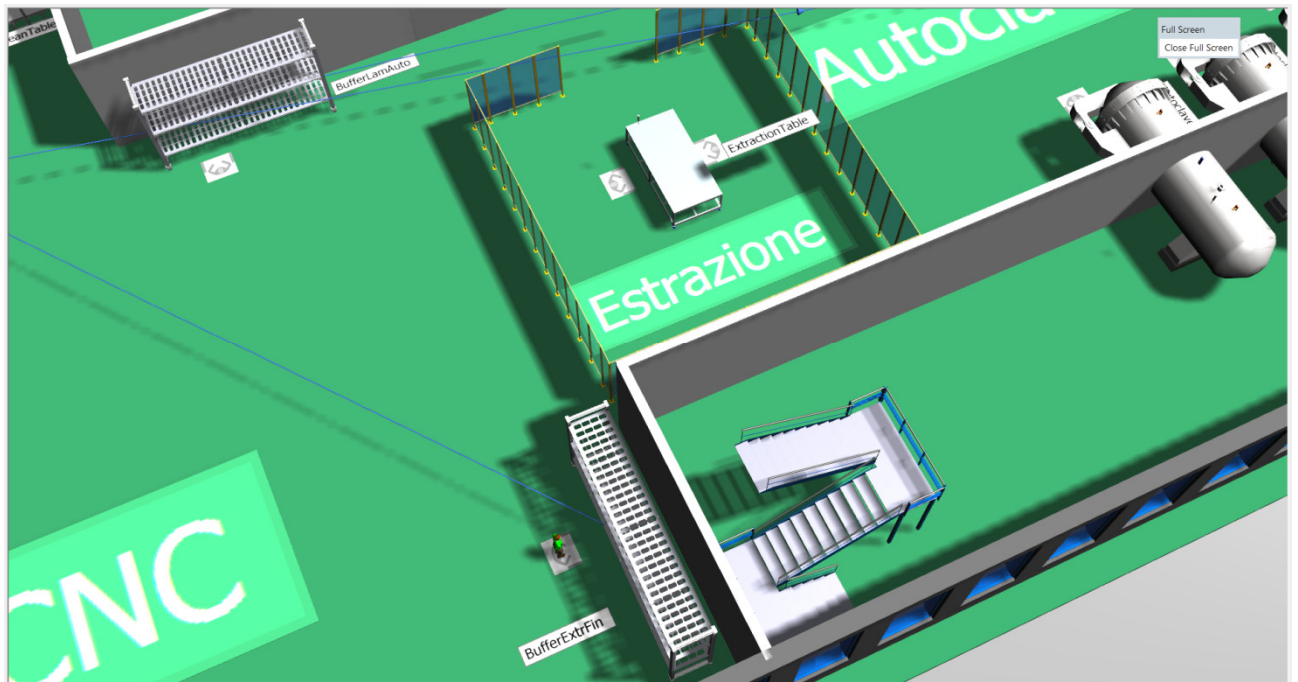


Figura 4.26. Dettaglio reparto 3

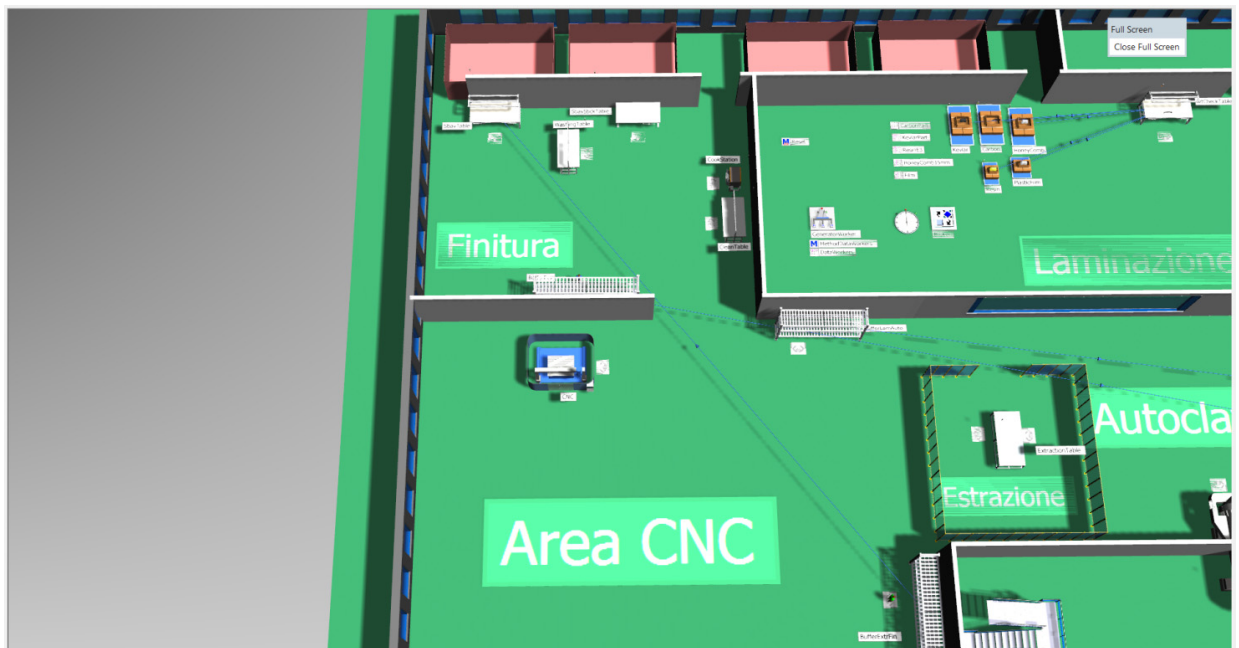
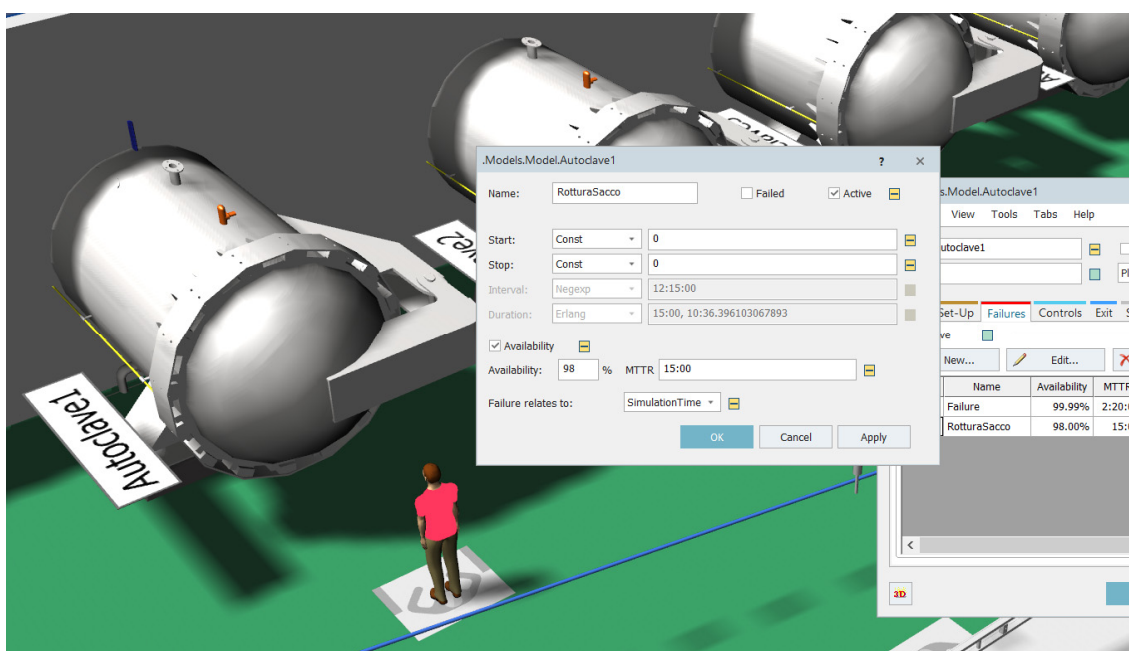


Figura 4.27. Dettaglio reparti 4 e 5

Per quanto riguarda gli scarti produttivi, si è usufruito dei dati forniti dall'azienda Ars Tech per quanto riguarda le varie tipologie di scarto, mostrate in precedenza.

Anzitutto gli scarti dovuti alla rottura sacco sono stati intesi come “**Failure**” nella stazione autoclave, indicando la **possibilità di accadimento** nella disponibilità (*trattandosi del 2%, il suo reciproco identifica una disponibilità del 98% per la stazione*) e il **tempo di recupero del pezzo**

dall'autoclave che dura come minimo circa 15 minuti, per il controllo del nuovo sacco ed una nuova rilavorazione.



*Figura 4.28. Il modello e gli scarti del reparto autoclave*

Successivamente, nel reparto qualità si è inserita una stazione che smista i pezzi di prima qualità da quelli scartati.

La **funzione di smistamento** è creata usando una “Exit Strategy” dalla stazione in percentuale, dove da una parte è indicata la porzione di pezzi conformi (96,71%), e dall'altra quelli scartati per difetti estetici, dimensionali, e meccanici (in totale 3,29).

*A questo punto, ogni pezzo si dirige verso l'apposito “Drain” per essere consegnato o riciclato.*



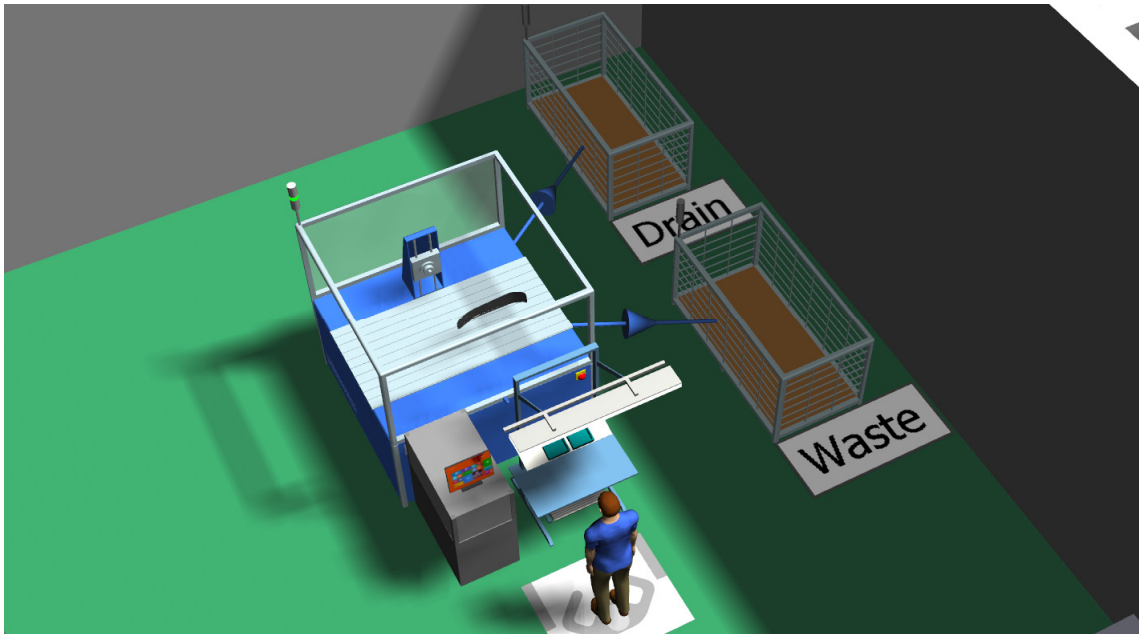


Figura 4.29. Il reparto qualità e gli scarti produttivi

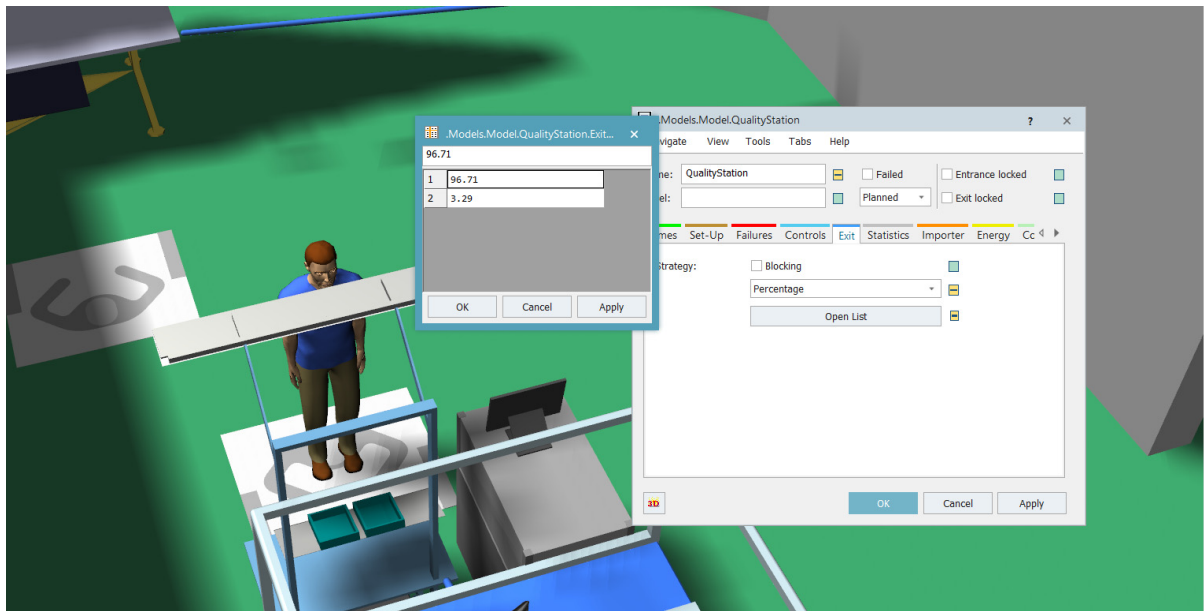
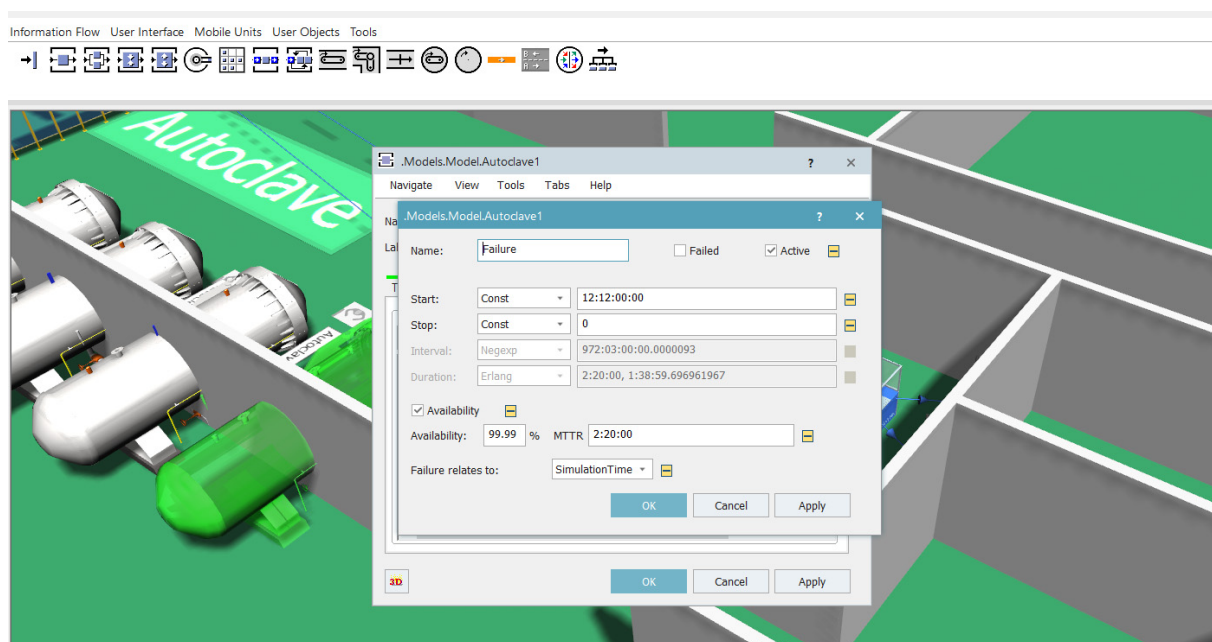


Figura 4.30. Il reparto qualità e gli scarti produttivi: l'interfaccia

Infine, poiché la probabilità di creazione di *pezzi non conformi* dipende anche dalla salubrità della macchina, si è inserito un sistema di **manutenzione** programmata (sotto forma di “Failures”) al CNC e agli autoclave, al fine di creare una situazione in cui una porzione del tempo simulativo venisse dedicata alla pulizia delle stazioni.

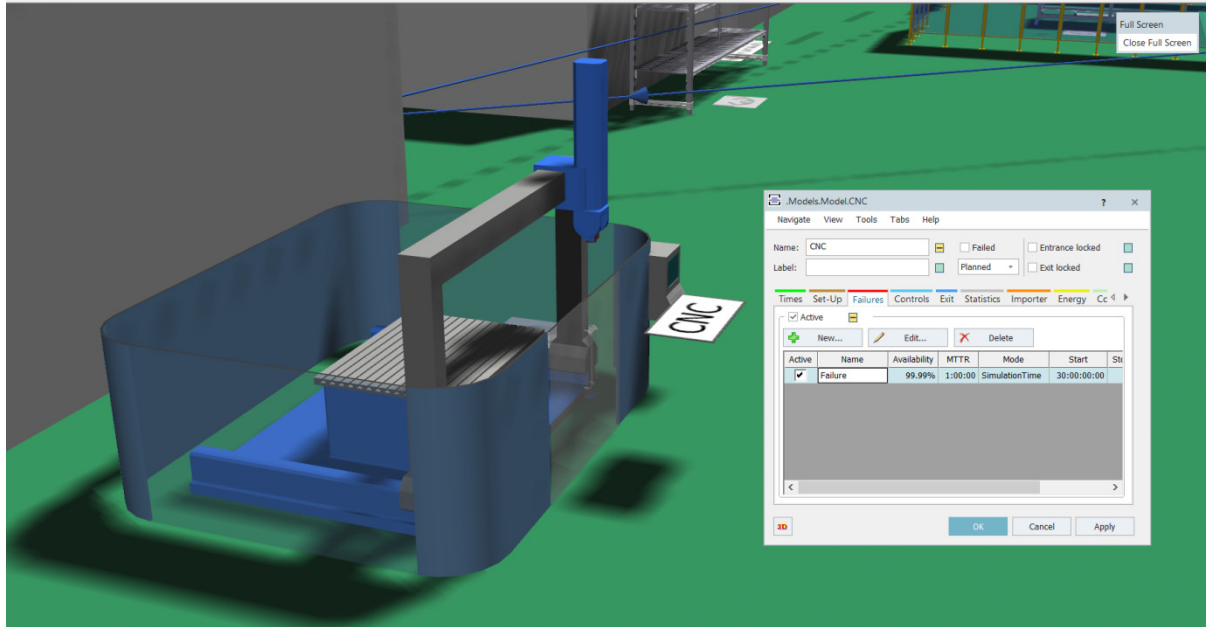
Per l'autoclave, si tratta prevalentemente di pulizia della camera di incubazione. Ogni Autoclave ha specifiche proprie e dettagliati metodi di manutenzione. Poiché i dati sui modelli non sono stati forniti per un discorso di privacy aziendale, si è cercato comunque di restituire una metodologia di manutenzione programmata, senza dei guasti improvvisi.

*Statisticamente, la pulizia avviene ogni 100 cicli di lavorazione (nel caso del solo Crash Box, ogni 12 giorni circa, con un tempo di manutenzione di 2 ore e 20 minuti) e trattandosi di manutenzione programmata, la disponibilità della macchina risulta essere del 99,99%.*



*Figura 4.31. Il sistema di manutenzione del reparto autoclave*

Nel caso del CNC, la situazione è ancor più specifica. Trattandosi di una macchina complessa, che oltretutto compie lavorazioni specializzate, si considera una manutenzione mensile, della durata di 1 ora (Fig.4.32).



*Figura 4.32. Il sistema di manutenzione del CNC*

Questa situazione generalistica offre uno spunto di riflessione sulle modalità di prevenzione attraverso la simulazione software.

Il processo sfrutta il CNC e l'autoclave, che sono fondamentali per la resa meccanica del pezzo. Una manutenzione negligente è alla base di un processo deleterio nei confronti della resa del prodotto. Più avanti si analizza anche questo aspetto.

#### **4.2.2 ANALISI DEI TEMPI DI MOVIMENTAZIONE**

Di seguito sono riportate delle tabelle (Fig. 4.33) che evidenziano la porzione di alcune tempistiche in percentuale relativa alle stazioni, presentando in particolare i tempi di attesa che dipendono quasi esclusivamente dalla fase di laminazione, identificabile come collo di bottiglia.

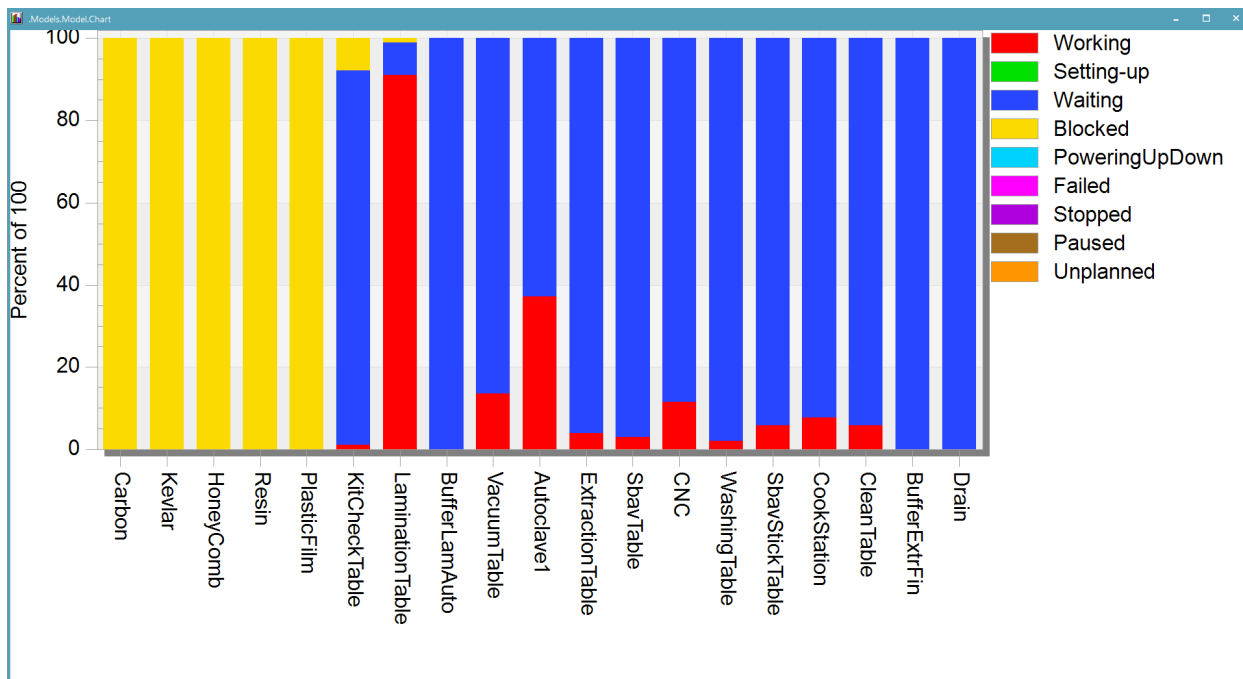


Figura 4.33. Il sistema di manutenzione del CNC

Da questa base è possibile riassumere l'attività giornaliera degli operatori ottenendo una visione astratta dei processi, tuttavia in questo particolare caso, che riguarda un'azienda orientata più all'artigianato che ad un contesto strettamente industriale, i miglioramenti possibili dipendono da fattori estranei al processo in sé, ma impliciti al lavoro degli operatori. Ad esempio, il miglioramento della qualità dipende da una riduzione del tasso di scarto, che si ha maggiormente nel reparto estrazione a causa della necessità dell'operatore di "forzare" (ovvero di imprimere una forza mediante martelli, con una leva o a mani nude) il pezzo ad uscire dallo stampo.

*Un'occasione utile è quella di ridurre i tempi di trasporto o addirittura ridurre le movimentazioni. In tal caso una soluzione plausibile sarebbe quella di condividere alcuni dei depositi tra i reparti.*

Appena compiute le fasi nel reparto i-esimo il pezzo viene stoccato su uno scaffale, ma anziché essere dislocato, esso collega i reparti o zone di viabilità. Per esempio, il deposito laminazione, anziché trovarsi fuori dal reparto, esso è raggiungibile direttamente dall'operatore. Lo stesso ragionamento si può fare per il reparto estrazione, aggiungendo una scaffalatura dedicata al solo Crash Box.

Per diminuire ulteriormente le distanze, si è deciso di posizionare i banchi da lavoro del reparto laminazione il più vicino possibile al deposito. Ciò permette, oltre alla diminuzione delle tempistiche (Tab. 5.11) anche la distanza percorsa (103,5 metri rispetto ai 155,5 metri della situazione attuale).

Inoltre, tale soluzione permette di lasciare libera la viabilità principale per i pezzi dalle dimensioni più importanti al cospetto di una movimentazione snella dei pezzi meno ingombranti.

*Tabella 5.7 Dettaglio della movimentazione del reparto Laminazione*

<b>REPARTO LAMINAZIONE</b>	
Sistemi di movimentazione:	manuale
Numero di operai impiegati:	1
Ore turno lavorativo giornaliero:	8
Numero turni settimanali:	5
Tempo di passaggio da una stazione all'altra:	4 min

*Tabella 5.8. Dettaglio della movimentazione del reparto Autoclave*

<b>REPARTO AUTOCLAVE</b>	
Sistemi di movimentazione:	manuale e carrello elevatore
Numero di operai impiegati:	1
Ore turno lavorativo giornaliero:	8
Numero turni settimanali:	5
Tempo di passaggio da una stazione all'altra:	5 min

Tabella 5.9. Dettaglio della movimentazione del reparto Estrazione

<b>REPARTO ESTRAZIONE</b>	
Sistemi di movimentazione:	manuale e carrello elevatore
Numero di operai impiegati:	1
Ore turno lavorativo giornaliero:	8
Numero turni settimanali:	5
Tempo di passaggio da una stazione all'altra:	2 min

Tabella 5.10. Dettaglio della movimentazione del reparto Finitura

<b>REPARTO FINITURA</b>	
Sistemi di movimentazione:	manuale
Numero di operai impiegati:	1
Ore turno lavorativo giornaliero:	8
Numero turni settimanali:	5

Anche qui la simulazione giunge in soccorso, restituendo un report per le tempistiche relative alla movimentazione manuale. Il report si presenta sotto forma di tempistiche date dall'event controller che è l'orologio della simulazione e traccia ogni evento della simulazione (arrivo operatore, inizio operazione, ecc). Non restituisce direttamente i tempi in una tabella Excel (serve un codice in entrata abbastanza oneroso in termini di scrittura perché vanno indicate tutte le stazioni), tuttavia, è possibile visualizzarli nella sua interfaccia.

Nella tabella sottostante (Tab. 11) il “*tempo di movimentazione alla stazione successiva  $k + 1$* ” si riferisce al tempo minimo richiesto dall'operatore per il trasferimento del pezzo. Il calcolo è il seguente:

$$\text{Tempo di movimentazione}_{k+1} = \text{Tempo di arrivo}_{k+1} - \text{Tempo di partenza}_k \quad (4.1)$$

Il tempo di movimentazione alla stazione  $k+1$  è dato dalla differenza temporale tra il tempo indicato dall'event controller all'arrivo dell'operatore alla stazione  $k+1$  ed il tempo indicato dall'event controller alla partenza dell'operatore dalla stazione  $k$ .

Tabella 5.11. Dettaglio dei tempi di movimentazione restituite dal software

<b>Stazione</b>	<b>Tempo movimentazione alla stazione successiva layout standard</b>
Tavolo Controllo Kit Materia Prima	00:00:06
Tavolo Laminazione	00:00:45
Deposito Laminazione	00:00:33
Tavolo per il Sottovuoto	00:00:05
Autoclave	00:00:25
Tavolo per l'Estrazione	00:00:20
Deposito Estrazione	00:00:51
Tavolo Sbavatura	00:00:21
CNC	00:00:20
Tavolo per il lavaggio	00:00:06
Tavolo per l'Incollaggio	00:00:05
Forno	00:00:00
Tavolo per pulitura finale	00:00:08
Deposito Finitura	00:00:00
<b>TOTALE</b>	<b>00:03:57</b>

Da notare che i dati si riferiscono ai tempi minimi di raggiungimento della stazione successiva e che quindi non tengono in considerazione dell'efficienza dell'operatore nel caso reale.

Dunque, la mappatura del processo (Fig. 4.34) prevede la definizione del **Lead Time** (o tempo di attraversamento), e del **Tempo Ciclo** (TC) per ogni fase del processo produttivo in esame.

Nello specifico, il tempo di attraversamento di una fase di un processo produttivo è l'intervallo di tempo che intercorre dal momento in cui sono disponibili i prodotti in input, a quando è disponibile il prodotto in output (il primo elemento del lotto). Operativamente si può marciare un materiale di ingresso e cronometrare il tempo che impiega a uscire dalla fase considerata.

Il Lead Time di approvvigionamento viene definito, invece, come l'intervallo di tempo che intercorre dal momento in cui viene ordinata la merce a quando essa è disponibile per la produzione.

Il **tempo totale di produzione** è definito come il tempo di attraversamento cumulativo di un prodotto, dal momento in cui vengono ordinate le materie prime a quello in cui esse vengono trasformate in prodotto finito, passando attraverso le varie fasi del processo.

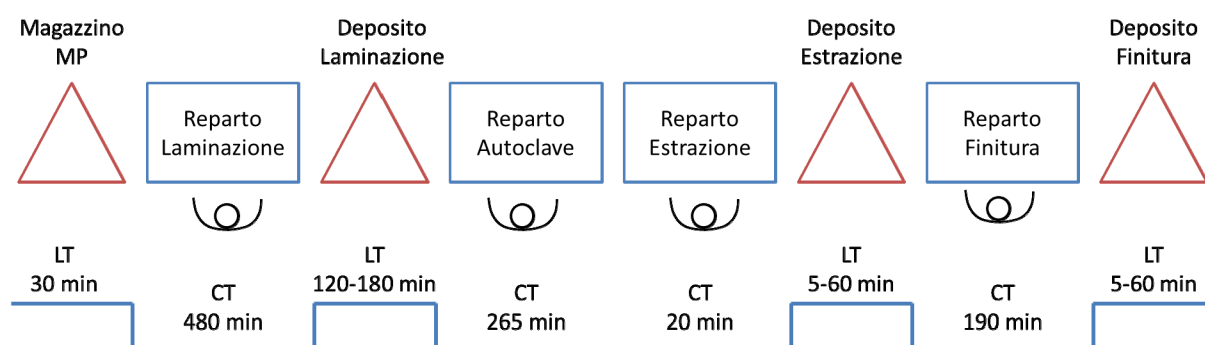


Figura 4.34. Value Stream Mapping attuale

Dall'analisi svolta si evidenzia che il **bottleneck** è il **Reparto Laminazione** con un TC pari a 480 minuti circa.

Dunque, poiché i tempi di lavorazione sono strettamente correlati all'attività manuale dell'operatore e non si può agire su di essi, il prossimo step prevede l'esecuzione di varie prove e simulazioni virtuali al fine di individuare gli interventi migliorativi utili a diminuire i tempi di movimentazione ed attraversamento del prodotto.



## 4.3 SIMULAZIONE VIRTUALE DEGLI SCENARI PRODUTTIVI



*Figura 4.35. Metodo di sviluppo di un modello di simulazione: La terza fase*

La prerogativa di miglioramento per ARStech concerne lo snellimento delle movimentazioni in termini di tempo e distanza percorsa per la realizzazione del CrashBox, nonché il monitoraggio delle attività di manutenzione delle macchine CNC.

Osservando la simulazione è intuibile che accorciare i tratti di consegna da un luogo all'altro è fondamentale. Su questa base ci si è concentrati quindi nell'ottimizzazione del trasporto manuale nei e tra i reparti. L'obiettivo delle simulazioni successive è quello di individuare e risolvere le anomalie o le carenze di posizionamento del CrashBox, il tutto proponendo gli spostamenti necessari per migliorare l'efficienza complessiva dell'area analizzata nei criteri logici stabiliti.

Di seguito sono elencate varie casistiche di natura strettamente concettuale:

- a) **Riorganizzazione del layout dei magazzini intraoperazionali**
- b) **Introduzione di un deposito dedicato**
- c) **Split di un'operazione**
- d) **Analisi della manutenzione**

### **4.3.1 RIORGANIZZAZIONE DEL LAYOUT DEI MAGAZZINI INTRAOPERAZIONALI (A)**

In questo primo caso particolare si è optato ad una condivisione diretta dei depositi con il tratto di viabilità principale. L'utente, in questo caso, non deve necessariamente lasciare il reparto in cui opera, poiché il pezzo lavorato viene consegnato immediatamente, senza andare a occupare la viabilità principale. Altresì, l'operatore che giunge in deposito può facilmente reperire il pezzo per le lavorazioni da compiersi nel reparto successivo.

Nella situazione attuale è plausibile considerare come candidati per l'ottimizzazione, i depositi di *Laminazione* e di *Estrazione*. Concettualmente il modello si presta come riportato in Fig. 4.36, 4.37, 4.38, e 4.39.

### *Deposito Laminaione*

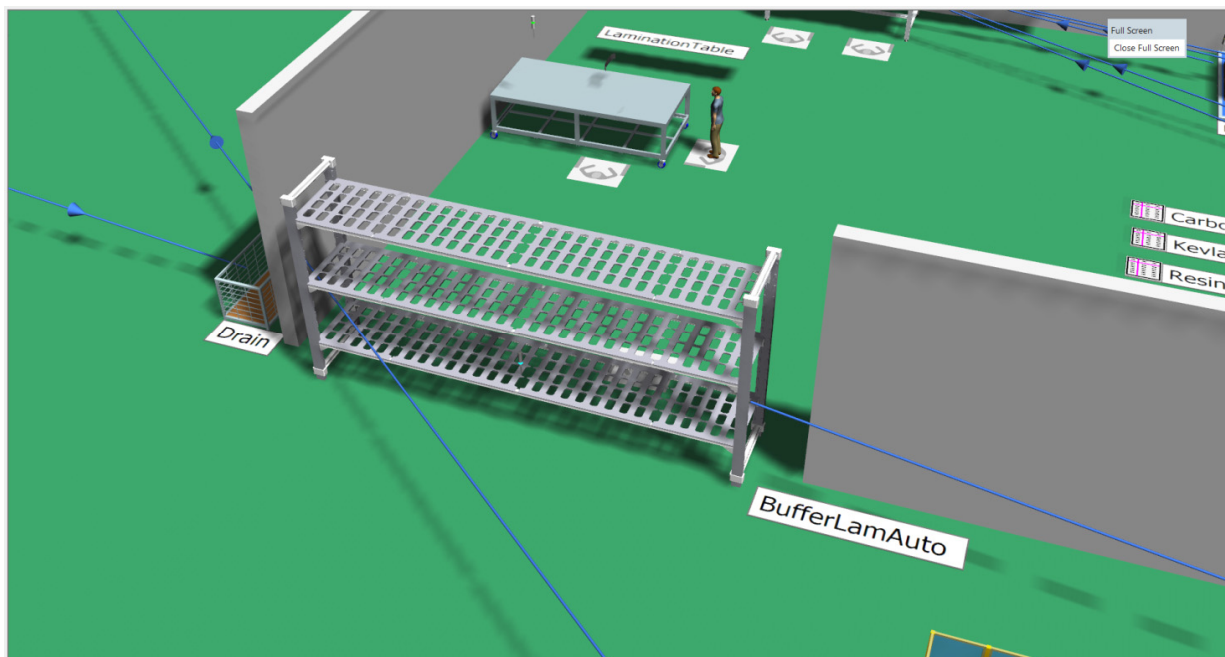


Figura 4.36. Modifiche Reparto\_Laminazione

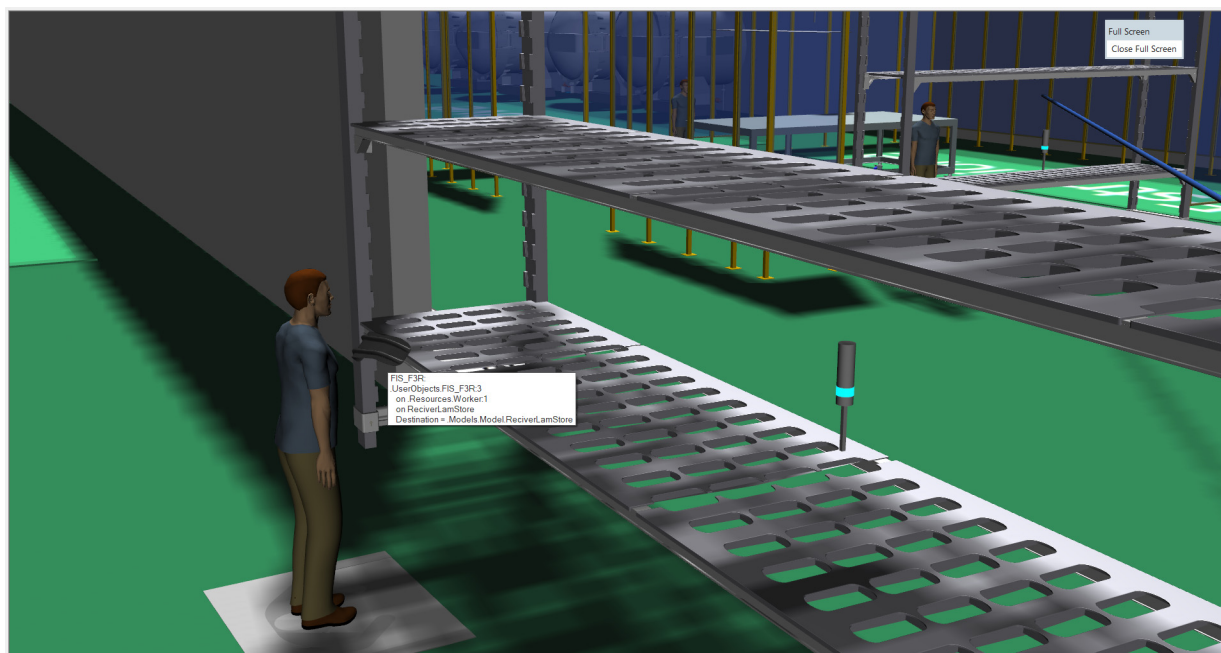


Figura 4.37. Modifiche Reparto\_Laminazione

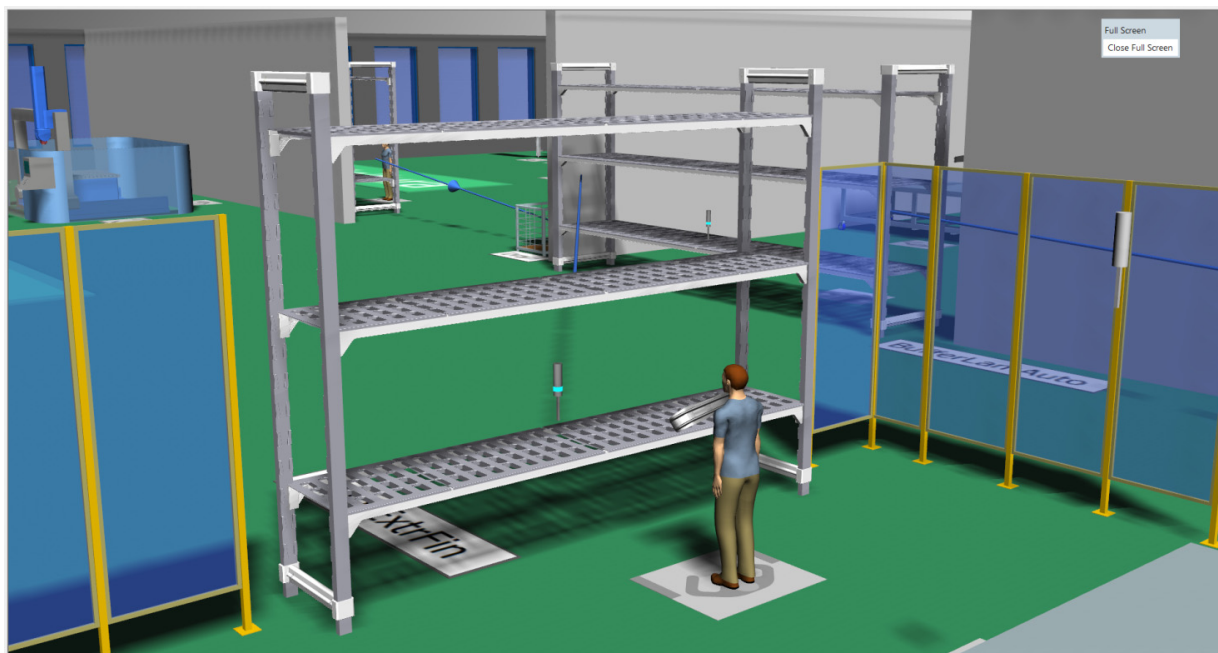


Figura 4.38. Modifiche Reparto\_Estrazione

Infine, poiché in laminazione ci sono più stazioni per le lavorazioni, si è ipotizzato che spostando i tavoli dedicati al CrashBox, fosse possibile ottimizzare ulteriormente il layout. La Fig. 4.39 concettualizza l'idea, mostrando che le stazioni sono state posizionate il più vicino possibile al deposito.

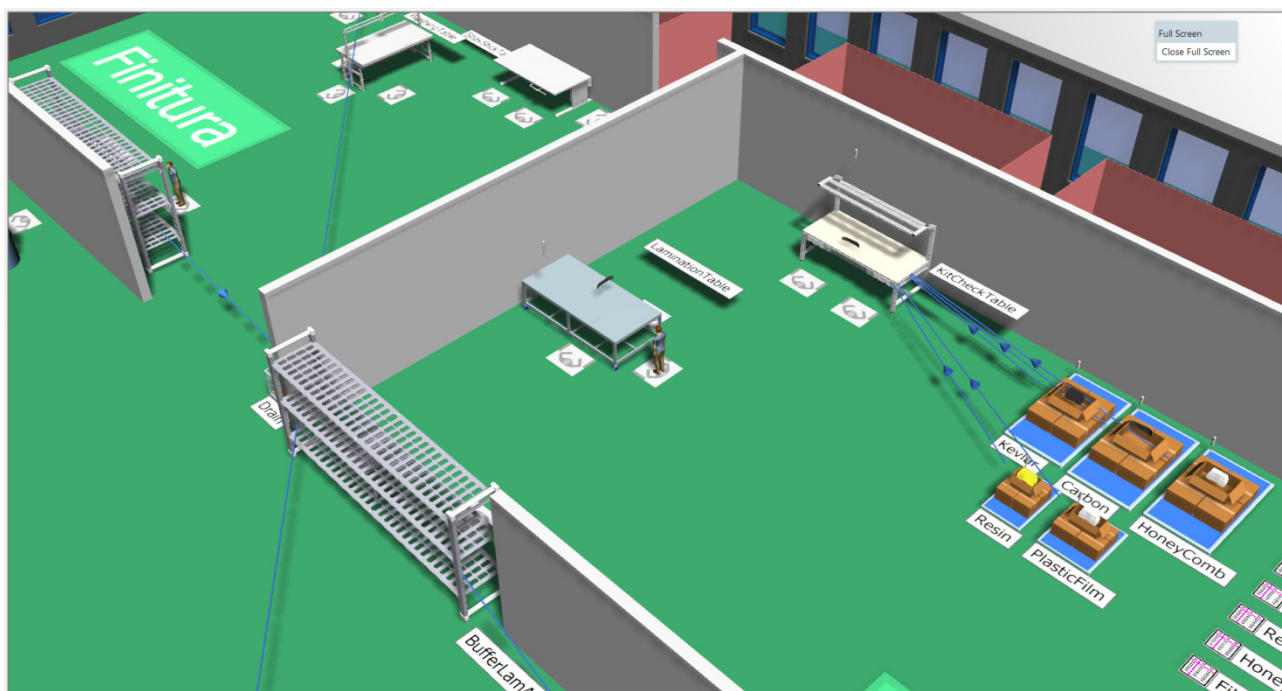


Figura 4.39. Modifiche Stazioni per la Laminazione

Realisticamente parlando, la realizzazione di questo tipo di layout pecca se nel contesto non è possibile modificare il muro interno.

Tuttavia, questo tipo di layout presenta dei vantaggi in termini di praticità:

Anzitutto esso ottimizza il trasporto nei reparti e snellisce quello tra i reparti. Di fatto, l'operatore dedito al CrashBox, muovendosi in una regione contenuta, non occuperebbe altri percorsi di viabilità, necessari per pezzi dalle dimensioni più generosi ed ingombranti.

Inoltre, la distanza percorsa misurata per tutto il ciclo di produzione decresce notevolmente, complessivamente da 159,7m si passa a 130,50m.

Tale soluzione permette di concentrare il tempo del personale di deposito sulla simulazione rapida e flessibile di scenari di layout ottimali, riducendo il tempo dedicato alle operazioni manuali.

Inoltre, si può portare ad una serie di ulteriori miglioramenti sia a livello qualitativo che quantitativo. Ad esempio, un miglior posizionamento dei prodotti rispetto ai percorsi di preparazione, la riduzione dei tempi di preparazione e la riduzione delle movimentazioni, e di conseguenza dei possibili danneggiamenti del prodotto.

Infine, tale soluzione consente agli operatori di depositare i pezzi nel magazzino verticale che direttamente possono essere prelevati da chi si trova nell'area autoclave, senza che l'operatore del reparto Laminazione faccia il percorso reale dalla propria postazione di lavoro al deposito. Allo stesso modo si ipotizza il deposito estrazione leggermente spostato verso il reparto estrazione, al fine di diminuire la distanza individuata attraverso varie e ripetute simulazioni.

#### **4.3.2 INTRODUZIONE DI UN DEPOSITO DEDICATO (B)**

Dallo stesso concetto visto in precedenza, anziché condividere l'intero deposito tra i reparti, si decide di introdurre un punto di accumulo aggiuntivo dedito al solo CrashBox, che in tal caso si tratta di un vero e proprio magazzino interoperazionale.

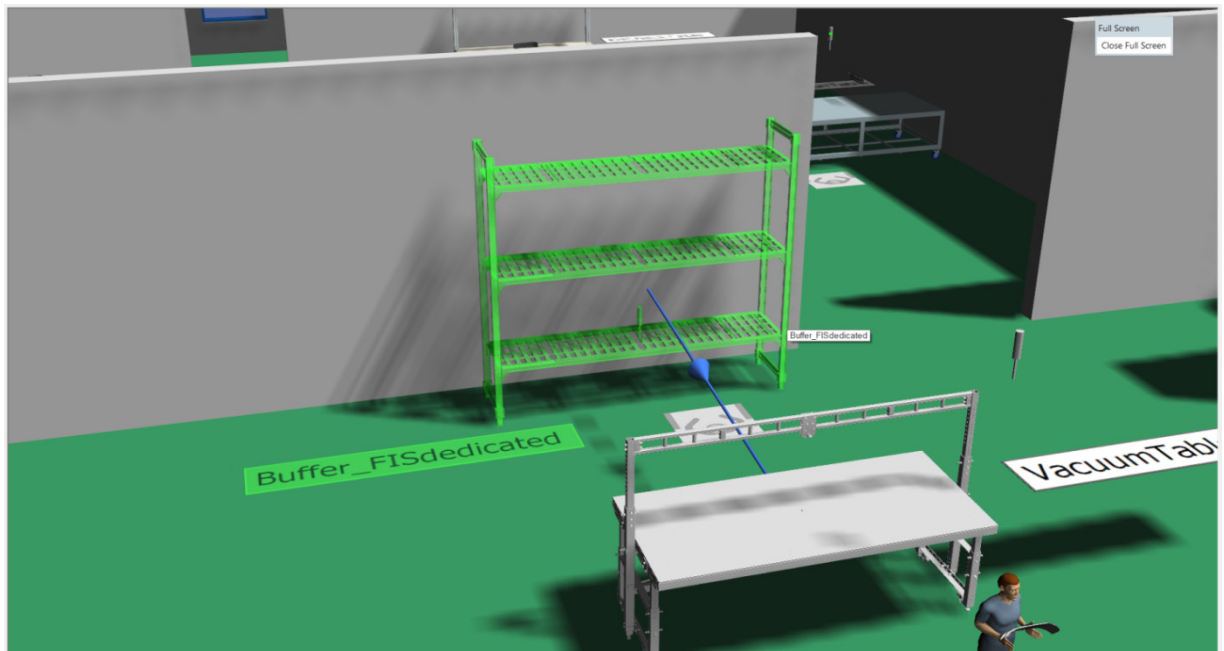


Figura 4.40. Magazzino dedicato

Altresì si è proceduto ad avvicinare le stazioni al magazzino, come evidenziato in Fig. 4.41.

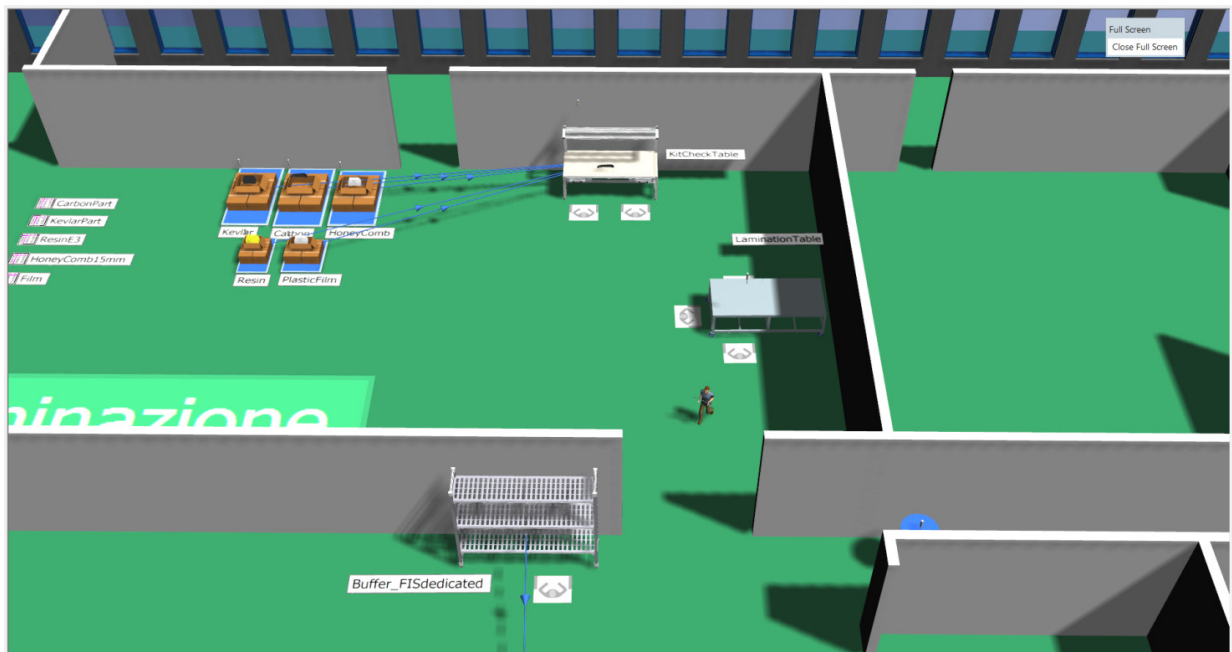


Figura 1.41. Stazioni ravvicinate

Questo supporto aggiuntivo al prodotto permette di snellire allo stesso modo la movimentazione, ma senza andare ad attuare modifiche invasive come l'apertura del muro. Inoltre questo deposito si

posizionerebbe proprio all'uscita del reparto Laminazione e ciò comporta una diminuzione ulteriore della distanza percorsa

È plausibile pensare, inoltre, che la separazione del CrashBox dagli altri pezzi potrebbe comportare un miglioramento qualitativo non trascurabile in termini di responsabilità operative. Ad esempio, un operatore potrebbe posizionare in maniera non corretta uno dei pezzi prodotti e causare delle contingenze o dei veri e propri rallentamenti di flusso oltre a potenziali danni ai prodotti. Con questo deposito dedicato, non solo preverrebbe questo tipo di problemi, ma esonerebbe automaticamente l'operatore dedicato da eventuali responsabilità che non gli competono.

Se si applicasse un punto di accumulo dedicato a tutte le zone di deposito, questo miglioramento qualitativo si applicherebbe a tutto il ciclo e non solo alla sola fase di storage nel deposito Laminazione.

#### **4.3.3 SPLIT DI UN'OPERAZIONE (C)**

Come si nota in Fig. 4.34, l'operazione relativa alla laminazione funge da collo di bottiglia (o bottleneck) con circa 480 minuti di lavorazione. Attualmente l'attività di laminazione viene realizzata completamente da un unico operatore esperto.

La politica è la seguente: l'operatore che inizia la laminazione è lo stesso che la termina. *Tuttavia, potrebbe essere utile splittare la laminazione in due fasi diverse, associando quindi due operatori: uno per ogni fase di laminazione.*

Studiando il dettaglio dell'operazione si individuano due attività principali:

- I. Laminazione di Prima pelle
- II. Laminazione di seconda pelle

Entrambe le lavorazioni sono eseguite da un solo operatore. Esso si occupa di entrambe le laminazioni, anche perché è intuibile che la progressione sulle applicazioni dei vari strati di carbonio, honeycomb e kevlar necessiti di alcune accortezze (come l'orientamento delle fibre), che un altro operatore non familiare al CrashBox può non rispettare. Se però si garantisse il flusso informativo sulla costruzione del pezzo, entrambi gli operatori lavorerebbero efficientemente.

Se si realizzasse ciò, sarebbe possibile realizzare uno "split" delle lavorazioni, così da permettere ai due operatori di lavorare parallelamente in reparto, con una conseguente riduzione del tempo ciclo.

Si ipotizzano quindi 2 operatori dedicati:

OP 1) operazione di laminazione di prima pelle ed inserimento honeycomb

OP 2) operazione di laminazione di seconda pelle ed inserimento del fabric breather

L'idea è che l'operatore 1 inizia la laminazione di prima pelle ed inserisce l'honeycomb. Al termine del sottovuoto, estrae il costrutto carbonio-core e lo consegna ad un'altra stazione, dove l'operatore 2 esegue la laminazione di seconda pelle, così da creare il costrutto finale, composto dall'aggregazione "Carbonio- Core- Kevlar" da consolidare con un altro sottovuoto semplice. Il pezzo viene poi depositato da questo stesso operatore, pronto per la lavorazione nel reparto Autoclave.

Si specifica che attualmente l'operazione di laminazione è eseguita da un solo operatore e tale è la filosofia aziendale attuale. Tuttavia, l'analisi di uno scenario diverso risulta sempre molto interessante.

Ovviamente tale ipotesi comporta sia vantaggi in termini di diminuzione del tempo ciclo (TC) del reparto laminazione che l'aumento del costo della manodopera dedicata. È importante quindi individuare il giusto *trade-off* tra tempi e costi di lavorazione.

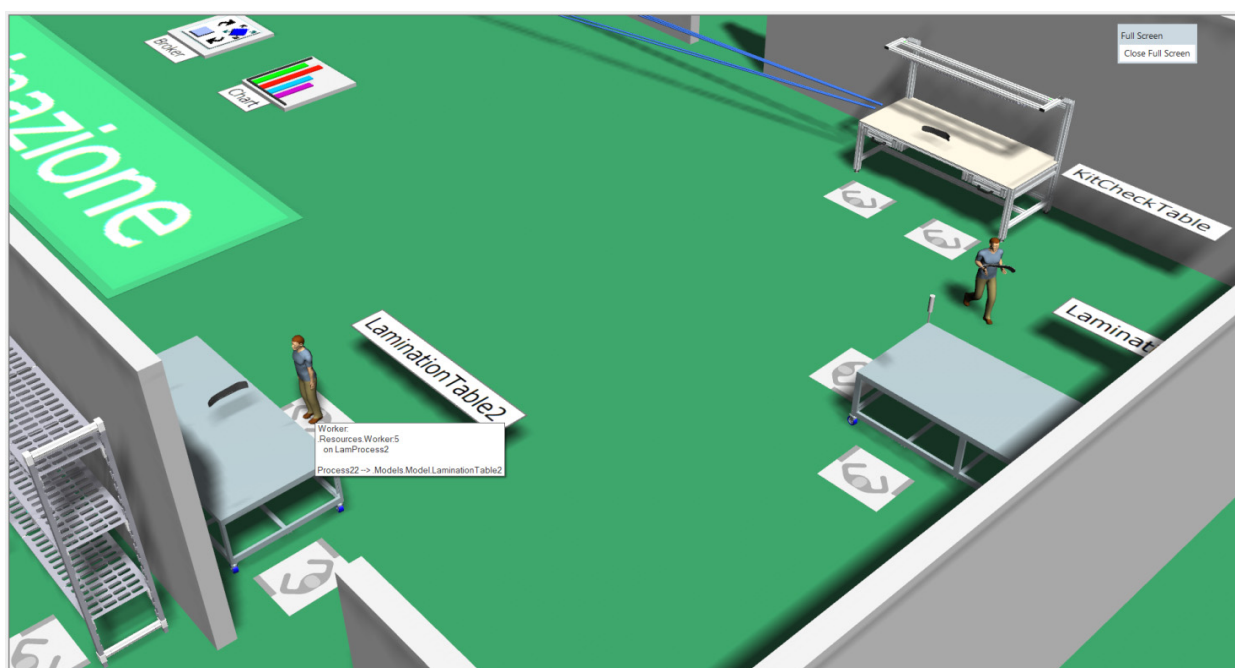


Figura 4.42. Split dell'operazione di laminazione

Il collo di bottiglia diventa quindi di 4h e 50m e il tasso di occupazione delle macchine nell'impianto rispetto al processo è di seguito mostrato:

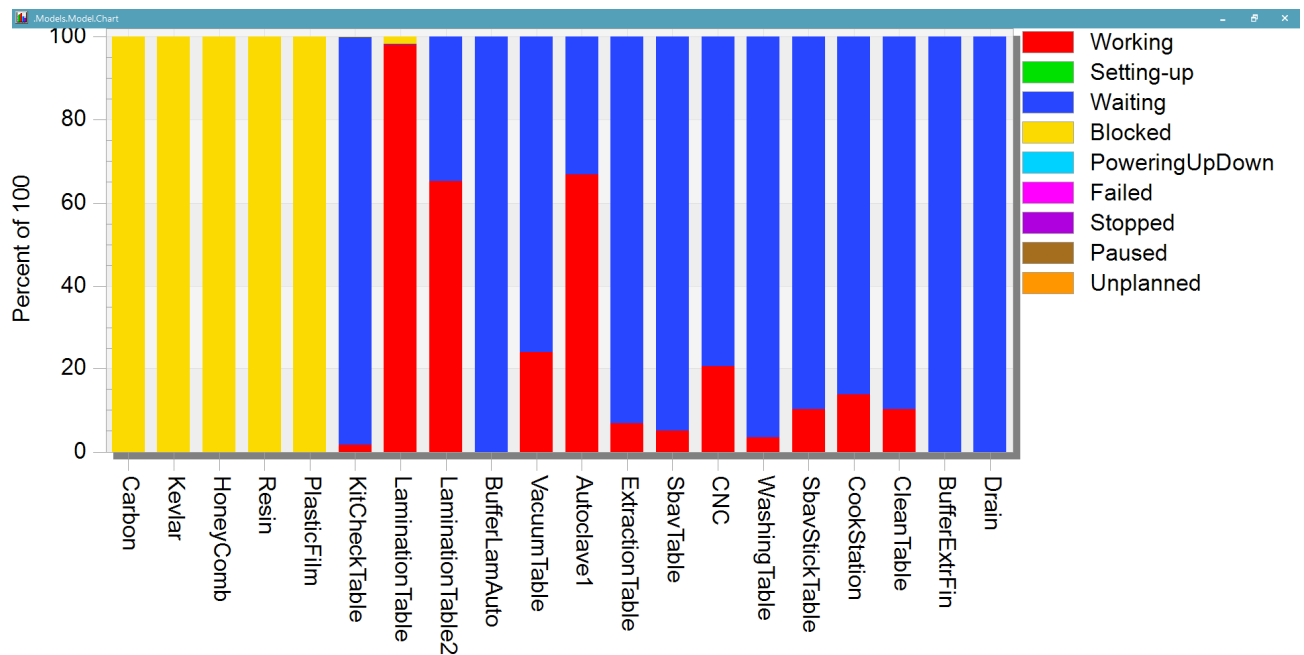


Figura 4.43. Analisi dell collo di bottiglia

#### 4.3.4 ANALISI DELLA MANUTENZIONE (D)

Si considera ora una simulazione base, avente però lo scopo di prevedere l'influenza di manutenzioni preventive e non sull'intero processo.

Un'analisi preventiva di determinati guasti o manutenzioni sistematiche, anticipa ciò che può verificarsi in caso in cui le macchine subiscano delle manutenzioni obbligatorie, in modo da attuare, sulla base dei risultati ottenuti, una strategia di supporto alla problematica.

Per avvalorare quanto detto, si è proceduto basandoci sulle **manutenzioni preventive** delle macchine dedicate al processo.

Le manutenzioni avvengono per l'autoclave ogni 12 giorni e per il CNC ogni mese, tuttavia, ci possono essere circostanze in cui l'impianto può smettere di funzionare a dovere. Per questo si sono condotti degli esperimenti sulle stesse macchine in modo da osservare, lungo tutto il tempo definito per la simulazione alcuni dati prioritari:

- *Percentuale di tempo operativo*
- *Percentuale di tempo di guasto*
- *Numero guasti*
- *Numero di pezzi in uscita*



Questi dati fungono come risultato ad esperimenti coinvolti. Per questo si è dovuto impostare tramite il tool “**experiment manager**” i suddetti dati Output.

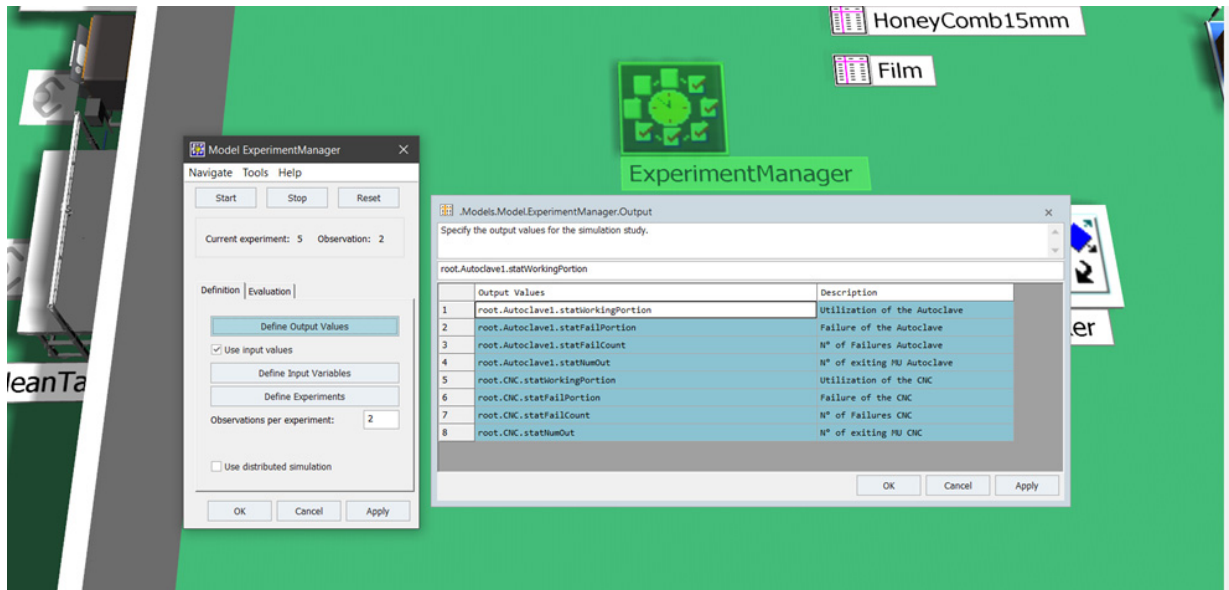


Figura 4.44 Tool “Experiment manager”

I valori di output fanno riferimento agli attributi da visualizzare ad esperimento compiuto, i quali sono generati da delle condizioni che sono state imposte come input.

Nel nostro caso si è andata a considerare la disponibilità. Realisticamente, al diminuire della disponibilità, aumenta il tempo di fermo macchina che nello specifico fa riferimento al tempo di manutenzione e al numero di interventi.

Si sono quindi impostati i dati in input, specificando l’attributo “Availability” per le stazioni d’interesse e si sono definiti gli esperimenti da condursi:

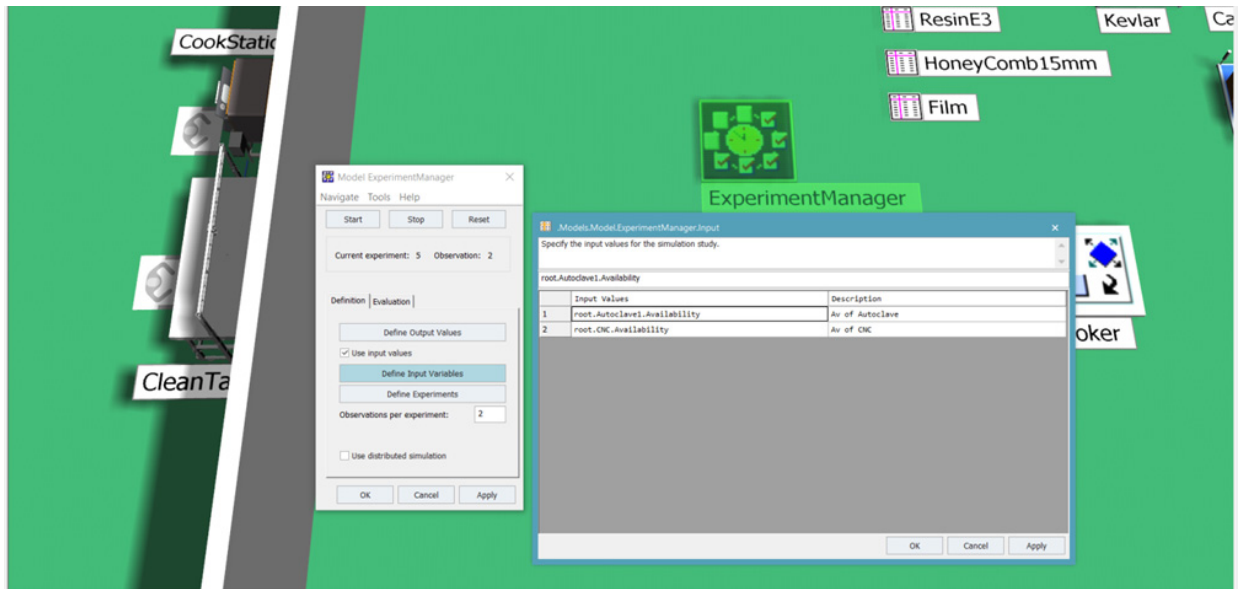


Figura 4.45. Impostazione dei dati in Input

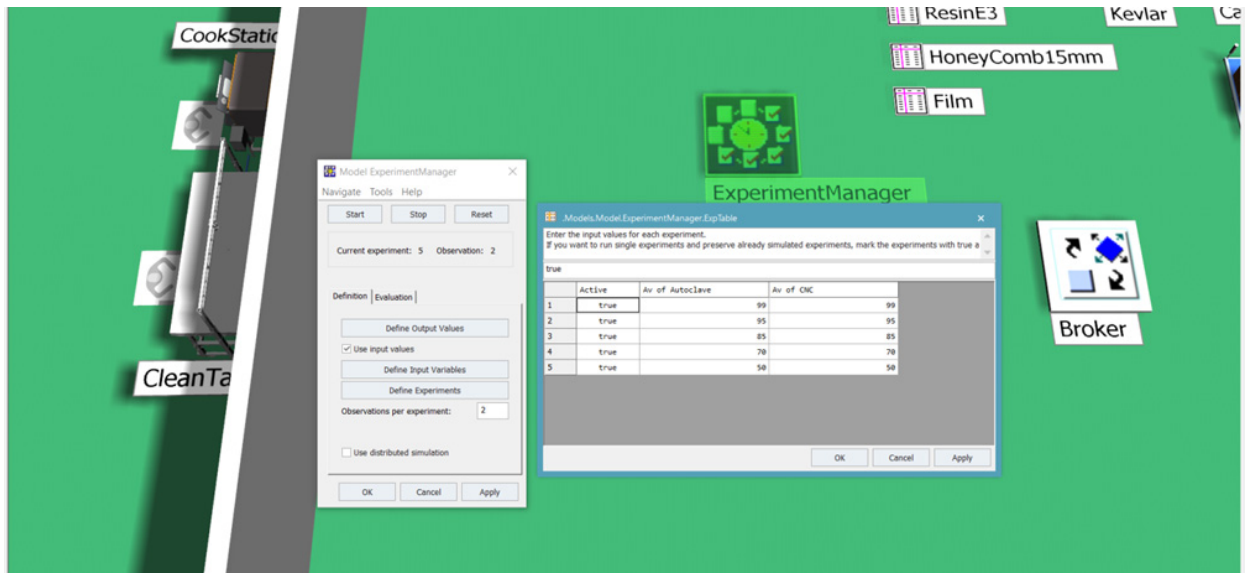


Figura 4.46. Impostazione degli esperimenti

Nel dettaglio, si riporta in Tab. 5.12 la disponibilità proposta ad ogni esperimento:

Tabella 5.12. "Availability" degli esperimenti

	Av. Autoclave	Av. CNC
Experiment 1	99	99
Experiment 2	95	95

Experiment 3	85	85
Experiment 4	70	70
Experiment 5	50	50

Plant Simulation, tramite il tool, va quindi a calcolare per ogni dato fornito, i valori di output che sono stati definiti in precedenza. Il calcolo statistico avviene simulando per un numero pari al numero di osservazioni per esperimento, anch'esse prefissate. Ovviamente, tanto maggiore è il numero di osservazioni, tanto più alta è l'accuratezza del risultato. In questo caso, sono state imposte 10 osservazioni e perciò il report finale è compiuto al termine di **50 simulazioni**.

**Overview**

Overview of all executed experiments, their parametrizations and the mean values of the target values.

	Av of Autoclave	Av of CNC	Utilization of the Autoclave	Failure of the Autoclave	N° of Failures Autoclave	N° of exiting MU Autoclave	Utilization of the CNC	Failure of the CNC	N° of Failures CNC	N° of exiting MU CNC
Exp 1	99	99	0.390951471215227	0.0283262142303764	119.6	173	0.120416666666667	0.00714011970617121	9.9	173.4
Exp 2	95	95	0.37480676159648	0.0587073779286779	135	165.9	0.116458333333333	0.0254524451506073	34.9	167.6
Exp 3	85	85	0.233891723703107	0.136887029571133	172.9	103.6	0.070347222222223	0.0778033426966886	107.1	100.4
Exp 4	70	70	0.133836805555555	0.256925465345492	233.4	59.3	0.039305555555556	0.151531898818677	213	55.6
Exp 5	50	50	0.112621527777778	0.413497673889311	308.9	49.8	0.033333333333334	0.247323149228764	355.3	47

Simulation effort: 5 experiments with 50 simulation runs  
No special diagrams

Figura 4.47. Gli output della simulazione

La tabella estratta dal software Plant Simulation (Fig. 4.47) restituisce i dati di output prescritti in fase di costruzione sperimentale e l'analisi della suddetta verrà effettuata nel successivo capitolo.

Di seguito, invece, verranno mostrati dei grafici prodotti dall'esperimento, che delineano la distribuzione statistica dei valori prodotti.

In generale, i grafici mostrano in relazione all'esperimento designato, i quartili.

Il primo ed il terzo quartile suddividono il valore minimo dal massimo, mentre il secondo indica la mediana. Il punto, invece, descrive il valor medio della distribuzione; tale valore è mostrato nella tabella sotto le rispettive voci di output.

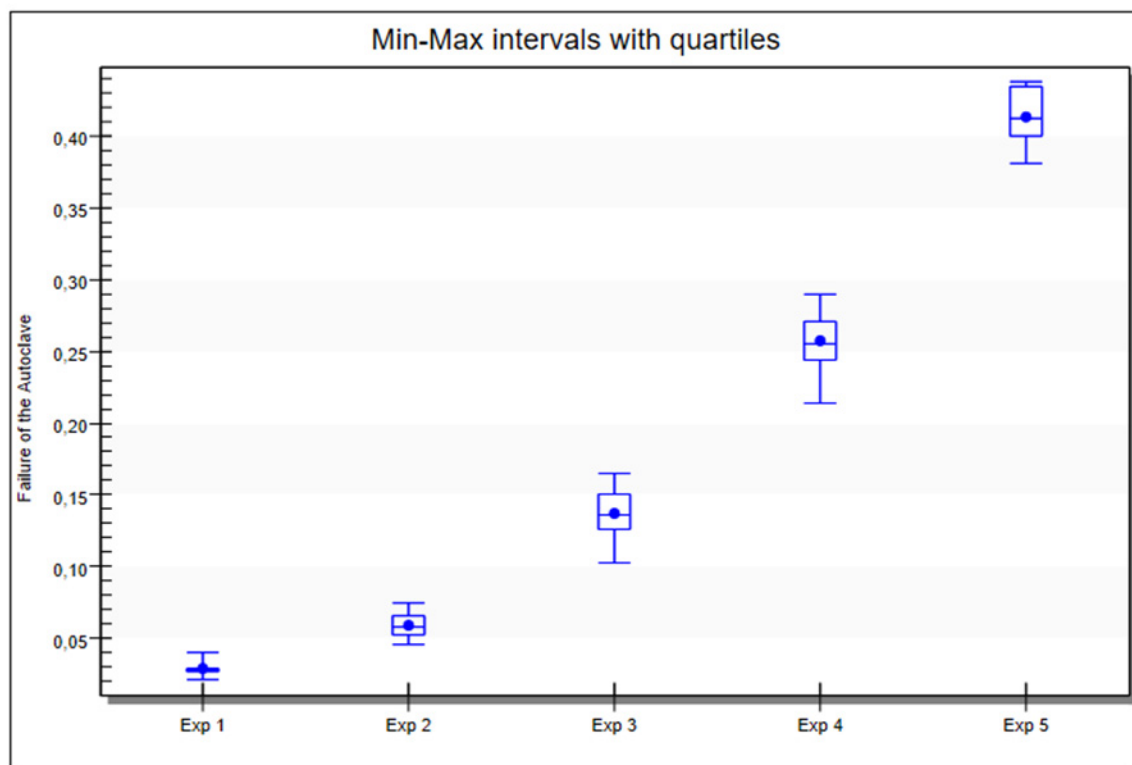
La comprensione e l'intuitività di questi grafici è utile qualora si vogliano osservare composizioni e distribuzioni concrete dei dati. In particolare, potrebbero essere sfruttati come test predittivi nel ramo del data mining per trovare correlazioni con dati in possesso.

Un esempio banale potrebbe essere la necessità di classificazione di guasti potenziali, correlando i valori forniti dai sensori di telemetria, dei report qualitativi con le statistiche prodotte dalla simulazione.

Di seguito vengono visionati i grafici nel dettaglio.

- **Porzione di tempo di manutenzione**

*Evaluations of the output value 'Failure of the Autoclave'*



*Figura 4.48. Distribuzione statistica dei failures del reparto Autoclave*

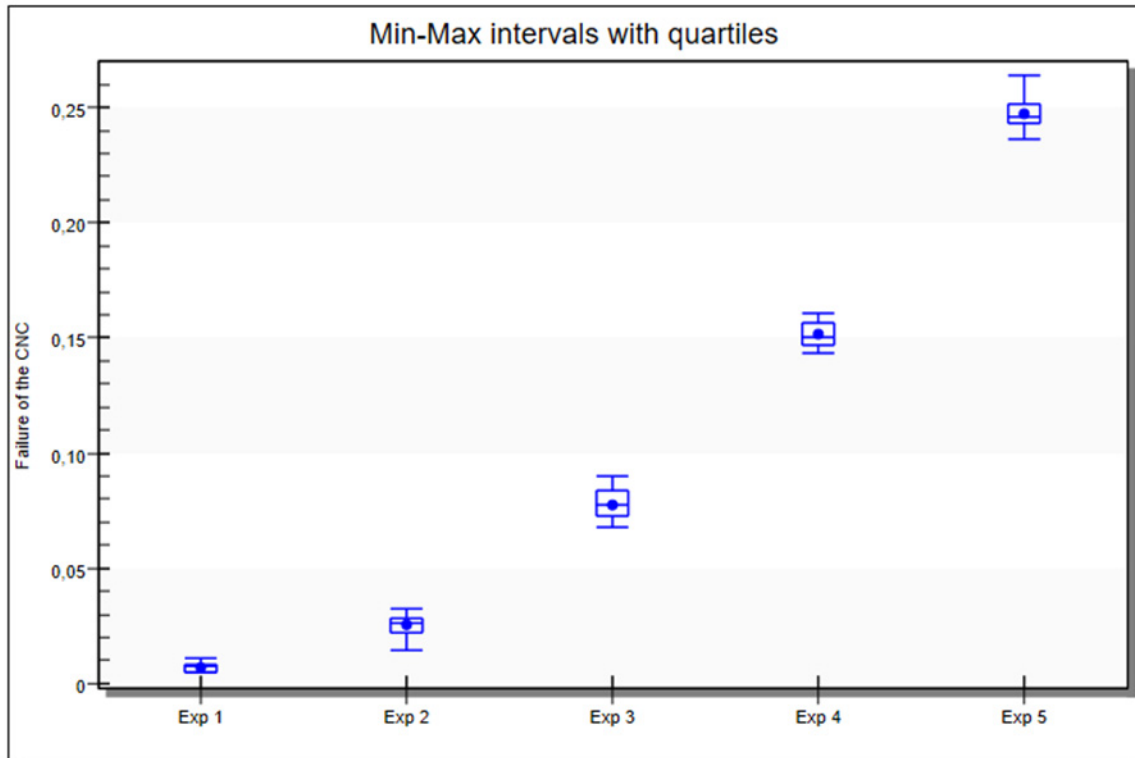


Figura 4.49. Distribuzione statistica dei failures del reparto CNC

La porzione del tempo manutentivo viene intesa come intervento straordinario dal software, che mediante le funzionalità “Failure” descrive in linea probabilistica quando un intervento deve verificarsi e quando deve terminare. Di conseguenza, ciò produce un intervallo di tempo, che in fase di simulazione viene conteggiato e rapportato al tempo ciclo della singola macchina. La porzione del tempo impiegato, cresce intuitivamente col numero di interventi richiesti, tanto che se risultasse eccessivo, potrebbe bloccare l'intero processo. Questa statistica è utile ad un rapporto di tempo perso per le manutenzioni.

- **Numero di interventi**

Il tempo di manutenzione è direttamente proporzionale alla quantità di interventi riscontrati nel tempo ciclo, specie se di entità simile, ovvero aventi le stesse caratteristiche in termini di durata, frequenza e probabilità di accadimento. In questo caso, si sono ipotizzati, di fatto interventi della stessa fattura.

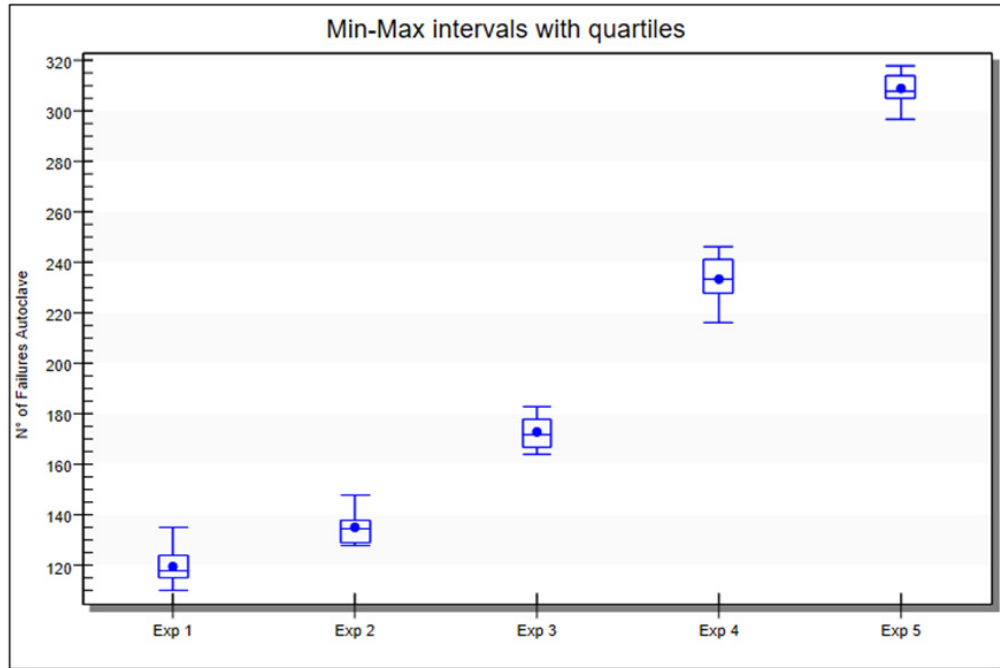


Figura 4.50. Distribuzione statistica del numero di interventi nel reparto Autoclave

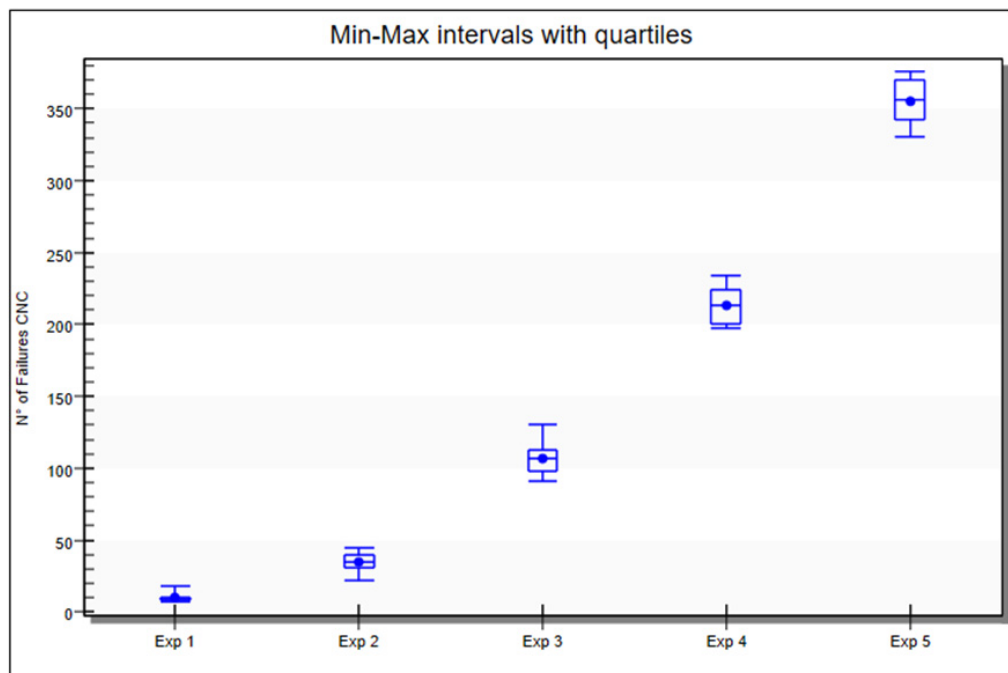


Figura 4.51. Distribuzione statistica del numero di interventi nel reparto CNC

- **Porzione di tempo di lavorazione effettiva**

La conseguenza diretta all'aumento dei tempi di manutenzione è che l'utilizzazione della macchina decresce al diminuire della disponibilità. Si può notare un trend negativo a forma di sella decrescente al progredire degli esperimenti.

**Evaluations of the output value 'Utilization of the Autoclave'**

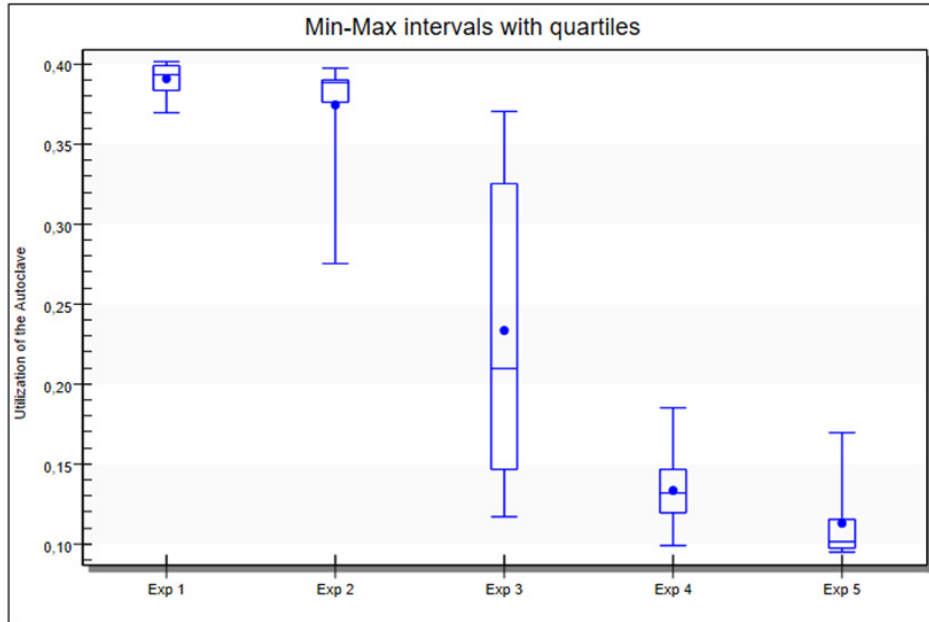


Figura 4.52. Distribuzione statistica del tempo di lavorazione del reparto Autoclave

**Evaluations of the output value 'Utilization of the CNC'**

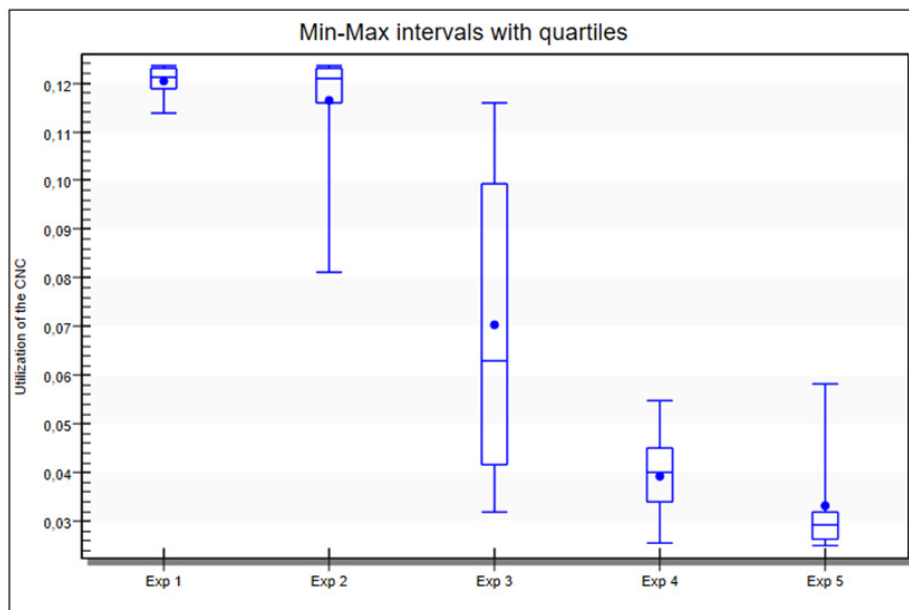


Figura 4.53. Distribuzione statistica del tempo di lavorazione del reparto CNC

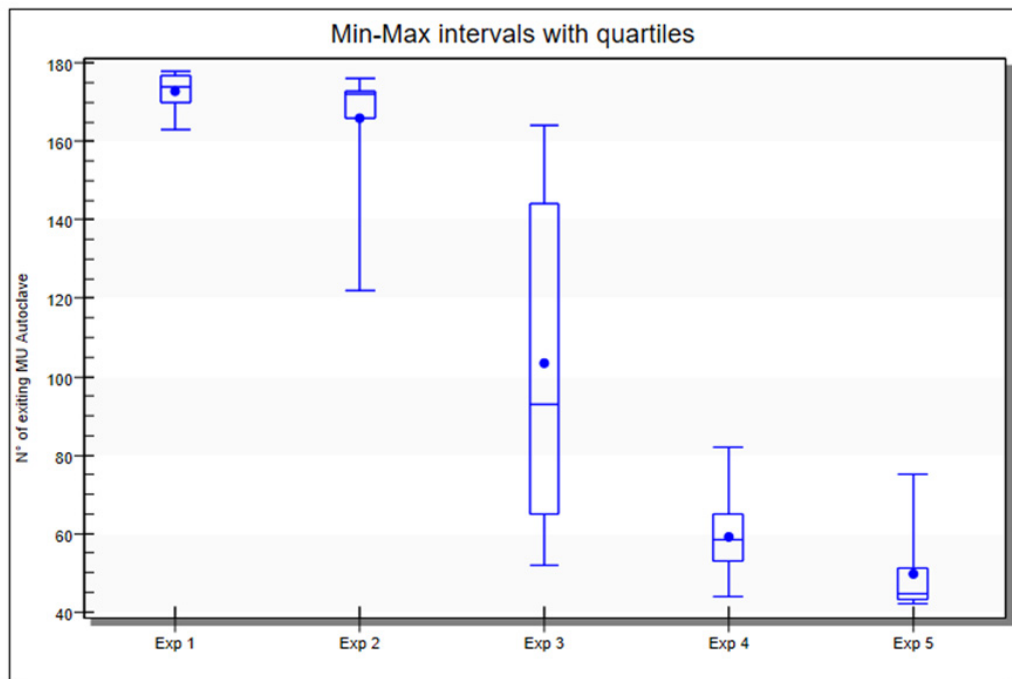
- **Numero di pezzi uscenti**

La statistica seguente mostra i quartili della distribuzione del numero di pezzi effettivamente realizzati dalla macchina.

Giunti al dato più impattante, questo valore di output fornisce un trend (ovviamente) negativo, effettivamente legato al tempo di effettiva lavorazione, che diminuisce all'aumentare degli interventi.

Tale dato è essenziale per tracciare i livelli di produttività.

**Evaluations of the output value 'N° of exiting MU Autoclave'**



*Figura 4.54. Distribuzione statistica dei pezzi in output nel reparto Autoclave*



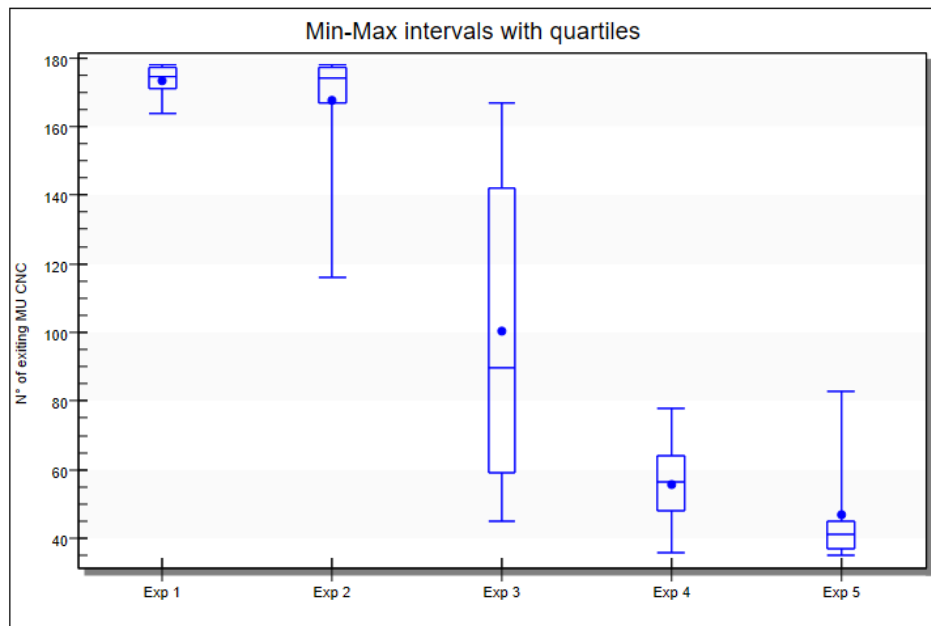


Figura 4.55. Distribuzione statistica dei pezzi in output nel reparto CNC

## 4.4 VALUTAZIONE DEI RISULTATI



Figura 4.56. Metodo di sviluppo di un modello di simulazione: La quarta fase

Per ogni corsa di simulazione proposta è stato definito un modello analitico per il calcolo dei:

- ❖ **Tempi di movimentazione**
- ❖ **Costi del processo**
- ❖ **Efficienza di flusso**

Nello specifico il calcolo dei tempi di movimentazione avviene utilizzando gli output del software Plant Simulation.

La formula dei costi utilizzata è la seguente:

$$C = c * \left[ \sum_{i=1}^n (t_i * d_i) + \sum_{k=1}^w (f_k) \right] + \sum_{i=1}^n (t_i * d_i) \quad (4.2)$$

Con

$C$  = Costo orario operatore

$t_i$  = Tempo lavorazione stazione  $i$ -esima

$d_i$  = N° di operatori presenti alla stazione  $i$ -esima

$l^j$  = Costo della materia prima  $j$ -esima

$q^j$  = Quantità di materia prima  $j$ -esima

$f_k$  = Tempo di movimentazione  $k$ -esima

Infine, l'efficienza di flusso, o Flow Efficiency:

$$\text{Flow Efficiency} = \frac{\text{Value Add Time}}{\text{Lead Time}} = \frac{\text{Cycle Time}}{\text{Cycle Time} + \text{Control Time} + \text{Handling Time} + \text{Waiting Time} + \text{Storage Time}} \quad (4.3)$$

Con

*Total Lead Time = Tempo di processamento totale, cioè il tempo in cui la materia entra nel sistema, ed esce trasformata come prodotto finito;*

*Value Added Time = Tempo a valore di processamento.*

Il confronto di questi due tempi, permette di identificare quanto tempo è effettivamente occupato da attività a valore e quanto risulta essere invece.

*Nello specifico, l'efficienza di flusso è il rapporto tra i tempi delle attività a valore aggiunto (VAT), o tempo ciclo, ed il tempo totale di attraversamento del processo (LT).*

Dall'analisi del flusso aziendale è stato rilevato che i tempi di stazionamento possono variare da 5/10 minuti fino a circa 1 ora, ma la cosa è molto variabile e dipende dalla priorità dei componenti in flusso. Eccezion fatta per il deposito della laminazione, poiché il ciclo in autoclave in genere

parte nel tardo pomeriggio per caricare simultaneamente più componenti. Quindi in questo caso si possono considerare dalle 2 alle 3 ore.

Inoltre, tutte le parti prodotte vengono sottoposte ad un controllo qualità attraverso un processo di reverse engineering. I pezzi non conformi possono essere rilavorati, altrimenti vengono scartati. La percentuale di scarto è del 2,82% per contingenze produttive e lo 0,47% per difetti dimensionali ed estetici.

#### 4.4.1 RISULTATI OTTENUTI

Di seguito si riportano le tabelle che descrivono i risultati ottenuti dalle diverse simulazioni.

Come prima cosa, si visiona la tabella inerente ai tempi di movimentazione, che rappresentano il nucleo della richiesta dell'azienda Ars Tec di studiare l'andamento delle movimentazioni nei e tra i reparti. Si è scelto di valutare il tempo di movimentazione basandoci sulla disponibilità massima dell'operatore. Egli di fatto andrebbe a percorrere la via più diretta alla stazione successiva, per poi compiere il job assegnato. I dati rilevati sono i seguenti.

Tabella 5.13. Tempi di movimentazione - Case study 1 e 2

Stazione	Tempo movimentazione alla stazione successiva layout standard	Tempo movimentazione alla stazione successiva layout modificato n°1	Tempo movimentazione alla stazione successiva layout modificato n°2
KitCheckTable	00:00:06	00:00:06	00:00:06
LaminationTable	00:00:45	00:00:06	00:00:10
BufferLamAuto	00:00:33	00:00:33	00:00:06
VacuumTable	00:00:05	00:00:05	00:00:05
Autoclave1	00:00:25	00:00:25	00:00:25
ExtractionTable	00:00:20	00:00:03	00:00:03
BufferExtrFin	00:00:51	00:00:44	00:00:44
SbavTable	00:00:21	00:00:21	00:00:21
CNC	00:00:20	00:00:20	00:00:20
WashingTable	00:00:06	00:00:06	00:00:06
SbavStickTable	00:00:05	00:00:05	00:00:05
CookStation	00:00:00	00:00:00	00:00:00
CleanTable	00:00:08	00:00:08	00:00:08
BufferFin	00:00:00	00:00:00	00:00:00
<b>TOTALE</b>	<b>00:03:57</b>	<b>00:02:42</b>	<b>00:02:15</b>
<b>Dist. Percorsa (m)</b>	<b>159,17</b>	<b>130,50</b>	<b>120,24</b>

Tabella 5.14. Tempi di movimentazione - Case study 3

Stazione	Tempo movimentazione alla stazione successiva layout modificato n°2
KitCheckTable	00:00:06
LaminationTable	00:00:07
LaminationTable2	00:00:07
BufferLamAuto	00:00:06
VacuumTable	00:00:05
Autoclave1	00:00:25
ExtractionTable	00:00:03
BufferExtrFin	00:00:44
SbavTable	00:00:21
CNC	00:00:20
WashingTable	00:00:06
SbavStickTable	00:00:05
CookStation	00:00:00
CleanTable	00:00:08
BufferFin	00:00:00
<b>TOTALE</b>	<b>00:02:29</b>
<b>Dist. Percorsa (m)</b>	<b>123,24</b>

Si evince che la miglioria assoluta si otterrebbe con il layout modificato n°2 in termini di tempo di movimentazione e distanza percorsa, anche se occorre anticipare che il layout ottimizzato n° 3 presenta dei vantaggi che saranno mostrati di seguito.

Dal punto di vista di minutaggio, le varie ottimizzazioni potrebbero sembrare inefficaci, poiché presentano una diminuzione minima del tempo di percorrenza, ma anche un minimo miglioramento può produrre conseguenze su larga scala nel lungo periodo, senza contare che i tempi di percorrenza così definiti sono incidenza anche di un altro fattore: la distanza percorsa.

Una minor distanza percorsa implica direttamente che gli operatori compino lo stesso ciclo di lavorazione sfruttando molto meno la viabilità e gli spazi dell'impianto. Da ciò si deduce che se si riduce la distanza percorsa, ma i tempi di movimentazione restano pressoché invariati, si ottiene un incremento di velocità in termini di trasporto.

Definiamo quindi la velocità di percorrenza relativa degli operatori nell'impianto come:

$$Velocità\ di\ trasporto = \frac{Distanza\ percorsa}{Durata\ della\ movimentazione} \quad (4.4)$$

Nel contesto di un ciclo di produzione l'analisi si traduce in un incremento visibile della velocità.

Tabella 5.14. Velocità di movimentazione

	Layout Standard	Layout Modificato 1	Layout Modificato 2	Layout Modificato 3
Velocità relativa (operatore) [m/s]	0,671603376	0,805555556	0,890666667	0,827114094
Incremento ottenuto [%]		<b>19,95%</b>	<b>32,62%</b>	<b>23,16%</b>

Traducendo il tutto come sintomo di produttività, l'incremento di velocità del layout modificato n° 2 offre il maggior vantaggio prestazionale in termini di movimentazione manuale.

Per quanto riguarda la simulazione della *manutenzione preventiva*, quello analizzato è solo un esempio dettato da ipotesi di disponibilità. Si evince che al diminuire della disponibilità, provocato dalla manutenzione, aumentino il numero di interventi lungo tutto l'arco lavorativo. Può sembrare scontato, ma tener traccia del numero di interventi necessari, scandisce e genera gradualmente l'informazione relativa ad un possibile guasto sistematico. Tanto più gli interventi si fanno frequenti e a cadenze regolari, non si parla più di manutenzione straordinaria, ma di veri e proprie riparazioni ordinarie. Ciò vorrà dire che la macchina stessa deve essere ricondizionata o sostituita. Queste sono strategie specifiche ed improntate alla filosofia aziendale.

*La simulazione di tipo "preventiva" anticipa scenari tramite esperimenti svolti coinvolgendo variabili implicative di varia forma.*

I dati input vengono combinati nelle osservazioni svolte e come già mostrato, il report nella semplice casistica visionata, ci pone di fronte ai seguenti dati:

Tabella 5.15. Scenari della manutenzione preventiva

	Av of Autoclave	Av of CNC	Utilization of the Autoclave	Failure of the Autoclave	N° of Failures Autoclave	N° of exiting MU Autoclave	Utilization of the CNC	Failure of the CNC	N° of Failures CNC	N° of exiting MU CNC
<b>Exp 1</b>	99	99	39%	3%	119,6	173	12%	1%	9,9	173,4
<b>Exp 2</b>	95	95	37%	6%	135	165,9	12%	3%	34,9	167,6
<b>Exp 3</b>	85	85	23%	14%	172,9	103,6	7%	8%	107,1	100,4
<b>Exp 4</b>	70	70	13%	26%	233,4	59,3	4%	15%	213	55,6
<b>Exp 5</b>	50	50	11%	41%	308,9	49,8	3%	25%	355,3	47

A seconda della disponibilità, corrispondono per l'autoclave e il CNC, la porzione di utilizzazione e di guasto della macchina nel tempo ciclo. Il numero di interventi e di pezzi uscenti da essa.

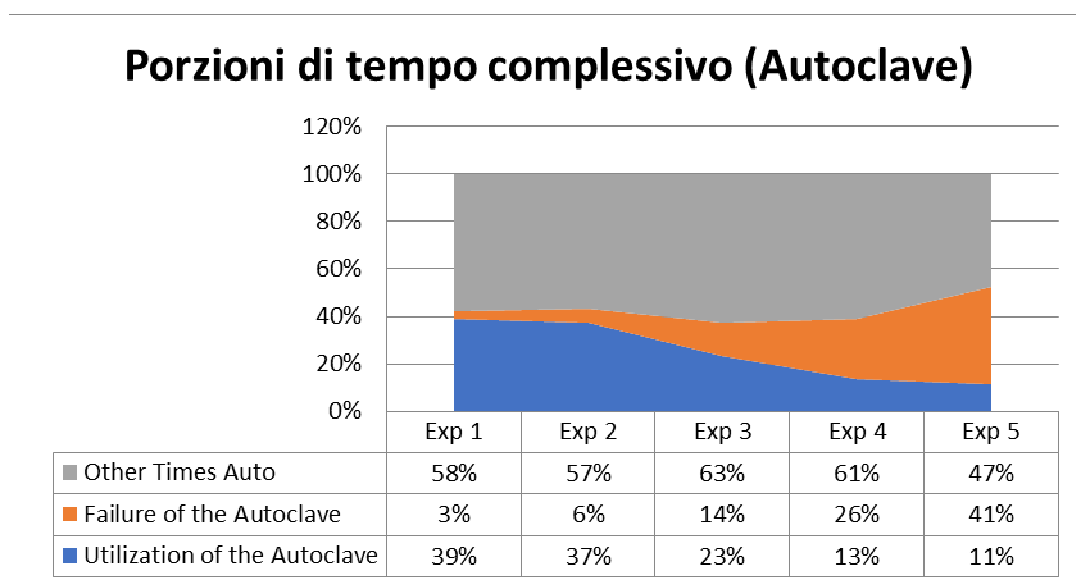
Questa tabella (Tab. 5.15) ci pone di fronte all'ovvietà secondo cui, un maggior numero di interventi implica una diminuzione di disponibilità, e come conseguenza, la diminuzione del tempo di utilizzazione e del numero di pezzi lavorati.

Con un processo ben rappresentato, l'esecuzione degli esperimenti può determinare con estrema precisione i dati output suggeriti in fase di costruzione.

Da essi, si possono definire degli indici o trend di rilevanza, come anche dei veri e propri KPI ove possibile.

Ivi sono presentati vari esempi, mostrati sotto un profilo grafico.

- **Trend delle porzioni di tempo complessivo.**



*Figura 4.57. Andamento di tempo dell'Autoclave*

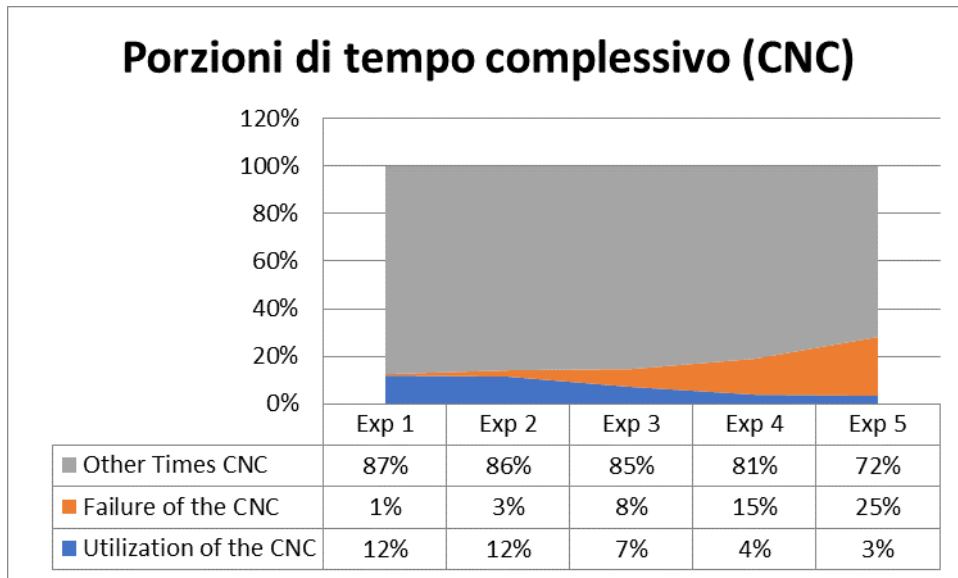


Figura 4.58. Andamento di tempo del CNC

- **Andamento del rapporto tra pezzi prodotti e numero guasti**

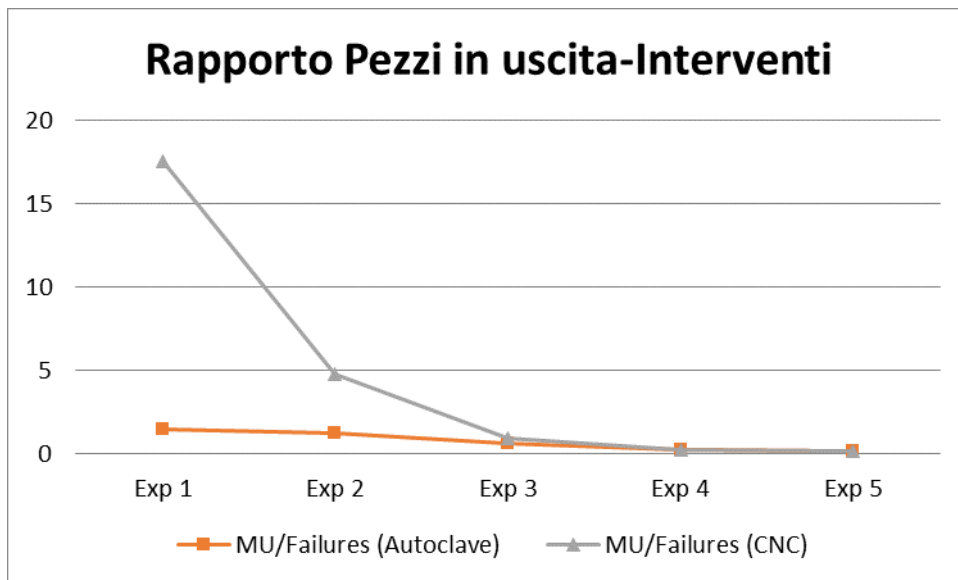


Figura 4.59. Andamento pezzi/guasti

#### 4.4.2 ANALISI DEI COSTI

Quanto segue, mostra una breve analisi dei costi del ciclo di produzione. Nello specifico si è voluto ricavare il costo necessario alla realizzazione di un singolo pezzo, basandoci sulla formula (2) precedentemente adottata.

Si ricavano quindi i costi dell'operatore necessari alla realizzazione del pezzo sommando i costi di ogni singolo processo.

Naturalmente si parla di Costo orario dell'operatore che ammonta a 16/h e di conseguenza, il costo di ogni processo può essere calcolato moltiplicando il tempo di processo complessivo per il costo della manodopera:

$$\text{Costo Manodopera (Ciclo)} = \text{Costo orario} * \text{Tempo ciclo} \quad 4.5$$

Da qui si definisce il costo dell'operatore necessario per la realizzazione di un singolo prodotto (Tab. 5.16).

Tabella 5.16. Costo della manodopera per pezzo

	<b>Processo</b>
KitCheckTable	0,08
LaminationTable	7,92
LaminationTable 2	
BufferLamAuto	
VacuumTable	1,17
Autoclave1	3,25
ExtractionTable	0,33
BufferExtrFin	
SbavTable	0,25
CNC	1,00
WashingTable	0,17
SbavStickTable	0,50
CookStation	1,08
CleanTable	0,16
BufferFin	
<b>Costo Operatore (€/pz)</b>	<b>254,56</b>

Si presenta di seguito la tabella dei prezzi delle materie prime e relativamente alle quantità necessarie per la realizzazione del pezzo, è stato calcolato quindi il **costo totale della materia prima** (MP).



Tabella 5.17. Costo delle materie prime per pezzo

	Costo (€)/grammo o mq	Quantità necessaria (g)	Quantità necessaria (mq)	COSTO MP
Carbonio	25		0,85	21,25
E3 (Resina)	0,07	380,00		26,6
Film adesivo	0,10	300,00		30
Kevlar k285	35,00		0,35	12,25
Hc15mm 5052	25,00		0,85	21,25
			<b>Tot MP (€/pz)</b>	<b>90,1</b>

Come quanto avvenuto per il costo dell'operatore inerente al tempo di processo necessario alla produzione del pezzo, è stato calcolato allo stesso modo il costo dei **tempi di movimentazione**, sostituendo però il tempo di movimentazione al tempo di processo.

Tabella 5.18. Costo di movimentazione per pezzo

	Actual	Case Study 1	Case Study 2	Case Study 3
<b>Movimentazione (min)</b>	<b>3,95</b>	2,7	2,25	2,48
<b>Movimentazione (h)</b>	<b>0,066</b>	0,045	0,0375	0,041
<b>Costo Movimentazioni (€/pz)</b>	<b>1,053</b>	<b>0,72</b>	<b>0,6</b>	<b>0,661</b>

Infine, è stata valutata l'**efficienza di flusso** di ogni simulazione, tenendo fede ai dati ricavati da essi.

Il rapporto è determinato considerando uno stazionamento minimo e massimo, per poi ricavare un 'efficienza ottimale o pessimistica.

Tabella 5.19. FlowEfficiency di ogni case study

Tempi	Simulazione Base	Simulazione Ottimizzazione n°1	Simulazione Ottimizzazione n°2	Simulazione Ottimizzazione n°3
Ciclo	950,00	950,00	950,00	770
Movimentazione	3,95	2,70	2,25	2,48
Stazionamento (min)	130,00	130,00	130,00	130,00
<b>Δ Stazionamento</b>	<b>170,00</b>	<b>170,00</b>	<b>170,00</b>	<b>170,00</b>
<b>TOTALE (min)</b>	<b>1083,95</b>	<b>1082,70</b>	<b>1082,25</b>	<b>902,48</b>
<b>TOTALE (MAX)</b>	<b>1253,95</b>	<b>1252,70</b>	<b>1252,25</b>	<b>1072,48</b>

Flow Efficiency (min)	85,28%	85,38%	85,41%	82,58%
Flow Efficiency (MAX)	73,99%	74,06%	74,09%	69,84%

Si evince che l'incremento maggiore si ha con l'ottimizzazione n°1, che tende a “rallentare” con la seconda simulazione, considerando però lo stesso tempo ciclo.

Infatti, si può notare che l'efficienza di flusso relativa alla simulazione d'ottimizzazione n°3 decresce poiché i tempi di movimentazione diventano proporzionalmente più importanti.

La simulazione d'ottimizzazione n° 3 produce un'efficienza di flusso più bassa delle altre e ciò potrebbe erroneamente tradursi con una diminuzione di efficienza. Va però considerato che tale diminuzione non è prodotta dall'innalzamento dei tempi di movimentazione e di stazionamento, bensì (come già spiegato) da una riduzione del tempo ciclo. Quindi risulta ovvio che il rapporto tende a considerare molto di più i tempi di movimentazione e di stazionamento in confronto ad un tempo ciclo più basso.

Tuttavia è proprio la diminuzione del tempo ciclo che rende interessante tale ottimizzazione, poiché permette un'immissione più diretta del pezzo verso il cliente.

#### 4.5 CONSIDERAZIONI SUL CASO DI STUDIO ARSTECH

Lo studio preventivo e di simulazione è uno dei principali mezzi di analisi dei processi produttivi moderni, che permette, oltre all'identificazione delle criticità (come colli di bottiglia, ritardi, inefficienze), anche di creare un modello virtuale che risponda, in maniera del tutto simile a quello reale, agli interventi correttivi di prestazioni, di layout e di organizzazione della filiera operativa.

Nell'ottica **Resource Efficiency**, il lavoro svolto ha lo scopo di studiare ed incrementare l'efficienza operativa del processo produttivo, riducendone gli sprechi. Nel caso in esame per sprechi si intendono i tempi di movimentazione e manutenzione a non valore aggiunto (NPV), mentre per efficienza l'ottimizzazione dell'efficienza di flusso, intesa come il rapporto tra il Value Add Time ed il Lead Time.

Una ampia presentazione è stata doverosa, riguardante i principali componenti del software utilizzato, materia tanto diffusa quanto specifica e complessa. La simulazione è stata sviluppata attraverso il sistema **Plant Simulation** di *Virtual Manufacturing* di *Siemens*, presente nei centri di ricerca proponenti.

La simulazione è un'astrazione o rappresentazione del sistema reale che, come prima cosa, ha previsto una fase di conoscenza del sistema e di definizione del problema, con isolamento delle caratteristiche da includere nel modello in termini di attività NPV. La **complessità** del modello è commisurata alle necessità dell'analisi, la sua **semplicità** ne favorisce un'implementazione corretta, mentre la **fedeltà** è l'aspetto chiave del modello, che fornisce dati realmente descrittivi del processo attuale.

Nello specifico, l'attività di simulazione dello scenario produttivo ha previsto la valutazione delle alternative in funzione del processo produttivo in esame, nonché la definizione delle specifiche e delle funzionalità dei sistemi proposti. Per alternativa si intende un'**opportunità migliorativa** che implica l'analisi delle caratteristiche di massima delle misure da adottare, al fine di individuare il giusto **trade-off** tra tempo di movimentazione e costi di produzione, ottimizzando l'**efficienza di flusso** del sistema produttivo manuale.

Dunque, poiché non si tratta di un processo automatico, più che di sensoristica da adottare si parla di politiche correttive utili ad adempiere al principio *Lean Thinking* del miglioramento continuo, anche nel caso di un'azienda a forte incidenza manuale.

Una porzione dell'attività di simulazione si è rivolta anche ad aspetti che riguardano i metodi di previsione adottabili. In particolare si è potuto osservare come l'utilizzo di esperimenti costruiti *ad hoc* possano effettivamente prevedere status della realtà che si verificherebbero sotto opportune ipotesi. Ciò offre un vasto campo applicativo di questo genere di tool, non solo a livello operativo, ma anche a livello decisionale per strategie a lungo termine. Il caso proposto riguarda quindi anche l'aspetto manutentivo dei macchinari, ed rivolto all'analisi dei principali dati d'interesse necessari ad espletare l'evoluzione delle casistiche, nonché la loro rilevanza. Tale studio offre degli importanti spunti da cui trarre vantaggio. Infatti, nella simulazione il *testing* è forse il miglior strumento in grado di fornire indirettamente metodi di prevenzione "*escape plans*", e vere e proprie strategie attuative. Ovviamente, col progredire dell'orizzonte temporale, cambiano anche gli input e gli output d'interesse, così come la necessità di aggiornare i dati secondo precise scadenze, al fine di mantenere il testing sotto il massimo controllo e quindi di renderlo il più affidabile possibile.

Infine, l'attività svolta è di grande interesse poiché permette, inserendo i dati dell'azienda in esame, di individuare il collo di bottiglia e di simulare soluzioni successive per il suo efficientamento. L'analisi dei risultati è stata quindi discussa con l'azienda Ars Tech in esame, al fine di verificare i vantaggi e gli svantaggi delle varie alternative, e di stimolare la ricerca di ulteriori modifiche e sperimentazioni future.

In conclusione, possibili sviluppi futuri potrebbero prevedere l'ampliamento dei risultati ottenuti dall'attività di simulazione svolta, al fine di facilitarne i processi decisionali. Ad esempio sfruttando le caratteristiche del modello di simulazione anche per altre attività del progetto REACT.

## CAPITOLO V: IL CASO MARELLI

Quanto visto per Arstech, non vale per Marelli. Per meglio descrivere la differenza sostanziale tra le due casistiche, è che il layout di Arstech ha un'impronta artigianale e flessibile sotto il profilo della manodopera, mentre Marelli è, come vedremo, una linea d'assemblaggio ad elevata automazione.

Di seguito si evidenzierà questo aspetto sotto la stessa struttura d'analisi vista per Arstech (raccolta dati, analisi degli stessi, restituzione di un modello di simulazione, ecc), ma verranno presentati altri criteri in vista delle plausibili ottimizzazioni

### 5.1 STUDIO DEL PROCESSO PRODUTTIVO

Il lavoro di simulazione ed analisi è stato svolto sulla linea di assemblaggio PHP4 dello stabilimento Marelli di Modugno (BA). Si tratta di un'azienda specializzata nella progettazione e produzione di sistemi e componenti di alta tecnologia per l'industria automobilistica. L'oggetto dell'analisi è la catena di montaggio che si occupa della produzione di pompe di alimentazione utilizzate per motori ibridi, elettrico e a benzina con MGU (Motor Generator Unit) da 10 kilowatt, che vengono montati sulla linea di vetture Chrysler Ram.



*Figura 5.1. Motore Ibrido*



Figura 5.2. Pompa di alimentazione

La linea è composta da 12 postazioni di assemblaggio (OP 1.10 – OP 1.130) ed è completamente automatica; le attività manuali riguardano infatti solo le fasi di carico/scarico dei componenti e del prodotto finito. Nello specifico, le stazioni di ingresso ed uscita sono controllate da due lavoratori che hanno il compito di caricare il materiale da lavoro sul nastro (stazione iniziale) e di scaricarlo una volta concluso il processo di lavorazione (stazione finale). Inoltre, monitorano il corretto funzionamento dell'intera linea, si occupano dell'approvvigionamento del materiale nelle stazioni, ed in caso di necessità attuano manutenzioni/riparazione.

L'assemblaggio completo della pompa PHP4 avviene attraverso le stazioni automatiche che, collegate da un nastro trasportatore, operano simultaneamente ed in successione. Ben 10 postazioni sono infatti meccanizzate ed automatizzate, e svolgono le lavorazioni intermedie di assemblaggio, collaudo, saldatura e calibrazione per la produzione del pezzo finito. La linea è dotata di sensori ottici per il controllo qualità ed il corretto assemblaggio dei componenti. È presente inoltre un sistema di telemetria che registra in tempo reale il ciclo produttivo e lo stato delle macchine.

Il layout della linea è visibile nell'immagine:

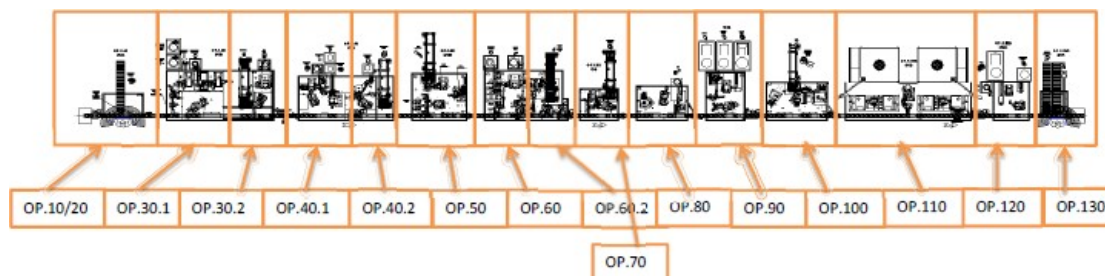


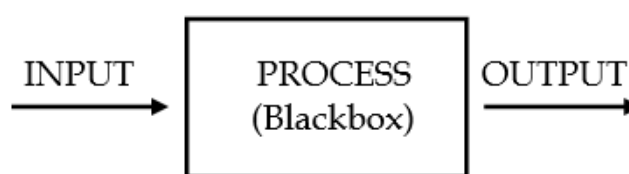
Figura 5.3. Layout della linea ad elevata automazione

Come evidenziato in Fig. 4 le stazioni 3, 4 e 6 sono “doppie”, eseguono al loro interno due lavorazioni successive distinte pur essendo situate nello stesso box.

Al fine di studiare correttamente il processo produttivo è stato necessario organizzare una serie di incontri nell'azienda Marelli con tutti i partners del progetto REACT. Durante gli incontri è stata organizzata una visita alla linea di produzione PHP4 in cui il responsabile di produzione ne ha presentato le caratteristiche di massima e il dettaglio di ogni lavorazione OP. Già durante la visita è stato possibile osservare alcuni eventi di guasto, sottolineandone la ricorrenza.

Dalla visita della linea e dalle successive riunioni e/o teleconferenze sono emersi numerose considerazioni utili allo sviluppo delle tecniche di simulazione previste dal progetto, relativamente a:

- Le postazioni di lavorazione manuale sono caratterizzate da un numero limitato di operazioni quali il carico e lo scarico dei componenti e del prodotto assemblato.
- L'operatore inserisce manualmente in un foglio excel il resoconto del turno di lavorazione riportando le anomalie, i guasti, gli scarti e le performance. I dati riguardano l'intera linea produttiva, considerata come un sistema 'Blackbox' (Fig. 5).



*Figura 5.4. Sistema Blackbox*

- L'accesso ai dati della telemetria avviene in un secondo momento, solo quando ritenuto opportuno.
- Nelle attività di crimpatura (OP. 40) e piantaggio (OP. 50) è ricorrente il problema dell'usura del punzone, sostituito circa 60 volte al mese. Ricorrente è anche la sovratemperatura dei robot, con conseguente blocco della produzione. Tuttavia, poiché non si conosce l'andamento del blocco della produzione, è necessaria l'analisi dei guasti.
- La linea è dotata di sensori per il rilevamento dei consumi di energia elettrica e aria compressa, ma al momento i dati non vengono salvati ed utilizzati.

Dopo aver definito il contesto generale dell'attività di simulazione si entra nel dettaglio dello studio del processo produttivo ad elevata automazione attraverso le attività seguenti:

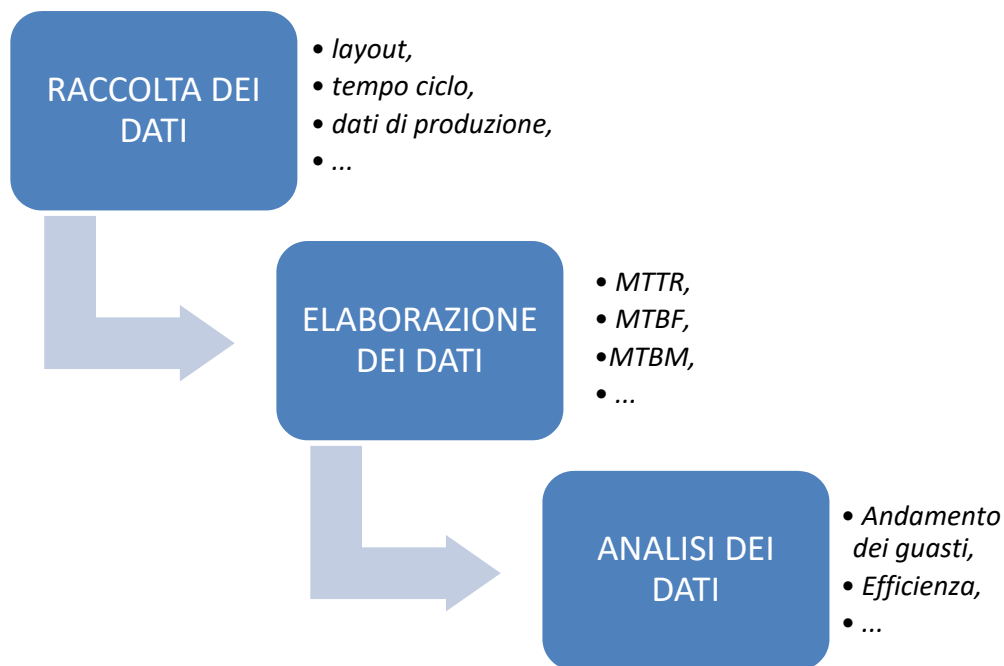


Figura 5.5. Studio del processo produttivo

## 5.2 RACCOLTA DEI DATI

Il primo passo per monitorare e gestire la linea di produzione e le strategie di manutenzione, riguarda il reperimento dei dati utili.

La raccolta dei dati di produzione è una componente integrante del moderno processo di produzione. “Avere il dato” significa poter avere una visione realistica della situazione attuale dell’azienda e **disporre di informazioni necessarie** (performance aziendali, capacità produttiva reale, anomalie di produzione, tempi di set up, ecc.) **a prendere delle decisioni**. Diversamente, la mancanza di informazioni potrebbe compromettere la gestione dell’azienda rendendola poco reattiva e non competitiva in mercati dove occorre prontezza nelle decisioni e consapevolezza delle proprie potenzialità produttive. Infatti, oggi, le aziende si trovano spesso ad affrontare i problemi relativi ai Big Data in termini di rapido processo decisionale per migliorare la produttività aziendale (Lee et al., 2014). Poiché viviamo nell’era dei Big Data in cui si cerca di raccogliere i dati da molteplici risorse (Kumar et al., 2019), sicuramente una futura opportunità per l’azienda Marelli potrebbe essere quella di sfruttare il sistema di telemetria.

La raccolta dati è stata effettuata prima attraverso processi manuali e poi attraverso gli strumenti software di gestione dei dati aziendali. Ogni operatore a fine turno ha compilato manualmente il



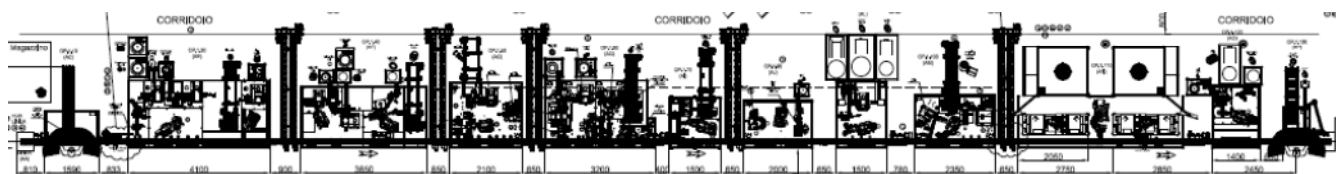
resoconto del turno di lavorazione, che è stato poi inserito all'interno del file Excel relativo allo storico dati.

Inoltre, alcuni dati sono stati forniti direttamente dal responsabile di produzione dell'impianto ottenendo informazioni riguardo a:

- a) LAYOUT: planimetria della catena di montaggio, descrizione del flusso e del tipo di lavorazione eseguita;
- b) TEMPO CICLO: turni di lavoro e tempo necessario ad ogni macchina per eseguire l'operazione assegnata;
- c) DATI DI PRODUZIONE: produzione giornaliera e produzione oraria.

### 5.2.1 IL LAYOUT

La disposizione e le caratteristiche di ingombro delle singole macchine sono riportate nella vista dall'alto di seguito riportata:



*Figura 5.6. Vista dall'alto delle linee di montaggio*

Si può notare uno sviluppo rettilineo in cui il pezzo si muove tra le varie stazioni tramite un nastro trasportatore sul quale viene posizionato all'inizio e tolto alla fine da due lavoratori. Il lavoratore nella stazione iniziale posiziona il pallet sul nastro trasportatore dando inizio alle varie lavorazioni che vengono riportate nella tabella sottostante (Tab.1) diversificate per le singole stazioni.

Di seguito, si descrivono in maniera dettagliata le lavorazioni eseguite su ogni singola stazione:

- Nella stazione iniziale il lavoratore posiziona il pallet sul nastro trasportatore dando inizio alle varie lavorazioni.
- **OP 10:** Arrivano i pezzi della pompa e si assemblano con il plunger. Si verifica la correttezza del lavoro tramite sensori a controllo ottico, i quali danno il via libera alla macchina per il proseguo della produzione.

- **OP 30.1:** Si esegue l'accoppiatura con la molla e si verifica il corretto assemblaggio tramite un tastatore, il controllo è quindi meccanico non ottico come sopra.
- **OP30.2:** In questa stazione viene verificata la conformità del pezzo, se il pezzo è non conforme viene fatto proseguire lungo la linea senza fermarsi nelle stazioni di lavoro successive, cioè viene solo trasportato fino in fondo senza subire successive lavorazioni; invece, nel caso in cui il pezzo abbia superato i controlli precedenti viene assemblata la valvola di aspirazione. Infine, si verifica il corretto assemblaggio.
- **OP 40.1:** Si esegue la punzonatura del pezzo.
- **OP 40.2:** In questa stazione si eseguono le operazioni di accoppiamento ed avvitamento, ovvero *Outlet Valve/Hp Fitting Assembly*. Inoltre, sono sempre presenti sensori ottici per il controllo dell'effettiva presenza del pezzo.
- **OP 50:** Si eseguono il piantaggio, la saldatura e poi il controllo della saldatura tramite un sensore ottico che analizza tre grandezze di riferimento della luce (es. lunghezza d'onda, etc.). Viene eseguito anche un controllo sui parametri energetici della saldatura, ovvero si verifica che le 3 grandezze si trovino all'interno di un range stabilito, se anche solo una oltrepassa il range viene comunicato come "KO" che viene poi controllato fisicamente dall'operatore.
- **OP 60:** In questa operazione si effettua il controllo della valvola di aspirazione attraverso i sensori ottici che verificano la correttezza del posizionamento. Se il pezzo supera il controllo precedente può proseguire, altrimenti la macchina si blocca necessitando dell'intervento dell'operatore. Qui avviene la cianfrinatura, operazione spesso soggetta a guasto. Le attività di controllo sono:
  - inserimento spillo nella pompa
  - presenza molla (sensore per verificare 3 parametri, con l'ausilio di PC a bordo linea per verificarne l'esattezza)
  - corretta posizione per la saldatura
  - controllo saldatura

La foto si utilizza per rilevare il movimento dello spillo e tramite la stessa si verifica che sia all'interno del range.

- **OP 70:** Si effettuano le letture relativamente al *plunger* e al *data mart* della pompa, al fine di verificare che il plunger stia entrando nella pompa prestabilita, infine si fissa il *sealing cup*.
- **OP 80:** Si effettuata la saldatura.
- **OP 90:** Si inseriscono il *dumper spacer*, il *dumper cushion* e di nuovo il *dumper spacer*. Infine, il tastatore verifica la presenza dei 3 componenti e la rispettiva quota.
- **OP 100:** Si preleva la pompa e si effettuata la saldatura del *dumper*, poi la bobina viene fissata e saldata.
- **OP 110:** Si verificata la presenza di fughe nel pezzo attraverso 4 camere uguali per la prova della tenuta dell'elio. Per ognuna delle camere si esegue un test sulla pompa, verificando quindi le saldature e conseguentemente la tenuta della pompa.
- **OP 120:** si effettua un controllo della quota dei semiconi per vedere se sono stati installati alla giusta quota o meno.
- All'uscita della stazione 120, l'operatore recupera il pezzo finale e lo posiziona nel pallet per essere trasportato su altre linee produttive

Tabella 5.1. Le lavorazioni della linea PHP4

STAZIONE	LAV. 1	LAV. 2	LAV. 3	LAV. 4
30	Composizione prv	Montaggio prv e Calibrazione1	Montaggio prv e Calibrazione2	Montaggio Tappo
40	Composizione ocv	Montaggio ocv	Crimpatura ocv	Montaggio hp Fitting
50	Montaggio fitting lp	Saldatura lp fitting		
60	Montaggio inlet valve+ ring nut	Crimpatura ring nut	Montaggio rod- Molla-on/off	Saldatura on/off
70	Montaggio plunger	Montaggio sealing Cap		
80	Saldatura sealing cap	Montaggio filtro		
90	Composizione pacchetto	Montaggio Pacchetto	Montaggio damper Cap	

100	Saldatura damper cap	Montaggio e Saldatura bobina		
110	Tenuta olio			
120	Composizione molla reatiner	Montaggio semiconi Molla reatiner		

### 5.2.2 TEMPO CICLO

Il secondo passo si basa sulla rilevazione del tempo ciclo (TC), ossia l'intervallo di tempo necessario ad una macchina per compiere la lavorazione programmata e la raccolta dei dati di produzione.

Nella tabella sono elencati i valori delle singole macchine:

*Tabella 5.2. Tempo Ciclo delle singole macchine*

<i>STAZIONE</i>	<i>LAVORAZIONE</i>	<i>TEMPO CICLO</i>	<i>UNITÀ DI MISURA</i>
OP 1/2	Manuale	0	Secondi
OP 30 1	Automatica	15.16	Secondi
OP 30 2	Automatica	14.9	Secondi
OP 40 1	Automatica	17.24	Secondi
OP 40 2	Automatica	15.3	Secondi
OP 50	Automatica	15.75	Secondi
OP 60 1	Automatica	15.61	Secondi
OP 60 2	Automatica	0	Secondi
OP 70	Automatica	15.25	Secondi
OP 80	Automatica	14.64	Secondi
OP 90	Automatica	14.38	Secondi
OP 100	Automatica	16.52	Secondi

OP 110	Automatica	16.76	Secondi
OP 120	Automatica	15.82	Secondi
OP 130	Manuale	0	Secondi

Come è possibile notare, essendo la linea già stata progettata, i valori dei tempi si attestano tutti intorno ad un valore medio di 15,6 secondi, in modo tale da ridurre problemi di coda, colli di bottiglia che sono fattori di inefficienza della catena operativa.

### 5.2.3 I DATI DI PRODUZIONE

La linea di montaggio lavora su 3 turni da 8 ore ciascuno garantendo una produzione giornaliera di circa 3400 pezzi e quindi circa 140 unità ogni ora.

Di seguito vengono riportate le misure effettuate durante un intero giorno di lavoro:

*Tabella 5.3. Produzione oraria per turno di lavoro*

1 Turno								Produzione Oraria
07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	
163	135	150	150	128	140	150	172	
2 Turno								
15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	
118	105	123	142	116	122	180	135	
3 Turno								
23:00	24:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	
166	177	180	144	127	144	122	106	

Dai dati riportati si può notare che il valore della produzione oraria varia in un range ampio; si passa da una produzione massima di 180 ad una minima di 105 pezzi.

Per analizzare meglio l'andamento della produzione abbiamo riportato i valori in relazione alla disposizione temporale:

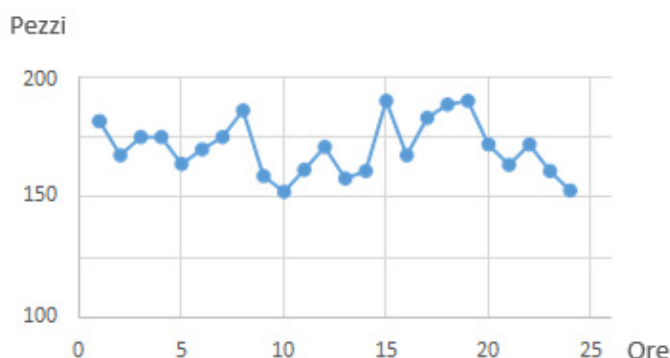


Figura 5.7. Andamento della produzione oraria

Dall'andamento della produzione oraria si evince che l'oscillazione dei valori sembra del tutto casuale e non dovuta a cambi di turno o pause programmate dei lavoratori.

Per un'ulteriore analisi abbiamo considerato la sua *distribuzione probabilistica*, assimilando il mutamento ad una distribuzione normale di probabilità; vengono riportati dei valori che descrivono l'alternanza della produzione:

- Produzione giornaliera media 3395 pezzi
- Produzione oraria massima 180 e minima di 105
- Deviazione standard 22.6
- Media 141.5

I valori possono essere approssimati ad una funzione di distribuzione simile a quella gaussiana; è utili quindi ipotizzare come valore utile quello medio (141.5) accettando una oscillazione pari alla deviazione standard (22.6).

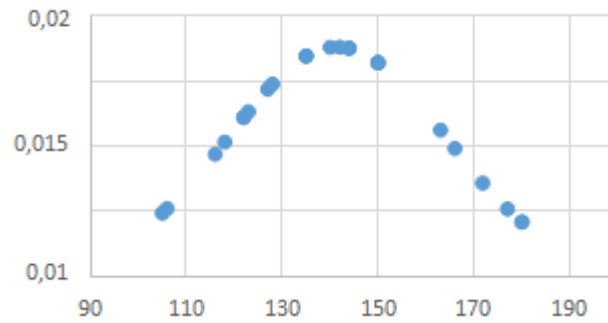


Figura 5.8. Distribuzione della produzione

### 5.3 ELABORAZIONE DEI DATI

L'efficacia del sistema è spesso espressa come una o più figure di merito, o FOM (*Figure Of Merit*), che rappresentano la misura in cui il sistema è in grado di svolgere la funzione prevista. Queste possono variare considerevolmente a seconda del tipo di sistema e dei requisiti (Stamatis, 2010):

- i. *Parametri di prestazione del sistema, come definiti dal cliente*
- ii. *Disponibilità, che è la misura del grado in cui un sistema si trova nello stato operativo*
- iii. *Affidabilità, che è la misura delle condizioni operative del sistema*

Dunque, per elaborare i dati, uno dei principali parametri da considerare è l'**affidabilità** (*reliability*). L'affidabilità si propone di descrivere e misurare la "capacità" di funzionamento di dispositivi o sistemi di produzione. Per ogni dato sistema, tale misura serve a quantificare il grado di "fiducia" che possiamo avere nel verificarsi del buon funzionamento del sistema, inteso come assolvimento degli obiettivi per i quali il sistema stesso è progettato e costruito.

Poiché le prestazioni di ogni sistema tendono inevitabilmente a degradare nel tempo, è opportuno che l'affidabilità di un sistema sia definita come la misura della sua attitudine a fornire nel tempo una prestazione soddisfacente. Tale misura non è altro che un valore numerico, espresso su una scala di numeri reali tra 0 e 1, perché è definito in termini di probabilità. La definizione più completa è quella che indica l'affidabilità di un elemento/sistema come la probabilità che l'elemento/sistema eseguirà una specifica funzione:

- sotto specifiche condizioni operative ed ambientali;
- ad un dato istante e/o per un prefissato intervallo di tempo.

Inoltre, con il termine guasto (*failure*) si indica invece la cessazione dell'attitudine di un dispositivo ad adempiere alla funzione richiesta, ovvero una variazione delle prestazioni del dispositivo che lo renda inservibile per l'uso al quale esso è destinato.

L'affidabilità, indicata con  $R$  (*reliability*), risulta in generale funzione di tre variabili:

$$R = R(C, A, t) \quad (5.1)$$

Dove  $C$  è il criterio per giudicare se l'elemento è funzionante o non funzionante,  $A$  sono le condizioni ambientali e  $t$  è l'intervallo di tempo durante il quale si richiede che il componente funzioni (tempo di missione).

Altro importante criterio è la **disponibilità**, ossia una funzione che tiene conto sia dell'affidabilità del sistema sia degli aspetti manutentivi.

Il principale parametro di affidabilità è il tempo medio al guasto, detto **MTTF** (“*Mean Time To Failure*”): esso rappresenta il tempo medio fra l'istante 0, in cui il componente è funzionante, e l'istante del suo guasto.

Il principale parametro di disponibilità è il tempo medio al ripristino **MTTR** (“*Mean Time To Repair*”): esso esprime il tempo medio che intercorre tra l'insorgenza di un guasto ed il completamento della sua riparazione.

Un parametro che dipende dai due precedenti è il tempo medio che intercorre tra due guasti, detto **MTBF** (“*Mean Time Between Failure*”), ed è ovviamente applicabile solo a componenti riparabili.

Alla luce di quanto detto e dei dati forniti è stata svolta la seguente analisi dove vengono calcolati:

- a) MTBF e MTTR
- b) Disponibilità della singola macchina
- c) Disponibilità della linea
- d) MTBM



### 5.3.1 MTBF E MTTR

Per ogni macchina sono valutati i seguenti parametri per l'analisi dei dati con un orizzonte temporale di 141 giorni (dal 13 Agosto 2018 al 31 Dicembre 2018).

La tabella risulta così strutturata:

Tabella 5.4 Struttura tabella MTTR e MTBF

	13 Agosto 2018	...	31 Dicembre 2018
<b>Breakdowns</b>			
<b>Shifts</b>			
<b>Planned Production Time</b>			
<b>Time Machine Stopped</b>			
<b>MTTR monthly</b>			
<b>MTBF</b>			

Nel dettaglio:

- *Breakdowns*: indica il numero di guasti giornalieri;
- *Shifts*: indica il numero di turni giornalieri (in genere sono 3 turni da 8 ore al giorno);
- *Planned Production Time (PPT)*: indica le ore lavorative giornaliere, ciò sta a significare che come detto sopra, in genere, saranno 24 ore lavorative (8ore\*3turni=24ore)
- *Time Machine Stopped (TMS)*: indica i minuti di interruzione della macchina giornalieri
- *MTTR monthly*: Mean Time To Repair = media dei tempi di riparazione;
- *MTBF*: Mean Time Between Failure= media dei tempi tra due guasti consecutivi.

Sono stati quindi calcolati i valori di MTTR e MTBF riportati in Tab.5.5, applicando le formule:

$$MTTR\ monthly = \frac{\sum Time\ Machine\ Stopped}{\sum Breakdowns} \quad (5.2)$$

$$MTBF = \frac{\sum Planned\ Production\ Time - \frac{\sum Time\ Machine\ Stopped}{60}}{\sum Breakdowns + 1} \quad (5.3)$$

I valori ottenuti sono riportati in Tab. 5.5:

Tabella 5.5. Tempo medio di riparazione e tempo medio tra i guasti

	<i>TMS (down time) (min)</i>	<i>N° fermate per guasti</i>	<i>MTR (min)</i>	<i>MTBF (min)</i>
OP30	5390	90	59,89	34
OP40	7915	137	50,12	23
OP50	7537	98	76,91	31
OP60	1690	42	40,24	73
OP70	1265	21	60,24	143
OP80	110	4	27,50	634
OP90	335	14	23,93	211
OP100	790	20	39,50	150
OP110	1040	25	41,60	121
OP120	1405	27	52,04	112

### 5.3.2 DISPONIBILITÀ DELLA SINGOLA MACCHINA

La formula utilizzata per il calcolo della disponibilità è:

$$Disponibilità = \frac{UP\ TIME}{UP\ TIME + DOWN\ TIME} \quad (5.4)$$

Dove:

*Up Time* = tempo in cui l'entità è realmente disponibile e funziona correttamente, in questo caso viene calcolato l'UT come:

$$Up\ Time = Planned\ Production\ Time - Time\ Machine\ Stopped \quad (5.5)$$

*Down Time* = tempo in cui l'entità è fuori servizio, ferma o per guasto o per riparazione, in questo caso equivale al valore di Time Machine Stopped.

Viene detto:

$$Total\ Time = Up\ Time + Down\ Time \quad (5.6)$$

Per ogni macchina sono stati fatti i seguenti calcoli al fine di ottenere il valore della disponibilità corrispondente:

1. È stato calcolato il valore di:
  - Time Machine Stopped sommando i valori giornalieri nel periodo indicato,
  - Planned Production Time sommando i valori giornalieri nel periodo indicato (unità di misura = minuti)
2. Calcolo dell'Up Time secondo la formula scritta sopra
3. Avendo così a disposizione i valori di Up Time e Down Time si è calcolato il valore numerico percentuale della disponibilità.

Tabella 5.6. Parametri divisi per operazione

				Planned Production Time (min)	Up Time (min)	Avaiability
OP 30	Time Mach.	5390				
x2	Stop. Plan. Time	Prod. hours	3204	192240	186850	97,196 %
OP 40	Time Mach.	7915				
x2	Stop. Plan. Time	Prod. hours	3264	195840	187925	95,958 %
OP 50	Time Mach.	7537				
	Stop. Plan. Time	Prod. hours	3172	190320	182783	96,040 %
OP 60	Time Mach.	1690				
x2	Stop. Plan. Time	Prod. hours	3172	190320	188630	99,112 %
OP 70	Time Mach.	1265				
	Stop. Plan. Time	Prod. hours	3172	190320	189055	99,335 %
OP 80	Time Mach.	110				
	Stop. Plan. Time	Prod. hours	3172	190320	190210	99,942 %
OP 90	Time Mach.	335				
	Stop. Plan. Time	Prod. hours	3168	190080	189745	99,824 %
OP 100	Time Mach.	790				
	Stop. Plan. Time	Prod. hours	3172	190320	189530	99,585 %

OP 110	Time Stop. Plan. Time	Mach. Prod.	1040 3172 hours	190320	189280	99,454 %
OP 120	Time Stop. Plan. Time	Mach. Prod.	1405 3172 hours	190320	188915	99,262 %

Poiché il valore della disponibilità rappresenta la probabilità che la macchina ha di fermarsi durante una lavorazione, la teoria, per macchine automatiche consiglia sempre valori superiori al 95%. Dalla tabella è possibile vedere che i valori calcolati possono quindi essere considerati attendibili.

### 5.3.3 DISPONIBILITÀ DELLA LINEA

Il calcolo dell'*availability* dell'intera linea è stato fatto moltiplicando il valore della disponibilità delle singole macchine, dato che si ha un sistema in serie, e risulta essere 86,495%. Tale valore risulta essere in linea con i valori medi di disponibilità delle linee, ciò però non significa che sia un valore da non poter migliorare, infatti in un'ottica *lean* è d'obbligo ambire ad un valore di questo parametro quanto più possibile al 100%.

### 5.3.4 MTBM

È stato poi calcolato l'*MTBM* (*Mean Time Between Maintenance*) ossia il tempo medio che intercorre tra due interventi manutentivi, utilizzando la formula:

$$MTBM = \frac{\text{Tempo di utilizzo dell'entità}}{\text{Numero di fermate per manutenzione}} \quad (5.7)$$

Il tempo di utilizzo dell'entità viene inteso come l'Up Time.

Tabella 5.7. Resoconto dell'elaborazione dei dati

			PPT (min)	Up Time (min)	N° fermate manutenzione	MTBM (min)	MTBM (ore)
OP30	TMS	5390	192240	186850	90	2076,1	34,6
x2	PPT	3204 hours					
OP40	TMS	7915	195840	187925	137	1371,7	22,85
x2	PPT	3264 hours					

OP50	TMS	7537					
	PPT	3172	190320	182783	98	1865,1	31,08
		hours					
OP60	TMS	1690					
x2	PPT	3172	190320	188630	42	4491,2	74,85
		hours					
OP70	TMS	1265					
	PPT	3172	190320	189055	21	9002,6	150,03
		hours					
OP80	TMS	110					
	PPT	3172	190320	190210	4	47552,5	792,53
		hours					
OP90	TMS	335					
	PPT	3168	190080	189745	14	13553,2	225,88
		hours					
OP100	TMS	790					
	PPT	3172	190320	189530	20	9476,5	157,93
		hours					
OP110	TMS	1040					
	PPT	3172	190320	189280	25	7571,2	126,18
		hours					
OP120	TMS	1405					
	PPT	3172	190320	188915	27	6996,8	116,6
		hours					

## 5.4 ANALISI DEI DATI

Analizzando i risultati ottenuti si è constatato che le operazioni che presentano più guasti sono: OP30, OP40 e OP50; i guasti totali delle restanti operazioni sono molto inferiori ai guasti totali rilevati nelle operazioni elencate sopra.

Tabella 5.8. Analisi dei guasti correnti

OP30		OP40		OP50	
ORE	GUASTI	ORE	GUASTI	ORE	GUASTI
192	4	200	8	200	7
384	3	384	6	384	5
576	3	576	5	568	6
768	6	768	4	760	2
960	2	960	4	952	2
1152	3	1152	3	1144	3
1344	1	1340	3	1332	3
1528	3	1528	4	1520	3
1716	4	1716	2	1708	1
1904	2	1904	2	1896	6
2092	5	2092	5	2084	4
2280	8	2280	5	2272	3
2468	3	2468	6	2460	4
2660	2	2660	6	2652	2
2852	1	2852	0	2844	4
3044	3	3044	2	3036	7
3204	2	3180	3	3172	6
TOT	55	TOT	68	TOT	68

Si osserva che a parità di ore lavorative i guasti rilevati nelle OP40 e OP50 sono, nella maggior parte dei casi, uguali o maggiori ai guasti nell'OP30, cosa che non si può constatare nelle altre operazioni della linea. Da ciò si può dedurre che le lavorazioni eseguite dalle macchine dell'OP30, OP40 e OP50 sono strettamente correlate tra loro tanto che un guasto nell'OP30 causa uno o più guasti nelle due operazioni successive.

Nel fronte opposto a quanto detto sopra, la macchina che presenta meno guasti della linea è quella relativa all'OP80, la quale manifesta solo 4 guasti nel corso delle 3172 ore lavorative prese come campione per l'analisi.

Quanto risulta dall'analisi dei guasti è verificabile anche dall'analisi del parametro *Time Machine Stopped* cioè quanto tempo la macchina è fuori servizio, ferma o per guasto o per

riparazione. Infatti, sommando i tempi relativi al Time Machine Stopped giornaliero si ottiene il tempo totale durante il quale la macchina è fuori servizio nell'arco del periodo di campionamento (circa 3162 ore).

Tabella 5.9. Estratto di una tabella relativa ai guasti giornalieri

	20 Ago	21 Ago	22 Ago	23 Ago	24 Ago	25 Ago	26 Ago	27 Ago
Breakdowns (n°)	0	3	0	2	1	1	0	0
Shifts (n°)	3	3	3	3	3	3	3	3
Planned Production Time (hrs)	24	24	24	24	24	24	24	24
Time Machine Stopped (min)		80		70	20	60		

Si ottiene, in accordo con quanto detto nella precedente analisi, che l'operazione con minor Time Machine Stopped è l'OP80 e quella con maggior Time Machine Stopped è l'OP40, seguita dall'OP50 e OP30.

Tabella 5.10. Time Machine Stopped per ogni stazione

OPERAZIONE	$\Sigma$ TIME MACHINE STOPPED (min)
80	110
90	335
100	790
110	1040
70	1265
120	1405
60	1690
30	5390
50	7537
40	7915

## 5.5 SVILUPPO DEL MODELLO DI SIMULAZIONE

Con l'obiettivo di prevedere rotture accidentali, evitare la propagazione dei guasti, conseguire un miglioramento della qualità del prodotto, monitorare lo stato di danneggiamento della macchina, valutare l'impatto economico, individuare le strategie manutentive, ed analizzare i consumi energetici, nel seguente capitolo si descrivono:

- **L'IMPOSTAZIONE DEL MODELLO DI SIMULAZIONE SVILUPPATO,**
- **LA SELEZIONE DEI KEY PERFORMANCE INDICATORS (KPIs)**
- **LO SVILUPPO DI UNO STRUMENTO PER IL CALCOLO AUTOMATICO DEI KPIs**

A tal proposito, sono stati utilizzati i seguenti programmi: GrabCAD per la restituzione di modelli in 3D, Plant Simulation per l'implementazione di diversi scenari produttivi, Excel tramite lo sviluppo di un programma in Visual Basic (VBA) utile per automatizzare il processo di analisi dei risultati.

### 5.5.1 MODELLO DI SIMULAZIONE

Tramite l'utilizzo del software di simulazione **Plant Simulation**, sviluppato dalla Siemens PLM Software, si è analizzato come varia lo scenario produttivo della linea attuando politiche manutentive diverse da quella attuale sull'OP40.

L'interfaccia grafica del programma permette di familiarizzare subito con le varie funzioni e di vedere direttamente l'evoluzione del progetto.

A monte e a valle di ogni linea deve essere inserito il comando di arrivo (*Source*) e di uscita (*Drain*) del prodotto che permette di assegnare attributi dimensionali e tempo di arrivo delle singole tipologie di materiali.

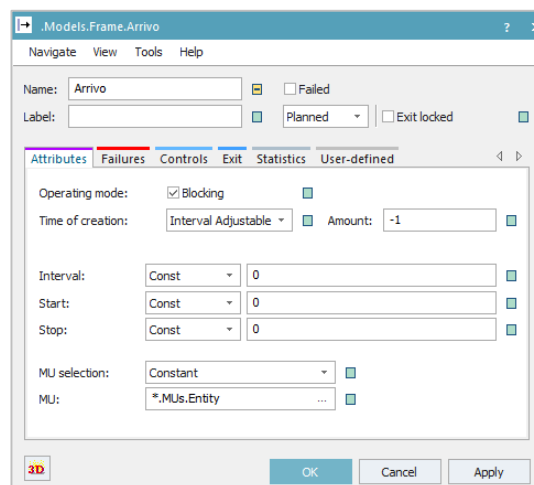


Figura 5.9. Interfaccia utente: gli attributi

Inoltre, nella casella "Type statistics" della stazione in uscita vengono riportati i risultati riguardanti la produzione dell'intera linea come:

- Numero di pezzi prodotti durante la simulazione (*throughput*).



- *Throughput per day*,
- *Throughput per hour*,
- Percentuale di lavoro (*working*),
- Percentuale di attesa (*waiting*),
- Percentuale di fallimento (*failed*).

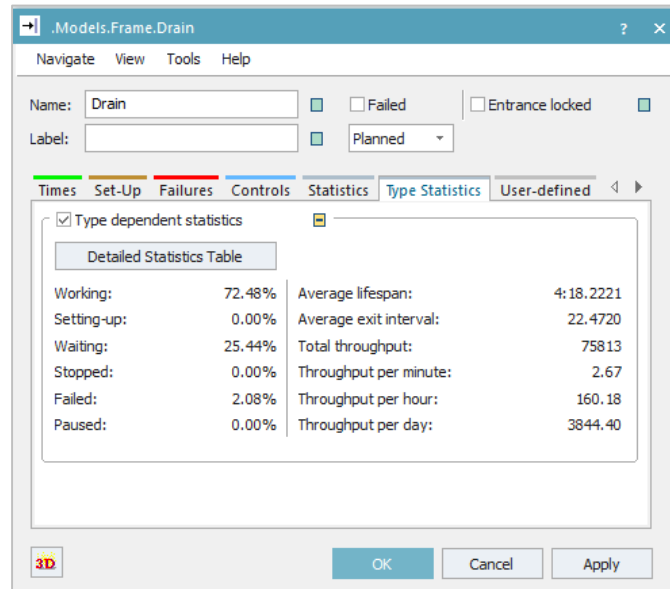


Figura 5.10. Interfaccia utente: le statistiche

Attraverso la *Toolbox* nella sezione *Material Flow* è possibile inserire e collegare i vari tipi di processo della linea produttiva a seconda che essi siano:

- Singoli processi,
- Più processi che avvengono parallelamente,
- Processi di assemblaggio,
- Processi di disassemblaggio.

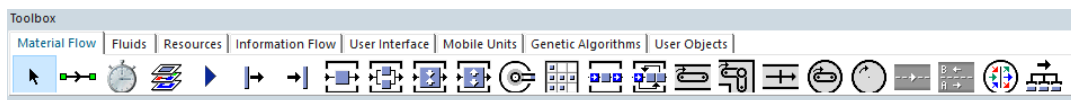


Figura 5.11. Toolbox: il flusso di materiale

Per vedere se il modello funziona correttamente, è possibile testarlo usando il comando *EventController* che ha il compito di coordinare gli eventi che si svolgono durante la simulazione e quindi:

- Iniziare,
- Fermare,
- Ripristinare,
- Alterare la velocità della simulazione,
- Inserire data di inizio e fine simulazione.

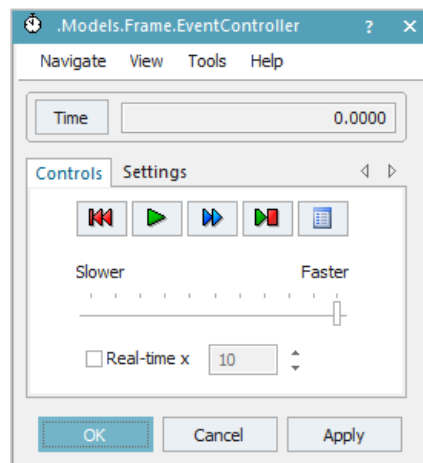


Figura 5.12. Interfaccia utente: il controllore

Similmente alle caratteristiche di arrivo e uscita del materiale, si possono modificare le proprietà delle singole lavorazioni.

È possibile impostare il *processing time* (tempo effettivo di lavorazione) il *set-up time* (tempo necessario alla configurazione dell'inizio lavorazione) ed il *recovery time* (tempo necessario al trasporto e smaltimento del pezzo in uscita) per ogni singola stazione.

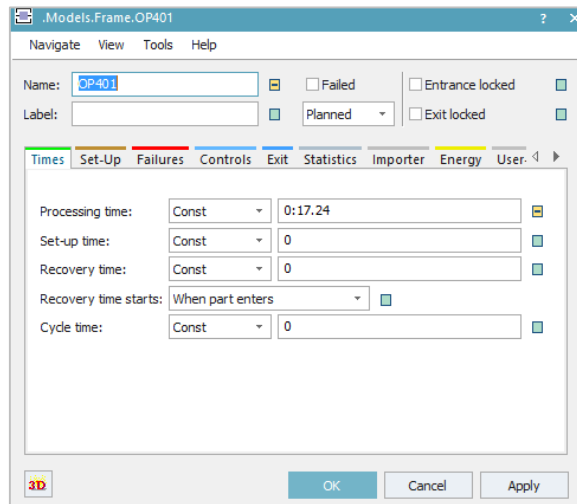


Figura 5.13. Interfaccia utente: i tempi

Per i singoli dati è possibile impostare una *distribuzione di variazione* del volare effettivo per tener conto delle possibili alterazioni temporali del ciclo causate da ritardi o imperfezioni dello stesso processo di lavorazione.

Nel pannello delle “*failure*” si può stabilire la durata e la frequenza della inattività e, a seconda che questa sia programmata o sistematica, anche il tempo necessario alla riparazione per l’avvio delle attività.

La risorsa si fermerà dopo un tempo *MTBF*, per un tempo pari a *MTTR* per un numero di volte pari al numero di guasti della risorsa.

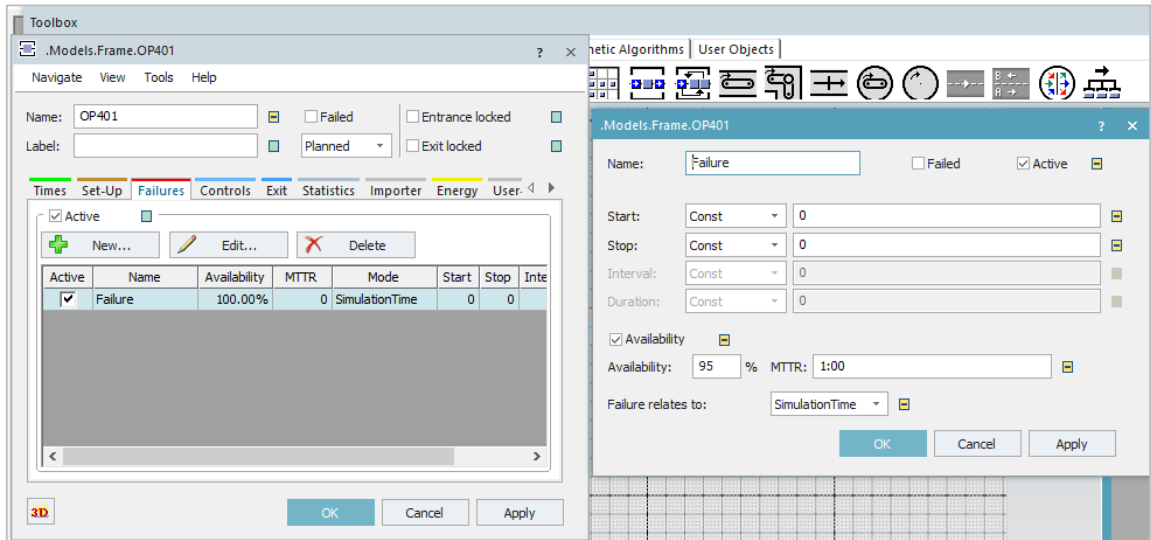


Figura 5.14. Interfaccia utente: i guasti

Dopo aver costruito il modello ed aver impostato e lanciato la simulazione, il programma permette fin da subito di avere dei dati qualitativi sia dei singoli processi che della linea complessiva.

Per quanto riguarda i risultati finali è possibile ricavare i dati di:

- Numero di pezzi prodotti durante la simulazione (*throughput*),
- *Throughput per day*,
- *Throughput per hour*,
- Percentuale di lavoro (*working*),
- Percentuale di attesa (*waiting*),
- Percentuale di fallimento (*failed*).

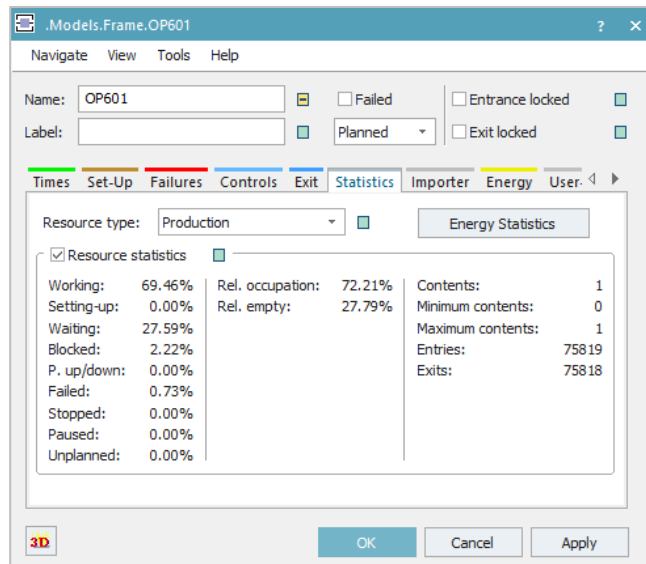


Figura 5.15. Interfaccia utente: le statistiche

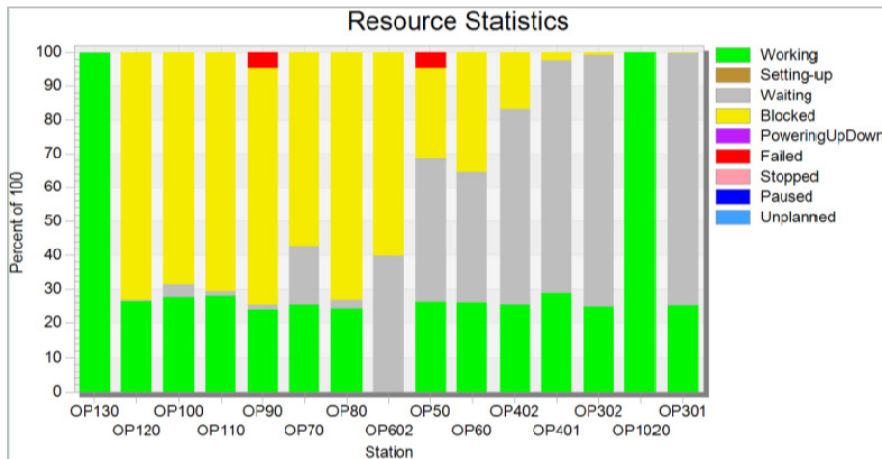


Figura 5.16. Esempio del grafico delle statistiche

Le informazioni ottenute possono essere subito riportate su dei grafici per visualizzare come e quanto le percentuali di bloccaggio e attesa dei singoli processi influiscano sugli effettivi tempi di lavorazione.

Il programma ci consente inoltre di rappresentare sia in 2D che in 3D il modello creato durante il ciclo di simulazione e notare oltre al flusso del materiale anche l'andamento dei grafici riassuntivi.

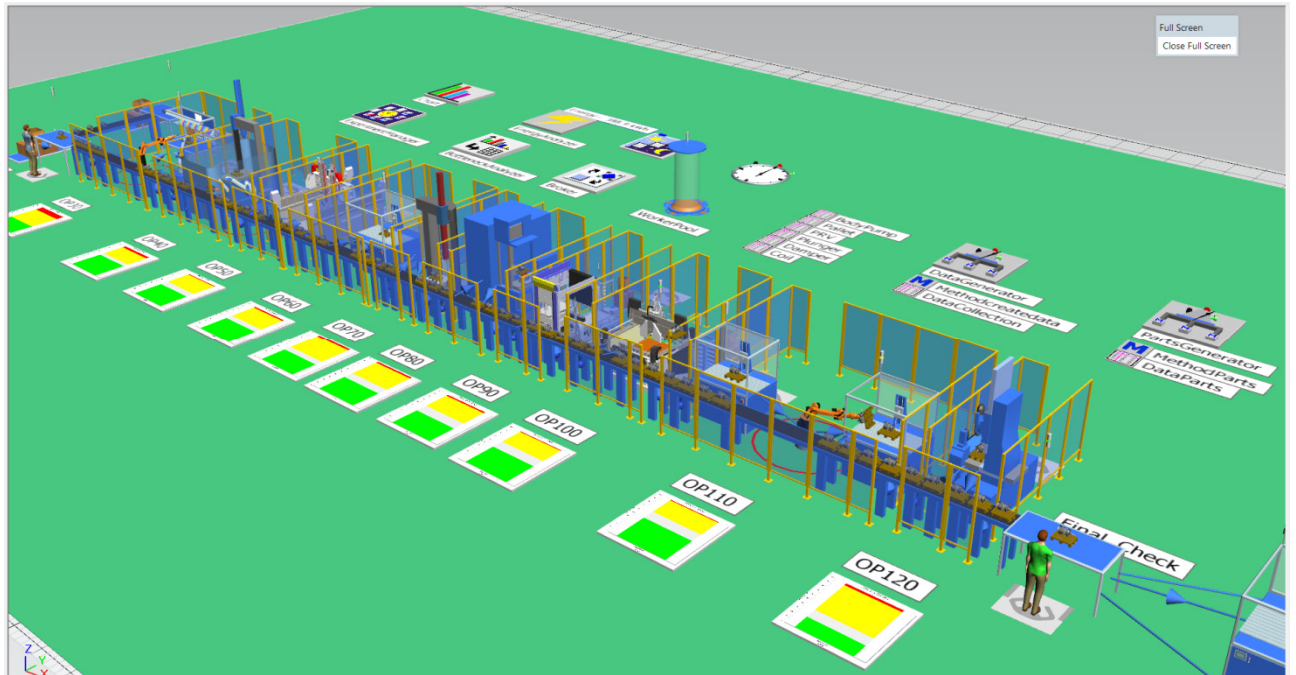


Figura 5.17. La linea produttiva

Il modello appena descritto può essere modificato e reso simile a situazioni reali aggiungendo parametri funzionali che tengano conto delle singole problematiche e caratteristiche del particolare processo come manutenzioni, ritardi programmati, limite di scorte, velocità dei nastri trasportatori, limitata capacità dei magazzini posti a fine stazione e di tutte quelle inefficienze che possono verificarsi durante il ciclo di lavorazione della linea.

Per quanto riguarda i nastri trasportatori ci è permesso di impostare, oltre a proprietà geometriche e di ingombro fisico, anche efficienze di funzionamento e valore di potenza elettrica utilizzata (*working e off*).

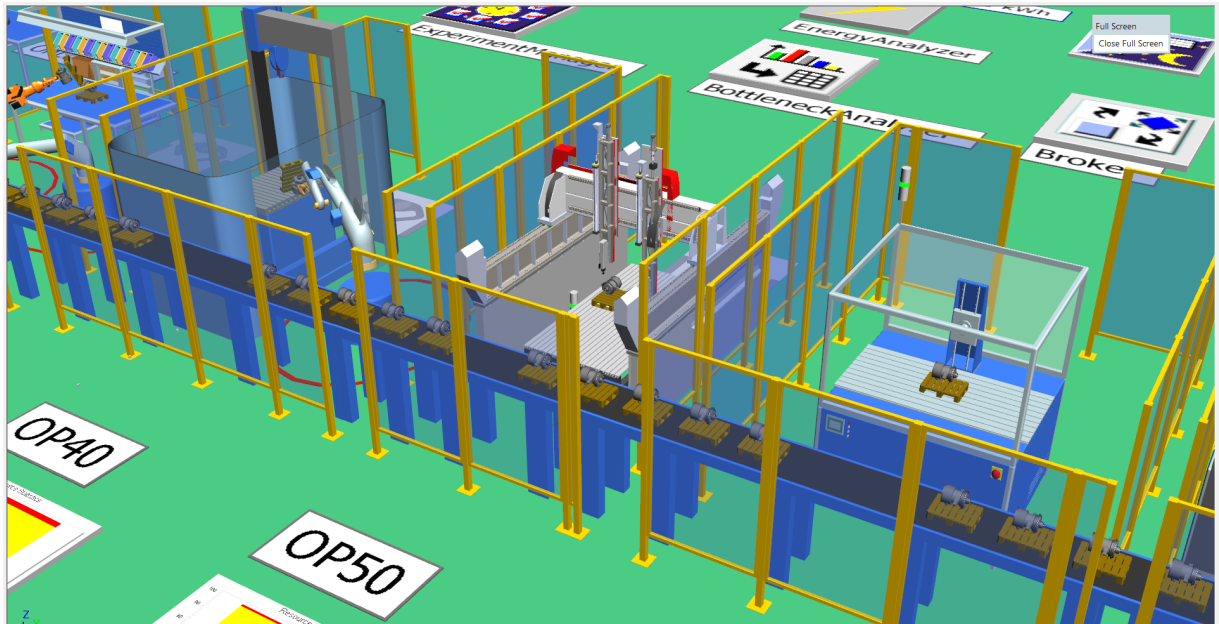


Figura 5.18. Dettaglio della linea produttiva

Un'ulteriore caratteristica delle stazioni che il software permette di modellare è quella della presenza di lavoratori specializzati all'interno della filiera; i "workers" possono essere integrati al processo ed assegnati alle diverse stazioni utilizzando i comandi nella barra *resources* presenti nella *Toolbox*.

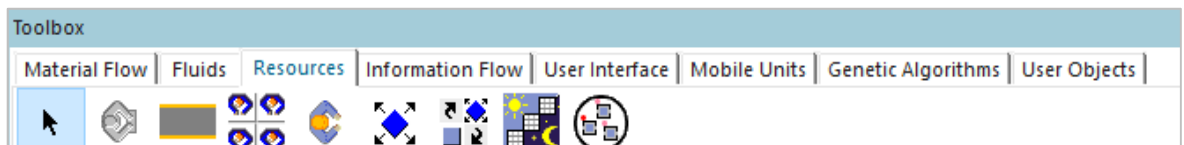


Figura 5.19. Toolbox: le risorse lavorative

Bisogna, innanzitutto, creare la postazione di lavoro (*worker place*) della risorsa umana (*worker*) ed assegnarla ad una stazione.

Il software permette di posizionare una stazione di riposo (*worker pool*) dalla quale i singoli lavoratori escono per dirigersi alle varie postazioni e poi ritornarvi, dopo aver concluso la lavorazione.

Il *tool* settaggio dei comandi (*broker*) permette di stabilire le varie caratteristiche dei lavoratori come turni di lavoro, capacità di svolgere determinate mansioni, tempi di pausa, efficienza, postazioni di lavoro dedicate, velocità di movimento, etc.

### 5.5.2 DEFINIZIONE DEI KPIS

Nel suddetto paragrafo, come prima cosa si descrivono i *Key Performance Indicators*, utilizzati come indici di andamento del processo aziendale. Nel caso in esame, il calcolo dei KPI è stato automatizzato al fine di ridurre i tempi di calcolo e di valutazione delle performance di simulazione, nonché al fine di snellire i processi delle campagne simulate. Dopo aver raggruppato tutti i dati utili all'analisi dei processi simulati, è stata effettuata una valutazione globale dei risultati ottenuti. Berrah et al. (2000) forniscono la seguente definizione, da un punto di vista generale, di sistema di KPIs: *"Un set di indicatore di performance, ognuno dei quali è in relazione ad un obiettivo dato del sistema di obiettivi dell'impresa"*.

Il processo (ad esempio la totalità delle attività manutentive) è considerato come una scatola nera, mentre l'input (ad esempio le ore lavoro) e l'output (ad esempio i pezzi prodotti) devono essere definiti chiaramente. Nel caso dell'azienda Marelli i punti più interessanti saranno i seguenti:

- numero di rotture per macchina o apparato;
- analisi delle rotture (cause, ripetitività, misure correttive, ingorghi);
- analisi del lavoro (tempo speso per macchina o per tipo di lavoro, pezzi di ricambio usati);
- costi di manutenzione per macchina o apparato;
- analisi dei consumi energetici.

Le informazioni sono state focalizzate sull'efficacia ed efficienza del sistema manutentivo, principalmente delle sue attività considerate più critiche.

A tal proposito, i Key Performance Indicators, o KPIs, provvedono a fornire uno strumento che confronta i risultati correnti con obiettivi predefiniti e permetta quindi di avviare le necessarie azioni per conseguire tali obiettivi. In generale, i principi caratteristici che le misure dei KPIs dovrebbero seguire sono:

- Le misure devono essere specifiche dell'organizzazione, ossia sono collegate alla strategia dell'azienda;
- Le misure devono essere amichevoli: semplici, facili da usare, immediatamente disponibili.;
- L'efficacia del sistema ed il suo contributo alla performance globale devono essere rivisti periodicamente per seguire i cambiamenti e gli sviluppi che devono essere fatti;
- Le misure devono inoltre avere carattere globale.



In generale, molti degli indicatori di performance di manutenzione discussi in letteratura sono sviluppati per supportare decisioni operative, anche se molto spesso, essi sono solo una campana d'allarme che qualche azione deve essere intrapresa.

Considerando che la manutenzione è una funzione di supporto essenziale nel processo produttivo analizzato, si ritiene che il suo contributo possa essere analizzato come funzione delle seguenti variabili: il costo dell'azione manutentiva, l'effetto dell'interruzione causata dall'azione manutentive richiesta, l'effetto della performance dell'equipment, l'effetto sugli aspetti energetici.

Al fine di rispondere a tali specifiche, si è deciso di analizzare il sistema in esame come una Blackbox e di utilizzare come base dei *Key Performance Indicators* gli indicatori attuali dell'azienda Marelli:

- **Overall Equipment Effectiveness** (misure di performance relative all'equipment)
- **Costi di manutenzione** (misure di performance relative ai costi)
- **Efficienza energetici** (misure di performance relative ai processi)

Seguendo la logica attuale dell'azienda Marelli, il sistema produttivo in esame viene considerato come una 'black box', da cui:

$$EFFICIENZA = \frac{Input\ teorico}{Input\ reale} \quad (5.8)$$

$$EFFICACIA = \frac{Output\ reale}{Output\ teorico} \quad (5.9)$$

$$PRODUTTIVITÀ = \frac{Output}{Input} \quad (5.10)$$

Di fondamentale importanza è definire un indicatore di prestazione che possa essere rappresentativo della situazione attuale e futura dell'impianto. Generalmente l'indicatore utilizzato è l'**Overall Equipment Effectiveness (OEE)**.

Tale indicatore è costituito da tre voci fondamentali, ovvero disponibilità, efficienza delle performance e qualità.

La disponibilità (*availability, A*) indica il rapporto tra il tempo realmente disponibile per la produzione (sottraendo tutte le fermate pianificate, i *setup*, i guasti) e il tempo totale in cui l'impianto è potenzialmente in funzione ed è calcolabile come:

$$A = \frac{\text{Tempo di funzionamento}}{\text{Tempo a disposizione}} = \frac{\text{Tempo a disposizione} - \text{tempo di fermata}}{\text{Tempo a disposizione}} = \frac{\text{Up Time}}{\text{Up Time} + \text{Down Time}} \quad (5.11)$$

L'efficienza delle *performance* (performance efficiency, P) è il rapporto tra il tempo realmente assegnato alla produzione (rispetto a quello teorico) e il tempo realmente disponibile per la produzione ed è possibile calcolarla in termini di tempi persi, però dal momento che i tempi di microfermate e riduzioni di velocità sono difficilmente misurabili si preferisce riferirsi alla produzione conforme totale realizzata in un certo intervallo temporale per valutare l'efficienza:

$$P = \frac{\text{Produzione con fermate totale} * \text{Tempo Ciclo Teorico}}{\text{Tempo Operativo Attuale}} \quad (5.12)$$

La *qualità* (quality, Q) è definita come il rapporto tra la produzione totale conforme alle specifiche e quella totale:

$$Q = \frac{\text{Pezzi realizzati conformemente alle specifiche}}{\text{Pezzi complessivamente realizzati}} = \frac{\text{Pezzi complessivamente realizzati} - \text{Scarti}}{\text{Pezzi complessivamente realizzati}} \quad (5.13)$$

L'*OEE* risulta dal prodotto delle tre voci:

$$OEE = A * P * Q \quad (5.14)$$

A livello industriale esistono dei valori target per ognuno degli indici che vanno a comporre l'OEE diversificati a seconda del settore di appartenenza.

Nella tabella seguente sono riportati alcuni esempi:

Tabella 5.11. Target degli indici a livello industriale

SETTORE	DISPONIBILITÀ	PRESTAZIONI	QUALITÀ	OEE
Manifatturiero	>90%	>95%	>99,9%	60%<OEE<85%
Processo	70%<OEE<90%			
Metallurgico	65%<OEE<70%			
Cartario	70<OEE<95%			

Ogni azienda avrà poi dei valori target che si propone di raggiungere e mantenere che possono essere imposti dal mercato in cui è inserita o dallo standard ideale per lo specifico prodotto.

Di seguito la formula utilizzata per il calcolo dei costi di manutenzione:

$$CT = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (W_j * T_{i,j}) + \sum_{i=1}^n S_i + \sum_{i=1}^n (E_i * C) \quad (5.15)$$

Con

$1 < i < n$        $n$ : numero degli interventi in un giorno

$1 < j < m$        $m$ : numero di manutentori dell'intervento  $i$ -esimo

$CT$  = Costo totale della manutenzione

$W_j$  = Costo orario del personale di manutenzione  $j$ -esimo

$T_{i,j}$  = tempo impiegato dall'operatore  $j$  – esimo nell'intervento  $i$  – esimo

$S_i$  = Costo di sostituzione dell'equipment per l'intervento  $i$  – esimo

$E_i$  = Consumo energetico del guasto  $i$  – esimo [kWh]

$C$  = Costo energia [€/kWh]

### 5.5.3 ALGORITMO PER IL CALCOLO AUTOMATICO DEI KPI

Uno strumento fondamentale per l'analisi dei dati ottenuti dalla simulazione è sicuramente Microsoft Excel. Trattandosi di un software esterno, i dati dovrebbero essere immessi manualmente nel foglio di calcolo, tuttavia esistono delle possibilità di estrazione automatica di tabelle.

Per prima cosa è necessario capire quali sono i dati di interesse, ed in questo caso l'attenzione si rivolge sui tempi di processo, di attesa, di blocco e di guasto della linea oltre al numero di guasti, dei pezzi prodotti (di prima qualità, rigettati e scartati).

Si vuole quindi restituire una tabella relativa ai tempi ed una relativa ai pezzi prodotti.

Dalla simulazione si provvede alla costruzione della procedura di estrazione.

Inseriamo un "Generatore", un "Metodo", ed una "Tabella dati" per ogni tabella da restituire. È stato inserito anche un metodo per il reset delle tabelle qualora si provveda ad azzerare la simulazione, e quindi alla cancellazione dei dati nelle tabelle.

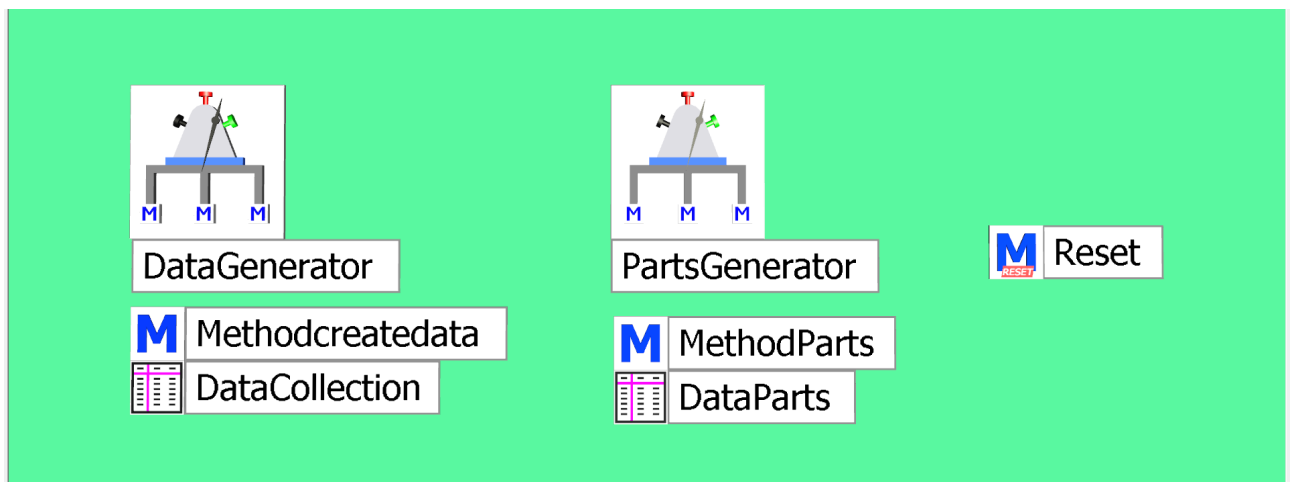


Figura 5.20. Generatore, metodo e tabella dati

Il generatore serve, come suggerisce il nome stesso, a generare oggetti come report testuali, fogli di calcolo e tabelle all'interno di Plant Simulation secondo il metodo associato. A *DataGenerator* viene associato il *Methodcreatedata* che restituisce i parametri del foglio Excel "*DataCollection*" (tabella dei tempi e del numero di failure associati ad ogni macchina), mentre *PartsGenerator* si lega a *MethodParts*, che crea una tabella che visualizza i pezzi prodotti.

Importante è il CODICE DI COMPILAZIONE con il quale costruiamo le tabelle. Per *DataCollection* si vuole avere sulle colonne "j" i tempi, mentre per le righe "i" le macchine. Il codice è il seguente:

## -- .Models.Model.Methodcreatedata

*DataCollection.writeRow(1,DataCollection.yDim+1,root.OP30.MainOP30.StatWorkingTime,root.OP30.MainOP30.StatWaitingTime,root.OP30.MainOP30.StatBlockingTime,root.OP30.MainOP30.StatFailCount,root.OP30.MainOP30.MTTR,root.OP30.MainOP30.StatFailTime)*

*DataCollection.writeRow(1,DataCollection.yDim+1,root.OP40.MainOP40.StatWorkingTime,root.OP40.MainOP40.StatWaitingTime,root.OP40.MainOP40.StatBlockingTime,root.OP40.MainOP40.StatFailCount,root.OP40.MainOP40.MTTR,root.OP40.MainOP40.StatFailTime)*

*DataCollection.writeRow(1,DataCollection.yDim+1,root.OP50.MainOP50.StatWorkingTime,root.OP50.MainOP50.StatWaitingTime,root.OP50.MainOP50.StatBlockingTime,root.OP50.MainOP50.StatFailCount,root.OP50.MainOP50.MTTR,root.OP50.MainOP50.StatFailTime)*

*DataCollection.writeRow(1,DataCollection.yDim+1,root.OP60.MainOP60.StatWorkingTime,root.OP60.MainOP60.StatWaitingTime,root.OP60.MainOP60.StatBlockingTime,root.OP60.MainOP60.StatFailCount,root.OP60.MainOP60.MTTR,root.OP60.MainOP60.StatFailTime)*

*DataCollection.writeRow(1,DataCollection.yDim+1,root.OP70.MainOP70.StatWorkingTime,root.OP70.MainOP70.StatWaitingTime,root.OP70.MainOP70.StatBlockingTime,root.OP70.MainOP70.StatFailCount,root.OP70.MainOP70.MTTR,root.OP70.MainOP70.StatFailTime)*

*DataCollection.writeRow(1,DataCollection.yDim+1,root.OP80.MainOP80.StatWorkingTime,root.OP80.MainOP80.StatWaitingTime,root.OP80.MainOP80.StatBlockingTime,root.OP80.MainOP80.StatFailCount,root.OP80.MainOP80.MTTR,root.OP80.MainOP80.StatFailTime)*

*DataCollection.writeRow(1,DataCollection.yDim+1,root.OP90.MainOP90.StatWorkingTime,root.OP90.MainOP90.StatWaitingTime,root.OP90.MainOP90.StatBlockingTime,root.OP90.MainOP90.StatFailCount,root.OP90.MainOP90.MTTR,root.OP90.MainOP90.StatFailTime)*

*DataCollection.writeRow(1,DataCollection.yDim+1,root.OP100.MainOP100.StatWorkingTime,root.OP100.MainOP100.StatWaitingTime,root.OP100.MainOP100.StatBlockingTime,root.OP100.MainOP100.StatFailCount,root.OP100.MainOP100.MTTR,root.OP100.MainOP100.StatFailTime)*

*DataCollection.writeRow(1,DataCollection.yDim+1,root.OP110.MainOP110.StatWorkingTime,root.OP110.MainOP110.StatWaitingTime,root.OP110.MainOP110.StatBlockingTime,root.OP110.MainOP110.StatFailCount,root.OP110.MainOP110.MTTR,root.OP110.MainOP110.StatFailTime)*

*DataCollection.writeRow(1,DataCollection.yDim+1,root.OP120.MainOP120.StatWorkingTime,root.OP120.MainOP120.StatWaitingTime,root.OP120.MainOP120.StatBlockingTime,root.OP120.MainOP120.StatFailCount,root.OP120.MainOP120.MTTR,root.OP120.MainOP120.StatFailTime)*

Per *DataParts* si vuole ottenere in ordine i pezzi di prima qualità, rigettati e di scarto, quindi va fatto riferimento ai pezzi in uscita da ogni “*Stazione dummy*” creata allo scopo di distinguere la qualità dei pezzi prodotti.

## -- .Models.Model.MethodParts

*DataParts.writeRow(1,DataParts.yDim+1,root.Good.StatNumOut,root.Rejected.StatNumOut,root.Waste.StatNumOut)*

Importante è specificare gli istanti in cui si vogliono reperire i dati, quindi nel generatore vanno inseriti l'istante di inizio e di fine della compilazione ed eventualmente l'intervallo di generazione di nuovi dati. Ad esempio, si vuole effettuare la generazione di dati al termine di 24h.

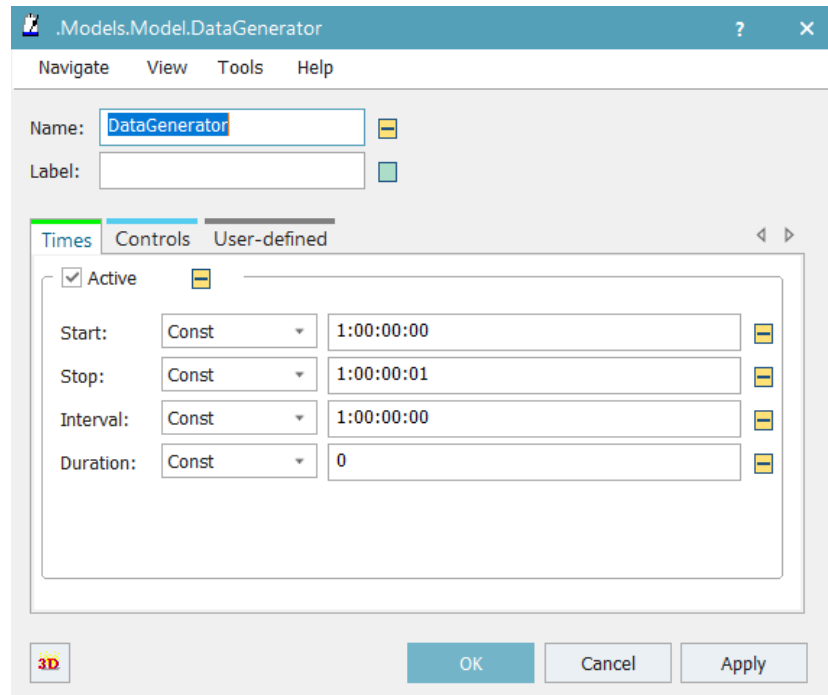


Figura 5.21. Specifica degli istanti di tempo per il reperimento dei dati

Al termine della simulazione, le tabelle si presentano come mostrato nelle seguenti figure:

**1° Foglio Excel: DataCollection**

	string 0	time 1	time 2	time 3	integer 4	time 5	time 6	st 7
	string Object	Working Time	Waiting Time	Blocked Time	Number of Failure	MTTR	Failure Time	
1	OP30.MainOP30	9:29:10.0855	40.3453	11:58:26.4208	1	59:53.0000	2:31:43.1483	
2	OP40.MainOP40	12:35:13.6152	54:45.5342	8:54:36.2760	1	57:46.0000	1:35:24.5746	
3	OP50.MainOP50	11:29:54.3375	2:30:15.4473	9:40:01.4797	1	1:16:54.0000	19:48.7355	
4	OP60.MainOP60	11:20:09.7460	2:01:29.0383	10:01:47.2917	1	40:14.0000	36:33.9240	
5	OP70.MainOP70	9:27:45.4500	2:05:47.7667	11:44:53.9535	1	1:00:14.0000	41:32.8298	
6	OP80.MainOP80	10:15:52.2120	2:39:21.6435	10:27:12.3151	1	27:30.0000	37:33.8293	
7	OP90.MainOP90	10:24:10.2991	3:14:18.6573	9:48:23.3500	2	23:56.0000	33:07.6936	
8	OP100.MainOP100	11:54:14.6741	3:13:19.6973	8:03:18.4890	2	39:30.0000	49:07.1395	
9	OP110.MainOP110	12:01:18.8395	3:40:58.8647	8:01:06.6109	1	41:36.0000	16:35.6849	
10	OP120.MainOP120	5:35:31.1169	3:27:17.0821	14:12:39.0630	1	52:00.0000	44:32.7380	
11								
12								
13								
14								

Figura 5.22. Data collection

## 2 Foglio Excel: *DataParts*

	string 0	integer 1	integer 2	integer 3	string 4
string		Good	Rejected	Waste	
1	Pump_Assembly	2177	243	24	
2					
3					

Figura 5.23. *Data parts*

È importante che ogni colonna fornisca il formato del dato che si vuole mostrare. Ad esempio, “time” visualizza il tempo e viene fornito per ogni colonna d’interesse, mentre “integer” fruisce un numero intero, che fa riferimento al n° dei failures e dei pezzi ottenuti. Se si imposta un indice (ovvero i nomi delle rispettive righe e colonne), questo non viene modificato ogni qualvolta che si compila la tabella.

Infine, il metodo per il reset delle due tabelle è il seguente:

```
-- .Models.Model.Reset
```

```
DataCollection.delete
```

```
DataParts.delete
```

A simulazione terminata, si può procedere all’esportazione manuale delle tabelle sotto forma di un nuovo file excel oppure direttamente in un foglio di calcolo di un file già creato. Nel nostro caso abbiamo già un file chiamato “**SimulationData Marelli**”, quindi si procede di pari passo:

1- Estrazione tabella d'interesse

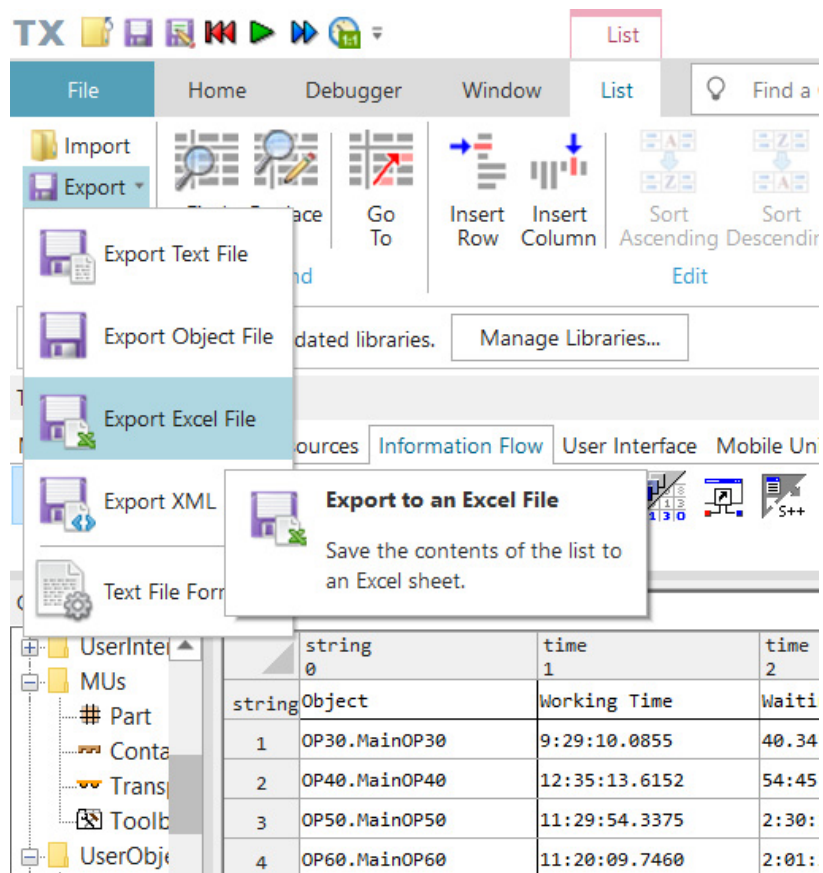


Figura 5.24. Estrazione dati da Plant Simulation ad Excel

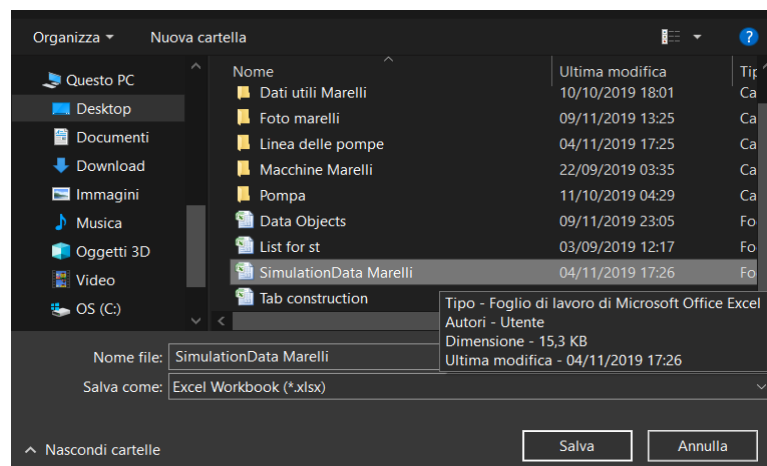


Figura 5.25. Estrazione dati da Plant Simulation ad Excel



## 2- Specifica del foglio di destinazione

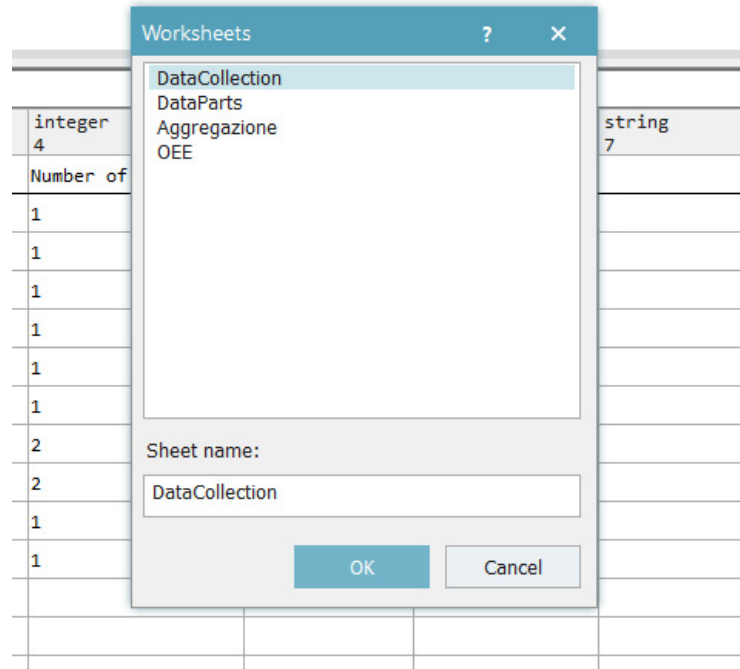


Figura 5.26. Estrazione dati da Plant Simulation ad Excel

È importantissimo che la procedura non vada a sovrascrivere altri fogli, altrimenti la perdita dei dati che dimorano nel foglio di calcolo sovrascritto è inevitabile. Per questo si raccomanda di impostare una protezione alle celle dei fogli di calcolo non aggiornabili.

Compiuta l'esportazione, i dati vengono rielaborati automaticamente su excel.

***È stato scritto un codice in Visual Basic per l'analisi istantanea dei dati una volta estratti dal software Plant Simulation, di cui si ringrazia la dott.ssa Laura Lucantoni.***

Nello specifico i dati esportati (in secondi) riguardano:

- Eventi di guasto
- Consumi energetici

Come prima cosa sono stati dichiarati i fogli excel su cui poter eseguire l'analisi:

- "Data Collection" contiene tutti i dati esportati da Plant Simulation relativi agli eventi di guasto;
- "Energy" contiene tutti i dati esportati da Plant Simulation relativi ai consumi energetici;
- "Data Parts" contiene l'aggregazione dei dati esportati;
- "KPIs" contiene il report di tutti gli indicatori aggiornati automaticamente ad ogni nuova simulazione, nonché il pulsante di attivazione macro per l'esecuzione del programma VBA.

```
'Dichiarazione dei fogli
Set sh1 = Worksheets("DataCollection")
Set sh2 = Worksheets("DataParts")
Set sh3 = Worksheets("Aggregazione")
Set sh4 = Worksheets("KPIs")
Set sh5 = Worksheets("Energy")
```

Figura 5.27. VBA: Dichiarazione dei fogli

In Fig. 29, si riporta il codice scritto per il calcolo dei dati utili alla definizione dei KPIs della linea, al fine di aggregare i dati delle varie OP della linea. Nello specifico si implementa un ciclo "For" che consente di aggiornare iterativamente la somma dei tempi di lavoro, di attesa, di guasto, di blocco e anche il numero di guasti totali della linea produttiva. Un esempio delle formule utilizzate per un turno di lavoro è:

$$\text{Tempo operativo [min]} = \sum_{i=1}^n \text{Tempo di lavoro macchina } i - \text{esima} \quad (5.16)$$

Con

$n$  = numero totale delle macchine in linea

```
For j = 2 To 11
s_Working = s_Working + sh1.Cells(j, 2)
s_Waiting = s_Waiting + sh1.Cells(j, 3)
s_NFailure = s_NFailure + sh1.Cells(j, 5)
s_Blocked = s_Blocked + sh1.Cells(j, 6)
s_Failed = s_Failed + sh1.Cells(j, 7)
Next j
```

Figura 5.28. VBA: Aggregazione dei dati

A questo punto si procede con i seguenti calcoli:

$$\begin{aligned} \text{Tempo Totale [min]} \\ &= \text{Tempo di lavorazione} + \text{Tempo di attesa} + \text{Tempo di blocco} \\ &+ \text{Tempo di guasto} \quad (5.17) \end{aligned}$$

$$\% \text{ Tempo di lavorazione di un turno di lavoro} = \frac{\text{Tempo di lavorazione}}{\text{Tempo Totale}} \quad (5.18)$$

La Formula 18 si applica anche a tutti gli altri tempi (attesa, blocco e guasto).

$$\begin{aligned} \text{Minuti di fermo globale [min]} &= \% \text{ Tempo operativo} * \text{minuti di un turno} * \\ &\text{numero di turni} \quad (5.19) \end{aligned}$$

```

TT = s_Working + s_Waiting + s_Blocked + s_Failed
sh3.Cells(2, 6) = TT

'Percentuali
p_Working = s_Working / TT
sh3.Cells(3, 2) = p_Working
p_Waiting = s_Waiting / TT
sh3.Cells(3, 3) = p_Waiting
p_Blocked = s_Blocked / TT
sh3.Cells(3, 4) = p_Blocked
p_Failed = s_Failed / TT
sh3.Cells(3, 5) = p_Failed

'Minuti di fermo macchina
min_turno = 480: sh3.Cells(7, 2) = min_turno
n_turni = 21: sh3.Cells(8, 2) = n_turni

t_Working = (min_turno * n_turni) * p_Working
sh3.Cells(4, 2) = t_Working
t_Waiting = (min_turno * n_turni) * p_Waiting
sh3.Cells(4, 3) = t_Waiting
t_Blocked = (min_turno * n_turni) * p_Blocked
sh3.Cells(4, 4) = t_Blocked
t_Failed = (min_turno * n_turni) * p_Failed
sh3.Cells(4, 5) = t_Failed

```

Figura 5.29. VBA: Elaborazione dei dati

L'output dell'elaborazione dei dati viene salvato nel foglio Excel "DataParts", come segue:

Tabella 5.12. Aggregazione dei dati

	Working	Waiting	Blocked	Failed
<b>SUM (sec)</b>	376400,4	85694,07679	370345,2	31560,3
<b>Portion (%)</b>	0,435649	0,099182959	0,42864	0,036528
<b>Min/day</b>	627,334	142,8234613	617,2421	52,6005

Il codice in Figura 31 è indispensabile affinché il software individui l'ultima riga piena del foglio "KPIs" al fine di aggiornare i dati senza eliminare quelli delle precedenti simulazioni. Questo foglio, dunque, si comporta come una sorta di Database per i KPIs.

```
n = sh4.Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row
If n > 1 Then
    N_Sim = sh4.Cells(n, 1)
End If

N_Sim = N_Sim + 1
i = n + 1

sh4.Cells(i, 1) = N_Sim
```

Figura 5.30. VBA: Elaborazione dei dati

A questo punto si procede con il calcolo dell'OEE:

$$\text{Disponibilità} = \frac{\text{Tempo operativo}}{\text{Disponibilità attuale}} = \frac{\text{Disponibilità attuale} - \text{Tempo di guasto} - \text{Tempo di attesa}}{\text{Disponibilità attuale}} \quad (5.20)$$

Con disponibilità attuale pari a circa 157 minuti.

```
'Disponibilità
pz_Rigettati = sh2.Cells(2, 3)
    sh4.Cells(i, 4) = pz_Rigettati
pz_Scartati = sh2.Cells(2, 4)
    sh4.Cells(i, 5) = pz_Scartati
pz_Buoni = sh2.Cells(2, 2)
    sh4.Cells(i, 6) = pz_Buoni
pz_Totali = pz_Rigettati + pz_Scartati + pz_Buoni
    sh4.Cells(i, 3) = pz_Totali
Disp_Attuale = 9450
    sh4.Cells(i, 7) = Disp_Attuale
```

Figura 5.31. VBA: Calcolo della disponibilità

$$Performance = \frac{Tempo\ operativo\ netto}{Tempo\ operativo} \quad (5.21)$$

Con

TC Reale = 0,283 secondi

TC = 0,267 (che corrisponde a 15,6 secondi)

Tempo operativo netto = Tempo operativo – Tempo ciclo differente (22)

Tempo ciclo differente = (TC reale – TC) \* Numero di pezzi totali prodotti (23)

Numero di pezzi totali prodotti = pezzi rigettati + pezzi scartati + pezzi buoni (24)

```
'Tempo Operativo
sh4.Cells(i, 8) = t_Failed
sh4.Cells(i, 9) = t_Waiting

T_Operativo = Disp_Attuale - t_Failed - t_Waiting
sh4.Cells(i, 10) = T_Operativo

'Tempo Op. Netto
TC_Reale = 0.283
sh4.Cells(i, 11) = TC_Reale
TC = 0.267
sh4.Cells(i, 12) = TC

TC_Differente = (TC_Reale - TC) * pz_Totali
sh4.Cells(i, 13) = TC_Differente

T_OpNetto = T_Operativo - TC_Differente
sh4.Cells(i, 14) = T_OpNetto
```

*Figura 5.32. VBA: Calcolo del tempo operativo*

$$Qualità = \frac{Tempo\ operativo\ a\ valore\ aggiunto}{Tempo\ operativo\ netto} \quad (5.25)$$

$$OEE = Disponibilità * Qualità * Performance \quad (5.26)$$

```
'OEE
DISPONIBILITA = T_Operativo / Disp_Attuale
sh4.Cells(i, 17) = DISPONIBILITA
PERFORMANCE = T_OpNetto / T_Operativo
sh4.Cells(i, 18) = PERFORMANCE
QUALITA = T_OpValAgg / T_OpNetto
sh4.Cells(i, 19) = QUALITA
OEE = DISPONIBILITA * PERFORMANCE * QUALITA
sh4.Cells(i, 20) = OEE
```

*Figura 5.33. VBA: Calcolo dell'OEE*

Foglio Excel in output “KPIs”, relativo al calcolo dell’OEE:

	A	B	C	D	E	F
1						
2	Pezzi Totali Prodotti	2444				
3	Rigettati	243				
4	Scartati	24				
5	Pezzi di prima Qualità	2177		DISPONIBILITA'	0,855241513	
6	Disponibilità Attuale	1350		PERFORMANCE	0,966131291	
7	Tempo di Setup/Failure	52,60049605		QUALITA'	0,941835387	
8	Tempo di Attesa	142,8234613		OEE	0,778215587	
9	Tempo Operativo	1154,576043				
10	Tempo Ciclo a pezzo Reale	0,283				
11	Tempo Ciclo a pezzo	0,267				
12	Tempo Ciclo differente	39,104				
13	Tempo Operativo Netto	1115,472043				
14	Tempo Rework	64,881				
15	Tempo Operativo a Valore Aggiunto	1050,591043				
16						
17						

La Disponibilità Attuale è ottenuta eliminando pause di 30 minuti ad ogni turno (similmente a quanto ripostato dal file XML di telemetria ufficiale)

Figura 5.34. KPIs: l’OEE

Al fine di rispettare le specifiche aziendali, si riporta che l’immagine mostra un OEE calcolato su base giornaliera. Tuttavia, in seguito, vedremo altre casistiche in cui il tempo simulato è pari a 7 giorni.

$$\begin{aligned}
 \text{Costo} &= \text{Costo totale MP} + \text{Costo totale manodopera} + \text{Costo totale energia} \\
 &= (\text{costo mp} [\text{€/pz}] * \text{totale di guasti} [n]) \\
 &+ (\text{costo manodopera} [\text{€/min}] * \text{tempo di riparazione} [\text{min}]) \\
 &+ (\text{costo consumo energetico} [\text{€/kWh}] \\
 &* \text{Consumo energetico durante il failure} [\text{kWh}] \quad (5.27)
 \end{aligned}$$

```

'Consumo energetico
For x = 2 To 12
ConsumoEnergetico = ConsumoEnergetico + sh5.Cells(x, 2)
ConsumoEnergeticoFailed = ConsumoEnergeticoFailed + sh5.Cells(x, 8)
Next x
sh3.Cells(14, 2) = ConsumoEnergetico
sh3.Cells(15, 2) = ConsumoEnergeticoFailed
sh4.Cells(i, 21) = ConsumoEnergetico

'Costo
C_mp = 15: sh3.Cells(11, 2) = C_mp
C_manodoperaH = 16: sh3.Cells(12, 2) = C_manodoperaH
C_manodoperaMin = 16 / 60
C_energiakWh = 0.06243: sh3.Cells(16, 2) = C_energiakWh

CT_mp = s_NFailure * C_mp
sh4.Cells(i, 22) = CT_mp
CT_manodopera = C_manodoperaMin * t_Failed
sh4.Cells(i, 23) = CT_manodopera
CT_energia = ConsumoEnergeticoFailed * C_energiakWh
sh4.Cells(i, 24) = CT_energia
CT = CT_mp + CT_manodopera + CT_energia
sh4.Cells(i, 25) = CT

```

Figura 5.35. KPIs: Consumo energetico e costi

Foglio Excel in output “KPIs”, relativo al calcolo del consumo energetico e del costo totale dell’intervento di manutenzione:

N. Sim.	Consumo energetico	CT mp	CT manodopera	CT energia	CT intervento
1	3507,978521	€ 405,00	€ 58,79	€ 1,12	€ 464,90
2	3510,76043	€ 405,00	€ 58,65	€ 1,12	€ 464,77
3	3567,108317	€ 405,00	€ 58,88	€ 1,12	€ 465,00
4	3562,575206	€ 405,00	€ 58,80	€ 1,12	€ 464,92
5	3511,956712	€ 405,00	€ 58,61	€ 1,12	€ 464,73
5	3568,6224	€ 405,00	€ 58,77	€ 1,12	€ 464,88

Figura 5.36. KPIs: i costi ed il consumo energetico

## 5.6 SIMULAZIONE VIRTUALE DI DIVERSI SCENARI PRODUTTIVI

Poi, siamo andati a simulare altri scenari dove si ipotizzano differenti tecniche manutentive sia sull’OP40 che è risultata essere ad oggi la stazione più critica sotto il punto di vista manutentivo, che in generale sulle caratteristiche della linea.

- A. *Simulazione ideale;*
- B. *Simulazione reale;*
- C. *Simulazioni basate sulla manutenzione preventiva:*
  - Dopo 800 pz,



- Dopo 900 pz,
- Dopo 1100 pz,
- Dopo 1200 pz,
- Range  $\pm 15\%$ .

D. *Simulazioni basate sugli aspetti energetici:*

- Caso ideale
- Caso reale
- Caso semideale

E) *Simulazioni di diversi scenari produttivi:*

- Inserimento Buffer,
- Stazioni parallele,
- Installazione di un dispositivo ATC.

### **5.6.1 SIMULAZIONE IDEALE (A)**

Il primo scenario che è stato creato è quello “ideale”, in cui i fattori di inefficienza non vengono considerati e la linea procede al massimo delle sue potenzialità; il suo studio ci ha permesso, in prima approssimazione, di valutare i limiti massimi di produzione che la linea può generare se lavorasse in regime ed in condizioni perfette. Per far ciò abbiamo impostato una distribuzione costante dei tempi di lavorazione delle singole macchine; la durata delle operazioni rimane quindi costante per tutto il periodo della simulazione, fissa al valore di progetto.

Le macchine vengono considerate anche loro come ideali, non hanno necessità di fermarsi per effettuare lavori di manutenzione, ogni loro lavorazione ha sempre successo e non deve essere ripetuta. Il valore della disponibilità (*availability*) è massimo (100%) e non è necessario inserire quello del MTTR.

Lanciando la simulazione per un tempo di 100 ore i dati finali risultano essere di gran lunga superiori di quelli reali; la produzione oraria infatti si attesta su un valore di 208 pezzi/h grazie al fatto che le stazioni lavorano quasi tutte con prestazioni e percentuali di successo elevate; come si può vedere direttamente dalle immagini riportate di seguito.

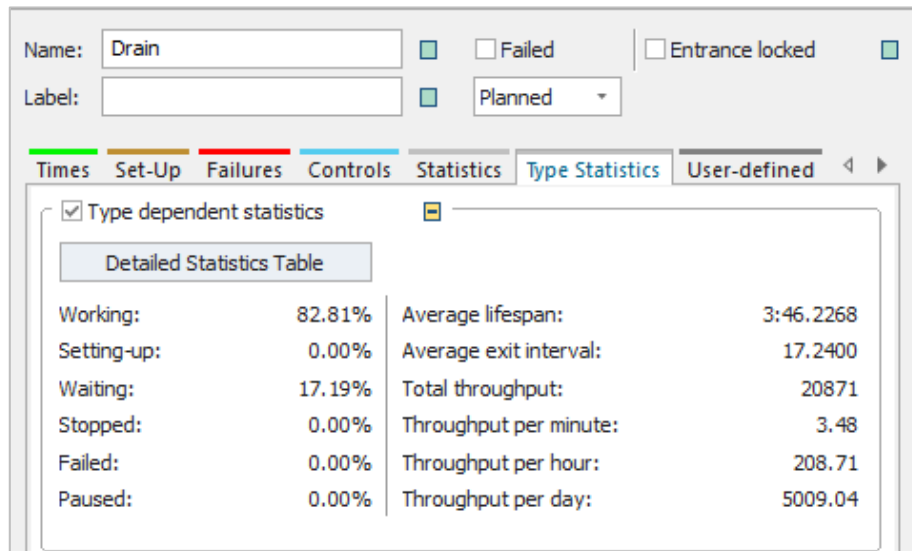


Figura 5.37. Le statistiche del modello ideale

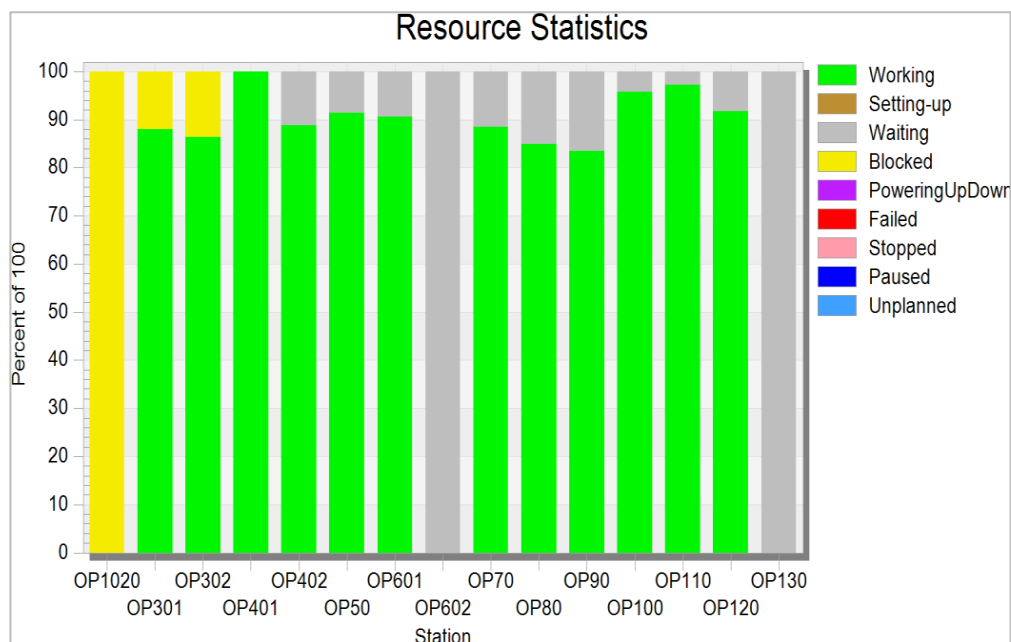


Figura 5.38. Statistiche di lavoro delle singole stazioni del modello ideale

La casistica appena descritta permette di conoscere le potenzialità massime della produzione, alle quali si deve sempre cercare di ambire, attraverso un miglioramento continuo (utilizzo di principi *lean*) ma che difficilmente si riesce ad ottenere definitivamente.

I risultati raggiunti ci permettono di dire che linea è progettata in maniera ottimale infatti lavora con percentuali di fermo minime, ciò è possibile grazie al corretto bilanciamento dei tempi ciclo nelle singole macchine che evita la formazione di code e colli di bottiglia, cause di inefficienza operativa e ritardi della produzione.

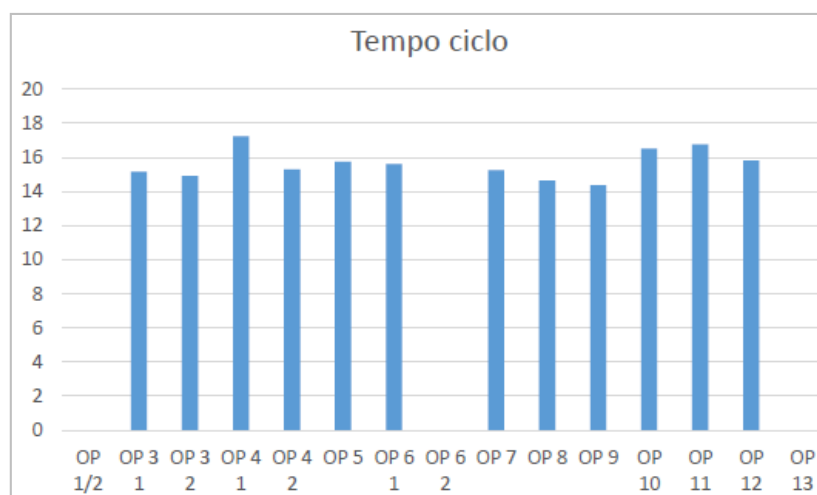


Figura 5.39. Il Tempo Ciclo del modello ideale

Il modello precedente non permette di simulare il reale comportamento della filiera produttiva ma è utile per visualizzare l'effettivo flusso dei materiali e delle attività.

### 5.6.2 SIMULAZIONE REALE (B)

La seconda simulazione è stata effettuata considerando la situazione attuale, settando in maniera diversa i singoli parametri al fine di diminuire la produzione oraria.

Come primo intervento abbiamo aggiunto il valore delle *failure*; grazie ai dati forniti sui tempi di pausa (MTTR e MTBF) abbiamo calcolato il valore della disponibilità (*availability*) per ognuna delle singole stazioni, tenendo quindi conto delle interruzioni dovute alla manutenzione dei guasti.

In questo caso, la manutenzione sull'OP40 con relativa sostituzione del punzone, è fatta circa ogni 1000 pezzi lavorati, indipendentemente dal grado di usura, oppure ogni circa 3 pezzi scartati consecutivamente. I fermi programmati delle macchine si propagano lungo tutta la linea causando una diminuzione dell'efficienza produttiva globale.

I risultati ottenuti dalla simulazione di 100 ore evidenziano un calo della produzione oraria di circa il 15% fino ad un valore di 179 pezzi/h.

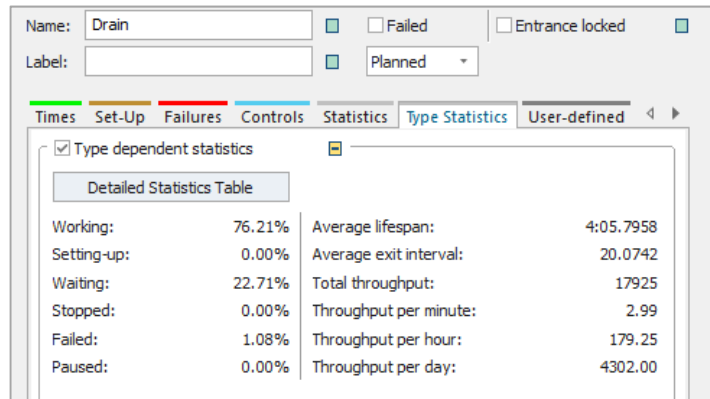


Figura 5.40. Le statistiche del modello reale

Per quanto riguarda le statistiche di lavoro delle singole stazioni, come è possibile notare dal grafico sottostante, la presenza di percentuali di *failure* (in rosso) causa un aumento dei tempi di non funzionamento, tempo in cui la macchina è in attesa di poter lavorare per mancanza del pezzo pronto a valle e/o per l'occupazione di quella a monte.

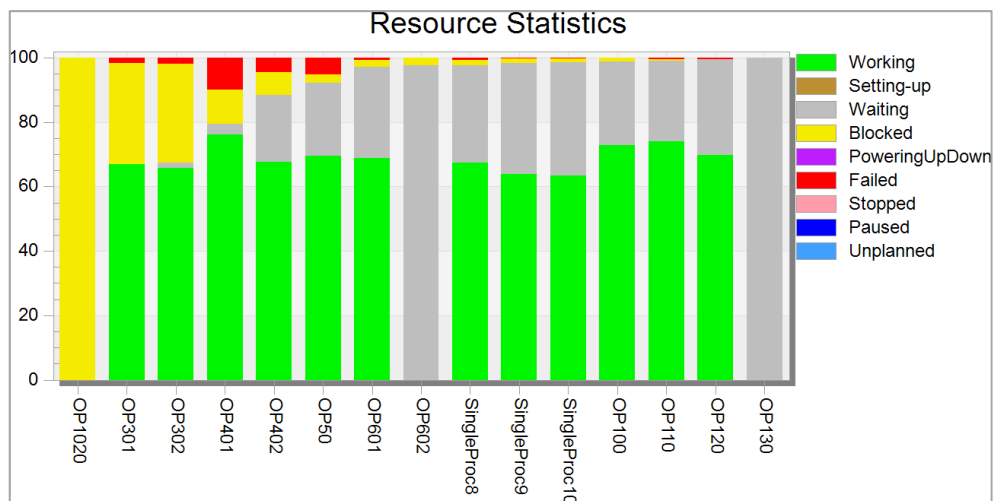


Figura 5.41. Statistiche di lavoro delle singole stazioni del modello reale

La nuova configurazione riporta un abbassamento del tasso di lavoro (*valore aggiunto*) per tutte le stazioni.

Con i dati forniti da Marelli è stato calcolato tale parametro considerando che al momento la stazione più critica della linea in esame è l'OP40, fatto che è emerso dalle precedenti analisi condotte, e motivo per cui sarà oggetto di studio futuro. Attualmente su questa macchina viene eseguita una manutenzione di tipo preventivo, cioè il punzone (parte della macchina che risulta critica) viene sostituito ogni 1000 pezzi lavorati oppure nel caso in cui vengono rilevati 3 pezzi consecutivi non conformi.

Il valore dell'*availability* dell'OP40 risulta essere quindi pari a 95,96%.

Moltiplicando tale dato per i valori dell'*availability* delle altre stazioni otteniamo l'*availability* della linea che risulta essere 86,495%.

Dai dati analizzati risulta che nel periodo considerato sono stati scartati 50983 pezzi, ciò equivale ad un valore percentuale di 11,46% sulla produzione totale.

Ora avendo i valori dei 3 parametri necessari per il calcolo dell'OEE, si è ottenuto che questo è pari a 68,139%.

Facendo riferimento a quanto riportato nella tabella mostrata sopra, in particolare al settore manifatturiero, il valore ottenuto è compreso nel range dei valori accettabili, però è tuttavia possibile osservare che è un parametro ampiamente migliorabile.

Alla luce di quanto emerso si è proceduto con un lavoro di analisi sull'OP40, in particolare sulla sua manutenzione.

### 5.6.3 SIMULAZIONI BASATE SULLA MANUTENZIONE PREVENTIVA (C)

- Successivamente è stata simulata la situazione in cui la manutenzione sull'OP40, venga effettuata ogni 800 pezzi lavorati. Su un tempo di simulazione di 500 ore, notiamo come le interruzioni sull'OP40 siano molto maggiori rispetto al caso precedente.

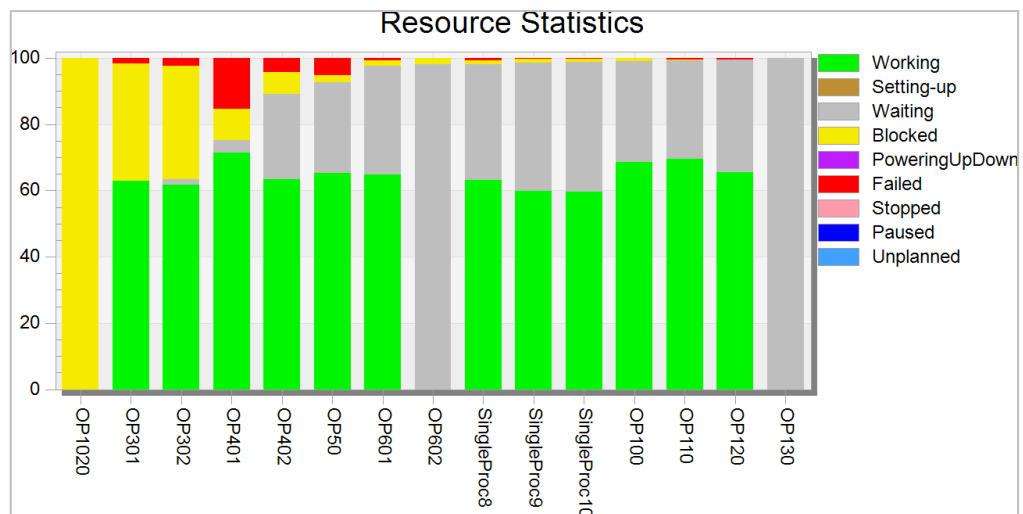


Figura 5.42. Statistiche di lavoro delle singole stazioni della manutenzione preventiva (800 pz)

Inoltre, la produzione oraria si abbassa da 179,5 pezzi/ora a 145,53 pezzi/ora.

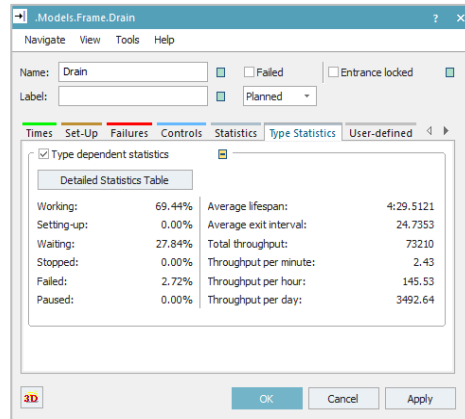


Figura 5.43. le statistiche della manutenzione preventiva (800 pz)

Abbiamo quindi calcolato la disponibilità dell'OP40 che si attesta al 93,417%, quindi andando a sostituire il valore della disponibilità appena citato con quello registrato nella situazione attuale, abbiamo ottenuto che la disponibilità della linea è 84,205%. La performance è stata influenzata negativamente, ciò dato dal fatto che sostituendo il punzone più frequentemente ci sono state più interruzioni della linea con conseguente diminuzione del numero di pezzi prodotti pari all'87,852% dei pezzi teorici da produrre. Si è riscontrato invece un aumento del parametro che misura la qualità della linea, infatti quest'ultimo è salito al 92,003% visto che sono aumentati i pezzi prodotti conformi alle specifiche.

Da questi parametri quindi abbiamo ricalcolato l'OEE della linea:

$$OEE = A * P * Q = 84,205\% * 87,852\% * 92,107\% = 68,060\%$$

Un ulteriore simulazione è stata fatta considerando la situazione in cui la manutenzione sull'OP40 viene fatta ogni 900 pezzi lavorati. Come nel caso precedente è stata impostata una distribuzione costante delle *failure*. I risultati ottenuti dalla simulazione di 500 ore hanno permesso di calcolare la disponibilità dell'OP40 che risulta essere pari a 95,374%, valore inferiore a quello della disponibilità nel "caso attuale" perché in questa situazione si registra un aumento del *downtime*. Abbiamo calcolato la disponibilità della linea, con il valore appena citato della disponibilità dell'OP40, che equivale a 85,969%. Come nel caso precedente, la performance si è abbassata rispetto al caso attuale, si è registrata una diminuzione del numero di pezzi prodotti pari all'88,308% dei pezzi teorici da produrre. È aumento il valore del parametro che indica la qualità della linea, cioè 90,107%.

L'OEE della linea quindi è:

$$OEE = A * P * Q = 85,969\% * 88,308\% * 90,107\% = 68,407\%$$

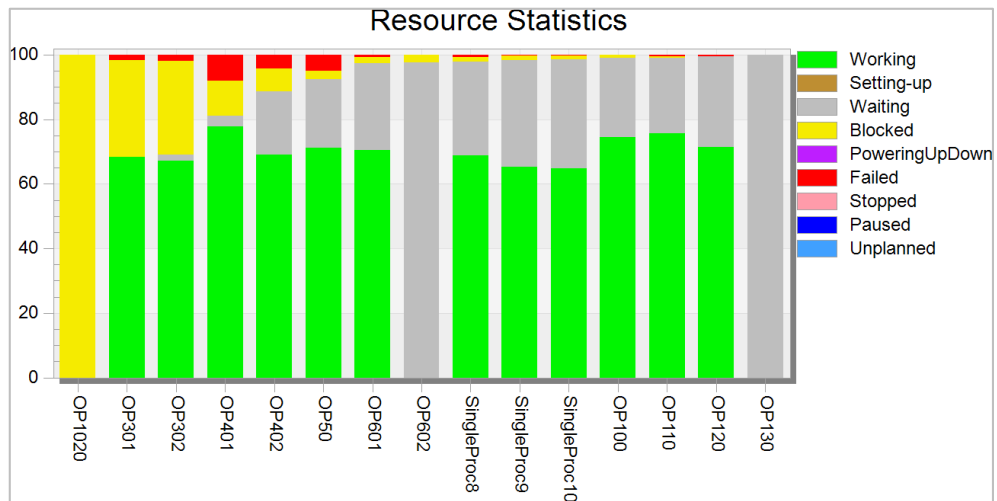


Figura 5.44. Statistiche di lavoro delle singole stazioni della manutenzione preventiva (900 pz)

Considerando invece la situazione in cui la manutenzione sull'OP40 venga fatta ogni **1100** pezzi lavorati, abbiamo ottenuto una disponibilità della stazione OP40 pari a 96,133%, la disponibilità della linea inserendo quest'ultimo valore è risultata essere 86,644%.

La performance è stata influenzata in modo positivo in quanto sostituendo il punzone con meno frequenza ci sono state meno interruzioni della linea con conseguente aumento del numero di pezzi prodotti cioè 450968 pezzi pari all'90,194% dei pezzi teorici da produrre. Si è riscontrato invece una diminuzione del parametro che misura la qualità della linea, contrariamente alla simulazione precedente, infatti quest'ultimo è sceso al 87,042% visto che sono diminuiti i pezzi prodotti conformi alle specifiche.

Da questi parametri quindi abbiamo ricalcolato l'OEE della linea:

$$OEE = A * P * Q = 86,644\% * 90,194\% * 87,042\% = 68,014\%$$

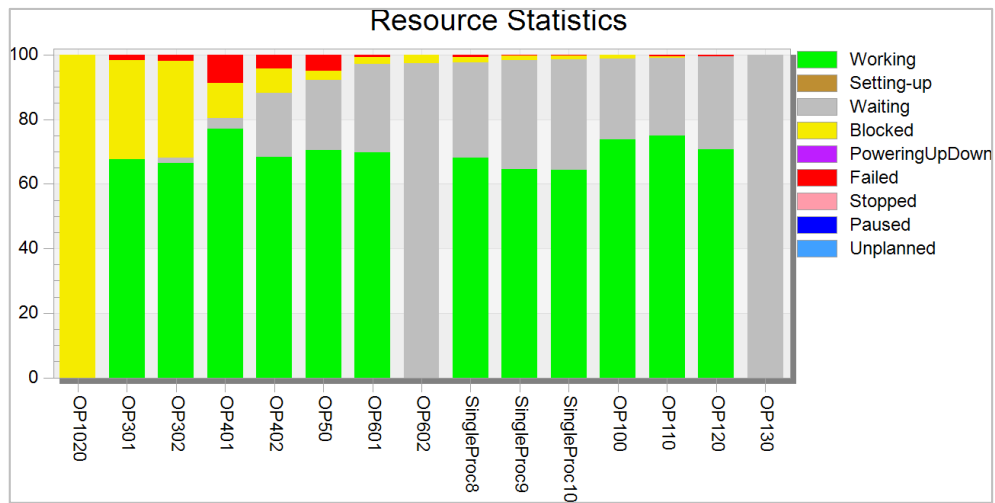


Figura 5.55. Statistiche di lavoro delle singole stazioni della manutenzione preventiva (1100 pz)

Simulando invece la situazione in cui la manutenzione sull'OP40 venga fatta ogni **1200** pezzi lavorati, la disponibilità della stazione OP40 risulta essere 96,273%, e quindi la disponibilità della linea è risultata essere 86,779%. Il valore della performance è salito al 90,303% dei pezzi teorici da produrre. La qualità della linea è scesa al 86,751%.

Da questi parametri l'OEE della linea è risultato essere:

$$OEE = A * P * Q = 86,779\% * 90,303\% * 86,751\% = 67,982\%$$

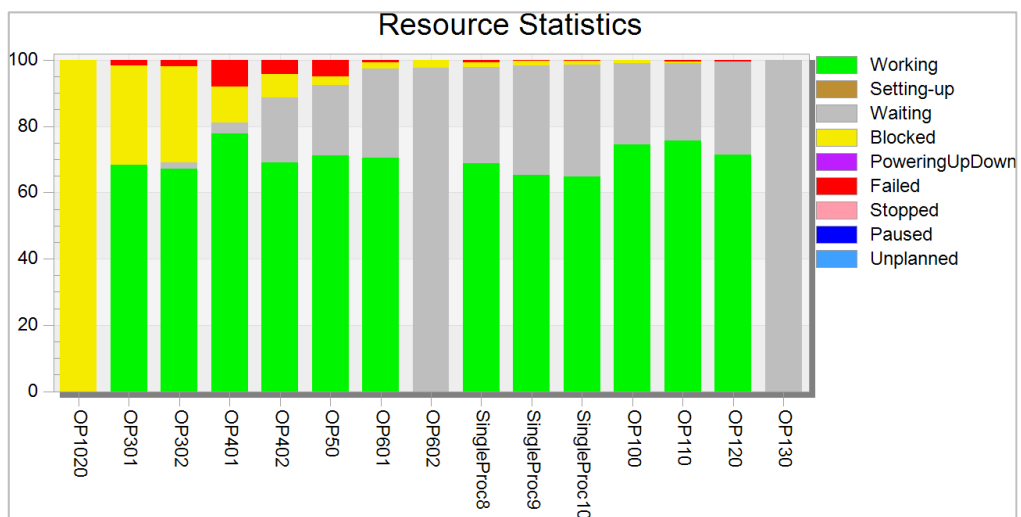


Figura 5.46. Statistiche di lavoro delle singole stazioni della manutenzione preventiva (1200 pz)



Come ultima analisi si è voluto simulare il caso in cui la manutenzione del punzone venga fatta non in modo puntuale come nei casi precedenti ogni 800,900,1100 o 1200 pezzi lavorati, ma la sostituzione del punzone possa avvenire in un **Range** di +15% o -15% dei 1000 pezzi lavorati. Per fare ciò è stata impostata una distribuzione triangolare del guasto, come possibile vedere in figura.

Figura 5.47. Interfaccia utente della manutenzione preventiva (Range)

Nella sezione “Interval” sono stati definiti i valori del range di tempo dell’intervallo dove 7:30:00 è valore centrale della distribuzione mentre 6:23:30 e 8:37:30 sono i valori estremi. Nella sezione “Duration” invece, è stato inserito il tempo di intervento per la manutenzione.

Con queste impostazioni della simulazione si è ottenuto un’*availability* della linea pari all’86,984%, un valore di performance del 90,921% e l’indicatore della qualità è risultato essere dell’86,471%, da tali dati abbiamo calcolato l’OEE:

$$OEE = A * P * Q = 86,984\% * 90,921\% * 86,471\% = 68,387\%$$

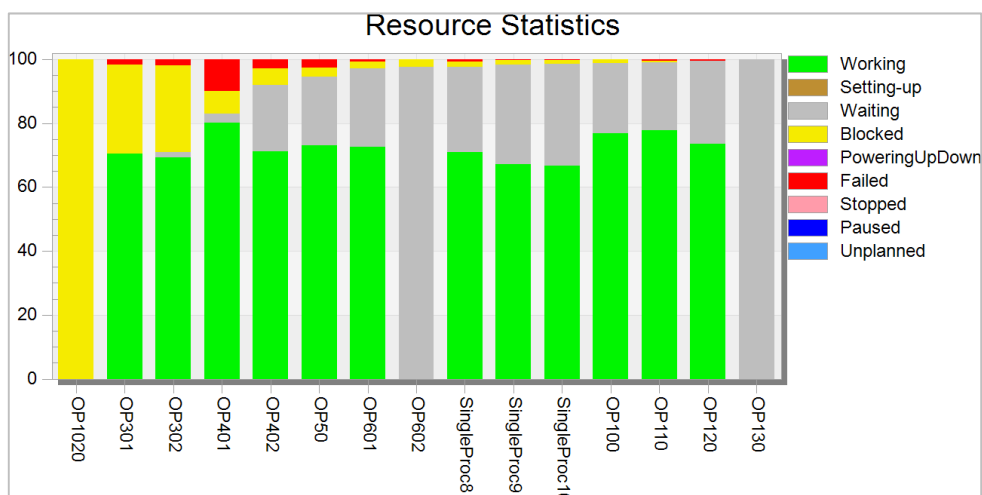


Figura 5.48. Statistiche di lavoro delle singole stazioni della manutenzione preventiva (Range)

### 5.6.4 SIMULAZIONI BASATE SUGLI ASPETTI ENERGETICI (D)

I dati riguardanti la potenza necessaria alle singole macchine sono stati misurati direttamente tramite dei sensori presenti nella linea, che permettono di rilevare l'assorbimento istantaneo quando la linea di montaggio è in condizione di normale funzionamento.

Queste informazioni, contenute nella tesi di Arbuatti Marco "Simulazione di una linea di produzione industriale finalizzata a migliorarne l'efficienza energetica", sono state utili per quantificare l'effettivo consumo delle singole macchine all'interno del ciclo produttivo; infatti dai risultati ottenuti viene evidenziata una variazione del valore di potenza richiesta adducibile al fatto che la stazione necessita di un fabbisogno di energia variabili, dipendente dal tipo di attività svolta (working, operational, standby)

Nell'immagine successiva è possibile notare oltre al layout 3D della catena di montaggio anche la distribuzione delle potenze utilizzate e le possibili criticità.

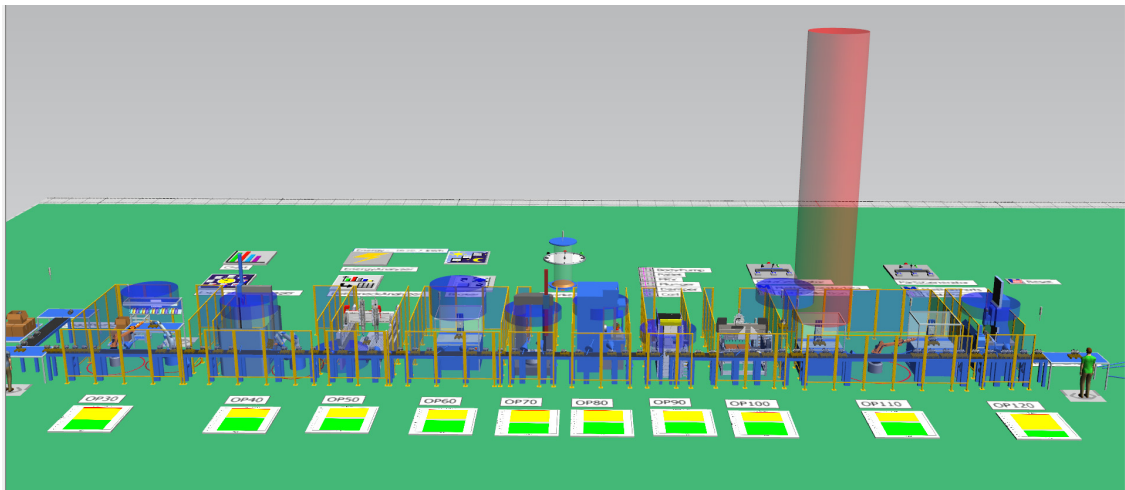


Figura 5.49. Distribuzione 3D dei consumi

string	Energy Consumers	real 1 Energy [kWh]	real 2 Energy operational [kWh]	real 3 Current power input [kW]	real 4 Working	real 5 Setting-up	real 6 Operational	real 7 Failed	real 8 Standby	real 9 Off
0	string 0									
1	OP1020	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	OP301	79.65	7.89	0.65	71.76	0.00	7.89	0.00	0.00	0.00
3	OP302	79.06	8.72	0.64	70.35	0.00	8.72	0.00	0.00	0.00
4	OP401	81.40	0.01	0.81	81.39	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
5	OP402	70.58	6.42	0.57	64.16	0.00	6.42	0.00	0.00	0.00
6	OP50	90.02	6.54	0.91	83.49	0.00	6.54	0.00	0.00	0.00
7	OP601	179.13	13.47	1.83	165.66	0.00	13.47	0.00	0.00	0.00
8	OP602	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	OP70	67.06	5.96	0.69	61.11	0.00	5.96	0.00	0.00	0.00
10	OP80	72.19	8.01	0.76	64.18	0.00	8.01	0.00	0.00	0.00
11	OP90	66.71	9.59	0.69	57.12	0.00	9.59	0.00	0.00	0.00
12	OP100	85.15	2.96	0.86	82.19	0.00	2.96	0.00	0.00	0.00
13	OP110	1839.76	35.04	18.57	1804.72	0.00	35.04	0.00	0.00	0.00
14	OP120	74.56	5.22	0.76	69.34	0.00	5.22	0.00	0.00	0.00

Figura 5.50. Valori numerici del consumo tabellati

I parametri riguardanti le *failure* non sono stati modificati mentre per quanto riguarda quelli delle potenze elettriche, per fare in modo di diminuire il valore totale, abbiamo utilizzato i seguenti valori:

- Working, la media dei due valori di consumo massimo
- Operational, il valore minimo
- Failure, il valore medio

Nel layout e nelle simulazioni sono stati considerati anche i due lavoratori che sostano nelle stazioni iniziale (OP1020) e quella finale (OP130) ai quali però non vengono affidati tempi effettivi di lavorazione poiché il loro compito è solo quello di caricare e scaricare i pallet contenenti le materie prime.

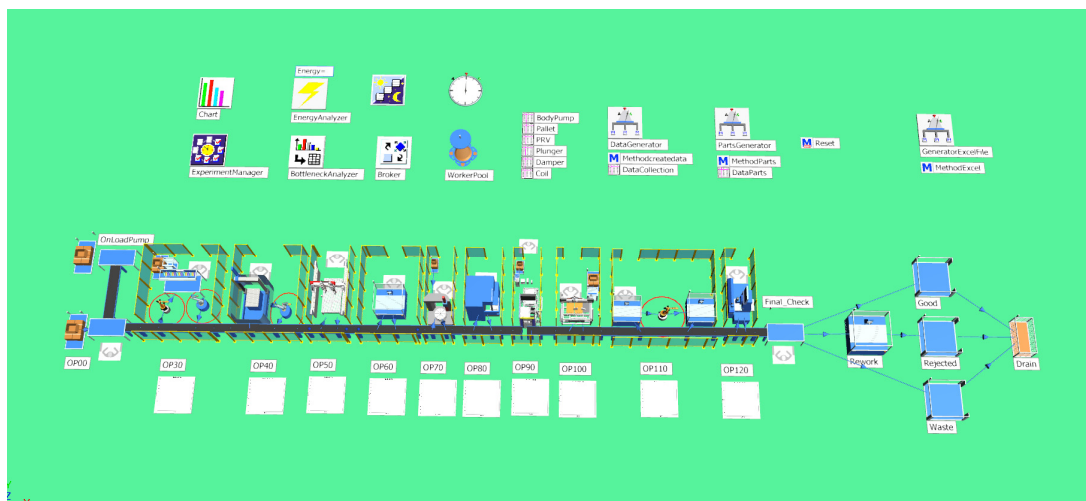
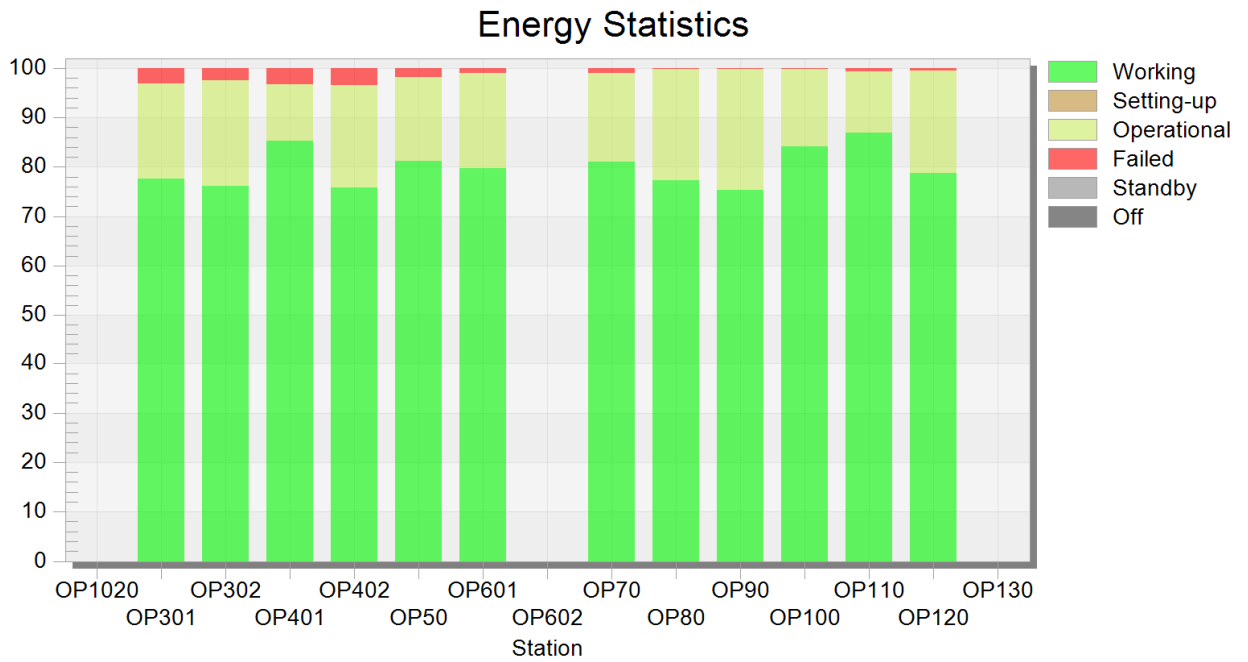


Figura 5.51. Layout della linea di produzione REALE

I risultati ottenuti evidenziano un'ulteriore calo della produzione oraria ad un valore di 157 pezzi/ora dovuto alla variazione statistica dei tempi di lavorazione di tutte le stazioni.

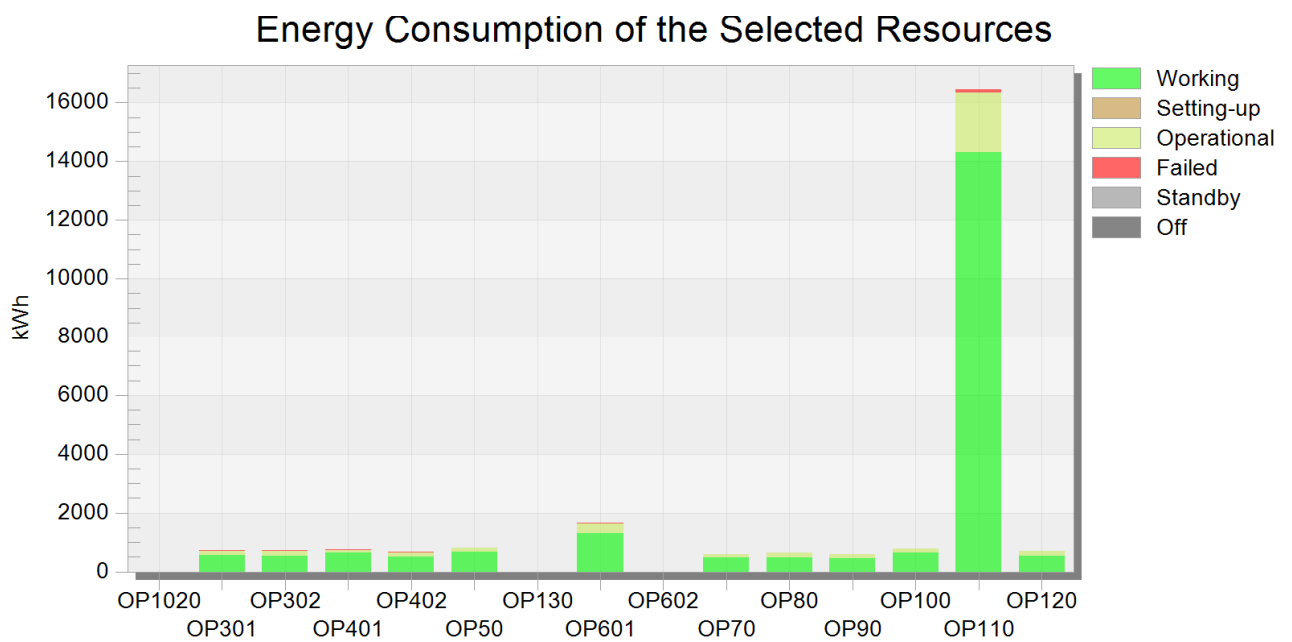
Dalle statistiche delle lavorazioni si evidenzia una crescita delle attività *non a valore aggiunto* (waiting/blocked) a discapito di quelle a valore aggiunto (working).

Ovviamente, il calo delle prestazioni si ripercuote sui consumi; la parte di *operational* crescendo, causa una diminuzione della componente di energia elettrica legato alle attività di working.



*Figura 5.52. Percentuale del consumo di energia*

La distribuzione di energia lungo la linea di montaggio si presenta come visibile in Fig. 5.53, ove la stazione OP110, la più energivora, è di entità maggiore rispetto alle altre.



*Figura 5.53. Distribuzione del consumo di energia caso*

### 5.3.5 SIMULAZIONI DI DIVERSI SCENARI PRODUTTIVI (E)

Costruito il caso base, ove la simulazione rappresenta lo stato attuale della linea, è stata una prerogativa il voler modificare vari aspetti della stessa per poter creare scenari di ottimizzazione. L'utilizzo del software offre il vantaggio di poter modificare il modello molto rapidamente ed allo stesso tempo osservare il cambiamento effettuato sotto il profilo di produttività.

Avendo costruito in precedenza una modalità di calcolo automatico dell'OEE, si è sfruttata questa possibilità per confrontare le varie simulazioni che sono seguite.

In particolare, sono state considerate 3 potenziali modifiche, da cui sono scaturite simulazioni inerenti al caso specifico e varie altre in riferimento alla combinazione di più modifiche in un singolo contesto.

#### Modifica 1: Inserimento di Buffer

I buffer, ove correttamente inseriti, permettono di ridurre i fenomeni di affannamento e di bloccaggio delle stazioni, con conseguente miglioramento del flusso di produzione. Sono state osservate varie combinazioni di inserimento, ma prevalentemente, i buffer giacciono prima della stazione bottleneck e in prossimità di stazioni critiche sotto il profilo manutentivo. In alcune simulazioni si è deciso di inserire i buffer su tutta la linea, ovvero tra i punti di collegamento delle varie OP, così da avere una prova che oltre un certo numero di buffer, non v'è un miglioramento importante, anzi, all'aumentare di essi l'aumento delle prestazioni della linea tende a rallentare.

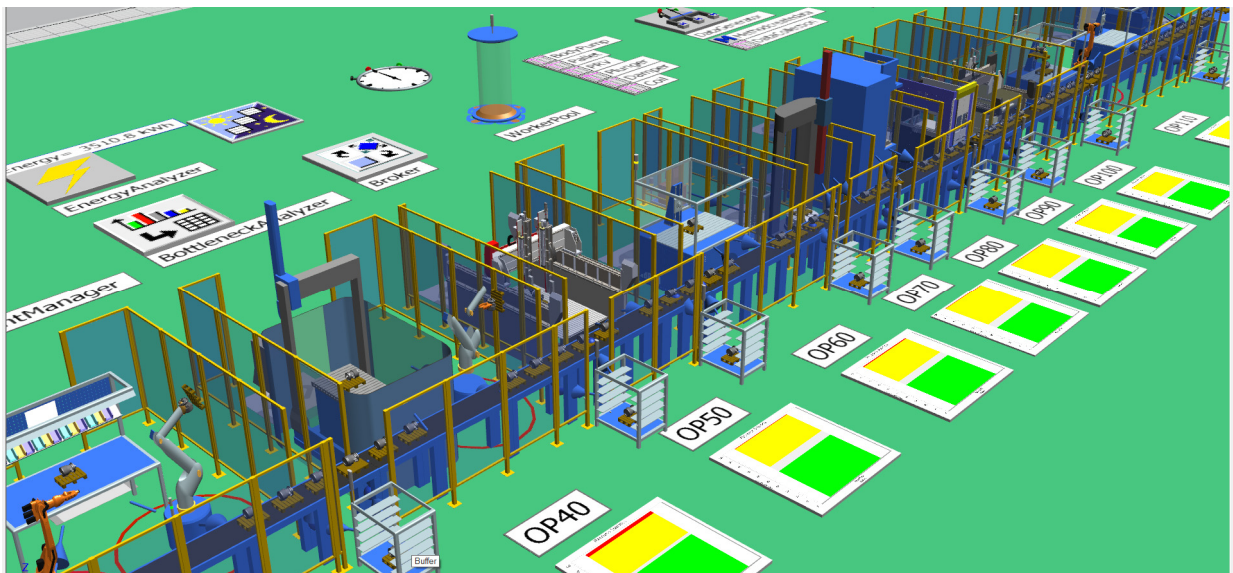
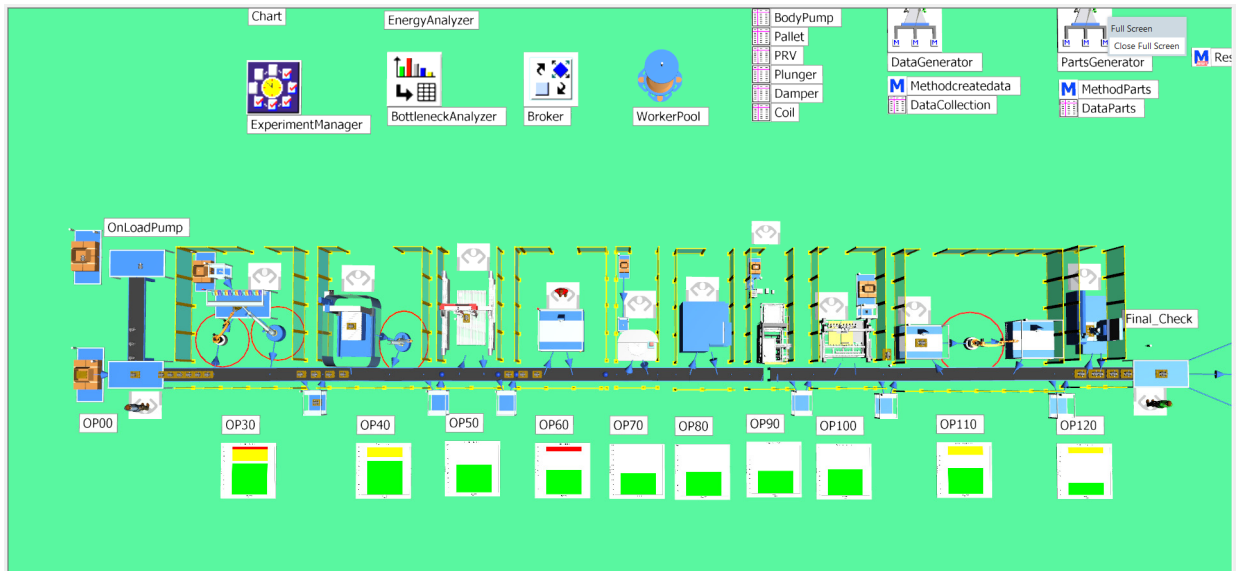


Figura 5.54. Buffer su tutta la linea



*Figura 5.55. Buffer nelle regioni critiche*

### Modifica 2: Utilizzo di stazioni parallele

L'aggiunta di un processo parallelo in una stazione permetterebbe in questo caso, l'assemblaggio simultaneo di più pezzi. Qualora una delle stazioni dovesse necessitare di un intervento, l'altra continuerebbe ad operare, senza interrompere il flusso. La nuova simulazione consiste nell'inserimento di una nuova stazione nell'OP40 alla operazione di punzonatura, poiché questa è l'attività che richiede più interventi giornalieri effettuati dall'operatore dedicato. Questa ulteriore stazione andrà ad inserirsi nelle analisi energetiche, cambiando il profilo della linea. Trattandosi di una modifica invasiva e costosa, è pertanto sconsigliata, ma è stato utile vederne gli effetti sotto il profilo prestazionale, energetico ed economico.

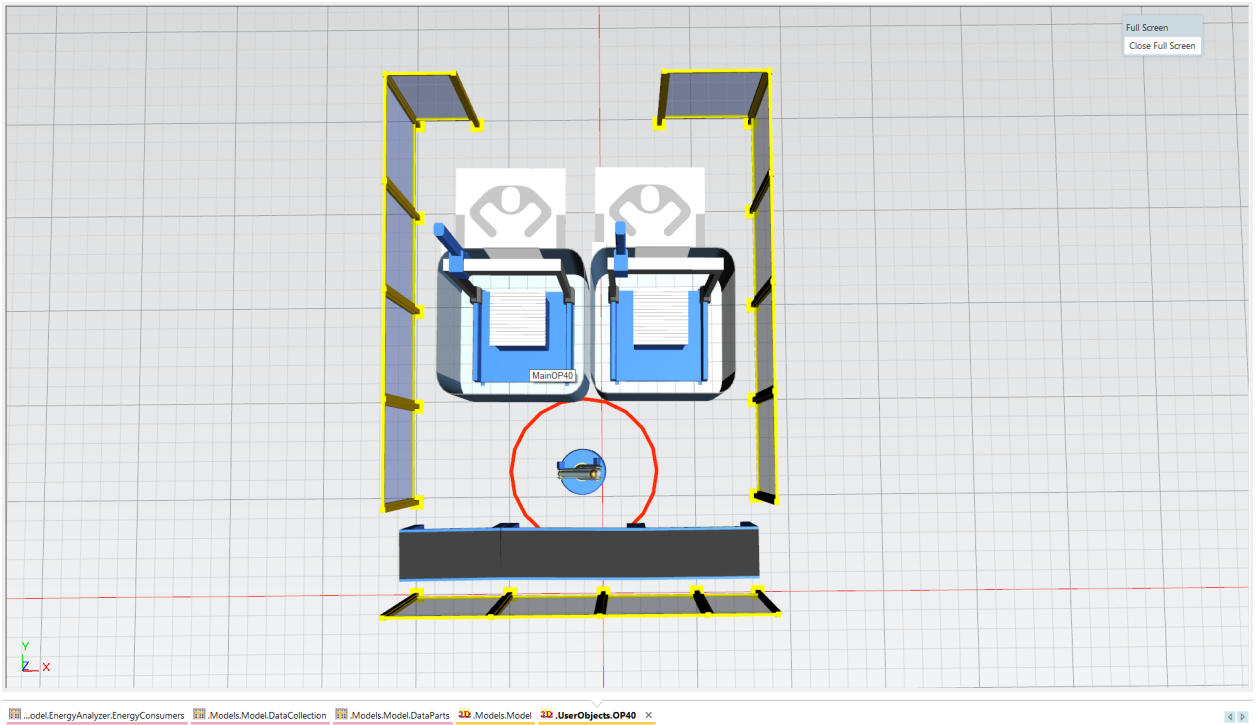


Figura 5.56. Processo parallelo

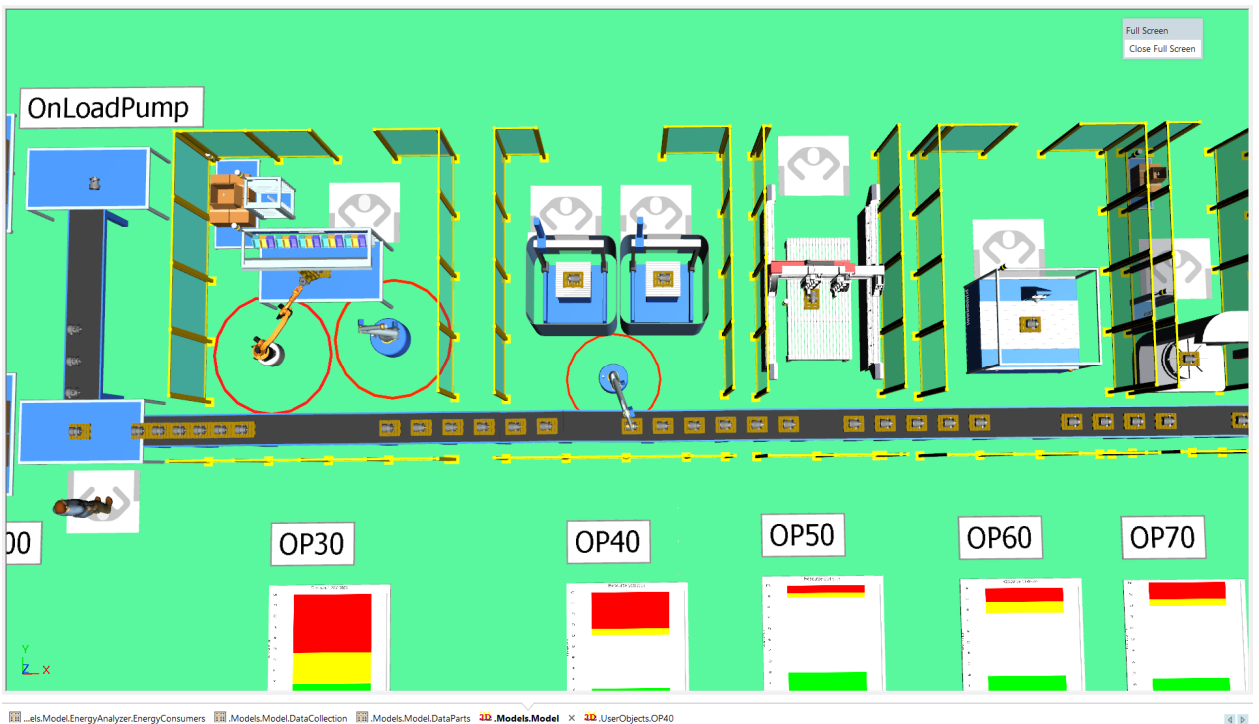


Figura 5.57. Dettaglio processo parallelo nella linea

### Modifica 3: Installazione di un dispositivo ATC

Poiché molti utensili sono soggetti ad una frequente usura è interessante vedere come si comporterebbe la linea se la sostituzione degli utensili avvenisse automaticamente e non manualmente tramite l'operatore. Per questo, uno dei miglioramenti possibili sarebbe quello di inserire un dispositivo di cambio automatico dell'utensile ATC (Automatic tool changer). La praticità di questo dispositivo è il meccanismo automatico necessario perché sia effettuata la sostituzione dell'utensile montato nel mandrino con quello presente nel magazzino scelto dal programma di lavorazione. Poiché la lavorazione nelle singole OP è specializzata, non si necessitano di vari tipi di utensile, ma una banca contenente un maggior numero di utensili dello stesso tipo, che provvederanno a sostituire quello appena utilizzato con tempistiche che variano dai 2 secondi fino ad un massimo di 60 in media. Le linee di assemblaggio sono complesse e da lavorazioni specializzate, quindi l'implementazione di certi meccanismi può essere complessa.

Poiché in fase di rappresentazione, il meccanismo è facilmente identificabile nella sezione Failure della macchina. In particolare, l'oggetto di analisi è l'OP40, che necessita giornalmente il maggior numero di sostituzioni. Poiché l'ATC contribuisce alla riduzione del tempo di sostituzione dell'utensile, intuitivamente l'MTTR della macchina verrà ridotto. Contando ove possibile il numero di interventi dovuti alla sostituzione giornaliera e considerando che l'MTTR è calcolato su una media semestrale, che comprende anche guasti imprevisti, si è potuto calcolare che la riduzione del dato è di circa 20 minuti. In questo contesto, anche la disponibilità della OP40 aumenterà giungendo a 97,34%, aumentando altresì anche la disponibilità dell'intera linea (87,74%).



Figura 5.58. Schermata Failures (interventi) aggiornata

## 5.7 VALUTAZIONE DEI RISULTATI

Sulla base delle modifiche adottabili, sono state effettuate le osservazioni sull'OEE, sul contesto energetico e sui costi di manutenzione. Si è riportata da principio, la situazione attuale e solo in seguito le varie casistiche con modifiche semplici e varie combinazioni delle stesse. Sono state eseguite più di 50 simulazioni distribuite su diversi scenari produttivi.

Nello specifico, per gli scenari produttivi del caso F sono state eseguite 12 simulazioni in un orizzonte temporale di 7 giorni, e saranno poi confrontate.

Qui segue una tabella che funge da legenda per le varie casistiche.

Tabella 5.13. Legenda delle simulazioni con descrizioni

N. Sim.	Descrizione
1	Caso Base
2	Buffer in OP (30,40,50,90,100,110)
3	Stazioni parallele con buffer
4	Stazioni parallele
5	Buffer su tutta la linea

	Stazioni parall. Buffer su tutta la
6	linea
7	ATC+Buffer tutta la linea
8	ATC+Buffer linea+ST.Parallele
9	ATC+Buffer Critici+ST.Parallele
10	ATC+ST.Parallele
11	ATC+Buffer Critici
12	ATC

Questa prima tabella riporta i dati relativi al numero di pezzi realizzati e quanti di essi sono conformi, scartati o rigettati per una rilavorazione. Si può notare che la simulazione 7 fornisce un maggior numero di pezzi prodotti, seguita dalla simulazione 11 e 12.

*Tabella 5.14. Pezzi prodotti per simulazione*

N. Sim.	pz			
	Tot.	Riget.	Scart.	Qualità
1	18893	1888	189	16816
2	18940	1893	189	16858
3	18451	1845	185	16421
4	18373	1837	184	16352
5	18958	1895	190	16873
6	18478	1848	185	16445
7	19172	1917	192	17063
8	18995	1899	190	16906
9	18981	1898	190	16893
10	18919	1892	189	16838
11	19168	1917	192	17059
12	19120	1912	191	17017

Di seguito sono invece riportati i tempi (espressi in minuti) relativi alle simulazioni per il calcolo dell'OEE, fornito nella tabella successiva.

Tabella 5.15. Tempi per il calcolo OEE

N . Sim.	Disp. Att.	Setup/ Fail.	Attesa	T. Op.	TC Reale	TC	TC Diff.	T. Op. Netto	Rework	T. Op. Val. Agg.
1	9450	220,4471	1249,947	7979,606	0,283	0,267	302,288	7677,318	504,096	7173,221577
2	9450	219,9311	1244,657	7985,412	0,283	0,267	303,04	7682,372	505,431	7176,940852
3	9450	220,7957	1948,796	7280,408	0,283	0,267	295,216	6985,192	492,615	6492,576902
4	9450	220,5184	1992,477	7237,004	0,283	0,267	293,968	6943,036	490,479	6452,557368
5	9450	219,7852	1241,305	7988,909	0,283	0,267	303,328	7685,581	505,965	7179,616439
6	9450	220,3712	1952,91	7276,718	0,283	0,267	295,648	6981,07	493,416	6487,654467
7	9450	192,4815	1020,771	8236,748	0,283	0,267	306,752	7929,996	511,839	7418,156694
8	9450	195,1523	1507,678	7747,17	0,283	0,267	303,92	7443,25	507,033	6936,217158
9	9450	195,1382	1514,552	7740,309	0,283	0,267	303,696	7436,613	506,766	6929,847267
10	9450	195,4712	1527,578	7726,951	0,283	0,267	302,704	7424,247	505,164	6919,083297
11	9450	192,4749	1022,91	8234,615	0,283	0,267	306,688	7927,927	511,839	7416,088135
12	9450	192,8201	1033,308	8223,872	0,283	0,267	305,92	7917,952	510,504	7407,448388

La miglior simulazione sotto questo profilo è la numero 7, seguita altresì dalla 11 e 12. Evidentemente implementando moltitudini di buffer si ottiene una miglior prestazione in termini di flusso di materiali.

Tabella 5.16. OEE per simulazione

N. Sim.	DISPONIBILITA'	PERFORMANCE	QUALITA'	OEE
1	84,44%	96,21%	93,43%	75,91%
2	84,50%	96,21%	93,42%	75,95%
3	77,04%	95,95%	92,95%	68,70%
4	76,58%	95,94%	92,94%	68,28%
5	84,54%	96,20%	93,42%	75,97%
6	77,00%	95,94%	92,93%	68,65%
7	87,16%	96,28%	93,55%	78,50%
8	81,98%	96,08%	93,19%	73,40%
9	81,91%	96,08%	93,19%	73,33%
10	81,77%	96,08%	93,20%	73,22%
11	87,14%	96,28%	93,54%	78,48%
12	87,03%	96,28%	93,55%	78,39%

Giunti all'ultima tabella, è possibile osservare che il minor consumo energetico è la simulazione 1, tuttavia, un minor costo per l'intervento si hanno la n° 7 e 11 seguita dalla 12.

Tabella 5.17. Consumi e costi per simulazioni

N. Sim.	Consumo energetico	CT mp	CT manodopera	CT energia	CT intervento
1	3507,979	€ 405,00	€ 58,79	€ 1,12	€ 464,90
2	3510,76	€ 405,00	€ 58,65	€ 1,12	€ 464,77
3	3567,108	€ 405,00	€ 58,88	€ 1,12	€ 465,00
4	3562,575	€ 405,00	€ 58,80	€ 1,12	€ 464,92
5	3511,957	€ 405,00	€ 58,61	€ 1,12	€ 464,73
6	3568,622	€ 405,00	€ 58,77	€ 1,12	€ 464,88
7	3522,688	€ 390,00	€ 51,33	€ 1,00	€ 442,33
8	3599,364	€ 390,00	€ 52,04	€ 1,19	€ 443,23
9	3598,542	€ 390,00	€ 52,04	€ 1,19	€ 443,23
10	3594,894	€ 390,00	€ 52,13	€ 1,19	€ 443,32
11	3522,458	€ 390,00	€ 51,33	€ 1,00	€ 442,33
12	3519,665	€ 390,00	€ 51,42	€ 1,00	€ 442,42

Sulla base di questa classifica approssimativa è stato possibile visualizzare quale di queste simulazioni permette un miglioramento effettivo alla linea.

È possibile constatare che le simulazioni con inserimento di stazioni parallele non forniscono un vantaggio, poiché la produzione rallenta a discapito dell'OEE e sotto il profilo energetico si evidenziano degli aumenti in termini di costo e consumi.

D'altro canto, tra le migliori, troviamo la simulazione 7, che rappresenta la casistica in cui tutta la linea sia coperta dai buffer. In tal modo si prevengono i fenomeni di "starving" per le stazioni a valle e di "blocking" delle stazioni a monte. Ciò permette un flusso più bilanciato ed il tempo operativo aumenta a discapito della porzione di blocco. Così facendo, se una stazione dovesse trovarsi in condizione da necessitare di un intervento, le successive potrebbero continuare a lavorare, poiché alimentate dai buffer.

La simulazione 11 invece consiste nell'inserimento di un ATC nella OP40 e di buffer nei punti critici (a valle delle OP30, OP40, OP50, OP90, OP100, OP110). Così facendo, la disponibilità della linea aumenta sensibilmente e si riduce il tempo di intervento, che ormai è automatizzato per il cambio utensile mentre si mantiene manuale per i guasti o vari altri tipi di manutenzione. Ciò permette di ottenere un costo più basso per l'intervento.

Per ultima v'è la simulazione 12 che consiste nel semplice inserimento dell'ATC

Queste 3 migliori simulazioni ottenute vanno confrontate sotto però un altro punto di vista: l'inserimento di 10 buffer rappresenta un costo per l'azienda, senza contare che non si hanno effetti tangibili sulla qualità dei pezzi prodotti.

L'ATC, di contro, fornisce una diminuzione di manodopera necessaria ed un aumento qualitativo dovuto alla crescita dell'automazione della linea, poiché la sostituzione del punzone nell'OP40 non sarebbe più soggetta ad errori umani.

Un connubio tra l'inserimento di ATC e di buffer ove strettamente necessario, sarebbe quindi ideale.

A riprova di queste ipotesi sulla gestione degli utensili, sono state inoltre analizzate le variazioni dei costi legati alla manutenzione sull'OP40 in relazione alle politiche manutentive simulate, grazie alle ipotesi fatte da Bastianelli Margherita nella sua tesi "Tecniche di simulazione per l'efficienza di linee produttive in ambiente manifatturiero", in cui considera un costo orario della manodopera pari a 16 €/ora e il costo del punzone uguale a 15 €.

Attualmente il costo della manutenzione sul punzone ammonta a 995 € mensili.

Se si optasse per la manutenzione sull'OP40 ogni 800 pezzi lavorati, il costo della manutenzione sarebbe 1389 € mensili.

Se consideriamo che la manutenzione del punzone avvenga a 900 pezzi lavorati il costo risulterebbe essere di 1145 € mensili.

Per la manutenzione a 1100 pezzi lavorati il costo sarebbe di 927 € mensili, mentre per la manutenzione ogni 1200 pezzi lavorati il costo si abbasserebbe a 873 €.

In ultimo, risulta che per una manutenzione compresa tra gli 850 e 1150 pezzi lavorati il costo di manutenzione sull'OP40 ammonterebbe a 915 €.

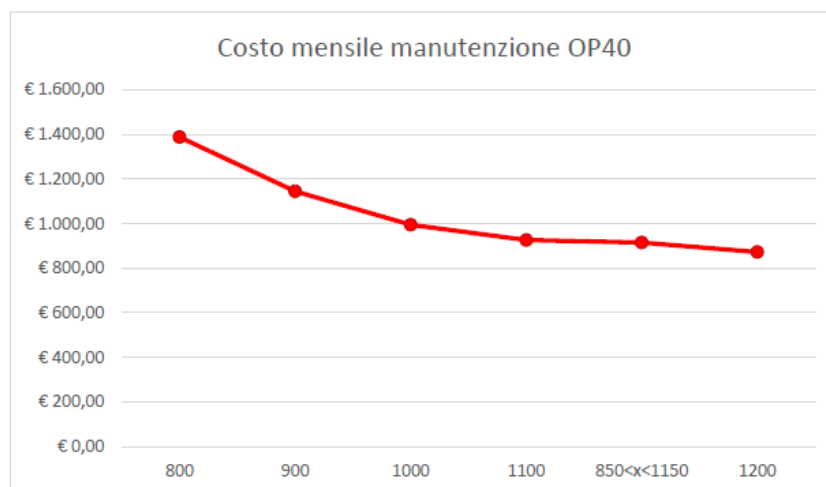


Figura 5.59. Il costo della manutenzione dell'OP40

Andando ad estendere i risultati su un fronte annuale otteniamo che attualmente la manutenzione sull'OP40 ha un costo annuale di 11940€, mentre i costi relativi agli scenari simulati sarebbero:

Tabella 5.18. Costi manutenzione semplice (cambio utensile)

MANUTENZIONE OP40	COSTO ANNUO
Ogni 800 pezzi	16668 €
Ogni 900 pezzi	13740 €
Ogni 1100 pezzi	11124 €
Ogni 1200 pezzi	10476 €
Tra 850 e 1150 pezzi	10980 €

Possiamo constatare dunque che se venisse attuata una manutenzione predittiva ogni 800 pezzi i costi aumenterebbero del 39,6%, ogni 900 pezzi l'aumento sarebbe del 15,1%, mentre per una manutenzione predittiva ogni 1100 pezzi i costi diminuirebbero del 6,8%, sullo stesso trend sarebbe la manutenzione ogni 1200 pezzi dove si registrerebbe una diminuzione del 12,3%; la manutenzione compresa in un range del + o - 15% si collocherebbe vicino alla diminuzione avuta con la manutenzione a 1100 pezzi, infatti i costi di manutenzione dell'OP40 scenderebbero dell'8,1%.

I dati forniti dall'azienda Marelli offrono un OEE attuale che risulta essere pari a 68,140% dato dalla moltiplicazione di un valore di disponibilità della linea uguale a 86,495%, performance

88,975% e qualità della linea 88,540%. In un'ottica di *Lean Manufacturing* è nostro scopo cercare di avvicinarci quanto più possibile ad un valore di OEE del 100%; per farlo abbiamo quindi individuato la criticità maggiore nella linea (cioè la sostituzione del punzone nell'OP40) e ipotizzato alcune soluzioni per ridurre il problema e andando a vedere come varia la situazione avvalendoci del software di simulazione.

La prima ipotesi fatta è stata quella di attuare una manutenzione preventiva sul punzone ogni 800 pezzi lavorati, dalla simulazione è emerso che con tale accorgimento la disponibilità dell'OP40 passa da 95,958% a 93,417%; questa diminuzione della disponibilità è data dal fatto che sostituendo più frequentemente il punzone si hanno maggior tempo di *downtime*, tempo in cui la macchina non è operativa. Il valore della performance della linea invece cambia da 88,975% a 87,852% per lo stesso motivo di cui sopra, infatti i pezzi realizzati nell'intervallo di tempo sono minori. Mentre per quanto riguarda l'indice di qualità si ha un aumento da 88,540% a 92,003% questo perché i prezzi prodotti secondo le specifiche sono aumentati rispetto ai pezzi conformi prodotti attualmente.

Per quanto riguarda i costi si riscontra un aumento dei costi di manutenzione, si passa infatti da un costo di 995€ mensili per la manutenzione del punzone ad un costo di 1389€, che equivale ad un aumento del 39.6%.

Un'altra ipotesi fatta è stata quella di eseguire una manutenzione sempre di tipo predittivo sull'OP40 ogni 1200 pezzi lavorati. Dalla simulazione abbiamo ottenuto che la disponibilità della stazione in esame è aumentata infatti è passata da 95,958% a 96,273% ciò è dipeso dal fatto che ci sono stati minori tempi di inattività della macchina in quanto è stata fermata meno volte per la sostituzione del punzone. Stessa cosa per quanto concerne la performance, infatti il valore come prevedibile è aumentato in quanto i pezzi prodotti nell'arco di tempo simulato sono aumentati. Inversamente agli indici di disponibilità e performance, la qualità è diminuita in quanto c'è stato un maggior numero di pezzi scartati, quindi che non rispettavano le specifiche progettuali.

Osserviamo però che contrariamente al caso precedente i costi sono diminuiti a 873€ mensili per la manutenzione, che corrisponde ad una diminuzione del 12,3%.

Questi appena citati sono i casi estremi simulati, infatti come scritto sopra, nel caso di una manutenzione a 800 pezzi si ha un aumento esponenziale dei costi mentre nel caso di una manutenzione a 1200 pezzi l'OEE si abbassa troppo, quindi gli altri casi prendo in considerazione valori compresi tra 800 e 1200 pezzi per l'attuazione della manutenzione; infatti possiamo osservare dai dati riportati nel paragrafo precedente come i valori ottenuti per le simulazioni a 800 pezzi e 1100 pezzi non hanno delle variazioni così accentuate per quanto riguarda l'OEE e i costi.

Tabella 5.19. Visione globale dei risultati ottenuti dalla simulazione base

<i>MANUTENZIONE</i>	<i>DISPONIBILITA'</i>	<i>PERFORMANCE</i>	<i>QUALITA'</i>	<i>OEE</i>	<i>COSTI MAN. OP40</i>
<i>Manutenzione ogni 800 pezzi</i>	84,205%	87,852%	92,003%	68,060 %	1389 €/mese
<i>Manutenzione ogni 900 pezzi</i>	85,969%	88,308%	90,107%	68,407 %	1145 €/mese
<i>Manutenzione ogni 1000 pezzi (attuale)</i>	86,495%	88,975%	88,540%	68,140 %	995 €/mese
<i>Manutenzione ogni 1100 pezzi</i>	86,644%	90,194%	87,042%	68,014 %	927 €/mese
<i>Manutenzione ogni 1200 pezzi</i>	86,779%	90,303%	86,751%	67,751 %	873 €/mese
<i>Manutenzione tra 850 e 1150 pezzi</i>	86,984%	90,921%	86,471%	68,387 %	915 €/mese

Se consideriamo quindi che parte della manodopera possa essere eliminata dalla manutenzione, si giunge alla conclusione che a livello teorico, in termini di costo e di OEE, le simulazioni con inserimento di ATC sono quelle ottimali.

Dal punto di vista prettamente energetico invece, l'ultimo modello descritto riesce a simulare con precisione la linea di produzione reale. Nel capitolo successivo si analizzano i risultati ottenuti dallo studio di questo scenario andando a proporre soluzioni migliorative sia di gestione dei



processi che d'organizzazione della linea stessa al fine di aumentare il valore della produzione oraria e la sua efficienza energetica.

Per quanto riguarda l'analisi delle singole stazioni produttive vengono riportati di seguito i dati percentuali di lavorazione e consumo elettrico durante l'intero periodo di simulazione (1000h).

Tabella 5.20. Statistiche di lavoro

Stazioni	Working	Waiting	Blocked	Failed
OP 1/2	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%
OP 30 1	69.7%	0.0%	26.8%	3.5%
OP 30 2	67.4%	3.5%	26.3%	2.8%
OP 40 1	79.3%	5.7%	11.1%	3.9%
OP 40 2	70.4%	16.3%	9.3%	4.0%
OP 50	72.6%	18.4%	7.0%	1.9%
OP 60 1	71.8%	22.2%	4.8%	1.2%
OP 60 2	0.0%	59.7%	40.3%	0.0%
OP 70	70.2%	18.2%	10.2%	1.3%
OP 80	65.2%	19.6%	15.1%	0.2%
OP 90	66.3%	18.3%	15.2%	0.3%
OP 100	76.0%	17.9%	5.9%	0.3%
OP 110	77.0%	20.5%	1.5%	0.9%
OP 120	71.9%	27.5%	0.0%	0.6%
OP 130	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%

Nella tabella 5.20 sono presenti le percentuali di utilizzo delle singole stazioni; si può notare che la quasi totalità delle stazioni compie lavorazioni utili (*a valore aggiunto*) con percentuali medie intorno al 70%.

La teoria dell'EVSM si basa sulla ricerca di azioni correttive che vadano a diminuire le attività che non danno valore al prodotto finale; in prima analisi quelle di *spreco* che vengono considerate adducibili ad inefficienze dei macchinari, cattivo uso della materia prima, errori durante la lavorazione, pause e mancanze di attenzione del personale.

Le altre, *non a valore aggiunto*, la cui riduzione permette di arrivare a percentuali di risparmio maggiore, devono essere analizzate con attenzione per formulare azioni correttive adatte a ridurle. Le cause di questa tipologia di attività possono essere:

- Tempi di attesa di stazioni dovute alla occupazione delle stazione a monte e/o a valle

- Tempi di fermo macchina dovute a turni di pausa del personale addetto
- Costi di energia dovuti all'illuminazione o distribuzione interna delle risorse spesso sovrabbondante

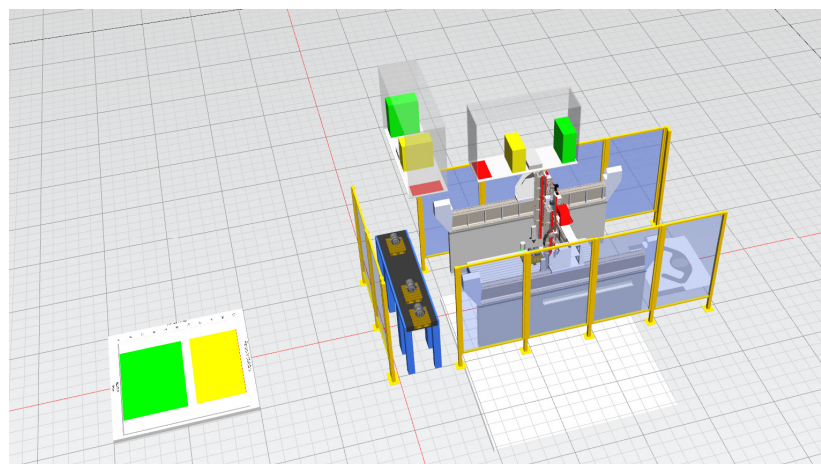
Il programma di simulazione permette di dividere le attività non a valore aggiunto in due categorie distinte:

- **Blocked**, rappresenta il tempo durante il quale la stazione si trova in condizione di poter fornire il pezzo finito alla stazione successiva ma questa è ancora impegnata a terminare la sua lavorazione;
- **Waiting**, rappresenta il tempo durante il quale la stazione dopo aver terminato la sua lavorazione ed aver fornito il pezzo alla successiva è in attesa di uno nuovo dalla stazione che si trova prima.

Dai valori riportati precedentemente le attività *non a valore aggiunto* si verificano per il quasi il 30% del tempo di simulazione mentre quelle di *spreco* per percentuali minori, circa de 3%.

Nell'immagine successive è rappresentata la distribuzione delle diverse attività svolte dalla stazione OP50 e la loro divisione in:

- A valore aggiunto (verde)
- Non a valore aggiunto (grigio e giallo)
- Spreco (rosso)



*Figura 5.60. Distribuzione delle attività OP50*

L'aumento globale dei tempi di lavoro della varie stazioni porterà direttamente ad aumentare anche quello della produzione oraria.

Per quanto riguarda invece la distribuzione dell'assorbimento energetico, le percentuali sono leggermente differenti, poiché, come spiegato precedentemente, l'assorbimento elettrico dovuto alle

lavorazioni è maggiore rispetto a quello nel quel la macchina è in attesa o in condizione di fallimento/fermo programmato.

Si riscontrano infatti percentuali di consumo di working in media superiori all'78%; le attività non a valore aggiunto, operational, richiedono un consumo medio del 20% mentre quelle di spreco del 2%.

*Tabella 5.21. Statistiche consumo energetico*

Stazione	Working	Operational	Failure
OP 1/2	0.0%	0.0%	0.0%
OP 30 1	77.6%	19.3%	3.1%
OP 30 2	76.1%	21.4%	2.5%
OP 40 1	85.3%	11.4%	3.3%
OP 40 2	75.8%	20.8%	3.4%
OP 50	81.2%	17.1%	1.7%
OP 60 1	79.8%	19.6%	1.0%
OP 60 2	0.0%	0.0%	0.0%
OP 70	80.9%	17.9%	1.2%
OP 80	77.2%	22.6%	0.1%
OP 90	75.3%	24.5%	0.3%
OP 100	84.2%	15.5%	0.3%
OP 110	86.9%	12.4%	0.7%
OP 120	78.8%	20.7%	0.5%
OP 130	0.0%	0.0%	0.0%

Interventi correttivi che vadano ad aumentare la percentuale di working permetteranno di migliorare il valore dell'efficienza energetica.

Nella tabella di seguito vengono riportati i dati di consumo delle singole stazioni monitorati con il software di simulazione che tiene conto delle diverse richieste di potenza elettrica a seconda della tipologia di lavorazione.

Tabella 5.22. Valori di consumo elettrico

Stazione	Esercizio	Working	Operational	Failure	Unità misura
OP 1/2	0	0	0	0	W
OP 30 1	722.68	558.3	141.59	22.79	W
OP 30 2	705.14	532.6	154.59	17.95	W
OP 40 1	745.77	634.6	86.46	24.71	W
OP 40 2	661.65	499	139.78	22.87	W
OP 50	815.2	661.2	139.6	14.4	W
OP 60 1	1617.97	1285.4	315.44	17.13	W
OP 60 2	0	0	0	0	W
OP 70	572.94	459	107.52	6.42	W
OP 80	610.44	465	144.54	0.9	W
OP 90	590.65	441.2	147.55	1.9	W
OP 100	760.35	638	120.25	2.1	W
OP 110	15695.7	13536.8	2041	117.9	W
OP 120	673.58	527	143	3.58	W
OP 130	0	0	0	0	W
Totale	24172.0	20238.1	3681.32	252.65	W
Percentuale		83.7%	15.2%	1.0%	

Analizzandoli, si vede come l'intera filiera produttiva necessiti di una potenza elettrica superiore a 24kW differentemente distribuiti lungo le varie stazioni. Il valore trovato, anche se superiore a quello delle misurazioni, può essere ritenuto corretto per il fatto che sono stati attribuiti valori fissi a tipi di lavorazioni che necessitano di consumo molto variabili (come visibile dai dati grafici del consumo per le singole stazioni).

L'analisi energetica ci permette di affermare che:

- dalle misurazioni è possibile vedere che oltre all'1% di energia di spreco,
- i risultati delle misurazioni energetiche attestano un consumo di energia utile elevato (83%).

A tal proposito, la prima considerazione fatta è quella sui lavoratori che si trovano nella stazione iniziale e finale, in assenza dei quali la linea non è in grado di produrre per mancanza di pezzi da lavorare, ma comunque consuma energia elettrica essendo le macchine perennemente in funzione.

Abbiamo studiato il caso in cui la catena di montaggio in ognuno dei tre turni giornalieri, abbia solamente due operatori, che lavorano con periodi di pausa di un'ora totale ogni otto ore di turno.

I risultati della simulazione denotano un calo netto della produzione dovuto al fatto che la linea risulta essere completamente funzionante per una porzione minore di tempo; viene riscontrato un calo della produzione oraria del 13% fino ad un valore di 137 pezzi/ora.

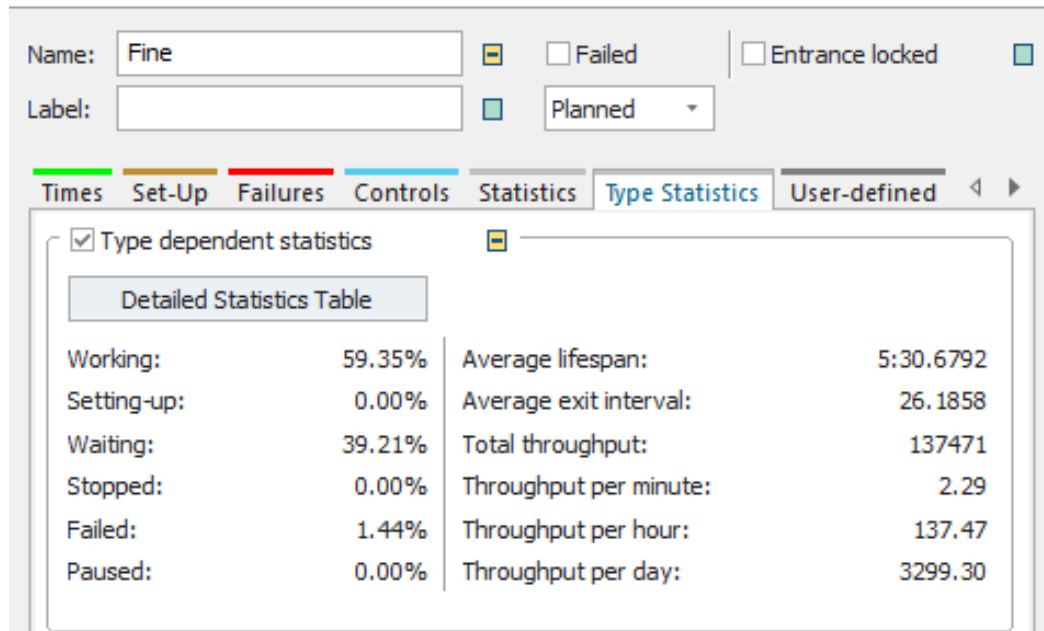


Figura 5.61. Dati di produzione con due lavoratori

Conseguentemente, le statistiche delle singole stazioni vengono peggiorate, si nota una diminuzione dei periodi di *working* ed un aumento delle inefficienze dovute ai fermi prolungati delle macchine (bloccaggio e attesa).

Il fatto che le stazioni siano in condizione di attesa per un tempo maggiore causa un aumento del tasso di energia *non a valore aggiunto* ed un calo dell'efficienza energetica.

Il focus dell'analisi viene fatto sulla stazione OP110 che essendo quella più energivora è causa di maggiori sprechi; il suo calo percentuale delle prestazioni di *working* è di circa 7%.

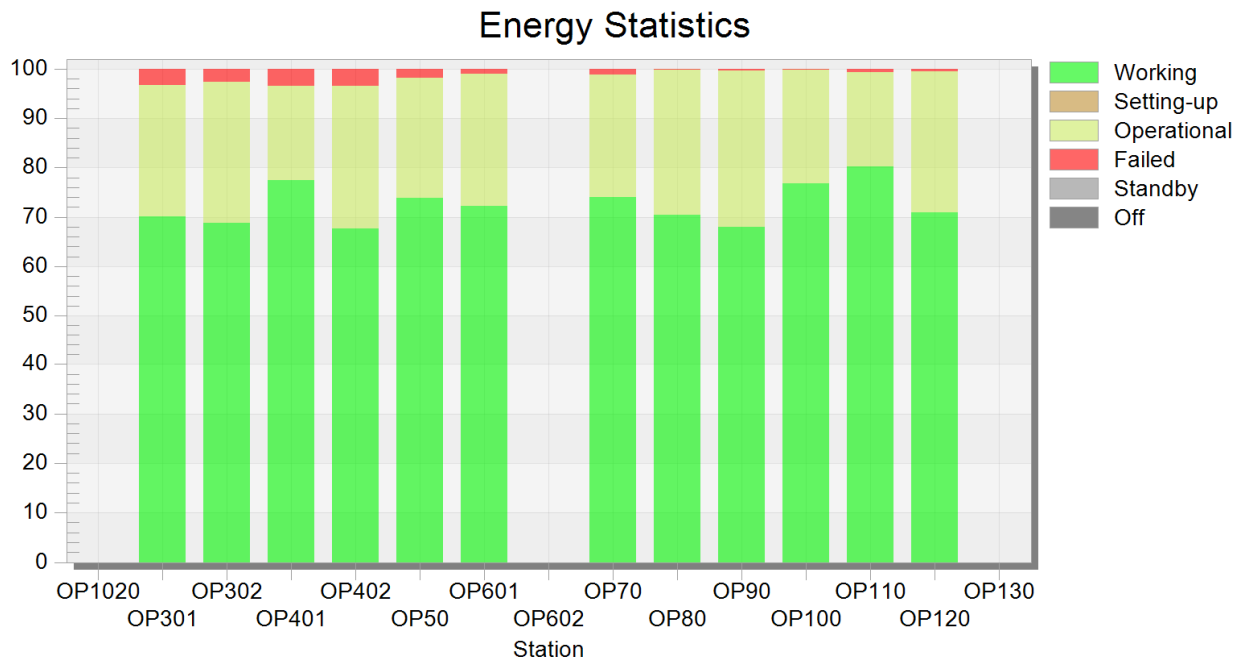


Figura 5.62. Percentuale del consumo di energia con due lavoratori

La soluzione a questo tipo di problematica è utilizzare una turnazione che permetta ai lavoratori, in caso di pausa, di essere prontamente sostituiti da altri in maniera continuativa, in modo tale da non causare fermi alla produzione e sprechi di energia.

Un'ulteriore considerazione è quella che può essere fatta sulle attività delle stazioni *non a valore aggiunto*, *blocked* e *waiting*, che vengono riportate nel grafico dei consumi sotto la voce *operational*.

Come esposto precedentemente le attività non a valore aggiunto sono quelle dovute a momenti di fermo della stazione per la non perfetta saturazione della linea.

L'energia utilizzata in *operational*, in questo caso, è dovuta a due diverse situazioni:

- La situazione di *waiting* in cui la macchina dopo aver terminato la sua lavorazione ed aver fornito il pezzo a quella successiva si trova in attesa del pezzo da lavorare proveniente da quella che la precede.
- La situazione di *blocked* in cui la stazione si trova in condizione di poter fornire il pezzo finito alla stazione successiva ma questa è ancora impegnata a terminare la sua lavorazione, quindi la macchina risulta bloccata.

Queste due tipologie di attività possono essere ridotte utilizzando delle soluzioni impiantistiche adatte ai particolari casi.

La causa principale è la non perfetta omogeneità dei tempi ciclo delle varie stazioni, ciò causa la formazione di code e ritardi che anche se minimi possono portare a elevati sprechi. È per questo che una soluzione potrebbe essere cercare di variare i tempi ciclo delle macchine più lente e più veloci per fare in modo di avvicinarle ad un valore medio più simile possibile.

Questo tipo di soluzione è comunque molto difficile poiché necessita della totale sostituzione di macchinari già esistenti ed i cui costi derivanti dall'acquisto sono spesso ammortizzabili in lunghi tempi.

Una soluzione più vantaggiosa ed immediata è quella dell'utilizzo di magazzini di stoccaggio nei quali posizionare pezzi semilavorati per far in modo di saturare la linea il più possibile.

La soluzione migliore è quella di utilizzare dei magazzini a monte delle stazioni OP301 e OP302 che hanno il più elevato livello di waiting durante la produzione.

Per simulare questo nuovo scenario abbiamo ipotizzato la presenza di appositi magazzini di storage con capienza massima di 40 pezzi.

Così facendo il prospetto delle attività e della produzione migliora, si rileva una produzione oraria di 164.4 pezzi/ora. Inoltre, si nota come la presenza dei magazzini ad inizio linea, permette un miglioramento delle fasi di working e di conseguenza una riduzione di quelle di waiting.

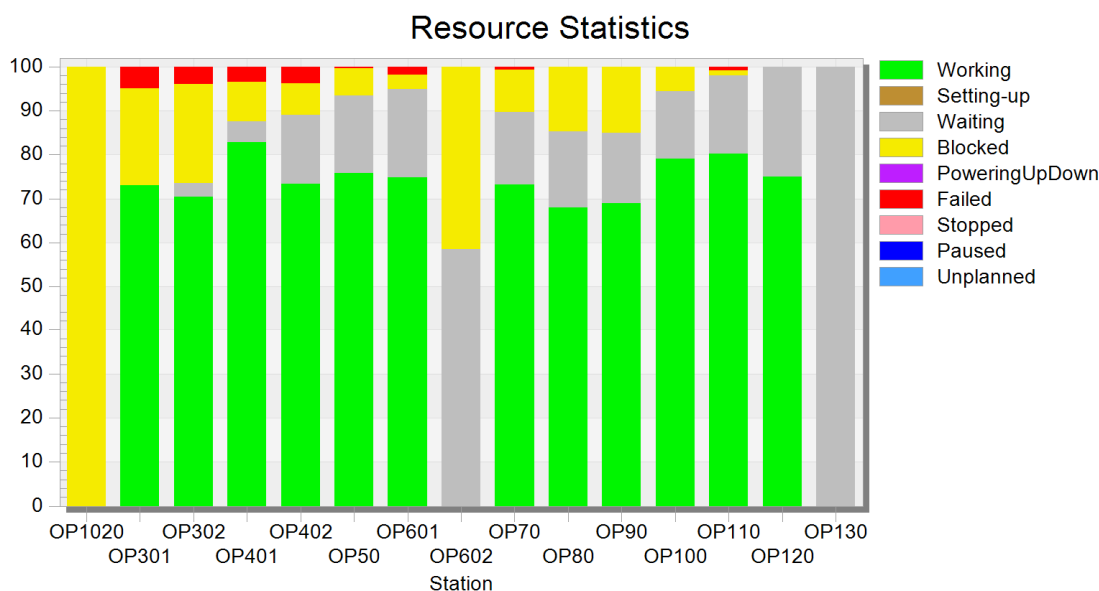


Figura 5.63. Statistiche di produzione

Analogo ragionamento viene fatto per il consumo di energia.

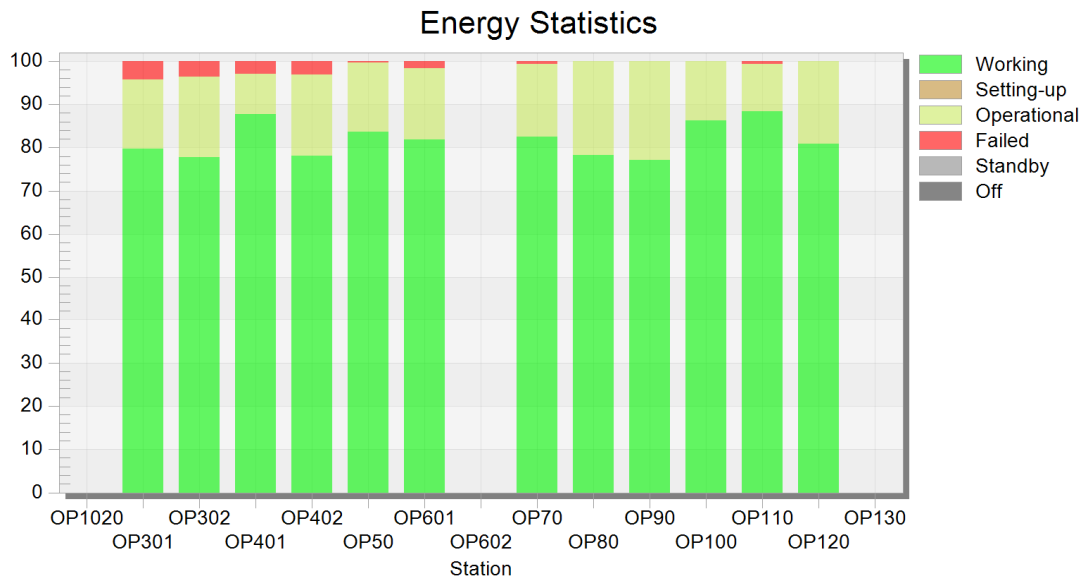


Figura 5.64. Statistiche di consumo energetico

Il grafico seguente riporta l'occupazione dei magazzini.

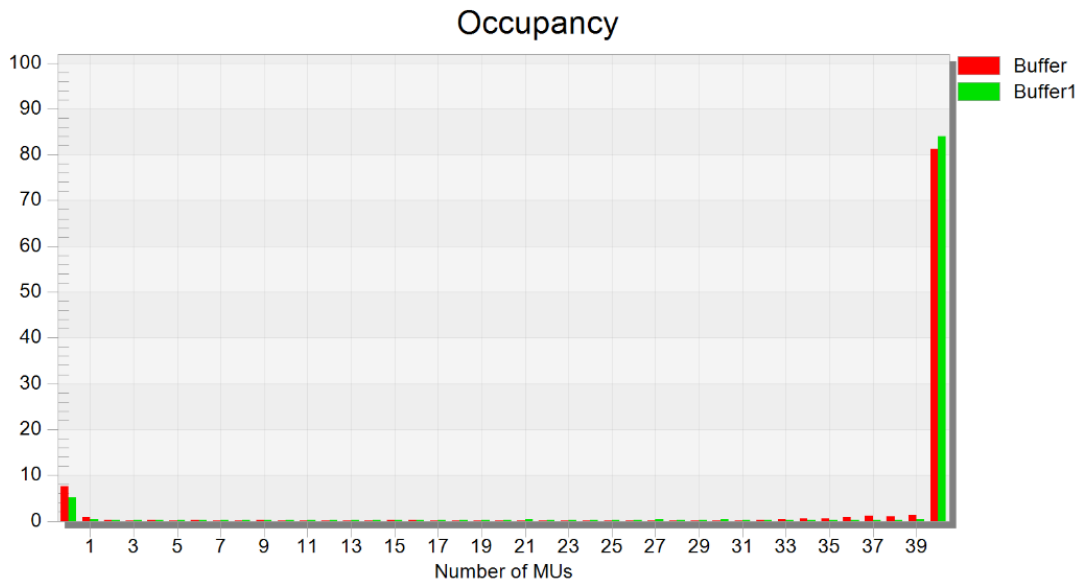


Figura 5.65. Occupazione magazzini

Il focus principale viene fatto sulla stazione OP110 la quale ha un miglioramento dei consumi con conseguente riduzione nelle fasi di operational e Failed.



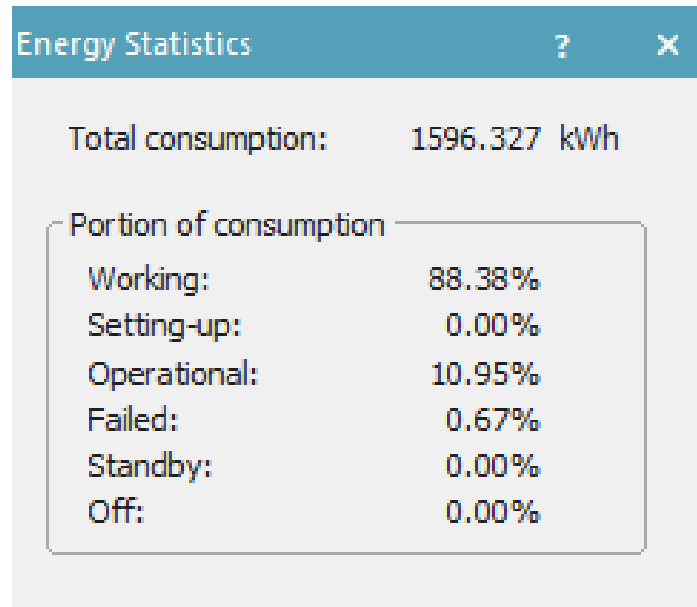


Figura 5.66. Statistiche energetiche stazione OP110

## 5.8 CONSIDERAZIONI SUL CASO MARELLI

L'impiego di software di simulazione è uno dei procedimenti principali per l'analisi di processi produttivi poiché permette, mediante accurati parametri di performance, di identificare le cause di maggior inefficienza e criticità all'interno di un processo produttivo. L'approccio simulativo, implementato con il software Plant Simulation della Siemens, porta alla compilazione di una libreria di possibili casistiche ed azioni a loro associate nel caso di una linea a forte incidenza automatica.

Di maggior interesse per il progetto React è la visione globale ottenuta dai dati valutati in tutte le 12 postazioni di assemblaggio, dall'OP 1.10 all'OP 1.130. Coerentemente con l'attuale logica aziendale, il sistema in esame è stato trattato sottoforma di 'black box', e gli indicatori di interesse in output concernono l'analisi della globalità dell'efficienza produttiva (OEE), dei costi di manutenzione straordinaria, ed infine del dispendio energetico durante i guasti. Nel caso analizzato in questo elaborato, la simulazione ha messo in luce come i costi e l'OEE non hanno un andamento lineare al variare della politica manutentiva, ragion per cui è necessario fare un *trade off* fra i due aspetti.

In tali termini, l'attività svolta ha permesso di:

- individuare il collo di bottiglia della linea di assemblaggio PHP4 dell'azienda Marelli;
- fornire un sistema di reporting di molteplici casi studio;
- seguire l'evoluzione degli indicatori di performance, al fine di prendere le necessarie misure e di semplificare la valutazione delle alternative, quanto più velocemente e coerentemente possibile;

- implementare correzioni virtuali con azioni specifiche;
- fornire ai partners React uno strumento in grado di adattarsi velocemente ad eventuali sviluppi futuri, semplicemente variando gli indicatori di performance.

Nello specifico, dall'analisi svolta si evince che l'attività più critica in termini di manutenzione preventiva e predittiva della linea di assemblaggio PHP4 risulta essere l'OP40, operazione relativa all'accoppiamento ed avvvitamento. È stato studiato che quando si raggiunge un certo livello di usura, il punzone dell'OP40 diventa inutilizzabile, il carico raggiunge una posizione diversa uscendo dalle specifiche, e la pompa va buttata.

A tal proposito, sono state effettuate diverse simulazioni basate sulla variazione degli scenari produttivi, ipotizzando di modificare l'attuale politica di manutenzione, secondo cui la sostituzione del punzone avvenga circa ogni 1000 pz. Alla luce di quanto ottenuto possiamo concludere che con la soluzione proposta nel caso in cui la manutenzione venga effettuata ogni 900 pezzi, si ottiene un aumento dell'OEE dello 0,267% rispetto alla situazione attuale, ma si ha anche un aumento dei costi di manutenzione pari al 15,07%. Ciò induce ad ipotizzare una prima soluzione in cui potremmo sostituire il piano manutentivo attuale sull'OP40 con una manutenzione di tipo preventiva ogni 900 pezzi lavorati in modo tale da avere un aumento dell'OEE immediato a discapito di un leggero aumento dei costi. Il caso del range di manutenzione invece, è più complicato da realizzare nel breve periodo, infatti, si ipotizza di implementare un sistema di manutenzione predittiva installando dei sensori sulla linea, in modo tale da monitorare costantemente la situazione delle macchine, ed effettuare la sostituzione dei componenti solo quando strettamente necessario. Ovviamente, oltre ad essere una soluzione attuabile nel lungo periodo in quanto richiede una complessa analisi per il posizionamento dei sensori, è sicuramente una soluzione economicamente molto più onerosa; però una volta entrata a regime i costi della manutenzione diminuiranno visto che la sostituzione dei componenti avverrà solo quando effettivamente necessario.

Altresì essenziale è stato sfruttare i dati ottenibili dalle simulazioni energetiche, che hanno contribuito ad avvalorare i risultati ottenuti allo scopo di considerare i consumi come fattori strettamente correlati alla manutenzione. Da essi si sono potuti visualizzare i costi energetici per quanto riguarda l'attività manutentiva, ottenendo che l'uso di un ATC riduce i costi per un tetto massimo (teorico) di 22,57€ settimanali. Stando a quanto calcolato, invece, considerando i dati output delle ultime 12 simulazioni, è stato possibile constatare che l'inserimento di un ATC può essere determinante nell'evoluzione migliorativa del processo, al contrario di un processo parallelo. Con l'inserimento di buffer inoltre produrrebbe un aumento dell'OEE del 3,39%, che è l'incremento massimo raggiunto nelle simulazioni teoriche.

Dunque, l'attività di simulazione svolta definisce l'analisi di una serie di interventi e di politiche volti ad analizzare l'incidenza dei KPIs ritenuti più significativi, fornendo una base solida per l'implementazione delle prossime attività del progetto React.

In conclusione, un'attività di simulazione efficiente, ben disegnata e seguita in maniera soddisfacente, non solo dà un'idea precisa della performance della linea produttiva, ma permette anche di semplificare le decisioni strategiche future che, nel caso in analisi, riguardano la manutenzione preventiva e predittiva, nonché l'efficientamento dei consumi energetici.

## **CAPITOLO VI CONCLUSIONI**

Nel percorso intrapreso per costruire i modelli e le conseguenti ottimizzazioni descritte nei capitoli precedenti, si è potuto constatare da un occhio soggettivo ed ignaro come, in realtà esista un intero mondo dietro alla faccia mostrata dagli strumenti utilizzati.

Altresì è vero che oltre a varie possibilità di utilizzo, ci sono e sono in via di diffusione sistemi e concetti atti a semplificare l'industria e le attività che la circoscrivono.

Con l'avvento e la diffusione dell' Industria 4.0, hanno preso piede altresì nuove tecnologie e sistemi volti ad automatizzare ulteriormente suddette attività usufruendo prevalentemente di sistemi cyberfisici (CPS) e le nuove reti (cloud, wireless, ecc).

Una di queste attività volte ad essere “ammodernate” potrebbe proprio essere l'ottimizzazione del layout. Di seguito verrà descritto come può essere possibile rendere l'ottimizzazione qualcosa di tangibile ed immediato, nel contesto moderno che è la “Smart Manufacturing”.

### **6.1 IL DIGITAL TWIN**

Un Digital Twin è una replica digitale di un oggetto del mondo reale e per tale motivo suddetta replica, come costruzione intuitiva, può essere avvicinata alle tecnologie di simulazione, ma un Digital Twin è molto di più. Un gemello digitale è una rappresentazione ad alta fedeltà della dinamica operativa della sua controparte fisica, resa possibile dalla sincronizzazione quasi in tempo reale tra il cyberspazio e lo spazio fisico. Le dinamiche operative sono elementi critici di un gemello digitale perché il comportamento di un gemello si basa su dati trasferiti in tempo reale al netto di input lag e ritardo di risposta dei sensori, provenienti dalla controparte fisica. La simulazione si concentra su ciò che potrebbe accadere nel mondo reale (scenario ipotetico), ma non su ciò che sta accadendo attualmente. Nel contesto produttivo, un Digital Twin può essere utilizzato per monitoraggio, controllo, diagnostica e previsione, oltre alla semplice simulazione.

#### **6.2.1 LA FABBRICA INTELLIGENTE (SMART MANUFACTURING)**

La produzione sta diventando “smart” a tutti i livelli: dal dispositivo fisico, attraverso la gestione della fabbrica, alle reti di produzione, acquisendo capacità di apprendimento, configurazione ed esecuzione con intelligenza cognitiva.

Nella produzione intelligente, un oggetto fisico in una fabbrica è connessa alla rete industriale tramite gateway informatici standard e legato come un gemello digitale nel cyberspazio. Ogni gemello digitale nel cyberspazio è un'astrazione della sua controparte nel mondo fisico, riflettendo il suo stato reale. Il cyberspazio memorizza ed elabora i dati in streaming da oggetti fisici connessi. Questi dati vengono utilizzati per modellare, simulare e prevedere lo stato di ogni cosa fisica in

condizioni di lavoro dinamiche. L'uso pervasivo di tecnologie intelligenti, come Big Data Processing e Artificial Intelligence, consente l'estrazione dell'intelligence di produzione in ogni singolo momento delle attività produttive.

L'intelligenza collettiva nelle fabbriche connesse localmente e il cyberspazio apre la strada ad alcuni drammatici cambiamenti dagli aspetti dell'operatività intra-aziendale, della collaborazione interaziendale e del modello di produzione, come mostrato in Fig.6.1.

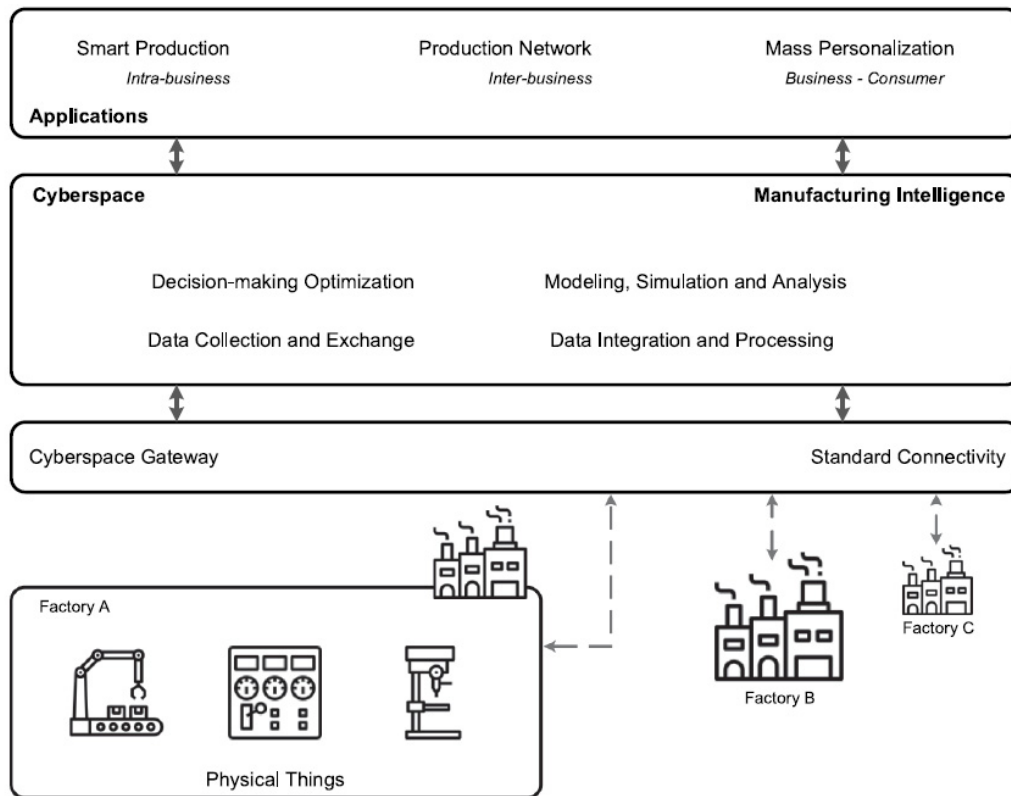


Figura 6.1 Overview della Smart Manufacturing

- **Produzione intelligente:** i sistemi di produzione aumentati con intelligenza cognitiva possono assumere sempre più lavori di produzione. I sistemi di produzione connessi e auto-organizzati affronteranno i nuovi compiti di produzione con alta efficienza e flessibilità. Anche il rapporto tra uomo e macchina cambierà; una direzione è che una fabbrica diventerà uno spazio di collaborazione uomo-macchina completamente immersivo.

- **Rete di produzione intelligente:** i sistemi di produzione cyber-fisici collegati formeranno una rete di produzione globale in grado di rispondere quasi in tempo reale ai cambiamenti dinamici nei sistemi di produzione locali e nella catena di fornitura esterna. Una rete di produzione di sistemi di produzione adattivi e auto-ottimizzanti può consentire la configurazione e la pianificazione autonome delle attività di produzione per lavori di produzione su scala variabile per ottenere impatti economici, ambientali e sociali.

- **Personalizzazione di massa:** il modello di produzione si sposterà da un tipo Push ad un modello di produzione Pull la personalizzazione di massa. Le fabbriche intelligenti che rispondono pienamente ai cambiamenti e alle richieste della fabbrica, della catena di approvvigionamento e del lato cliente possono ottenere una produzione in lotti con alta efficienza e flessibilità. L'onnipresente intelligenza produttiva nelle fabbriche distribuite e nei sistemi di produzione può rilevare, configurare e collaborare da sola in base allo stato e alle esigenze di produzione quasi in tempo reale, il che fornisce quindi l'agilità necessaria per la produzione di prodotti altamente personalizzati.

Il Digital Twin può e deve svolgere un ruolo chiave nella visione della produzione intelligente. Esso consente la transizione dall'analisi del passato alla previsione del futuro. La rappresentazione dal vivo della realtà tramite Digital Twins ci consente di evolvere dalla raccolta e dall'analisi dei dati ex post a pratiche commerciali in tempo reale ed ex ante. Rispecchiando la visione della Smart Manufacturing in Fig. 6.2, il Digital Twin può influenzare la produzione futura dai seguenti aspetti.

- *Digital Twin per risorse produttive:* una risorsa produttiva può essere connessa e sottratta al cyberspazio tramite la sua Digital Twin. I produttori possono ottenere un quadro più chiaro delle prestazioni del mondo reale e delle condizioni operative di un asset di produzione tramite dati quasi in tempo reale acquisiti dall'asset e prendere decisioni operative proattive ottimali. Con le informazioni veritiere provenienti da una risorsa produttiva, i produttori possono migliorare la propria consapevolezza situazionale e migliorare la resilienza e la flessibilità delle operazioni, in particolare nel contesto della personalizzazione di massa.

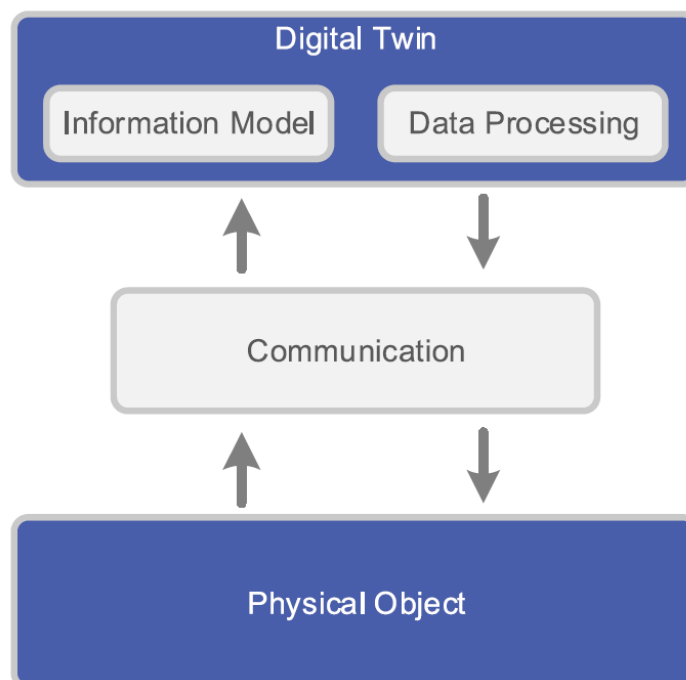
- *Digital Twin per utenti:* i Digital Twins possono anche collegare i lavoratori in officina. La rappresentazione di una persona, inclusi dati personali come peso, dati sulla salute, dati di attività e stato emotivo può aiutare a stabilire modelli per comprendere il benessere personale e le condizioni di lavoro degli esseri umani in una fabbrica. La comprensione dello stato umano nella forza lavoro può aiutare a progettare strategie di collaborazione incentrate sulla macchina umana per aumentare la salute fisica e psicologica dei lavoratori, oltre a raggiungere le migliori prestazioni di produzione. I lavoratori possono anche potenziarsi tramite programmi di formazione ultra realistici che fondono le configurazioni fisiche di fabbrica con scenari “what-if” virtuali. La capacità di impostare programmi di formazione virtuale personalizzati basati su gemelli digitali di lavoratori e fabbriche può portare a un'eccezionale ottimizzazione delle risorse ed efficienza operativa.

- *Digital Twin per l'impianto di produzione:* i Digital Twin possono funzionare anche per le fabbriche, creando una replica di un ambiente di fabbrica dal vivo. Le operazioni di gemellaggio digitale e di produzione basata sui dati possono consentire la creazione di un ambiente di fabbrica auto-organizzante con visibilità operativa e flessibilità complete. La connettività e il tracciamento dei dati durante l'intero processo di produzione consentono di trasformare le operazioni della

fabbrica in pratiche basate sull'evidenza dei dati, offrendo le capacità di tracciare le fonti di errore del prodotto, analizzare colli di bottiglia e le stazioni più efficienti della produzione e prevedere i requisiti futuri delle risorse.

- *Digital Twin per reti di produzione*: collegando le risorse produttive, le persone e il servizio tramite Digital Twin, è possibile rappresentare virtualmente ogni aspetto del business. Il collegamento di gemelli digitali distribuiti tra aziende consentirà alle aziende di costruire reti di produzione virtualmente connesse. Sfruttando le capacità dei Big Data, questa strategia offre una visibilità senza precedenti sulle prestazioni operative e crea la possibilità di prevedere le esigenze future in una rete di gemelli digitali.

Il Digital Twin riflette la mappatura dinamica bidirezionale tra un oggetto fisico e il suo modello virtuale nel cyberspazio. Un gemello digitale presenta un'architettura “middleware” (Insieme di software che fungono da intermediari fra strutture e programmi informatici, permettendo loro di comunicare a dispetto della diversità dei protocolli o dei sistemi operativi) che riassume la sua controparte fisica per i sistemi di gestione di ingegneria di alto livello per prendere decisioni quasi in tempo reale. La Fig. 6.2 mostra un modello di riferimento Twin digitale.



*Figura 6.2 Flusso direzionale di dati*

Come nucleo tecnico, lo sviluppo di Digital Twin ha bisogno di tre componenti: un modello informativo che riassume le specifiche di un oggetto fisico, un meccanismo di comunicazione che trasferisce i dati bidirezionali tra un Digital Twin e la sua controparte fisica, e un modulo di elaborazione dei dati che può estrarre informazioni da dati multi-sorgente eterogenei per costruire la rappresentazione dal vivo di un oggetto fisico. Questi tre componenti devono lavorare insieme per

costruire un Digital Twin. Senza un modello informativo per astrarre le caratteristiche di un'entità fisica, i dati trasmessi al cyberspazio perderanno significato e contesto. Senza un meccanismo di sincronizzazione dei dati tra un modello fisico e il suo modello di informazioni, la connessione e la riflessione tra queste due estremità si disconetteranno e il modello di informazioni diventa un'istantanea, una tantum, della sua controparte fisica. L'elaborazione dei dati ad alte prestazioni è la chiave per colmare il divario tra il flusso di dati eterogeneo e il modello di informazione Digital Twin.

### **6.2.2 TECNOLOGIE PER LA CREAZIONE DEL GEMELLO DIGITALE**

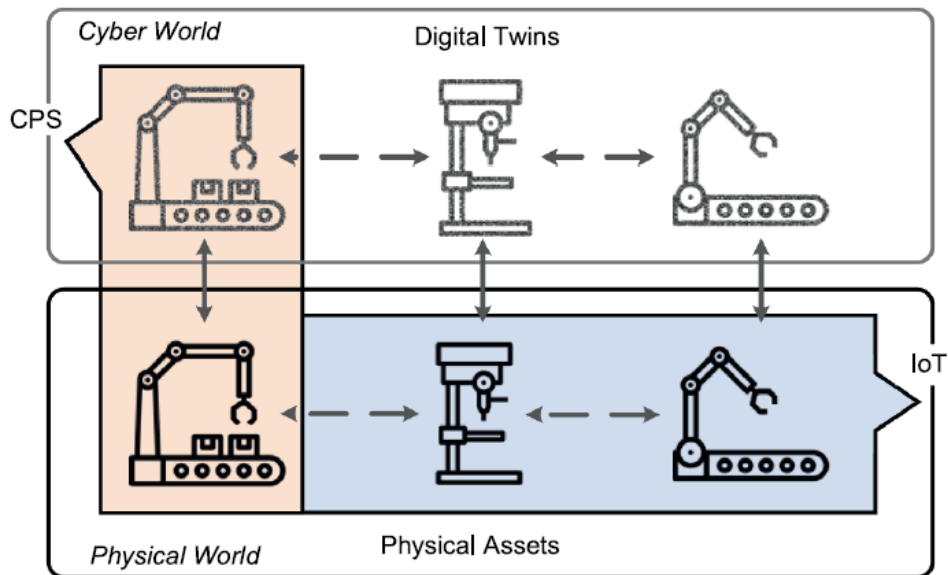
Esistono diversi punti di vista sulle relazioni tra Digital Twin e altri concetti, come la simulazione, i sistemi cyber-fisici (CPS) e Internet of Things (IoT). Sebbene questi concetti siano strettamente correlati, essi, per loro natura, differiscono per concetto, elementi chiave e applicazione.

Sebbene Digital Twin, CPS e IoT utilizzino tutti reti e sensori, il Digital Twin è un concetto diverso ma correlato con CPS o IoT, come mostrato in Fig. 6.1.

Un CPS è caratterizzato da un'attività fisica e dal suo gemello digitale. Al contrario, un gemello digitale è limitato al modello, non al bene fisico di gemellaggio, sebbene un gemello digitale non possa vivere senza il suo gemello nello spazio fisico. In altre parole, Digital Twin rappresenta il prerequisito per lo sviluppo di un CPS.

IoT si riferisce alle connessioni tra una rete di risorse fisiche (dispositivi, impianti, prodotti, ecc) attraverso le quali i dati possono confluire tra di loro (un esempio applicativo è nel campo della domotica). Le connessioni sono rese possibili dall'implementazione sicura di reti di computer, l'Internet stesso e protocolli di comunicazione. Tuttavia, nonostante la connettività, l'IoT non include l'idea di modelli digitali nel cyberspazio. L'IoT è l'infrastruttura nello spazio fisico per la connessione di risorse fisiche.





*Figura 6.3 CPS e IoT a raffronto*

Nel contesto degli impianti industriali in generale il CPS fa riferimento alle risorse fisiche quali stazioni, sensori, o lo stesso prodotto che connesse tramite protocolli o lo stesso framework, vanno a costituire il sistema atto a creare e gestire il gemello digitale.

Una costruzione tramite Plant Simulation è possibile tramite il framework costituito da Siemens e da tools di cinematica atti a restituire le animazioni tramite i sensori dell'impianto. Ovviamente, l'utilizzo di queste tecnologie prevede la gestione di un'immensità di dati disaggregati e perciò per costruire un gemello digitale, occorre predisporre un sistema di server e basi di dati legati all'impianto. Ad esempio, i dati di telemetria verrebbero linkati al modello tramite un ODBC (Open Database Connectivity) ovvero un protocollo che consente di connettere un database a un'origine dati esterna.

In particolare Siemens offre alcuni pacchetti con cui gestire l'attività di costruzione di un DT, specie fatta per Plant Simulation che legato ad altri software come Team Center (programma di gestione le attività operative e decisionali di PLM ed Electronic Data Processing) e link ai server aziendali, si può costituire un framework completo. L'esempio mostrato in figura 6.4 mostra un Digital Twin basato su architettura MTConnect, uno standard industriale del settore della produzione nato per facilitare il recupero organizzato delle informazioni di processo da dispositivi con macchine CNC. Di base lo standard MTConnect è diviso in tre sezioni. La prima fornisce informazioni sul protocollo e la struttura dei documenti XML con schemi XML (utili per l'integrazione dati dal server). La seconda sezione specifica i componenti della macchina e la descrizione dei dati disponibili. La terza e ultima sezione specifica l'organizzazione del flusso di dati che può essere fornito da un dispositivo. Una sezione intermedia è quella che identifica il supporto su dispositivi mobili.

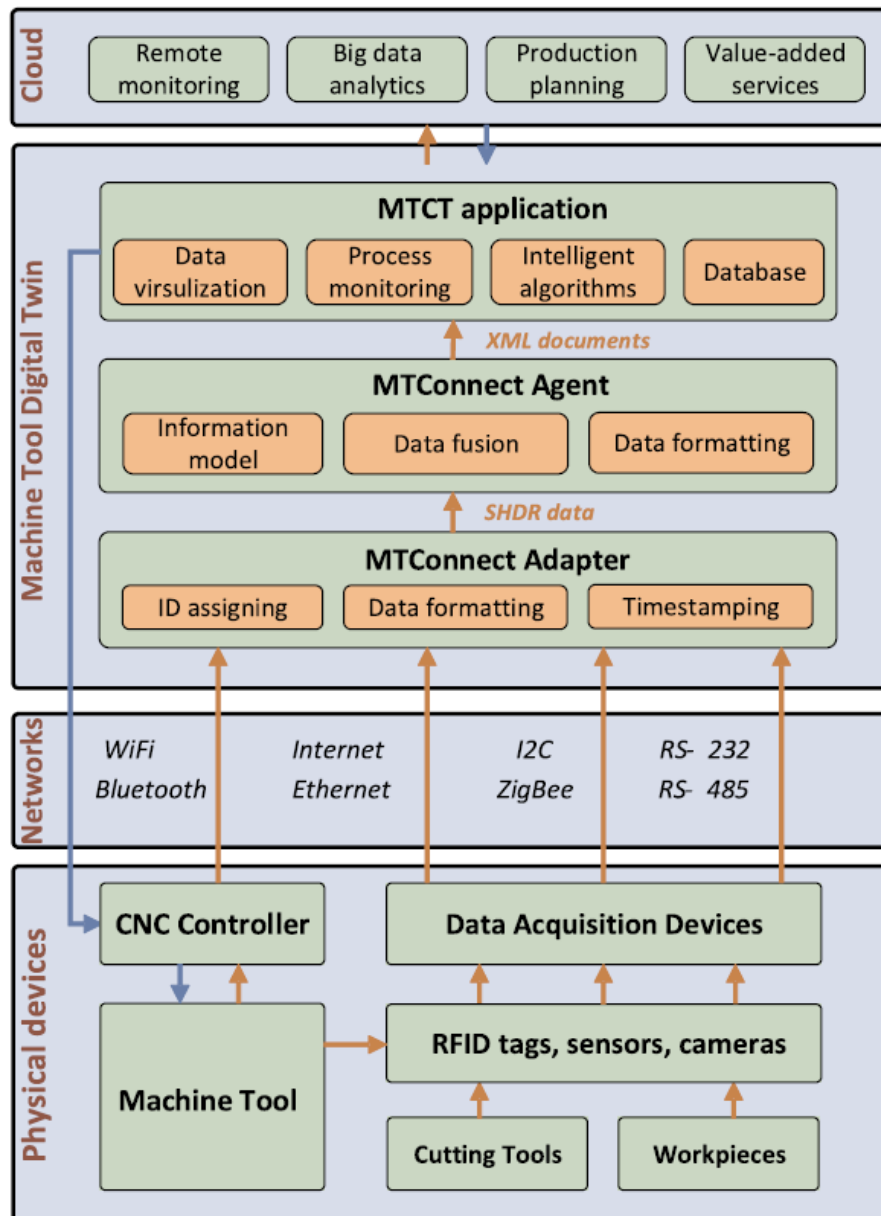


Figura 6.4 MTConnect per il DT

### 6.3 RIFLESSIONI FINALI E SVILUPPI FUTURI

Descritto il Digital Twin è intuibile pensare a quali possano effettivamente essere le potenzialità in un contesto legato all'ottimizzazione del layout.

In primis occorre ricordare che modificare qualcosa nel modello del DT, suddetta modifica si ripercuote fisicamente nel mondo reale e viceversa. Cambiando un input quale ad esempio un dato grossolano come il numero di prodotti da realizzare, il corrispettivo mix, o la velocità dei trasportatori sino ad altri dettagli più minuziosi. Ciò presuppone che i dati fluenti siano trasmessi quasi istantaneamente e che non siano datati, e ciò che si è voluto mostrare in tutto il progetto di tesi, che tanto più un modello è vicino allo stato reale, tanto più questi è fedele. Sotto quest'ottica,

sia le modifiche che i dati predisposti all'analisi sono raccolti in tempo reale. Le ripercussioni sul sistema decisionale possono fornire un enorme vantaggio concorrenziale e gestionale poiché l'evoluzione dei dati può essere tracciata con estrema precisione, permettendo di adottare approcci esatti per il processo di ottimizzazione. La stessa struttura d'analisi diverrebbe stabile permettendo strategie dedicate e previsioni sempre meno distanti da un mero caso ipotetico.

Un gemello digitale per Arstech e Marelli avrebbe permesso di visualizzare il reale flusso di MU, i reali guasti provocatisi e le relative sostituzioni degli utensili, definendo statistiche precise e non approssimative tramite i campioni raccolti. La raccolta dati stessa sarebbe stata istantanea attraverso i file XML e fruiti direttamente dal software e fogli di calcolo oltre ai semplici report utili alle sole attività batch e in generale di procedure offline.

Non per ultimo e centrale al discorso è il fatto che le ottimizzazioni proposte avrebbero avuto un effettivo risvolto fisico. Nel caso Arstech si trattava di aggiungere o spostare dispositivi e storage, perciò la sola modifica fisica avrebbe influito su quella digitale, ma qualora le stazioni fossero state ancorate ad una guida mobile, il controllo digitale avrebbe influito sull'impianto, persino sotto questo aspetto, cambiando radicalmente la struttura dell'impianto. E sotto questo punto di vista è quasi surreale che tutto ciò sarebbe stato realizzato attraverso un mouse ed una tastiera.

## **APPENDICE: LA SIMULAZIONE NEGLI ECOSISTEMI MR**

Lo scopo di questa appendice è mostrare un ulteriore passo intuitivo-tecnologico che è possibile intraprendere nell'ambito della simulazione allo scopo di ottimizzare non solo il layout in sé, ma anche ed eventualmente i processi e i vari sistemi utente-macchina.

L'idea è di introdurre l'operatore a diretto contatto con la realtà digitalizzata ed interagire tramite essa per ottenere dei vantaggi nel mondo reale.

Introduciamo quindi le tecnologie Virtual Reality, Augmented Reality e Mixed Reality.

### **A.1 AR, VR E MR**

La tecnologia VR è una sorta di sistema di simulazione al computer che può creare uno spazio virtuale. Essa utilizza la tecnologia informatica per generare un ambiente di simulazione che è una fusione di informazioni multi-sorgente, una scena visiva tridimensionale interattiva e una simulazione del sistema di comportamento fisico. I sistemi VR utilizzano la computer grafica per costruire modelli in tempo reale e illustrare la scena in tridimensionalità e si concentrano principalmente su percezione, interfaccia utente, software di base e hardware.

Sulla base della tecnologia VR, l'AR può aumentare la fusione tra spazio virtuale e spazio fisico. Il sistema AR costruisce un modello di ambiente tridimensionale virtuale attraverso la tecnologia di interazione uomo-computer, la tecnologia di visualizzazione optoelettronica, la tecnologia di animazione tridimensionale in tempo reale e la tecnologia di computer grafica basata sulla tecnologia di tracciamento degli input esterni (tramite controller, ad esempio). Il modello virtuale è mappato nel mondo reale in modo che l'utente si trovi in un ambiente fuso e ottenga un'esperienza più immersiva. Inoltre, i sistemi AR aumentano anche la capacità di acquisire informazioni al di là della gamma di percezione umana dal mondo reale.

Pertanto, la percezione umana viene ampliata dopo che queste informazioni sono state elaborate dal sistema AR e diventano informazioni percepibili dall'uomo.

La realtà mista (MR) è talvolta chiamata realtà ibrida. Fonde il mondo reale e lo spazio virtuale per creare un nuovo ambiente visivo. Nel nuovo ambiente di visualizzazione, oggetti fisici e digitali coesistono e interagiscono in tempo reale. Nel nuovo ambiente di visualizzazione, oggetti fisici e oggetti digitali coesistono e interagiscono in tempo reale. L'obiettivo di MR è integrare perfettamente la realtà virtuale e la realtà per formare un nuovo mondo virtuale che includa le caratteristiche di un ambiente reale per oggetti virtuali, ad esempio, attraverso sensori di gravità, giroscopi e altri dispositivi. In effetti, gli oggetti nel sistema MR non sono oggetti visibili poiché sono digitali. Nel sistema MR, oggetti fisici e oggetti virtuali digitali possono coesistere e interagire in tempo reale, l'interazione delle

informazioni è realizzata da una tecnologia chiave (tecnologia di tracciamento della registrazione input, tracciamento oculare, tecnologia di riconoscimento dei gesti, tecnologia interattiva tridimensionale, tecnologia di interazione vocale, ecc.).

### **A.1.1 DIFFERENZE TRA LE TECNOLOGIE AR, VR MR**

In generale, gli oggetti visti nel sistema VR sono illusori. Gli oggetti virtuali che vediamo sono realizzati introducendo la coscienza umana nello spazio virtuale.

Rispetto al sistema VR, gli oggetti nel sistema AR sono costituiti da oggetti virtuali e oggetti fisici. Il sistema AR porta informazioni virtuali nel mondo reale, alcune informazioni che l'uomo non può percepire vengono catturate e trasformate in informazioni apprezzabili dal sistema AR. La realtà mista include sia la realtà aumentata che la realtà virtuale aumentata. Inoltre, da VR a MR, le caratteristiche di immersività, interattività e multi-percezione vengono costantemente rafforzate. Pertanto, ci sono molte somiglianze e differenze tra VR, AR e MR e il confronto in dettaglio è il seguente:

**Somiglianze:** le informazioni virtuali devono essere generate dal sistema di simulazione al computer, in cui le informazioni virtuali sono visualizzate da dispositivi specifici come display mobili, guanti high-tech, tracker di posizione, caschi, ecc.

A livello tecnico, la tecnologia “3R” (come soprannominabile l’insieme delle VR, AR, MR) dipende in larga misura dalle tecnologie dell’informazione di nuova generazione (tecnologia di simulazione, tecnologia di computer grafica e tecnologia di interazione uomo-computer, ecc.). Con lo sviluppo di informazioni di nuova generazione essa, perfezionerà l’esperienza dell’utente per coinvolgere gli utenti. Attualmente, la portabilità è la tendenza comune di VR / AR / MR secondo questi dispositivi, che sono ancora dominati da dispositivi indossabili, ma non totalmente liberi a causa del problema dell’alimentazione.

**Differenze:** esse hanno requisiti diversi per le attrezzature. Ad esempio, i dispositivi VR non possono ottenere l’interazione tra utente e spazio virtuale, ma i dispositivi AR e MR sì. Immersività, interattività e multi-percezione sono caratteristiche diverse tra loro. Ad esempio, AR e MR sono migliori della realtà virtuale semplice in un’esperienza immersiva. La principale differenza sta nell’interazione. Le caratteristiche dell’interazione sono principalmente le seguenti e la Figura A.1 mostra la differenza prestazionale di VR, AR e MR.

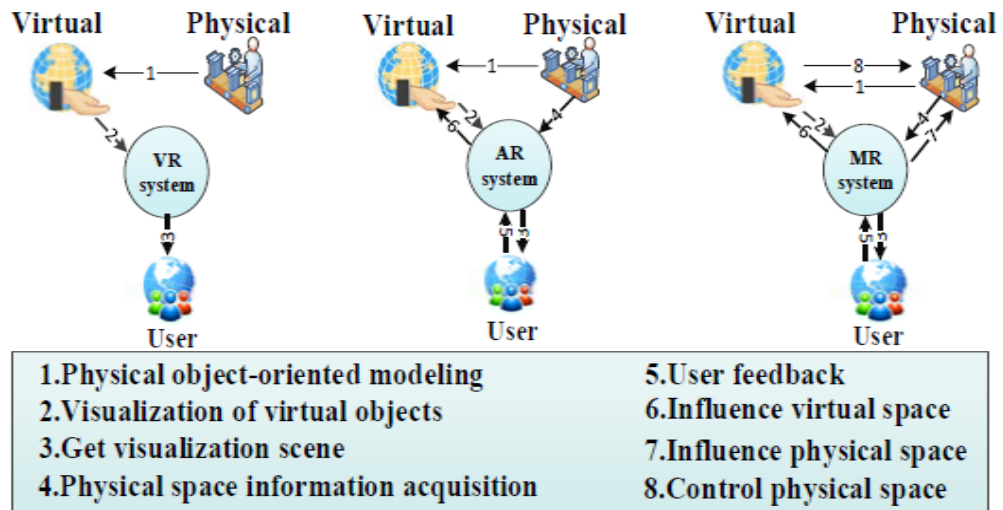


Figura A.1 Rappresentazione prestazionale dei sistemi 3R con flussi informativi

### A.1.2 INTERAZIONE NEI SISTEMI 3R

**Interazione VR:** l'interazione unidirezionale in VR è un'interazione in modalità base, ad es. Interazione unidirezionale (spazio fisico → spazio virtuale → utente) e il sistema VR è il ponte per l'interazione tra spazio virtuale e utente. In primo luogo, il modello gemello virtuale di oggetti fisici con alta fedeltà è il passaggio chiave per l'interazione. In questo passaggio, le caratteristiche geometriche, i tratti comportamentali e i parametri di funzione del gemello fisico devono essere rappresentati digitalmente, imitare o persino prevedere in termini di entità gemellare virtuale. Quindi, il sistema VR fornisce agli utenti informazioni digitalizzate per lo spazio virtuale e gli utenti riceveranno una scena visiva tridimensionale immersiva. Poiché l'utente riceve info puramente digitali, questa immersione si basa semplicemente su informazioni virtuali sintetizzate dal computer, quindi non troppo realistiche e prive di interazione diretta tra l'utente e lo spazio fisico.

**Interazione AR:** Diversamente dalla realtà virtuale, l'interazione in AR ha sia interazione a senso unico che interazione a due vie. Ad esempio, l'interazione a senso unico è spazio fisico → spazio virtuale → utente o spazio fisico → utente → spazio virtuale. L'interazione in due è spazio virtuale → ← utente. Per queste interazioni, il sistema AR richiede informazioni sia dallo spazio virtuale, informazioni in tempo reale dallo spazio fisico e informazioni sensoriali e di feedback dell'utente. Pertanto, il sistema AR sovrapporrà queste informazioni sensoriali e di feedback per aumentare le scene reali. Rispetto al sistema VR, il sistema AR enfatizza il processo di interazione (spazio fisico → utente → ← spazio virtuale), che si riferiscono alla percezione dell'utente dell'ambiente fisico complessivo, quindi un feedback cognitivo sarà studiato e simulato dal sistema AR nello spazio virtuale secondo ai dati di realtà aumentata.

In termini di interattività e di immersività, il sistema AR è migliore del sistema VR.

**Interazione MR:** Rispetto al sistema VR e al sistema AR, il sistema MR presenta un miglioramento completo dell'esperienza immersiva e delle forme interattive. Il sistema MR può non solo realizzare l'interazione bidirezionale (spazio virtuale  $\rightarrow$   $\leftarrow$  utente) tra gli utenti e lo spazio virtuale, ma potrebbe anche realizzare l'interazione bidirezionale (spazio fisico  $\rightarrow$   $\leftarrow$  utente) tra utenti e spazio fisico. Infine, grazie al sistema MR, lo spazio fisico potrebbe anche realizzare interazioni bidirezionali (spazio fisico  $\rightarrow$   $\leftarrow$  spazio virtuale). Per queste due interazioni, il sistema MR ha bisogno sia di informazioni dallo spazio virtuale, sia di informazioni in tempo reale dallo spazio fisico, sia di informazioni sensoriali e di feedback da parte dell'utente. Inoltre, nel processo di interazione bidirezionale, il sistema MR svolgerà un ruolo che permetterà di elaborare e convertire le informazioni chiave.



*Figura A.2 Operatore e AR*

## **A.2 APPLICAZIONI DEI SISTEMI 3R**

Vediamo ora due esempi particolari di ciò che si può ottenere da un sistema 3R. Nel dettaglio analizziamo l'integrazione dei 3R con il sistema Digital Twin.

### **A.2.1 ASSEMBLAGGIO IMMERSIVO**

La tecnologia di assemblaggio digitale che integra la tecnologia Digital Twin e 3R è un modo efficace per ottenere un assemblaggio visivo tridimensionale, migliorare la qualità e l'efficienza dell'assemblaggio e ridurre i costi di assemblaggio. La tecnologia di assemblaggio visibile tridimensionale che combina la tecnologia DT e 3R è quella di realizzare l'interazione tra lo spazio virtuale e lo spazio fisico attraverso i gemelli digitali dell'edificio. Nel frattempo, i modelli virtuali vengono proiettati nello spazio fisico sulla base della tecnologia 3R che fa provare agli utenti esperienze interattive ultra immersive e ad alta percezione. Inoltre, questo assemblaggio visivo

consente all'utente di comprendere meglio le dinamiche del processo stesso e di controllare l'assemblaggio attraverso sistemi di interazione uomo-computer in tempo reale.

Il framework DT con tecnologia 3R è la base per l'assemblaggio visivo, al quale fornisce anche supporto tecnico. Questo framework include linee di assemblaggio a livello fisico, modelli e dati a livello di spazio virtuale e sistemi 3R. La catena di montaggio dello spazio fisico è il modulo di esecuzione che realizza l'assemblaggio visivo tridimensionale. Il modello relativo al prodotto a livello di spazio virtuale non solo definisce le caratteristiche geometriche delle parti e dei componenti del prodotto (come forme, dimensioni, tolleranze, ecc.), Ma descrive anche una varietà di informazioni di assemblaggio tra cui attributi fisici, parti del prodotto e i componenti. Essi inoltre si adattano alle relazioni e alla pianificazione del percorso di assemblaggio ecc. Il sistema interattivo di realtà virtuale è composto da guanti tech, tracker di posizione, casco e altri moduli hardware e software che supportano il sistema interattivo.



*Figura A.3 Assemblaggio Robot-Operatore tramite AR System*

### **A.2.1 INTERFACCE PER OPERATORI**

Si pensi all'utilizzare il modello virtuale come interfaccia immersiva ed operare fisicamente tramite essa. La simulazione non è più un semplice strumento di controllo, ma diventa il "controller", ovvero il mezzo con il quale si può effettivamente interagire con la realtà.

Frapporre il modello virtuale tra l'utente e la realtà gioca un ruolo a favore anziché, come si potrebbe pensare, una spesa inutile per un interazione uomo-macchina che può essere eseguita già direttamente.



L'utilizzo della simulazione come interfaccia operativa permette non solo di effettuare tali attività comodamente da una unica sede, ma anche di agire in totale sicurezza.

Costruire una linea totalmente automatizzata, ma controllata digitalmente dall'operatore permette contemporaneamente sia lo sfruttamento di attività altamente complesse sia una supervisione che solo l'occhio e la mente umana può riservare.

Programmare e progettare interfacce virtuali dedicate e che siano implicite al layout permette all'operatore di immergersi interamente nell'impianto e muoversi liberamente, ottenendo un controllo assoluto, nonché di lavorare in ombra rispetto all'impianto di produzione.



*Figura A.4 Interfaccia virtuale macchina/operazione*



*Figura A.5 Fabbrica virtuale con operatore in attività totalmente immersiva*

### **A.3 GLI ENGINE GRAFICI COME S.W. SIMULATIVI**

Realizzare un modello tridimensionale è molto complesso anche sotto il punto di vista del realismo. Per questo potrebbe essere utile utilizzare un'ulteriore tecnologia

Per tutto il documento si è data una rilevante importanza sulla rappresentazione grafica del layout. In genere, per effettuare delle semplici simulazioni non occorre una restituzione completa, bensì l'utilizzo di pochi oggetti semplici legati tra loro e di un altrettanto rapido sistema di analisi.

Si è anche discusso però, di come queste semplificazioni portino ad un effettivo distacco tra l'informazione in possesso e quella necessaria, sia che si tratti di una scelta voluta od obbligata.

L'utilizzo di motori grafici permettono di realizzare un ecosistema virtuale ultra realistico, che se appropriatamente implementato con la simulazione, garantirebbe l'immersività massima e una rappresentazione assolutamente coerente.

Si porta alla luce che tali "graphic engines" sono attualmente utilizzati prevalentemente nell'ambito cinematografico e nell'industria videoludica, tuttavia con l'avvento delle API (Application Programming Interface) ed in particolar modo delle Direct X (pacchetti software semplificativi di programmazione grafica) e con processori e schede video sempre più potenti, ma al contempo accessibili, si sono potute sperimentare restituzioni modellistiche ad hoc.

Tramite essi è possibile costruire in maniera molto intuitiva l'intero ambiente e oggetti semoventi al suo interno, nonché di programmare tramite script dei "comportamenti virtuali" relativi agli oggetti stessi. Per esempio si potrebbero programmare le animazioni del robot sulla base delle restituzioni fotogrammetriche o addirittura l'intero flusso dei materiali che effettivamente attraversa la linea.

Gli engine grafici non sono propriamente software di modellazione 3D, bensì offrono le strumentazioni e pacchetti che permettono di integrare gli oggetti in maniera coerente con l'ecosistema desiderato (sarebbe possibile, ad esempio, restituire l'ecosistema del pianeta Marte sia graficamente che sotto il profilo della forze fisiche che agiscono su di esso, come gravità, venti, atmosfera, ecc).

Questi strumenti vengono forniti generalmente all'interno di un ambiente di sviluppo integrato (dall'inglese integrated development environment o più comunemente IDE) affinché permettano lo sviluppo semplificato e rapido (RAD) degli ecosistemi secondo un metodo di progettazione data-driven. Questi motori grafici vengono chiamati spesso "middleware" perché, in accordo con il significato commerciale del termine, forniscono una piattaforma flessibile e riutilizzabile che fornisce tutte le funzionalità chiave necessarie esternamente per sviluppare

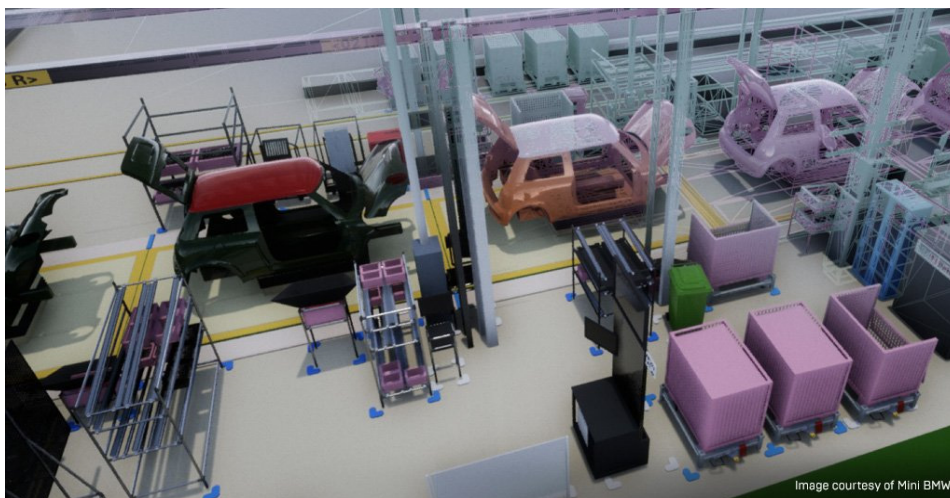
un'applicazione riducendo i costi, la complessità e il tempo impiegato; tutti fattori critici e altamente competitivi nell'industria di videogiochi e computer.

Ovviamente si parla di tecnologie marginali, anche se di potenziale rilevanza. In questa parte finale era doveroso citare che software come Autodesk Maya, Unreal Engine, Unity, Decima Engine, ecc stanno contribuendo a continue evoluzioni nel fotorealismo, ultimamente accompagnato dall'utilizzo della fotogrammetria.

Come già affermato, l'industria dell'intrattenimento (cinema e videogames) sfruttano questa tecnologia, ma viste le potenzialità immersive, non è difficile immaginare quali possano essere i vantaggi dell'implementare tutto ciò in ambito simulativo o per costruire l'apoteosi di un Digital Twin.



*Figura A.6 Restituzione 3d di una fabbrica tramite Unreal Engine*



*Figura A.7 Linea di assemblaggio automobili "Mini" (BMW) in Unreal Engine*

## BIBLIOGRAFIA:

- Ahire, P., and Relkar, A. S., *Correlating Failure Mode Effect Analysis (FMEA) & Overall Equipment Effectiveness (OEE)*, in *Procedia Engineering*, 2012, vol. 38, pp. 3482-3486.
- Alexandrov, G. (2008). Matrix Models. *Encyclopedia of Ecology*, 2273–2279.
- Altiok, T., & Melamed, B. (2007). *Simulation Modeling and Analysis with ARENA*. USA: Elsevier.
- Altobelli, A., Ambrosio, A., Marconi, C., *Ingegneria della manutenzione: Metodologia RCM – Case Study nel settore farmaceutico*, 2006, Manutenzione, Tecnica e Management.
- Andersson, C., Bellgran, M., *On the complexity of using performance measures: Enhancing sustained production improvement capability by combining OEE and productivity*, in *Journal of Manufacturing Systems*, 2015, vol 35, pp. 144-154.
- Angeli, F., *Principi generali di gestione della manutenzione*, 2007.
- Ahuja IPS, Khamba JS. *Assessment of contributions of successful TPM initiatives towards competitive manufacturing*, in *J. Qual Maint Eng*, 2007, vol. 14, no. 4, pp. 356–74.
- Arburatti Marco, *Simulazione di una linea di produzione industriale finalizzata a migliorarne l'efficienza energetica*.
- Badiger, A. S., Gandhinathan, R., *A proposal: evaluation of OEE and impact of six big losses on equipment earning capacity*, in *Int. J. Process Management and Benchmarking*, 2008, vol. 2, no. 3, 234-248.
- Banks, J. (1998). *Handbook of Simulation*. (J. Banks, Ed.). Canada: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Bastianelli Margherita, *Tecniche di simulazione per l'efficienza di linee produttive in ambiente manifatturiero*.
- Batumalay, K., and Santhapparaj, A., S., *Overall Equipment Effectiveness (OEE) through Total Productive Maintenance (TPM) practices — A study across the Malaysian industries*, in *International Conference for Technical Postgraduates*, 2009.
- Bernard, P. Z., Tag Gon, K., & Herbert, P. (2000). *Theory of Modeling and Simulation* (Second Ed). USA: Academic Press.
- Berrah, L., Marius, G., Haurat, A., Foulloy, L., *Global vision and performance indicators for an industrial improvement approach*, in *Computers in Industry*, 2000, vol. 43, no. 3, pp. 211-225.
- Braz RGF, Scavarda LF, Martins RA, *Reviewing and improving performance measurement systems: An action Research*, in *International Journal of Production Economics*, 2011, vol. 133, no. 2, pp. 751-60.
- Caldera, H. T. S., Desha, C., & Dawes, L. (2017). Exploring the role of lean thinking in sustainable business practice : A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1546–1565. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.126>

- Dan, J. R. G., Guix, A., Martí, V., Arnaldos, J., & Darbra, R. M. (2016). Monte Carlo simulation as a tool to show the influence of the human factor into the quantitative risk assessment. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 441–449. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.04.024>
- Deller, J. R., & Hansen, J. (2005). 3 - Methods, Models, and Algorithms for Modern Speech Processing. In *The Electrical Engineering Handbook* (pp. 861–890).
- Duse, M. (2016). *Gestire progetti e commesse di produzione con Ms Project*.
- Cerciello, S., *La metodologia Reliability Centered Maintenance*, 2007, Manutenzione, Tecnica e Management.
- Esmaeilian, G.R., MegatAhmad, M.M.H., Ismail, N., Sulaiman, S., Hamed, M., *Particular Model for Improving Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) by Using of Overall Equipment Efficiency (OEE)*, in International Symposium on Information Technology, 2008.
- Erik Flores Garcia, Enrique Ruiz Zunika, Jessica Bruch, Matiaz Urenda Moris, Anna Syberfeldt, *Simulation-based Optimization for Facility Layout Design in Conditions of High Uncertainty*
- Fedele, L., Furlanetto, L., Saccardi, D., *Progettare e gestire la manutenzione*, 2004.
- Furlanetto, L., Garetti, M., Macchi, M., *Ingegneria di Manutenzione: Strategie e Metodi*, 2007.
- Geoffrey Coffey. (2010). *A Systems Approach to Leadership: How to Create Sustained High Performance in a Complex and Uncertain Environment*. Australia: Springer-Verlag.
- Gossinger, R., Helmke, H., Kaluzny, M., *Condition-based release of maintenance jobs in a decentralised production- maintenance system – An analysis of alternative stochastic approaches*, 2017, International Journal of Production Economics, vol. 193, pp. 528-537.
- Greasley, A. (2008). Using Simulation for Facility Design: A Case Study. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 16, 670–677.
- Guner, M. G., & Unal, C. (2008). Line Balancing in the Apparel Industry Using Simulation Techniques. *Fibres Textiles in Eastern Europe*, 16(2), 75–78.
- Imbergamo, E., Viviani, A., Fornaciari, L., & Canali, G. (2014). *Abbatere inefficienze e costi di produzione. Un modello di eccellenza operativa e di simulazione: Un modello di eccellenza operativa e di simulazione*. (F. Angeli, Ed.).
- Jeong, K.Y., Phillips, D.T., *Operational efficiency and effectiveness measurement*, in International Journal of Operations & Production Management, 2001, vol. 21, no. 11, pp. 1404-1416.
- Jude, S., Tinch, W., & Rosser, P. (1990). Discrete-event simulation applied to apparel manufacturing. *Georgia Institute of Technology*.
- Krishnasamy, L., Khan, F., Haddara, M., *Development of a risk-based maintenance (RBM) strategy for a power-generating plant*, 2005, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 18, no. 2, pp. 69-81.
- Kumar, A., Shankar, R., Aljohanic, N.R., *A big data driven framework for demand-driven forecasting with effects of marketing-mix variables*, in Industrial Marketing Management, 2019.

- ISO 22400, *Automation Systems and integration - Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management*, 2014.
- Lee, J., Kao, H. A., Yang, S., *Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment*, in *Procedia CIRP*, 2014, vol. 16, pp. 3-8.
- Maymon, G. (2018). Chapter 5 - Two Basic Methods of Solutions. In *Stochastic Crack Propagation* (pp. 53–57).
- Mansur, A., and Rayendra, R., *Performance Acceleration on Production Machines Using the Overall Equipment Effectiveness (OEE) Approach*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, vol. 105.
- Morgante, *Dai sistemi produttivi tradizionali ai sistemi produttivi avanzati*, in Maggioli Editori, 2013.
- Nagi, M., Chen, F. F., & Wan, H. (2017). Throughput Rate Improvement in a Multiproduct Assembly Line Using Lean and Simulation Modeling and Analysis. *Procedia Manufacturing*, 11, 593–601. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.153>
- Nakajima, S., *Introduction to TPM*, in Productivity Press, Cambridge, MA, 1988.
- Omega, D., and Andika, A., *Improving Overall Equipment Effectiveness Using CPM and MOST: A Case Study of an Indonesian Pharmaceutical Company*, in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 343.
- Phillips, F., Chang, J., & Su, Y. (2019). When do efficiency and flexibility determine a firm's performance? A simulation study. *Suma de Negocios*, 4(2), 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2017.12.003>
- Pontevedra, V. (2019). Feasibility of Using Simulation Technique for Line Balancing In Apparel Industry. *Procedia Manufacturing*, 30, 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.043>
- Pourhassan, M. R., & Raissi, S. (2017). An integrate d simulation-base d optimization technique for multi-objective dynamic facility layout problem, 8, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.06.001>
- Pritsker, A. B. (1984). *Introduction to Simulation and SLAM II*. (Halsted Press, Ed.). New York.
- Rajput, H. S., and Jayaswal, P., *A Total Productive Maintenance (TPM) Approach To Improve Overall Equipment Efficiency*, in *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2012, vol.2, no. 6, pp. 4383-4386.
- Rimawan, E., Kholil, M., Hendri, *Measurement value analysis overall equipment effectiveness (OEE) packaging process in line 2 (Case Study of PT.MBI Tbk)*, in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 343
- Rubrich, L., & Watson, M. (2004). *Implementing World Class Manufacturing* (Second Edi). Fort Wayne, Indiana: WCM Associates.
- Saeheaw, T., & Charoenchai, N. Chattinnawat, W. (2009). Line Balancing in the Hard Disk Drive Process Using Simulation Techniques. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 3(12), 1571–1575.
- Saeid, M., William, A. P., & John, Y. M. (2019). Chapter 19 - Process Modeling and Simulation of

Gas Processing Plants. *Principles and Practices*, 579–614.

- Shiqian Ke, Feng Xiang, Zhi Zhang, Ying Zuo, A enhanced interaction framework based on VR, AR and MR in Digital Twin (2019)
- Siregar, I., Muchtar, M.A., Rahmat, R.F., Andayani, U., *Method of calculation overall equipment effectiveness in fertilizer factory*, in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 343.
- Stamatis, D. H., *The OEE primer: understanding overall equipment effectiveness, reliability, and maintainability*, in CRC Press, 2010.
- Stief, P., Dantan, J., Etienne, A., & Siadat, A. (2018). A Motion Reuse Framework for Accelerated Simulation of Manual Assembly Processes. *Procedia CIRP*, 72, 398–403. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.282>
- Suryahatmaja, U. S. (2015). Modeling and Simulation of Queuing Systems Using Arena Software : A Case Study. In *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 1–7). Dubai, UAE.
- Szczerbicki, E., & White, W. (2010). SYSTEM MODELING AND SIMULATION FOR PREDICTIVE MAINTENANCE. *Cybernetics and Systems*, 29(5), 481–498.
- Tavner, P., Ran, L., Penman, J., Sedding, H., *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*, in The Institution of Engineering and Technology, 2008.
- Turpin, L. J. (2018). A note on understanding cycle time. *Intern. Journal of Production Economics*, 205(August), 113–117. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.004>
- Walrand, J., & Pravin, V. (2000). CHAPTER 9 - Control of Networks: Mathematical Background. In *High-Performance Communication Networks* (Second Edi, pp. 431–487).
- Wang, P., Yang, T., & Yu, L. (2018). Lean-pull strategy for order scheduling problem in a multi-site semiconductor crystal ingot-pulling manufacturing company. *Computers & Industrial Engineering*, 125(May), 545–562. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.043>
- Yang, S., Arndt, T., & Lanza, G. (2016). A flexible simulation support for production planning and control in small and medium enterprises. *Procedia CIRP*, 56, 389–394. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.10.062>
- Yuqian Lu, Chao Liu, Kevin I-Kai Wang, Huiyue Huang, Xun Xu, *Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues*
- Zhang, L., Zhou, L., Ren, L., & Laili, Y. (2019). Modeling and simulation in intelligent manufacturing. *Computers in Industry*, 112, 103–123. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.08.004>
- Zhu, Y., Ã, J. L., & Gonza, M. (2009). A hybrid simulation optimization method for production planning of dedicated remanufacturing, 117, 286–301. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.11.005>
- Zexuan Zhu, Chao Liu, Xun Xu (2019). Visualisation of the Digital Twin data in manufacturing by using Augmented Reality

## RINGRAZIAMENTI

Spendo queste ultime righe per ringraziare coloro che mi sono stati accanto e che mi hanno guidato questi ultimi mesi ed in questi 5 anni di carriera universitaria.

In primis ringrazio il professor Filippo Emanuele Ciarapica per avermi dato l'opportunità di intraprendere questo percorso formativo e di avermi predisposto ad un argomento tanto interessante quanto fruttuoso in questo momento storico per l'industria.

Ringrazio inoltre la dottoressa Laura Lucantoni, la quale mi ha guidato e, riduttivo dire, aiutato lungo tutto il tirocinio, oltre ad avermi permesso di utilizzare dati e conoscenze tecniche altrimenti ignote.

Un necessario grazie lo ripongo per la mia famiglia, per il loro costante incoraggiamento nel proseguire ed intraprendere strade, senza costrizioni, ma col solo interesse nel consigliare in bene e col desiderio più sincero di vedermi felice di ciò che faccio e voglio fare. Lungo questi anni ho realizzato quanto sia fortunato, ma anche quanto disonorevole sia dare per scontato tutto ciò.

Un grazie inoltre ai miei amici, vicini e non. Grazie a loro, questo percorso si è fatto ogni giorno più leggero, dandomi sempre l'opportunità di ridere e scherzarci su, anche nei momenti di più totale sconforto. Pochi possono dire di avere amici così.

Un enorme grazie infine a colei che in quest'ultimo anno più di tutti mi ha ascoltato e continua a farlo. Custodisco ogni singolo momento passato insieme, e tutti quelli che verranno in questo cammino che stiamo facendo insieme.