

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto



RICONFIGURAZIONE DI IMPIANTI DI PRODUZIONE:
ANALISI COMPARATIVA TECNICO-ECONOMICA E
SIMULATIVA CON INTEGRAZIONE DI
AUTOMAZIONE ROBOTICA

Relatore: Prof.ssa Martina Calzavara

Correlatore: Prof. Nicola Berti

Laureandi: Tommaso Cais

Pietro Mandaio

Davide Stefani

Thomas Visentin

Anno Accademico 2025-2026

Sommario

1 - Introduzione.....	3
1.1 - Contesto del caso studio.....	3
1.2 - Obiettivi.....	3
2 - Dati.....	4
2.1 - Dati di progetto.....	4
2.2 - Dati assunti.....	6
3 - Dimensionamento analitico.....	9
3.1 - Dimensionamento del sistema per reparti.....	9
3.1.1 - Calcolo della produttività di ogni reparto.....	9
3.1.2 - Calcolo del numero teorico di macchine.....	9
3.1.3 - Calcolo del numero reale di macchine e relativo coeff. di utilizzo per reparto.....	9
3.1.4 - Calcolo del fabbisogno di operatori.....	10
3.1.5 - Identificazione del reparto collo di bottiglia.....	11
3.1.6 - Calcolo del costo al pezzo per ogni prodotto.....	12
3.2 - Classificazione dei prodotti.....	13
3.2.1 - Analisi DCA.....	13
3.2.2 - Analisi ROC.....	14
3.2.3 - Analisi MROC.....	15
3.2.4 - Analisi del ciclo tecnologico.....	16
3.3 - Dimensionamento della cella produttiva.....	17
3.3.1 - Calcolo della produttività della cella.....	17
3.3.2 - Calcolo del numero di macchine nella cella.....	18
3.3.3 - Calcolo e verifica del coefficiente di utilizzo.....	18
3.3.4 - Eventuali modifiche nella parte di produzione che rimane per reparti.....	20
3.3.5 - Calcolo del costo di ogni prodotto considerando una cella manuale.....	20
3.3.6 - Calcolo del costo di ogni prodotto considerando una cella servita da robot.....	21
4 - Dimensionamento con modelli simulativi.....	24
4.1 - Preparazione dei modelli simulativi.....	24
4.1.1 - Introduzione ai modelli simulativi.....	24
4.1.2 - Struttura dei modelli simulativi per reparti.....	25
4.1.3 - Struttura dei modelli simulativi per celle.....	28
4.2 - Confronto dimensionamento analitico con modello simulativo.....	31
4.2.1 - Modello simulativo scenario S0.....	31
4.2.2 - Modello simulativo scenario S1.....	33
4.2.3 - Modello simulativo scenario S2.....	35
4.2.4 - Modello simulativo scenario S3.....	37
4.2.5 - Modello simulativo scenario S4.....	38
4.2.6 - Modello simulativo scenario S5.....	40
5 - Confronto deterministico vs. simulativo.....	42
5.1 - Confronto del sistema per reparti.....	42
5.2 - Confronto del sistema per celle.....	43
6 - Bibliografia.....	44

1 - Introduzione

1.1 - Contesto del caso studio

L'oggetto del caso studio tratta un'azienda che opera nel settore delle lavorazioni per asportazione di truciolo. La produzione dell'azienda si articola in componenti di acciaio e di ghisa destinati a sistemi di trasmissione del moto, organi idraulici e meccanismi di precisione. L'impianto produttivo attuale è organizzato per reparti (job shop) ossia con macchinari omogenei che vengono raggruppati all'interno della stessa area produttiva e lavorano prodotti differenti che transitano tra di essi seguendo il ciclo tecnologico caratteristico del singolo prodotto.

Per l'azienda in questione è previsto un incremento dei volumi produttivi nei prossimi tre anni per alcune famiglie di prodotto. Pertanto, l'azienda sta valutando se e quando convenga riorganizzare parte della produzione in celle di lavorazione per poter aumentare l'utilizzo delle risorse produttive (tramite l'utilizzo dei principi della group technology). Inoltre, si desidera includere nell'analisi l'eventuale inserimento di un robot per la movimentazione del materiale all'interno delle celle di lavorazione per valutarne l'eventuale convenienza economica.

1.2 - Obiettivi

- Dimensionamento analitico del sistema produttivo attuale (per reparti) per ciascuno dei prossimi tre anni del piano di vendita con relativi coefficienti di utilizzo.
- Identificazione delle famiglie di prodotto adeguate alla produzione per celle di lavorazione.
- Dimensionamento analitico della cella di lavorazione per ciascuno dei prossimi tre anni del piano di vendita, con relativi coefficienti di utilizzo, tramite l'utilizzo della curva caratteristica economica
- Definizione dell'eventuale momento di convenienza alla transizione alla cella (coefficiente di utilizzo $\geq 60\%$).
- Valutazione dell'inserimento di un robot per la movimentazione all'interno della cella.
- Sviluppo di modelli di simulazione ad eventi discreti tramite *Siemens Tecnomatix Plant Simulation* al fine di valutare le prestazioni operative.
- Calcolo dei KPI (Key Performance Indicators).
- Confronto fra il dimensionamento analitico ed il modello simulativo ad eventi discreti.

2 - Dati

2.1 - Dati di progetto

Di seguito sono tabulati dei parametri generali del sistema produttivo che vengono ritenuti validi sia per la configurazione per reparti che per la configurazione per celle di lavorazione.

Parametro	Valore	Note
Giorni lavorativi/anno	220	Escluse festività e ferie
Turni/giorno	2	Turno mattina + pomeriggio
Ore/turno	8	
Ore produttive/anno	3520 h/anno	$220 \times 2 \times 8$
Soglia convenienza cella	$\geq 60 \%$	Coefficiente di utilizzo minimo

tabella 2.1.1: Informazioni iniziali sulle caratteristiche produttive aziendali

Il costo relativo agli operatori ed ai robot antropomorfi è stato ipotizzato come segue:

- Costo operatore manuale ≈ 35.000 €/anno.
- Costo robot (hardware + integrazione + programmazione) ≈ 120.000 €/anno.

Nella seguente tabella sono riportate le risorse macchina disponibili nell'impianto:

Cod.	Tipo macchina	Valore economico [€]	Setup medio [min/lotto]	Ingombro [m ²]	K1	K2	K3	K4
TOR	Tornio CNC	85.000 €	20	15	93.00%	96.7%	85%	45%
FRE	Fresatrice CNC	110.000 €	20	22	92.50%	92.0%	85%	42%
FOR	Foratrice CNC	55.000 €	20	18	97.10%	86.5%	85%	46%
RET	Rettificatrice CNC	140.000 €	20	16	95.60%	83.0%	85%	45%
BRO	Brocciatrice	75.000 €	20	15	97.40%	98.0%	85%	42%
LAV	Lavaggio industriale	35.000 €	20	23	100.00%	90.0%	85%	48%
CON	Banco controllo CMM	95.000 €	20	10	92.20%	93.0%	85%	45%

tabella 2.1.2: Valori economici, tempi di attrezzaggio, ingombro e coefficienti di performance dei reparti

Il “Valore economico [€]” è inteso come costo iniziale di acquisto del macchinario. Il “Setup medio [min/lotto]” rappresenta il tempo medio di attrezzaggio per effettuare un cambio di formato di produzione. I coefficienti di performance “ K_i ” sono relativi alla produzione per reparti ed in particolare il coefficiente K_4 che risulta circa del 45%, tipico di una produzione caratterizzata da attrezzaggi continui per cambio prodotto.

Di seguito si riportano le tabelle relative ai cicli tecnologici dei sei prodotti considerati per l'inclusione nel cambio di layout produttivo. Il “Tempo [min/pz]” si intende come il tempo impiegato dal macchinario per lavorare un pezzo, ad esclusione quindi del tempo di setup.

P01 - Albero di trasmissione			
#	Macchina	Operazione	Tempo [min/pz]
1	TOR	Tornitura esterna grezza	4.5
2	TOR	Tornitura di finitura	3.2
3	FRE	Fresatura piana spallamenti	2.8
4	FOR	Foratura assiale centri	1.0
5	RET	Rettifica cilindrica esterna	5.5
6	LAV	Lavaggio e asciugatura	1.5
7	CON	Controllo dimensionale	2.0

tabella 2.1.3: Ciclo tecnologico e tempi di lavorazione del prodotto P01

P02 - Flangia di accoppiamento			
#	Macchina	Operazione	Tempo [min/pz]
1	TOR	Tornitura frontale e assiale	3.0
2	FRE	Fresatura profilo esterno	2.0
3	FOR	Foratura passanti 4× Ø10	2.5
4	FOR	Maschiatura M10×4	1.8
5	LAV	Lavaggio	1.0
6	CON	Controllo dimensionale	1.5

tabella 2.1.4: Ciclo tecnologico e tempi di lavorazione del prodotto P02

P04 - Pignone conico			
#	Macchina	Operazione	Tempo [min/pz]
1	TOR	Tornitura cono esterno	4.0
2	FRE	Fresatura denti conici (divid.)	8.0
3	FOR	Foratura e maschiatura hub	1.5
4	BRO	Brocciatura scanalature interne	2.0
5	RET	Rettifica fianco denti	6.0
6	LAV	Lavaggio	1.0
7	CON	Controllo geometrico denti	4.0

tabella 2.1.5: Ciclo tecnologico e tempi di lavorazione del prodotto P04

P05 - Boccola di guida			
#	Macchina	Operazione	Tempo [min/pz]
1	TOR	Tornitura esterna e foro	2.0
2	TOR	Tornitura finitura foro	1.5
3	RET	Rettifica interna	3.0
4	LAV	Lavaggio	0.8
5	CON	Controllo dimensionale	1.0

tabella 2.1.6: Ciclo tecnologico e tempi di lavorazione del prodotto P05

P07 - Spinotto di collegamento			
#	Macchina	Operazione	Tempo [min/pz]
1	TOR	Tornitura esterna Ø18 h6	1.2
2	TOR	Smussatura e filettatura	0.8
3	RET	Rettifica esterna	1.5
4	CON	Controllo automatico	0.5

tabella 2.1.7: Ciclo tecnologico e tempi di lavorazione del prodotto P07

P08 - Sede valvola			
#	Macchina	Operazione	Tempo [min/pz]
1	TOR	Tornitura esterna e smussatura	2.8
2	TOR	Tornitura sede conica interna	3.5
3	FOR	Foratura passante centrale	1.0
4	RET	Rettifica sede conica	4.5
5	LAV	Lavaggio	1.0
6	CON	Controllo tenuta e angolo cono	2.0

tabella 2.1.8: Ciclo tecnologico e tempi di lavorazione del prodotto P08

Nella tabella seguente sono riportati i dati relativi al piano di vendita previsionale triennale che riflette la crescita dei volumi attesi per ciascun prodotto.

Cod.	Prodotto	Anno 1 [pz/anno]	Anno 2 [pz/anno]	Anno 3 [pz/anno]
P01	Albero di trasmissione	2250	2700	3450
P02	Flangia di accoppiamento	4500	6000	7950
P04	Pignone conico	11250	13500	18000
P05	Boccola di guida	9450	14100	19500
P07	Spinotto di collegamento	15000	22500	32250
P08	Sede valvola	2850	3450	4350

tabella 2.1.9: incremento dei volumi produttivi nei prossimi tre anni per ciascun prodotto

2.2 - Dati assunti

Di seguito si riportano tutti i dati assunti.

Dati per il calcolo del costo della materia prima (c_{mp}), utili a sua volta per il calcolo del costo al pezzo di ogni prodotto:

- Innanzitutto si considera la tipologia dei prodotti da realizzare e il loro impiego, si esclude quindi l'utilizzo di acciai speciali e si opta per l'impiego di acciai al carbonio (C40; C45) con eventuali trattamenti termici (es. bonifica); così facendo si ottengono delle caratteristiche meccaniche compatibili all'impiego considerato (e soprattutto adatte alle lavorazioni meccaniche da eseguire), mantenendo un costo contenuto.

- Si assume una densità media pari a: $\rho \approx 7,5 \text{ g/cm}^3$.
- Le dimensioni medie del pezzo grezzo (di forma cilindrica) sono stimate, considerando il tempo di lavorazione del pezzo, in: diametro: $d = 30 \text{ mm}$; altezza: $h = 250 \text{ mm}$.

Quindi:

$$Volume = \frac{\pi d^2}{4} \times h = 176,6 \text{ cm}^3$$

$$Peso = Volume \times \rho = 1,3 \text{ kg}$$

Si determina quindi il costo unitario medio all'ingrosso: $Costo = c_u \times peso = 2,9 \text{ €}$

Si assume quindi come costo medio della materia prima per ogni prodotto $c_{mp} = 3 \text{ €}$.

Calcolo dei costi fissi dei macchinari:

si suddividono i macchinari in tre categorie per somiglianza della lavorazione, delle dimensioni, dei consumi e similitudine nei costi fissi ausiliari, come quelli riguardanti gli utensili e la manutenzione:

1. Tornitura e fresatura
2. Brocciatura, foratura e rettifica
3. Lavaggio e controllo

Per ogni categoria si calcolano:

- $Costo \text{ energia} = Potenza \times C. \text{ energia elettrica} \times Tempo \text{ di lavoro} \times K_2 [\text{€}]$, con:

1. "Potenza" assunta sulla base della categoria;
2. "Costo (unitario) energia elettrica" assunto;
3. La moltiplicazione per il coefficiente di performance K_2 (medio) che tiene conto solo del tempo in cui la macchina è accesa e consuma energia. Trattasi di un metodo conservativo: si considera una potenza consumata pari al 100% del potenziale della macchina anche quando è accesa, ma non lavora o non lavora a pieno carico.

- $Costo \text{ utensili} = \frac{Costo \text{ utensile}}{Vita \text{ utensile}} \times Tempo \text{ di lavoro} \times K_4 [\text{€}]$, con:

1. "Costo utensile" e "Vita utensile" assunti sulla base della categoria;
2. La moltiplicazione per il coefficiente di performance K_4 (medio) che permette di trascurare il tempo di setup, di ozio, di ramp-up.

Si riporta nelle tabelle seguenti, per categoria, il riassunto di questi ed altri dati assunti per poter ricavare i costi fissi dei macchinari:

COSTI FISSI MACCHINARIO: TOR e FRE				
Potenza	8,00	kW	Refrigerante	1.000 €
C. energia elettrica	0,20	€/kWh	Costo energia	5.314 €
Costo utensile	10 €	€	Costo utensili	5.104 €
Vita utensile	3	h	Manutenzione	2.000 €
Tempo di lavoro	3520	h/anno	*nota su vita utensile: per rifinitura al tornio e fresatura durano anche 5/6 ore, mentre sgrossatura < 1 ora → 3h di media	
			TOTALE annuo	€ 13.418

tabella 2.2.1: calcolo dei costi fissi per la prima categoria di macchinari

COSTI FISSI MACCHINARIO: BRO, FOR e RET				
Potenza	6,00	kW	Refrigerante	1.000 €
C. energia elettrica	0,20	€/kWh	Costo energia	3.766 €
Costo utensile	20 €	€	Costo utensili	1.561 €
Vita utensile	20	h	Manutenzione	2.000 €
Tempo di lavoro	3520	h/anno		
			TOTALE annuo	€ 8.327

tabella 2.2.2: calcolo dei costi fissi per la seconda categoria di macchinari

COSTI FISSI MACCHINARIO: CON e LAV				
Potenza	2,00	kW	Acqua e prodotti	1.000 €
C. energia elettrica	0,20	€/kWh	Costo energia	1.288 €
Costo utensile	-	€	Costo utensili	-
Vita utensile	-	h	Manutenzione	1.000 €
Tempo di lavoro	3520	h/anno		
			TOTALE annuo	€ 3.288

tabella 2.2.3:calcolo dei costi fissi per la terza categoria di macchinari

Con “Tempo di lavoro” si fa riferimento alle ore produttive annue.

Tutti i dati relativi al costo delle singole lavorazioni (potenza, consumi, utensili) e della materia prima, sono stati assunti consultando il testo “*Tecnologia Meccanica*” e aziende che operano nel settore metalmeccanico, inoltre grazie ad esperienze lavorative pregresse nell’ambito delle lavorazioni meccaniche industriali, è stato possibile svolgere un’analisi critica delle informazioni raccolte.

Si può quindi calcolare il costo orario dei vari macchinari (m) tramite la seguente relazione:

$$CM_m = \left(\frac{\text{Valore economico}_m}{\text{Durata}} + CM_{f,m} \right) / \text{Tempo di lavoro} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right], \text{ con:}$$

1. Durata: vita utile assunta uguale per tutti i macchinari e pari a 10 anni;
2. $CM_{f,m}$: Costi fissi totali per il macchinario m (pari al “TOTALE annuo” nelle tabelle 2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3)

Si riportano i risultati così ottenuti per tutti i macchinari nella seguente tabella:

COSTO ORARIO SINGOLI MACCHINARI	
lavorazione	[€/h]
TORNITURA	6,23 €
FRESATURA	6,94 €
FORATURA	3,93 €
RETTIFICA	6,34 €
BROCIATURA	4,50 €
LAVAGGIO	1,93 €
CONTROLLO	3,63 €

tabella 2.2.4: costo orario dei macchinari

3 - Dimensionamento analitico

3.1 - Dimensionamento del sistema per reparti

Il procedimento utilizzato per il dimensionamento analitico del sistema organizzato per reparti, eseguito per tutte e tre le annualità in esame, è indicato nelle pagine seguenti.

3.1.1 - Calcolo della produttività di ogni reparto

Per il calcolo della potenzialità produttiva di ogni reparto è necessario calcolare prima la potenzialità produttiva richiesta dai singoli prodotti nei singoli reparti:

$$Q_{ij} = \frac{Q_{ui} / \prod_{j=1}^n (k_1)_j}{\eta_j}$$

dove:

1. Q_{ui} è la potenzialità produttiva in uscita del prodotto i espressa in $\left[\frac{pz}{h} \right]$
2. η_j è il rendimento del reparto j , ossia: $\eta_j = \prod_{x=1}^4 k_x$

Si sommano quindi le potenzialità produttive Q_{ij} di ogni prodotto all'interno dello stesso reparto j ottenendo la produttività di ogni reparto:

$$Q_j = \sum_{i=1}^n Q_{ij}$$

3.1.2 - Calcolo del numero teorico di macchine

Si calcola innanzitutto il numero teorico di macchine richiesto da ogni lavorazione 'j' per ogni prodotto 'i':

$$n'_{ij} = Q_{ij} \times t_{ij}$$

dove:

t_{ij} : tempo necessario per eseguire la lavorazione 'j' sul prodotto 'i'.

Si può quindi calcolare il numero teorico di macchine per ogni reparto j come segue:

$$n'_j = \sum_{i=1}^x n'_{ij}$$

3.1.3 - Calcolo del numero reale di macchine e relativo coeff. di utilizzo per reparto

Il numero reale di macchine è pari all'intero superiore del numero teorico di macchine:

$$n_j = \lceil n'_j \rceil$$

Una volta calcolato il numero di macchinari teorico e reale di ogni reparto è possibile calcolare il coefficiente di utilizzo teorico e reale dei singoli macchinari, rispettivamente:

$$U_{t\%j} = \frac{n'_j}{n_j}$$
$$U_{r\%j} = U_{t\%j} \times k_{4j}$$

3.1.4 - Calcolo del fabbisogno di operatori

Anche nel caso del calcolo del fabbisogno di operatori si procede con la medesima logica utilizzata per i macchinari: Si inizia calcolando il numero teorico di operatori necessari per realizzare ogni lavorazione j, per ogni prodotto i:

$$O_{ij}' = Q_{ij} \times t_{op;ij}, \text{ con:}$$

dove $t_{op;ij}$ è tempo necessario all'operatore per svolgere l'operazione j sul prodotto i e si calcola come

$$t_{op;ij} = \frac{t_{set\ up}}{Q_{ij/lotto}} + t_{ij} \times (1 - k_{4j})$$

Quest'ultima è una formulazione ricavata dai laureandi, dove:

1. $t_{set\ up}$: tempo necessario ad eseguire le operazioni di setup della macchina, le quali vanno svolte ad ogni cambio di prodotto, ossia al termine di ogni lotto produttivo;
2. $Q_{ij/lotto}$: dimensione del lotto produttivo assumendo che per ogni turno lavorativo (8h, di conseguenza il numero di operatori calcolato sarà relativo ad un singolo turno) si produca un lotto di ogni prodotto. Questo comporta la presenza di lotti di dimensioni diverse in base al prodotto ed all'annualità considerata e il cui volume aumenta all'aumentare della potenzialità produttiva.
3. k_{4j} : coefficiente di utilizzo della macchina che considera l'inefficienza data dal fatto che la macchina è accesa, ma l'operatore è occupato a fare l'attrezzaggio della stessa (approssimazione in quanto tale coefficiente considera anche i tempi di produzione di prototipi, l'ozio, le perdite di ramp-up);

Si procede calcolando il numero teorico di operatori necessari alla realizzazione della lavorazione j considerato il contributo di tutti i prodotti i:

$$O_j' = \sum_{i=1}^n O_{ij}'$$

Infine, si ricava il numero reale di operatori necessari alla realizzazione della lavorazione j considerato il contributo di tutti i prodotti i:

$$O_j = \lceil O_j' \rceil.$$

I risultati ottenuti dal dimensionamento analitico del sistema organizzato per reparti, eseguito per tutte e tre le annualità in esame, sono riportati nelle seguenti tabelle:

Reparti	Produttività	Numero macchinari		Coeff. di utilizzo macchinari		Numero operatori	
	Qj (pz/h)	n'	n	Ut%	Ur%	O'	O
TOR	74,8	2,68	3	89%	40%	1,89	2
FRE	19,9	1,96	2	98%	41%	1,26	2
FOR	22,1	0,67	1	67%	31%	0,57	1
RET	41,4	2,43	3	81%	36%	1,54	2
BRO	10,6	0,35	1	35%	15%	0,25	1
LAV	25,4	0,41	1	41%	20%	0,42	1
CON	39,2	1,14	2	57%	26%	0,88	1

tabella 3.1.1: dimensionamento analitico del sistema organizzato per reparti per la prima annualità

Reparti	Produttività	Numero macchinari		Coeff. di utilizzo macchinari		Numero operatori	
	Qj (pz/h)	n'	n	Ut%	Ur%	O'	O
TOR	104,5	3,55	4	89%	40%	2,37	3
FRE	24,5	2,37	3	79%	33%	1,50	2
FOR	27,7	0,85	1	85%	39%	0,67	1
RET	57,1	3,17	4	79%	36%	1,95	2
BRO	12,8	0,43	1	43%	18%	0,29	1
LAV	33,4	0,54	1	54%	26%	0,49	1
CON	53,9	1,45	2	73%	33%	1,05	1

tabella 3.1.2: dimensionamento analitico del sistema organizzato per reparti per la seconda annualità

Reparti	Produttività	Numero macchinari		Coeff. di utilizzo macchinari		Numero operatori	
	Qj (pz/h)	n'	n	Ut%	Ur%	O'	O
TOR	144,3	4,80	5	96%	43%	3,05	3
FRE	32,5	3,15	4	79%	33%	1,95	2
FOR	36,7	1,12	2	56%	26%	0,82	1
RET	78,7	4,29	5	86%	39%	2,57	3
BRO	17,0	0,57	1	57%	24%	0,37	1
LAV	44,7	0,71	1	71%	34%	0,58	1
CON	74,1	1,95	2	98%	44%	1,32	2

tabella 3.1.3: dimensionamento analitico del sistema organizzato per reparti per la terza annualità

3.1.5 - Identificazione del reparto collo di bottiglia

Il reparto che rappresenta il collo di bottiglia lo si identifica attraverso la curva caratteristica e l'analisi dei coefficienti di utilizzo dei macchinari.

Reparti	Anno 1		Anno 2		Anno 3	
	Coeff. di utilizzo		Coeff. di utilizzo		Coeff. di utilizzo	
	U _{t%}	U _{r%}	U _{t%}	U _{r%}	U _{t%}	U _{r%}
TOR	89%	40%	89%	40%	96%	43%
FRE	98%	41%	79%	33%	79%	33%
FOR	67%	31%	85%	39%	56%	26%
RET	81%	36%	79%	36%	86%	39%
BRO	35%	15%	43%	18%	57%	24%
LAV	41%	20%	54%	26%	71%	34%
CON	57%	26%	73%	33%	98%	44%

tabella 3.1.4: coefficienti di utilizzo dei reparti per le tre annualità

Al primo anno il collo di bottiglia è rappresentato dal reparto di fresatura, con un coefficiente di utilizzo teorico del 98%. Aumentando la produttività dell'impianto si satureranno prima il reparto di fresatura, poi quello di tornitura ed infine quello di rettifica. Si aggiunge dunque un macchinario a ciascuno di questi reparti.

La situazione ottenuta corrisponde a quella del secondo anno. In questa annualità il collo di bottiglia è rappresentato dal reparto di tornitura, con un coefficiente di utilizzo teorico dell'89%. Aumentando la produttività dell'impianto si satureranno prima il reparto di foratura, poi quello di rettifica ed infine quello di fresatura. Si aggiunge dunque un macchinario a ciascuno di questi reparti.

La situazione ottenuta corrisponde a quella del terzo anno. In questa annualità il collo di bottiglia è rappresentato dal reparto di controllo, con un coefficiente di utilizzo teorico del 98%.

3.1.6 - Calcolo del costo al pezzo per ogni prodotto

Il costo del prodotto è ricavabile suddividendo i costi totali dell'impianto sui vari prodotti, pesati in base alla potenzialità produttiva del singolo prodotto ed alla durata del ciclo tecnologico dello stesso:

$$c = c_{mp} + \frac{t_{tot,i} \times Q_{u,i}}{\sum_{i=1}^n (t_{tot,i} \times Q_{u,i})} \times \frac{c_{tot\ impianto}}{Q_{u,i}}$$

dove:

1. c_{mp} : costo della materia prima;
2. $c_{tot\ impianto} = c_{op, tot} + c_{macc, tot}$: costo totale dell'impianto come somma del costo annuo per gli operatori e del costo annuo dei macchinari. Dove:

$$2.1. c_{op, tot} = \sum_{j=1}^x O_j \times n_{turni} \times c_{op}, \text{ con:}$$

$$n_{turni} = 2 : \text{turni/giorno; } c_{op} = 35000 \text{ €/anno : costo annuo per un operatore;}$$

$$2.2. c_{M, tot} = \sum_{j=1}^x CM_{f,j} \times n_j$$

COSTO PRODOTTO			
Prodotto	Anno 1	Anno 2	Anno 3
P01 – Albero di Trasmissione	36,47 €	32,90 €	31,27 €
P02 – Flangia di accoppiamento	22,26 €	20,21 €	19,27 €
P04 – Pignone conico	46,26 €	41,65 €	39,55 €
P05 – Boccola di guida	16,55 €	15,11 €	14,45 €
P07 – Spinotto di collegamento	9,53 €	8,83 €	8,52 €
P08 – Sede valvola	27,16 €	24,59 €	23,41 €

tabella 3.1.5: coefficienti di utilizzo dei reparti per le tre annualità

3.2 - Classificazione dei prodotti

Prima di procedere con il dimensionamento della cella bisogna capire quali prodotti vale la pena inserire al suo interno, a questo fine si esegue un'analisi di clustering (ovvero un'analisi di raggruppamento) con lo scopo di individuare famiglie di prodotti, ossia prodotti con cicli tecnologici con lavorazioni in comune, tali da giustificare la creazione di una cella lavorativa apposita per la loro produzione, aumentando l'utilizzo dei macchinari al suo interno.

Si è deciso di affrontare 4 principali metodi di clustering.

3.2.1 - Analisi DCA

Questo metodo prevede la creazione di famiglie di prodotti per i componenti e di gruppi per le macchine, ciò viene fatto per garantire che ogni componente possa essere prodotto unicamente in un solo gruppo di macchinari.

Come secondo passo si crea una matrice macchine-componenti e si segna con "X" tutte le celle ij in cui il componente 'i' richiede una lavorazione nel macchinario 'j', al contrario la cella viene lasciata in bianco se il prodotto 'i' non richiede alcuna lavorazione nel macchinario 'j'.

Dopo aver creato la matrice si procede a riordinare con l'ausilio dell'algoritmo di clustering, l'algoritmo è il seguente:

1. Si contano le "X" per colonna e si ordinano le colonne in ordine decrescente;
2. Si contano le "X" per riga e si ordinano le righe in ordine decrescente;
3. Iterare il procedimento finché la matrice non cambia più.

Si tratta di una metodologia iterativa convergente entro un certo numero limitato di iterazioni.

Viene riportata la matrice ordinata secondo metodo DCA.

	TOR	CON	LAV	RET	FOR	FRE	BRO
P04	X	X	X	X	X	X	X
P01	X	X	X	X	X	X	
P08	X	X	X	X	X		
P02	X	X	X		X	X	
P05	X	X	X	X			
P07	X	X		X			

tabella 3.2.1: matrice DCA

3.2.2 - Analisi ROC

Analisi dell'algoritmo ROC:

1. Si crea una matrice $n \times m$ con n = numero parti, m = numero macchine;

2. Per ogni riga 'i' si calcola il valore: $\sum_{j=1}^m b_{ij} * 2^{m-j}$, con:

b_{ij} variabile binaria, pari a 1 se il macchinario 'i' esegue una lavorazione sul prodotto 'j', pari a 0 in caso contrario;

3. Si ordinano le righe in ordine decrescente basandosi sui valori calcolati;

4. Per ogni colonna 'j' $\sum_{i=1}^n b_{ij} * 2^{n-i}$, con: b_{ij} : variabile binaria come in 2;

5. Si ordinano la colonne in ordine decrescente;

6. Si itera il processo fin quando la matrice non varia più.

Viene riportata la matrice finale ottenuta seguendo la metodologia ROC.

	TOR	CON	LAV	FOR	FRE	RET	BRO
P04	X	X	X	X	X	X	X
P01	X	X	X	X	X	X	
P02	X	X	X	X	X		
P08	X	X	X	X		X	
P05	X	X	X			X	
P07	X	X				X	

tabella 3.2.2: matrice ROC

L'analisi ROC lavora bene quando in un impianto ideale dove tutti i prodotti hanno lo stesso peso e tutte le macchine hanno lo stesso tempo di run.

In un impianto reale bisogna tuttavia considerare anche i tempi di setup, volume dei prodotti e affidabilità delle macchine, per tale motivo si esplora anche l'opzione dell'analisi MROC.

3.2.3 - Analisi MROC

L'algoritmo MROC si basa sull'analisi ROC, l'unica differenza risiede nel fatto che anzich  usare delle variabili binarie vengono calcolati dei fattori di peso:

$$w_{ij} = t_{ij} * Q_{ui}$$

L'algoritmo segue questi passaggi:

1. Si calcolano tutti i pesi w_{ij} ;
2. Si crea la matrice pesata con i valori w_{ij} (per le celle i,j della matrice in cui   richiesta una lavorazione) e 0 (per le celle i,j in cui non   richiesta lavorazione);
3. Si calcola il valore per ogni colonna seguendo la formula: $\sum_{j=1}^m w_{ij} \cdot 2^{m-j}$
con m = numero macchine e n = numero parti;
4. Si ordinano le colonne in ordine decrescente;
5. Si calcola il valore per ogni riga seguendo la formula: $\sum_{i=1}^n w_{ij} \cdot 2^{n-i}$;
6. Si ordinano le righe in ordine crescente;
7. Si itera fino a raggiungere convergenza;

Viene riportata la matrice finale ottenuta seguendo la metodologia MROC. Evidenziate in verde si hanno le ipotetiche celle.

	FRE	RET	TOR	CON	BRO	FOR	LAV
P04	90000	67500	45000	45000	22500	16875	11250
P05	0	28350	33075	9450	0	0	7560
P01	6300	12375	17325	4500	0	2250	3375
P02	9000	0	13500	6750	0	19350	4500
P08	0	12825	17955	5700	0	2850	2850
P07	0	22500	30000	7500	0	0	0

tabella 3.2.3: matrice MROC

Proprio per la maggiore precisione e accuratezza del metodo MROC si   scelto di prendere in considerazione quest'ultimo per una prima idea di clustering.

Nonostante ci , il metodo MROC non ha comunque soddisfatto le nostre esigenze in quanto i blocchi individuati non rispecchiano il ciclo tecnologico: la soluzione proposta dall'algoritmo non prevede unidirezionalit , non risultando quindi in una cella razionale.

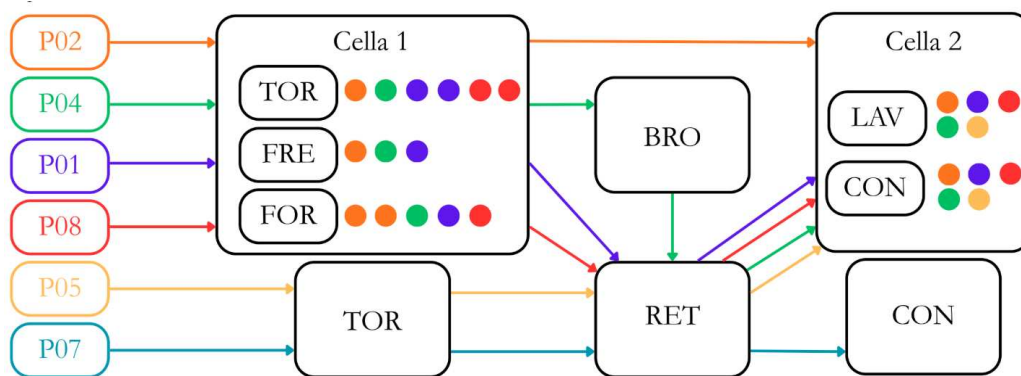
Per tale motivo abbiamo scelto di affidarci al metodo MROC solo preliminarmente, riscontrando analogie anche nella configurazione d'impianto successivamente scelta.

3.2.4 - Analisi del ciclo tecnologico

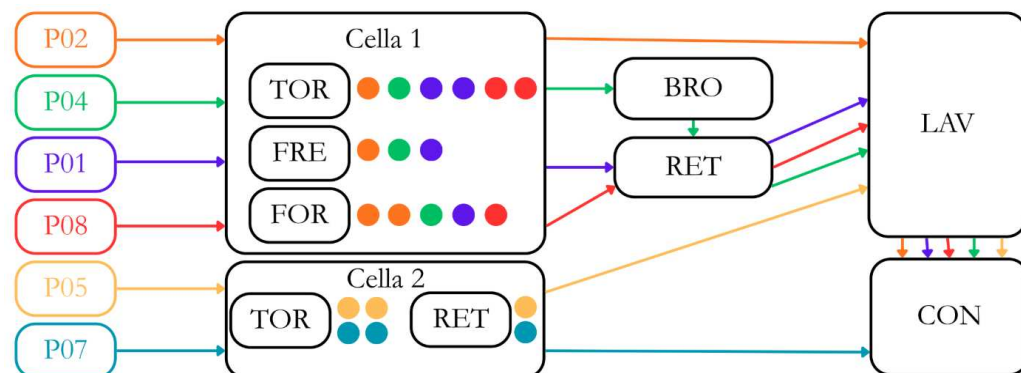
Si procede quindi analizzando il ciclo tecnologico dei sei prodotti.

Per la creazione di una cella di lavorazione si cercano di includere le lavorazioni comuni a più prodotti possibile, si cercano di escludere le lavorazioni veloci (tempo di lavorazione molto minore rispetto agli altri) e le lavorazioni che impiegano macchinari costosi (con valore economico molto maggiore rispetto agli altri). Tali esclusioni vengono effettuate perché l'inclusione di macchinari troppo veloci o troppo costosi abbatterebbe il coefficiente di utilizzo complessivo della cella (ritardando il raggiungimento della soglia del 60% richiesta e quindi la sua costituzione). Le lavorazioni non devono essere necessariamente consecutive e/o compiute nello stesso ordine per tutti i prodotti all'interno della cella.

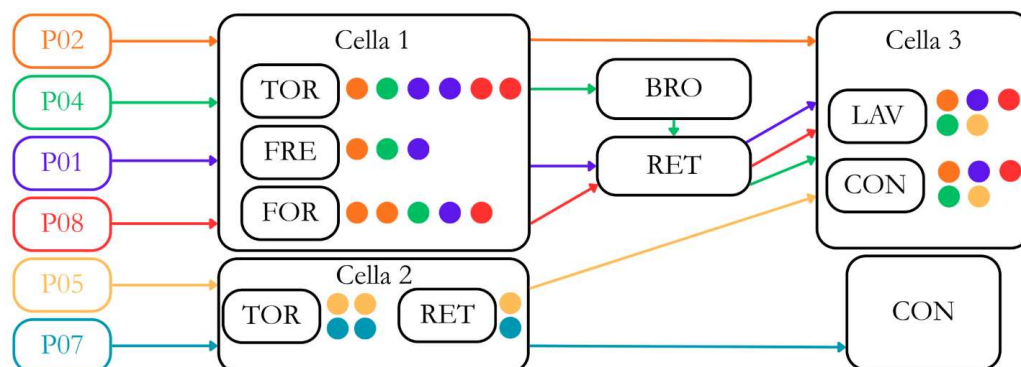
Tramite questa analisi si ottengono 5 opzioni preliminari di clustering dei prodotti di cui si riportano le conseguenti configurazioni d'impianto negli schemi seguenti.



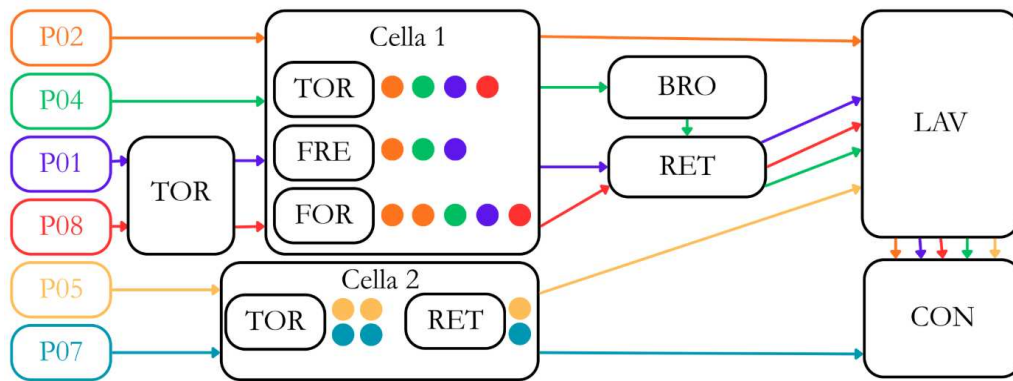
schema 3.2.4: configurazione 1 d'impianto



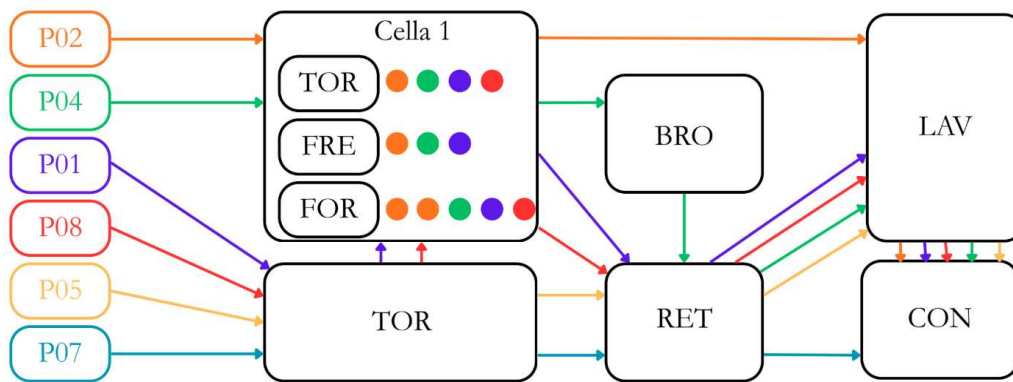
schema 3.2.5: configurazione 2 d'impianto (definitiva)



schema 3.2.6: configurazione 3 d'impianto



schema 3.2.7: configurazione 4 d'impianto



schema 3.2.8: configurazione 5 d'impianto

Si esegue il dimensionamento delle celle produttive per ogni configurazione preliminare e si decreta la configurazione più efficace sulla base del coefficiente di utilizzo tecnico totale d'impianto (maggiore). Nella sezione seguente si riportano i risultati ottenuti ed il procedimento utilizzato per tale analisi della sola configurazione ritenuta più efficace tramite il criterio descritto, ossia quella rappresentata dallo schema 3.2.5.

3.3 - Dimensionamento della cella produttiva

Il dimensionamento della cella produttiva è stato effettuato per ciascuna delle tre annualità del piano di vendita. La procedura utilizzata per l'ottenimento di tali risultati è sviluppata nei punti seguenti.

3.3.1 - Calcolo della produttività della cella

Il primo step consiste nel calcolare la potenzialità produttiva di saturazione di tutti i macchinari costituenti le celle:

$$Q_{SAT;j} = \frac{60}{t_{med;j}}$$

I risultati ottenuti sono riportati nella tabella seguente:

CELLA 1			CELLA 2			REPARTI					
Q _{sat_TOR_1}	17,14	pz/h	Q _{sat_TOR1_2}	37,50	pz/h	Q _{sat_BRO}	30	pz/h	Q _{sat_LAV}	56,60	pz/h
Q _{sat_FRE_1}	14,06	pz/h	Q _{sat_TOR2_2}	52,17	pz/h	Q _{sat_RET}	11,25	pz/h	Q _{sat_CON}	32,73	pz/h
Q _{sat_FOR_1}	38,46	pz/h	Q _{sat_RET_1}	26,67	pz/h						
t _{med_TOR_1}	3,5	min	t _{med_TOR1_2}	1,6	min	t _{med_BRO}	2	min	t _{med_LAV}	1,06	min
t _{med_FRE_1}	4,27	min	t _{med_TOR2_2}	1,15	min	t _{med_RET}	5,33	min	t _{med_CON}	1,83	min
t _{med_FOR_1}	1,56	min	t _{med_RET_2}	2,25	min						

tabella 3.3.1: potenzialità produttive di saturazione per i macchinari nella configurazione scelta

Con t_{med} ci si riferisce al tempo medio della lavorazione j , calcolato come la media dei tempi necessari ad effettuare la lavorazione j di tutti i prodotti che utilizzano la cella.

Si calcola poi la Q_j di ogni lavorazione (per entrambe le celle) sommando le Q_{ij} dei prodotti che subiscono la lavorazione j all'interno della cella. Il calcolo è effettuato come segue:

$$Q_j = \sum_{i=1}^n Q_{ij}$$

3.3.2 - Calcolo del numero di macchine nella cella

In numero di macchine teorico si ottiene come il rapporto fra le potenzialità produttive effettive e quelle di saturazione:

$$n'_j = \frac{Q_j}{Q_{SAT,j}}$$

Si procede ottenendo il numero di macchine effettivo arrotondando n'_j all'intero superiore:

$$n_j = \lceil n'_j \rceil$$

3.3.3 - Calcolo e verifica del coefficiente di utilizzo

Il coefficiente di utilizzo tecnico dei singoli macchinari ed il coefficiente di utilizzo di ogni cella sono calcolati, rispettivamente, come segue:

$$U_{t\%;j} = \frac{n'_j}{n_j}$$

$$U_{t\%; cella n} = \frac{\sum_{j=1}^x U_{t\%;j} \times n_j}{\sum_{j=1}^x n_j}$$

Volendo tenere in considerazione anche il valore economico dei macchinari si calcola anche il coefficiente di utilizzo economico di ogni cella come segue:

$$U_{e\%; cella n} = \frac{\sum_{j=1}^x U_{t\%;j} \times n_j \times \text{valore economico}_j}{\sum_{j=1}^x n_j \times \text{valore economico}_j}$$

Da progetto, la cella diviene conveniente quando: $U_{e\%; cella} \geq 60\%$

Di seguito vengono riportati i coefficienti di utilizzo economico per ogni cella per ogni annualità considerata.

	CELLA 1	CELLA 2
Anno	U _e %	U _e %
1	73%	72%
2	90%	74%
3	76%	88%

tabella 3.3.2: coefficienti di utilizzo economico per le tre annualità considerate

Dai risultati ottenuti si osserva che per le celle prese in considerazione tale soglia viene ampiamente superata per tutte e tre le annualità; in particolare notiamo che la CELLA 1 viene sfruttata al meglio nella seconda annualità, mentre la CELLA 2 nella terza.

Di seguito se ne riportano i risultati tabulati.

ANNO 1													
	CELLA 1			CELLA 2			REPARTI						
Potenz. produttive	Q _{TOR_1}	27,25	pz/h	Q _{TOR1_2}	24,63	pz/h	Q _{BRO}	10,64	pz/h	Q _{LAV}	25,43	pz/h	
	Q _{FRE_1}	19,92	pz/h	Q _{TOR2_2}	22,91	pz/h	Q _{RET}	16,60	pz/h	Q _{CON}	39,24	pz/h	
	Q _{FOR_1}	24,91	pz/h	Q _{RET_1}	24,82	pz/h							
Numero macchine		n'	n		n'	n		n'	n		n'	n	
	TOR_1	1,59	2	TOR1_2	0,66	1	BRO	0,35	1	LAV	0,45	1	
	FRE_1	1,42	2	TOR2_2	0,44	1	RET	1,48	2	CON	1,20	2	
	FOR_1	0,65	1	RET_2	0,93	1							
Rendimenti	U _{TOR_1}	79%		U _{TOR1_2}	66%		U _{BRO}	35%		U _{LAV}	45%		
	U _{FRE_1}	71%		U _{TOR2_2}	44%		U _{RET}	74%		U _{CON}	60%		
	U _{FOR_1}	65%		U _{RET_2}	93%								
	U _{t%1}	73%		U _{t%2}	68%		U _{t% rep}	58%					
	U _{e%1}	73%		U _{e%2}	72%		U _{e% rep}	63%					
	U _{% tecnico TOTALE impianto}					65,42%							
	U _{% economico TOTALE impianto}					68,37%							

tabella 3.3.3: dimensionamento della cella produttiva (manuale) per il primo anno

ANNO 2												
	CELLA 1			CELLA 2			REPARTI					
Potenz. produttive	Q _{TOR_1}	33,38	pz/h	Q _{TOR1_2}	36,87	pz/h	Q _{BRO}	12,77	pz/h	Q _{LAV}	33,35	pz/h
	Q _{FRE_1}	24,55	pz/h	Q _{TOR2_2}	34,29	pz/h	Q _{RET}	19,95	pz/h	Q _{CON}	53,92	pz/h
	Q _{FOR_1}	31,07	pz/h	Q _{RET_1}	37,16	pz/h						
Numero macchine		n'	n		n'	n		n'	n		n'	n
	TOR_1	1,95	2	TOR1_2	0,98	1	BRO	0,43	1	LAV	0,59	1
	FRE_1	1,75	2	TOR2_2	0,66	1	RET	1,77	2	CON	1,65	2
	FOR_1	0,81	1	RET_2	1,39	2						
Rendimenti	U _{TOR_1}	97%		U _{TOR1_2}	98%		U _{BRO}	43%		U _{LAV}	59%	
	U _{FRE_1}	87%		U _{TOR2_2}	66%		U _{RET}	89%		U _{CON}	82%	
	U _{FOR_1}	81%		U _{RET_2}	70%							
	U _{t%1}	90%		U _{t%2}	76%		U _{t% rep}	74%				
	U _{e%1}	90%		U _{e%2}	74%		U _{e% rep}	79%				
	U _{% tecnico TOTALE impianto}					79,80%						
	U _{% economico TOTALE impianto}					80,93%						

tabella 3.3.4: dimensionamento della cella produttiva (manuale) anno per il secondo anno

ANNO 3												
	CELLA 1			CELLA 2			REPARTI					
Potenz. produttive	Q _{TOR_1}	43,62	pz/h	Q _{TOR1_2}	52,14	pz/h	Q _{BRO}	17,03	pz/h	Q _{LAV}	44,68	pz/h
	Q _{FRE_1}	32,51	pz/h	Q _{TOR2_2}	48,49	pz/h	Q _{RET}	26,19	pz/h	Q _{CON}	74,06	pz/h
	Q _{FOR_1}	40,93	pz/h	Q _{RET_1}	52,54	pz/h						
Numero macchine		n'	n		n'	n		n'	n		n'	n
	TOR_1	2,54	3	TOR1_2	1,39	2	BRO	0,57	1	LAV	0,79	1
	FRE_1	2,31	3	TOR2_2	0,93	1	RET	2,33	3	CON	2,26	3
	FOR_1	1,06	2	RET_2	1,97	2						
Rendimenti	U _{TOR_1}	85%		U _{TOR1_2}	70%		U _{BRO}	57%		U _{LAV}	79%	
	U _{FRE_1}	77%		U _{TOR2_2}	93%		U _{RET}	78%		U _{CON}	75%	
	U _{FOR_1}	53%		U _{RET_2}	99%							
	U _{t%1}	74%		U _{t%2}	86%		U _{t% rep}	74%				
	U _{e%1}	76%		U _{e%2}	88%		U _{e% rep}	75%				
	U _{% tecnico TOTALE impianto}					76,95%						
	U _{% economico TOTALE impianto}					78,89%						

tabella 3.3.5: dimensionamento della cella produttiva (manuale) per il terzo anno

3.3.4 - Eventuali modifiche nella parte di produzione che rimane per reparti

I reparti di brocciatura, lavaggio e controllo rimangono invariati, per le ragioni esposte al paragrafo 3.2.

La rettifica presenta un layout misto: si trova sia nella CELLA 2 che in reparto, anche se con un numero di macchinari ridotto.

Le formule ed il procedimento utilizzati per calcolare potenzialità produttiva e numero di macchinari della porzione organizzata per reparti sono le stesse mostrate al paragrafo 3.1.

Tramite la stessa logica del paragrafo 3.3.3 è possibile calcolare il coefficiente di utilizzo tecnico ed il coefficiente di utilizzo economico per i singoli reparti e per l'intero impianto.

3.3.5 - Calcolo del costo di ogni prodotto considerando una cella manuale

Per il calcolo del costo al pezzo dei prodotti in questa configurazione è stato utilizzato il procedimento e le formule utilizzati al paragrafo 3.1.6 con la seguente modifica per il calcolo del numero di operatori:

$$O'_{cella} = Q_{cella} \times t_{med; cella} \times (1 - k_{4 med; cella}) + \frac{t_{set up}}{Q_{ij/lotto}}$$

dove:

1. Q_{cella} : potenzialità produttiva della cella, ottenuta come la somma delle potenzialità produttive dei macchinari costituenti la cella;
2. $t_{med; cella}$: tempo medio di una lavorazione all'interno della cella, ottenuto come la media dei tempi necessari allo svolgimento delle diverse lavorazioni presenti nella cella;
3. $k_{4 med; cella}$: coefficiente di utilizzo medio di una lavorazione all'interno della cella, ottenuto come la media dei coefficienti di utilizzo delle diverse lavorazioni presenti nella cella, che considerano l'inefficienza data dal fatto che la macchina è accesa ma l'operatore è occupato a fare l'attrezzaggio della stessa;

Il risultato ottenuto è un numero ideale. Per ricavare il numero reale di operatori necessari alla cella si arrotonda all'intero successivo:

$$O_{cella} = \lceil O'_{cella} \rceil$$

Il numero di operatori totale è dato dalla seguente somma:

$$O_{tot} = O_{celle} + O_{reparti}$$

I risultati ottenuti da questo procedimento sono riportati nella tabella seguente:

COSTO PRODOTTO			
Prodotto	Anno 1	Anno 2	Anno 3
P01 – Albero di Trasmissione	34,76 €	34,16 €	30,05 €
P02 – Flangia di accoppiamento	21,28 €	20,94 €	18,57 €
P04 – Pignone conico	44,06 €	43,28 €	37,96 €
P05 – Boccola di guida	15,86 €	15,62 €	13,95 €
P07 – Spinotto di collegamento	9,20 €	9,08 €	8,28 €
P08 – Sede valvola	25,93 €	25,50 €	22,53 €

tabella 3.3.6: costo al pezzo nel caso della configurazione in celle produttive (manuali)

3.3.6 - Calcolo del costo di ogni prodotto considerando una cella servita da robot

Nel caso le celle siano servite da robot antropomorfi si procede con gli stessi step effettuati al paragrafo 3.3.5, ma modificando le Q_{ij} utilizzate. Infatti, le Q_{ij} dei prodotti lavorati all'interno di una cella variano anche in funzione di k_3 e k_4 . Nel caso di robot antropomorfi:

1. $K_3 = 100\%$: coefficiente di utilizzo che considera l'efficienza degli operatori. Nel caso di robot è pari al 100%;
2. $K_4 = 60\% = \frac{\text{production time}}{\text{uptime}}$: assunzione data dal fatto che un robot è mediamente più veloce di un operatore umano a svolgere le mansioni richieste, si assume quindi un aumento rispetto alla condizione di utilizzo di una cella manuale.

Per lo stesso principio sopraesposto è stato ridotto del 25%, rispetto alla condizione di utilizzo di una cella manuale, il tempo di di attrezzaggio per effettuare un cambio di formato di produzione: $t_{set up} = 15 \text{ min.}$

Si ottengono così delle potenzialità produttive delle varie lavorazioni intermedie nettamente più basse, a parità di Q_{ui} , in quanto i robot permettono una maggiore efficienza e velocità di produzione e meno tempi morti.

Si prosegue con il calcolo del numero di macchinari, del coefficiente di utilizzo e del numero di robot necessari alla cella, attraverso un procedimento analogo a quello già utilizzato per le celle manuali al paragrafo 3.3.5.

I risultati ottenuti sono riportati nelle seguenti tabelle:

ANNO 1												
	CELLA 1			CELLA 2			REPARTI					
Potenz. produttive	Q _{TOR_1}	17,37	pz/h	Q _{TOR1_2}	15,70	pz/h	Q _{BRO}	10,64	pz/h	Q _{LAV}	25,43	pz/h
	Q _{FRE_1}	11,85	pz/h	Q _{TOR2_2}	14,60	pz/h	Q _{RET}	16,60	pz/h	Q _{CON}	39,24	pz/h
	Q _{FOR_1}	16,23	pz/h	Q _{RET_1}	15,82	pz/h						
Numero macchine		n'	n		n'	n		n'	n		n'	n
	TOR_1	1,01	2	TOR1_2	0,42	1	BRO	0,35	1	LAV	0,45	1
	FRE_1	0,84	1	TOR2_2	0,28	1	RET	1,48	2	CON	1,20	2
	FOR_1	0,42	1	RET_2	0,59	1						
Rendimenti	U _{TOR_1}	51%		U _{TOR1_2}	42%		U _{BRO}	35%		U _{LAV}	45%	
	U _{FRE_1}	84%		U _{TOR2_2}	28%		U _{RET}	74%		U _{CON}	60%	
	U _{FOR_1}	42%		U _{RET_2}	59%							
	U _{t%1}	57%		U _{t%2}	43%		U _{t% rep}	58%				
	U _{e%1}	60%		U _{e%2}	46%		U _{e% rep}	63%				
	U _{% tecnico TOTALE impianto}					54,22%						
	U _{% economico TOTALE impianto}					57,74%						

tabella 3.3.7: dimensionamento della cella produttiva (servita da robot) per il primo anno

ANNO 2													
	CELLA 1			CELLA 2			REPARTI						
Potenz. produttive	Q _{TOR_1}	21,28	pz/h	Q _{TOR1_2}	23,51	pz/h	Q _{BRO}	12,77	pz/h	Q _{LAV}	33,35	pz/h	
	Q _{FRE_1}	14,61	pz/h	Q _{TOR2_2}	21,86	pz/h	Q _{RET}	19,95	pz/h	Q _{CON}	53,92	pz/h	
	Q _{FOR_1}	20,24	pz/h	Q _{RET_1}	23,69	pz/h							
Numero macchine		n'	n		n'	n		n'			n'	n	
	TOR_1	1,24	2	TOR1_2	0,63	1	BRO	43%		LAV	0,59	1	
	FRE_1	1,04	2	TOR2_2	0,42	1	RET			CON	1,65	2	
	FOR_1	0,53	1	RET_2	0,89	1							
Rendimenti	U _{TOR_1}	62%		U _{TOR1_2}	63%		U _{BRO}	43%		U _{LAV}	59%		
	U _{FRE_1}	52%		U _{TOR2_2}	42%		U _{RET}	89%		U _{CON}	82%		
	U _{FOR_1}	53%		U _{RET_2}	89%								
	U _{t%1}	56%		U _{t%2}	64%		U _{t% rep}	74%					
	U _{e%1}	56%		U _{e%2}	69%		U _{e% rep}	79%					
	U _{% tecnico TOTALE impianto}					65,54%							
	U _{% economico TOTALE impianto}					68,86%							

tabella 3.3.8: dimensionamento della cella produttiva (servita da robot) per il secondo anno

ANNO 3												
	CELLA 1			CELLA 2			REPARTI					
Potenz. produttive	Q _{TOR_1}	27,81	pz/h	Q _{TOR1_2}	33,24	pz/h	Q _{BRO}	17,03	pz/h	Q _{LAV}	44,68	pz/h
	Q _{FRE_1}	19,34	pz/h	Q _{TOR2_2}	30,91	pz/h	Q _{RET}	26,19	pz/h	Q _{CON}	74,06	pz/h
	Q _{FOR_1}	26,67	pz/h	Q _{RET_1}	33,49	pz/h						
Numero macchine		n'	n		n'	n		n'	n		n'	n
	TOR_1	1,62	2	TOR1_2	0,89	1	BRO	0,57	1	LAV	0,79	1
	FRE_1	1,38	2	TOR2_2	0,59	1	RET	2,33	3	CON	2,26	3
	FOR_1	0,69	1	RET_2	1,26	2						
Rendimenti	U _{TOR_1}	81%		U _{TOR1_2}	89%		U _{BRO}	57%		U _{LAV}	79%	
	U _{FRE_1}	69%		U _{TOR2_2}	59%		U _{RET}	78%		U _{CON}	75%	
	U _{FOR_1}	69%		U _{RET_2}	63%							
	U _{t%1}	74%		U _{t%2}	68%		U _{t% rep}	74%				
	U _{e%1}	74%		U _{e%2}	67%		U _{e% rep}	75%				
	U% tecnico TOTALE impianto					72,79%						
	U% economico TOTALE impianto					72,52%						

tabella 3.3.9: dimensionamento della cella produttiva (servita da robot) per il terzo anno

L'utilizzo dei robot permette un abbassamento notevole delle Q_{ij} , il che comporta, specialmente al primo e secondo anno, una notevole riduzione del coefficiente di utilizzo delle celle.

Dalla terza annualità il calo delle Q_{ij} si traduce soprattutto in un notevole taglio del numero di macchinari necessari per il funzionamento dell'impianto e di conseguenza in una netta riduzione dei costi dello stesso. Quest'ultima si riflette in un abbassamento generale dei costi unitari dei prodotti. Questo è evidente nella tabella seguente:

COSTO PRODOTTO			
Prodotto	Anno 1	Anno 2	Anno 3
P01 – Albero di Trasmissione	34,25 €	33,27 €	26,71 €
P02 – Flangia di accoppiamento	20,99 €	20,42 €	16,65 €
P04 – Pignone conico	43,40 €	42,13 €	33,65 €
P05 – Boccola di guida	15,65 €	15,25 €	12,60 €
P07 – Spinotto di collegamento	9,10 €	8,91 €	7,63 €
P08 – Sede valvola	25,56 €	24,85 €	20,12 €

tabella 3.3.10: costo al pezzo nel caso della configurazione in celle produttive (servite da robot)

4 - Dimensionamento con modelli simulativi

4.1 - Preparazione dei modelli simulativi

4.1.1 - Introduzione ai modelli simulativi

Per verificare la bontà dei risultati ottenuti dal dimensionamento analitico, si è utilizzato una versione per studenti del software “Plant Simulation, Version 2404” che prevede l'utilizzo massimo di 80 elementi che possono essere inseriti all'interno del piano di lavoro.

Poiché i modelli simulativi devono essere il più possibile aderenti al dimensionamento analitico, si sono utilizzate le stesse ipotesi di partenza, nello specifico in ogni modello sono stati inclusi:

- Entità: i prodotti, ciascuno con il proprio ciclo tecnologico e il mix di produzione derivato dal piano di vendita.
- Risorse: le macchine (con capacità pari al numero di unità dimensionate durante il dimensionamento analitico).
- Tempi di lavorazione.
- Setup: valutare come modellare il cambio prodotto con il tempo di setup ogni volta che cambia il prodotto su una macchina.
- Buffer: inserire code tra le stazioni (illimitate nel caso base; poi affinare successivamente con buffer con un numero massimo di pezzi finiti).
- Logica di dispatching: secondo la logica FIFO.

In modo che il confronto tra dimensionamento analitico e verifica con simulazione potesse avvenire in maniera semplice, sono stati seguiti dei precisi scenari, in particolare i seguenti:

- S0 – Job Shop Anno 1 (baseline): sistema attuale, tutti i prodotti gestiti per reparti, volumi Anno 1.
- S1 – Job Shop Anno 2: come S0 con volumi Anno 2 (verifica saturazione, nuovi colli di bottiglia).
- S2 – Job Shop Anno 3: come S0 con volumi Anno 3.
- S3 – Cella Anno 1 (se già conveniente) o Anno in cui la cella diviene conveniente: prodotti candidati in cella, il resto dei prodotti rimane in job shop.
- S4 – Cella Anno 3 con robot antropomorfo: come S3 ma la movimentazione interna alla cella è gestita dal robot.
- S5 – Cella con buffer finiti (es. max 3 pezzi tra stazioni) → analisi dell'effetto sul throughput e sul WIP.

4.1.2 - Struttura dei modelli simulativi per reparti

Per realizzare tali modelli sul software sono stati inseriti sul frame di lavoro una Source che permette di generare i prodotti che verranno poi lavorati dal sistema; questo è composto da Buffer che permettono di raccogliere le code dei prodotti che sono in attesa di essere lavorati all'interno del reparto, e quindi, dalle stazioni di lavorazione; alla fine dello Job Shop è presente un Drain, ovvero un magazzino che raccoglie tutti i prodotti che hanno completato il loro ciclo tecnologico. Ad ogni prodotto sono stati assegnati degli attributi logici per tenere traccia dell'operazione a cui il prodotto è sottoposto (op), della tipologia di prodotto (Prodotto), e del tempo a cui il prodotto è entrato all'interno del ciclo tecnologico (TempoIngresso).

Name	Value	Type	C.	L.
op	0	integer	*	-
Prodotto		string	*	-
TempoIngresso	0.0000	time	*	-

immagine 4.1.1: definizione variabili relative a P01

Il ciclo tecnologico di ogni prodotto è stato riportato all'interno di un'opportuna DataTable nominata come "Cicli_Produttivi" dove per ogni prodotto è stata creata una SubTable contenente: le lavorazioni, il reparto dove queste lavorazioni avvengono e infine il tempo di lavorazione.

	string 1	table 2
1	P01	x
2	P02	x
3	P04	x
4	P05	x
5	P07	x
6	P08	x

	string 1	string 2	time 3
string	Step Description	Shop	ProcessTime
1	Tornitura esterna grezza	TOR	4:30.0000
2	Tornitura di finitura	TOR	3:12.0000
3	Fresatura piana spallamenti	FRE	2:48.0000
4	Foratura assiale centri	FORA	1:00.0000
5	Rettifica cilindrica esterna	RET	5:30.0000
6	Lavaggio e asciugatura	LAV	1:30.0000
7	Controllo dimensionale	CON	2:00.0000

tabella 4.1.2: datatable Cicli_Produttivi e relativa subtable contenente le lavorazioni di P01

Attraverso un'altra DataTable con nome "Piano_Giornaliero" sono state definite le potenzialità giornaliere che devono essere rispettate per ottenere il corretto mix produttivo annuale.

	object 1	integer 2
1	.UserObjects.P01	10
2	.UserObjects.P02	21
3	.UserObjects.P04	52
4	.UserObjects.P05	44
5	.UserObjects.P07	69
6	.UserObjects.P08	13

tabella 4.1.3: datatable Piano_Giornaliero

Per mantenere l'ipotesi analitica secondo cui in una giornata da 16 ore lavorative vengono lavorati tutti i prodotti senza però generare grandi blocchi omogenei, altrimenti il concetto di produzione per reparti non verrebbe rispettato, è stata implementata una logica di rilascio mista basata sul piano giornaliero, per ottenere ciò sono stati creati sul frame principale degli attributi che permettono al modello di ricordare: il round giornaliero corrente; quale prodotto generare; quando è iniziata la giornata lavorativa; il numero della giornata corrente; ed il numero progressivo di prodotti generati.



immagine 4.1.4: attributi presenti sul frame principale

E' stato generato un Method, collegato all'EventController, chiamato "Init_Model" rendendo possibile l'inizializzazione degli attributi precedentemente elencati, dei coefficienti di penalizzazione, della tabella contenente tutti i prodotti che arrivano al drain ed i tempi di attraversamento medi dei pezzi all'interno del sistema.

I coefficienti di penalizzazione sono stati aggiunti attraverso la datatable "K_Penalizzazione".

	string 1	real 2	real 3	real 4	real 5
1	TOR	0.930	0.967	0.850	0.450
2	FRE	0.925	0.920	0.850	0.420
3	FORA	0.971	0.865	0.850	0.460
4	RET	0.956	0.830	0.850	0.450
5	BRO	0.974	0.980	0.850	0.420
6	LAV	1.000	0.900	0.850	0.480
7	CON	0.922	0.930	0.850	0.450

tabella 4.1.5: datatable K_Penalizzazione simulazione S0

Con il Method "Station_Entrance", collegato alle stazioni di lavorazione, il software legge il tempo di lavorazione base per ogni operazione, il quale viene poi corretto con i K in modo da ottenere il tempo effettivo di lavorazione, come segue:

$$tempo\ effettivo = \frac{\frac{tempo\ base}{\prod_{j=1}^n K1}}{\prod_{i=1}^4 K} + tempo\ di\ setup$$

Per rimanere fedeli alla trattazione analitica si è usato un tempo di setup medio per lotto di 20 minuti, che per semplicità viene considerato nella formula sopra indicato solo quando il primo pezzo di ogni prodotto attraversa le stazioni, infatti per capire se l'operazione di setup è stata fatta oppure no nell'arco della giornata lavorativa sono stati creati degli attributi utilizzati da Station_Entrance.

Name	Value	Type	C..	L..
SetupDay	45	integer	*	—
SetupP01	true	boolean	*	—
SetupP02	true	boolean	*	—
SetupP04	true	boolean	*	—
SetupP05	true	boolean	*	—
SetupP07	true	boolean	*	—
SetupP08	true	boolean	*	—

immagine 4.1.6: variabili presenti all'interno di Station_Entrance per garantire il piano giornaliero

Oltre a Station_Entrance è presente anche il method “Station_Exit” che permette di leggere il ciclo tecnologico, di controllare qual è l'operazione successiva e di far avanzare il prodotto al reparto successivo o spostarlo nel drain nel caso che il ciclo tecnologico sia terminato.

Per monitorare i volumi dei vari prodotti è stata creata la datatable “P_exit” che viene compilata da un method situato all'interno del drain, nello specifico nella sezione controls.

Sono infine stati raccolti i coefficienti di prestazione (KPI) più importanti che sono stati riassunti nella seguente tabella:

#	KPI	Definizione	Unità
K01	Throughput	Pezzi completati per unità di tempo	[pz/h]
K02	Cycle Time medio	Tempo medio di attraversamento (ingresso e uscita dal sistema)	[h/pz]
K03	Utilizzo macchine	Frazione del tempo in cui la macchina è in lavorazione	[%]
K04	Ozio macchine	Frazione del tempo in cui la macchina è ferma in attesa di pezzi	[%]
K05	Lunghezza code	Numero medio di pezzi in attesa davanti a ciascuna stazione	[pz]
K06	Collo di bottiglia	Risorsa con utilizzo massimo; confrontare con previsione analitica	[-]

tabella 4.1.7: definizione coefficienti di prestazione

In cui:

- K01 si ottiene dalla P_exit dividendo i volumi annuali per le ore lavorative annuali;
- K02 si ricava facendo la media del tempo impiegato dai pezzi, di un determinato prodotto, per attraversare il sistema, tutto ciò avviene nel method presente all'interno del drain che va a compilare la datatable “CycleTime_Prodotti”.

	string 1	integer 2	time 3	time 4	real 5
1	P01	2170	864:06:56:48.5328	9:33:32.2620	9.5590
2	P02	4562	650:16:11:56.2219	3:25:23.1732	3.4231
3	P04	11255	4497:06:22:31.8941	9:35:23.6563	9.5899
4	P05	9539	3020:10:42:49.3108	7:35:57.8540	7.5994
5	P07	14940	4556:05:58:09.9810	7:19:09.3902	7.3193
6	P08	2821	1079:07:04:36.9388	9:10:56.0358	9.1822

tabella 4.1.8: datatable CycleTime_Prodotti simulazione S0

K03, K04 e K06 si ottengono sfruttando lo strumento del software chiamato “Bottleneck Analyzer” che permette di monitorare i coefficienti di utilizzo dei reparti e di conseguenza anche i coefficienti di inutilizzo; infine sulla base del K03 maggiore si è definito il collo di bottiglia.

Si riporta di seguito il “frame tipo” utilizzato nella simulazione dei reparti:

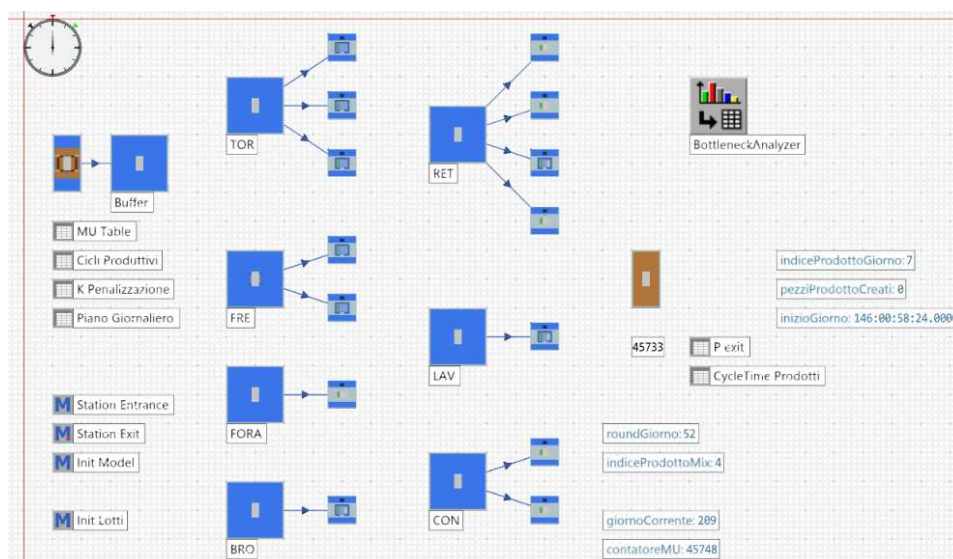


immagine 4.1.9: frame di lavoro simulazione S0

4.1.3 - Struttura dei modelli simulativi per celle

La struttura per reparti è stata ottenuta posizionando nel frame lavoro un Source, il quale grazie all’ausilio del Method ‘setExit’ comanda l’uscita dei vari prodotti nelle rispettive celle.

Le celle sono state ottenute grazie ad un flow shop, ovvero grazie un layout di linea, infatti rispecchiano il ciclo tecnologico permettendo il fluire dei prodotti attraverso le varie Station fino a raggiungere il buffer di accumulo nel quale, grazie ad un utilizzo di un altro Method ‘instrada’, si è in grado di distribuire i vari prodotti nei rispettivi reparti i quali hanno struttura analoga alla precedente simulazione dedicata, ovvero buffer connesso alla station di lavoro nella quale è settato il controllo di uscita ‘instrada’.

Infine i vari prodotti, una volta completato il rispettivo ciclo produttivo raggiungono il Drain, strumento apposito atto a raccogliere i pezzi completati.

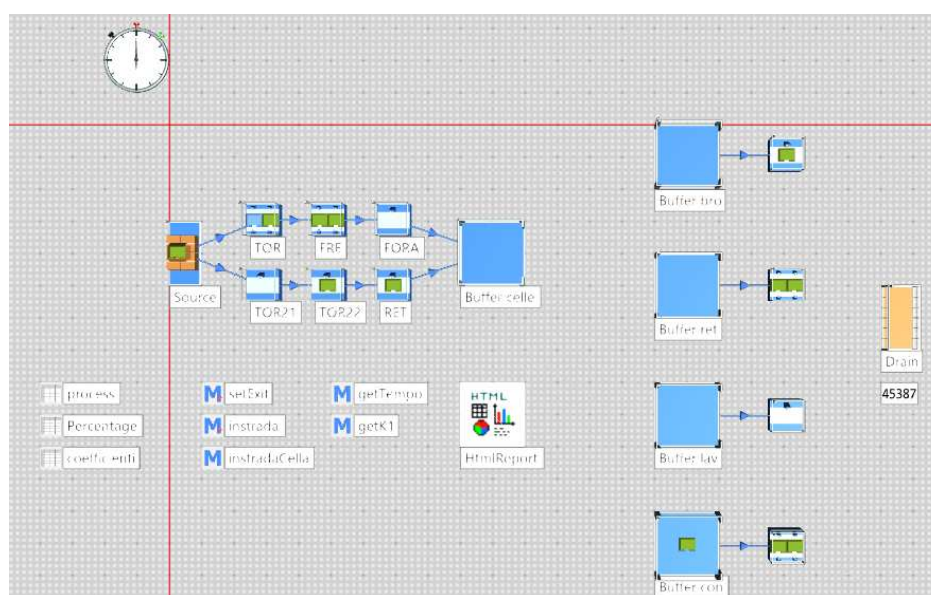


immagine 4.1.10: Top view del frame di lavoro della simulazione S3

Nella simulazione per celle si è fatto uso di quattro DataTable:

- 'process' nella quale sono contenuti tutti i prodotti con il proprio ciclo tecnologico e i tempi di lavorazione.

Parts	Bill of process	Step description	Shop	ProcTime
P01	x	Tornitura	TOR	7:42.0000
P02	x	Fresatura	FRE	2:48.0000
P04	x	Foratura	FORA	1:00.0000
P05	x	Rettifica	Buffer_ret	5:30.0000
P07	x	Lavaggio	Buffer_lav	1:30.0000
P08	x	Controllo	Buffer_con	2:00.0000

tabella 4.1.11: Esempio della tabella DataTable 'process', prodotto P01

- 'Percentage' nella quale è registrato il mix produttivo di riferimento.

MU	Portion
.UserObjects.P01	4.97
.UserObjects.P02	9.93
.UserObjects.P04	24.83
.UserObjects.P05	20.86
.UserObjects.P07	33.11
.UserObjects.P08	6.29

tabella 4.1.12: 'Percentage' relativa a S3

- 'coefficienti' dove invece sono inseriti i coefficienti di utilizzo di ogni station.

	k1	k2	k3	k4
TOR	0.930	0.967	0.850	0.450
TOR21	0.930	0.967	0.850	0.450
TOR22	0.930	0.967	0.850	0.450
FRE	0.925	0.920	0.850	0.420
FORA	0.971	0.865	0.850	0.460
RET	0.956	0.830	0.850	0.450
Buffer_ret	0.956	0.830	0.850	0.450
Buffer_bro	0.974	0.980	0.850	0.420
Buffer_con	1.000	0.900	0.850	0.480
Buffer_lav	0.922	0.930	0.850	0.450

tabella 4.1.13: 'coefficienti'

- 'conteggi' dove viene registrata la conta dei pezzi.

	string 1	integer 2
1	P01	2256
2	P02	4507
3	P04	11267
4	P05	9470
5	P07	15032
6	P08	2855

tabella 4.1.14: 'conteggi' relativa a S3

Sono stati utilizzati anche sette diversi Method, ovvero codici che regolano delle specifiche azioni:

- 'setExit' apposito per il Source, il quale regola il fluire dei prodotti nelle apposite celle;
- 'instradaCella' dedicato allo spostamento dei prodotti tra le varie station delle celle;
- 'instrada' dedicato allo spostamento dei prodotti tra i reparti;
- 'getTempo' codice dedicato all'acquisizione dei vari tempi di lavorazione di ogni prodotto su ogni station, corretto dai coefficienti di utilizzo secondo la formula:

$$tempo\ effettivo = \frac{\frac{tempo\ base}{\prod_{j=1}^n K1}}{\prod_{i=1}^4 K}$$

e per garantirne il corretto funzionamento, questo Method si appoggia a:

- 'getK1' che si occupa dell'acquisizione dei coefficienti K1 per ogni cella;
- 'contaPezzi' dedicato a contare i pezzi prodotti;
- 'Init' azzerava automaticamente la conta dei pezzi, evitando così di sommare più simulazioni consecutive.

Per quanto riguarda i setup, nelle simulazioni dedicate alle celle, si è optato per una soluzione semplice, fondata sull'idea di voler sfruttare, per quanto possibile, gli strumenti nativi di Plants Simulation e di voler rendere la simulazione quanto più verosimile, infatti è stato deciso di spalmare i 20 minuti di attrezzaggio per ogni prodotto in un corrispondente numero di set-up in modo che ci sia un effettivo attrezzaggio con il passaggio di due prodotti diversi.

Si ricorda che i set-up riguardano solo i reparti.

Si è ricorso dunque all'opzione 'Set-Up':

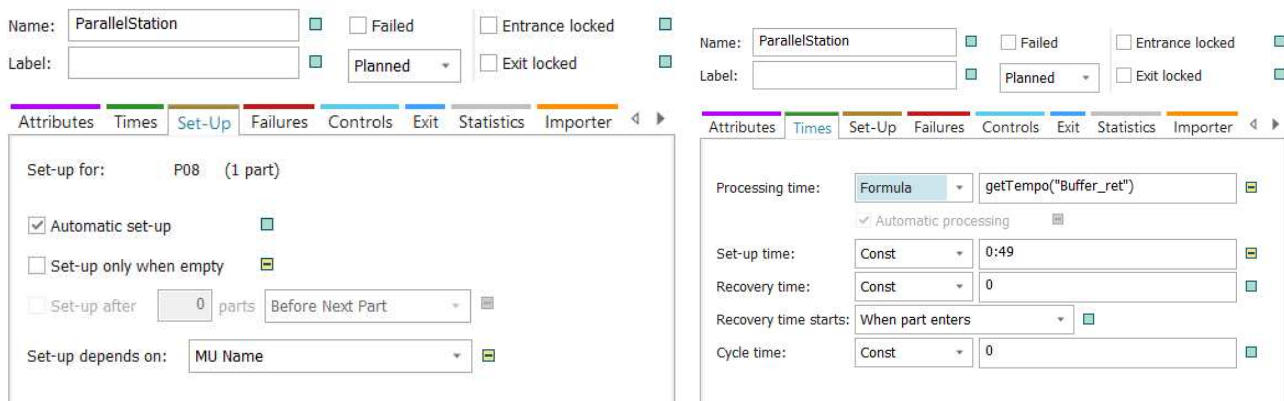


immagine 4.1.15: opzione 'Set-Up'

È stata spuntata la voce 'Set only when empty', così facendo è possibile eseguire l'attrezzaggio macchina anche mentre sta lavorando il pezzo precedente, in accordo il più possibile con la filosofia SMED.

Successivamente nell'opzione 'Times' e nella rispettiva voce 'Set-up time' è stato impostato il tempo di set-up calcolato nella seguente maniera:

1. Calcolo del numero dei pezzi passanti in ogni reparto nell'anno corrispondente, divido poi per il numero di giorni in cui abbiamo attività produttiva (220 giorni) e otteniamo così il numero di pezzi che passano per un certo reparto nell'arco di tempo di una giornata
2. Calcolo del tempo di set-up: $(20 * n^{\circ}prodotti * 60)/pezzi\ al\ giorno$

Portando invece l'attenzione sulle celle è possibile notare l'utilizzo delle 'ParallelStation' altro non sono che delle Station multiple; sono utili quando una stazione presenta più macchinari, permettendo ridurre il numero di oggetti e la complessità del Method dedicato alla guida dei prodotti.

immagine 4.1.16: Parallel Station

Le uniche considerazioni aggiuntive sono le dimensioni di tali stazioni parallele (X-dimension e Y-dimension) e la modalità di lavoro, è infatti possibile ignorare l'opzione 'Start processing when full' per simulare un comportamento quanto più simile a dei macchinari separati.

4.2 - Confronto dimensionamento analitico con modello simulativo

4.2.1 - Modello simulativo scenario S0

I risultati ottenuti da una prima simulazione realizzata con le risorse calcolate attraverso il dimensionamento analitico del layout per reparti sono i seguenti:

resource	working	waiting	blocked
root.RET_1	99,94%	0,06%	0
root.RET_2	99,93%	0,07%	0
root.RET_3	99,93%	0,07%	0
root.FRE_1	96,10%	3,90%	0
root.FRE_2	93,92%	6,08%	0
root.TOR_3	85,85%	14,15%	0
root.TOR_1	85,85%	14,15%	0
root.TOR_2	85,81%	14,19%	0
root.CON_2	84,43%	15,57%	0
root.CON_1	84,35%	15,65%	0
root.FOR_1	78,56%	21,44%	0
root.LAV_1	58,31%	41,69%	0
root.BRO_1	39,62%	60,38%	0

tabella 4.2.1a: coefficienti percentuali di utilizzo e di inutilizzo dei macchinari

Da un primo confronto si può evincere che i volumi annui totali del primo anno sono molto vicini a ciò che si è ottenuto analiticamente, ma nonostante questo, la richiesta di 45300 pz/anno non viene soddisfatta a

causa della saturazione del reparto di rettifica che analiticamente non era stata prevista, mentre risulta evidente nella simulazione.

Come detto in precedenza sono stati scelti dei coefficienti di prestazione per rendere più facile il confronto con il dimensionamento analitico.

	K01	K01	K02
	[pz/anno]	[pz/h]	[h/pz]
P01	2170	0,62	9,56
P02	4562	1,30	3,42
P04	11255	3,20	9,59
P05	9539	2,71	7,60
P07	14940	4,24	7,32
P08	2821	0,80	9,18
Tot	45287	12,87	

tabella 4.2.2a: KPI riferiti ai prodotti

	K03	K04	K05 [pz]	K06
TOR	85,84%	14,16%	16,0	
FRE	95,01%	4,99%	4,0	
FOR	78,56%	21,44%	5,0	
RET	99,93%	0,07%	60,5	COLLO DI BOTTIGLIA
BRO	39,62%	60,38%	1,0	
LAV	58,31%	41,69%	4,0	
CON	84,39%	15,61%	7,5	

tabella 4.2.3a: KPI riferiti ai macchinari

Ora ciò che era stato anticipato in precedenza è dimostrabile dal K02 e dal K05, in quanto il cycle time medio varia tra 3-9 ore circa e il buffer che necessita una maggiore capacità media è proprio quello del reparto di rettifica, ovvero dove abbiamo anche il collo di bottiglia poiché il coefficiente di utilizzo è massimo (K03). Per fare in modo che la simulazione soddisfi la richiesta iniziale è stata aggiunta una rettificatrice nel reparto (arrivando ad un totale di 4).

resource	working	waiting	blocked
root.FRE_2	96,23%	3,77%	0
root.FRE_1	93,81%	6,19%	0
root.TOR_1	86,26%	13,74%	0
root.TOR_3	86,23%	13,77%	0
root.TOR_2	86,23%	13,77%	0
root.CON_1	84,54%	15,46%	0
root.CON_2	84,52%	15,48%	0
root.FORA_1	78,83%	21,17%	0
root.RET_2	78,52%	21,48%	0
root.RET_4	78,49%	21,51%	0
root.RET_1	77,43%	22,57%	0
root.RET_3	77,35%	22,65%	0
root.LAV_1	58,57%	41,43%	0
root.BRO_1	39,48%	60,52%	0

tabella 4.2.1b: coefficienti percentuali di utilizzo e di inutilizzo dei macchinari

	K01	K01	K02
	[pz/anno]	[pz/h]	[h/pz]
P01	2299	0,65	4,87
P02	4598	1,31	3,51
P04	11270	3,20	3,53
P05	9614	2,73	1,87
P07	15026	4,27	1,14
P08	2926	0,83	4,33
Tot	45733	12,99	

tabella 4.2.2b: KPI riferiti ai prodotti

	K03	K04	K05 [pz]	K06
TOR	86,24%	13,76%	16,0	
FRE	95,02%	4,98%	4,0	COLLO DI BOTTIGLIA
FOR	78,83%	21,17%	5,5	
RET	77,95%	22,05%	3,5	
BRO	39,48%	60,52%	1,0	
LAV	58,57%	41,43%	3,5	
CON	84,53%	15,47%	9,0	

tabella 4.2.3b: KPI riferiti ai macchinari

Ora la produttività del sistema è rispettata sia nel totale, sia per ogni singolo prodotto lavorato, a ciò si aggiunge anche il collo di bottiglia che ora coincide con quello che era stato stimato analiticamente; inoltre dal K02 si può evidenziare l'abbassamento dei tempi medi di attraversamento del prodotto all'interno del sistema, e facendo riferimento al K05 le code nel reparto di rettifica si sono notevolmente ridotte. Questo tipo di differenze tra il dimensionamento analitico ed il modello simulativo si verificheranno in modo molto più evidente nei successivi scenari.

4.2.2 - Modello simulativo scenario S1

I risultati ottenuti da una prima simulazione realizzata con le risorse calcolate attraverso il dimensionamento analitico del layout per reparti sono i seguenti:

resource	working	waiting	blocked
root.CON_2	99,92%	0,08%	0
root.CON_1	99,92%	0,08%	0
root.RET_4	96,92%	3,08%	0
root.RET_3	96,89%	3,11%	0
root.RET_1	96,89%	3,11%	0
root.RET_2	96,87%	3,13%	0
root.FOR_1	95,07%	4,93%	0
root.TOR_2	87,33%	12,67%	0
root.TOR_4	87,30%	12,70%	0
root.TOR_3	82,34%	17,66%	0
root.TOR_1	82,31%	17,69%	0
root.FRE_3	78,84%	21,16%	0
root.FRE_2	77,44%	22,56%	0
root.FRE_1	73,55%	26,45%	0
root.LAV_1	71,33%	28,67%	0
root.BRO_1	46,19%	53,81%	0

tabella 4.2.4a: coefficienti percentuali di utilizzo e di inutilizzo dei macchinari

	K01	K01	K02
	[pz/anno]	[pz/h]	[h/pz]
P01	2665	0,76	56,44
P02	5736	1,63	56,77
P04	12884	3,66	57,04
P05	13525	3,84	53,34
P07	21890	6,22	53,03
P08	3280	0,93	56,36
Tot	59980	17,04	

tabella 4.2.5a: KPI riferiti ai prodotti

	K03	K04	K05 [pz]	K06
TOR	84,82%	15,18%	21,5	
FRE	78,14%	21,86%	3,0	
FOR	95,07%	4,93%	15,5	
RET	96,90%	3,10%	14,0	
BRO	46,19%	53,81%	2,5	
LAV	71,33%	28,67%	4,5	
CON	99,92%	0,08%	899,5	COLLO DI BOTTIGLIA

tabella 4.2.6a: KPI riferiti ai macchinari

Analogamente al caso precedente la produttività del sistema non soddisfa la richiesta di 62250 pz/anno poiché si forma una coda importante davanti al reparto di controllo, che risulta essere il collo di bottiglia che impedisce di raggiungere i volumi desiderati; a sostegno di questa tesi ci sono anche: il coefficiente di utilizzo del reparto di controllo (K03), il cycle time medio (K02), ed il K05.

Per correggere i volumi produttivi è stato aggiunto un banco di controllo nel reparto (per un totale di 3).

resource	working	waiting	blocked
root.RET_2	98,34%	1,66%	0
root.RET_4	98,33%	1,67%	0
root.RET_1	98,04%	1,96%	0
root.RET_3	98,03%	1,97%	0
root.FOR_1	97,60%	2,40%	0
root.TOR_2	86,19%	13,81%	0
root.TOR_1	86,19%	13,81%	0
root.TOR_3	86,17%	13,83%	0
root.TOR_4	86,15%	13,85%	0
root.FRE_2	77,88%	22,12%	0
root.FRE_1	77,86%	22,14%	0
root.FRE_3	77,84%	22,16%	0
root.CON_2	75,29%	24,71%	0
root.CON_3	73,20%	26,80%	0
root.LAV_1	72,69%	27,31%	0
root.CON_1	72,13%	27,87%	0
root.BRO_1	46,95%	53,05%	0

tabella 4.2.4b: coefficienti percentuali di utilizzo e di inutilizzo dei macchinari

A seguito della correzione la produttività viene soddisfatta, ma il collo di bottiglia è diverso da quello che era stato stimato analiticamente, poiché è il reparto di foratura a risultare maggiormente saturato.

	K01	K01	K02
	[pz/anno]	[pz/h]	[h/pz]
P01	2743	0,78	5,19
P02	6122	1,74	5,51
P04	13506	3,84	5,55
P05	14137	4,02	1,96
P07	22580	6,41	1,45
P08	3587	1,02	5,12
Tot	62675	17,81	

tabella 4.2.5b: KPI riferiti ai prodotti

	K03	K04	K05 [pz]	K06
TOR	86,18%	13,82%	22,0	
FRE	77,86%	22,14%	3,0	
FOR	97,60%	2,40%	16,5	
RET	98,18%	1,82%	12,5	COLLO DI BOTTIGLIA
BRO	46,95%	53,05%	2,5	
LAV	72,69%	27,31%	4,5	
CON	73,54%	26,46%	5,5	

tabella 4.2.6b: KPI riferiti ai macchinari

4.2.3 - Modello simulativo scenario S2

I risultati ottenuti da una prima simulazione realizzata con le risorse calcolate attraverso il dimensionamento analitico del layout per reparti sono i seguenti:

resource	working	waiting	blocked
root.RET_2	99,94%	0,06%	0
root.RET_1	99,94%	0,06%	0
root.RET_3	99,94%	0,06%	0
root.CON_1	99,93%	0,07%	0
root.RET_4	99,93%	0,07%	0
root.CON_2	99,93%	0,07%	0
root.RET_5	99,93%	0,07%	0
root.TOR_3	91,42%	8,58%	0
root.TOR_4	91,11%	8,89%	0
root.TOR_5	91,10%	8,90%	0
root.TOR_1	91,01%	8,99%	0
root.TOR_2	90,64%	9,36%	0
root.LAV_1	88,43%	11,57%	0
root.FRE_4	79,07%	20,93%	0
root.FRE_2	76,22%	23,78%	0
root.FRE_3	75,13%	24,87%	0
root.FRE_1	72,26%	27,74%	0
root.FORA_1	65,62%	34,38%	0
root.FORA_2	65,59%	34,41%	0
root.BRO_1	60,22%	39,78%	0

tabella 4.2.7a: coefficienti percentuali di utilizzo e di inutilizzo dei macchinari

	K01	K01	K02
	[pz/anno]	[pz/h]	[h/pz]
P01	2475	0,70	490,94
P02	5957	1,69	435,62
P04	12645	3,59	491,77
P05	13721	3,90	490,11
P07	24193	6,87	490,35
P08	3093	0,88	490,78
Tot	62084	17,64	

tabella 4.2.8a: KPI riferiti ai prodotti

	K03	K04	K05 [pz]	K06
TOR	91,05%	8,95%	34,0	
FRE	75,67%	24,33%	5,0	
FOR	65,60%	34,40%	6,0	
RET	99,93%	0,07%	1585,5	COLLO DI BOTTIGLIA
BRO	60,22%	39,78%	3,0	
LAV	88,43%	11,57%	14,0	
CON	99,93%	0,07%	10177,5	

tabella 4.2.9a: KPI riferiti ai prodotti

In questo caso lo scostamento tra i volumi desiderati e quelli reali è dell'ordine delle decine di migliaia di pezzi all'anno, questo è causato dalle code che si formano davanti ai reparti di rettifica e di controllo, come dimostrano i coefficienti di utilizzo (K03), i K05 e i K02.

resource	working	waiting	blocked
root.CON_3	94,74%	5,26%	0
root.CON_2	94,73%	5,27%	0
root.CON_1	94,59%	5,41%	0
root.LAV_1	93,46%	6,54%	0
root.TOR_1	92,22%	7,78%	0
root.TOR_3	92,22%	7,78%	0
root.TOR_5	92,21%	7,79%	0
root.TOR_2	92,21%	7,79%	0
root.TOR_4	92,21%	7,79%	0
root.RET_4	89,72%	10,28%	0
root.RET_2	89,70%	10,30%	0
root.RET_6	89,70%	10,30%	0
root.RET_5	89,37%	10,63%	0
root.RET_1	89,36%	10,64%	0
root.RET_3	89,35%	10,65%	0
root.FRE_4	77,82%	22,18%	0
root.FRE_2	77,82%	22,18%	0
root.FRE_1	77,80%	22,20%	0
root.FRE_3	77,78%	22,22%	0
root.FORA_2	68,27%	31,73%	0
root.FORA_1	65,90%	34,10%	0
root.BRO_1	62,06%	37,94%	0

tabella 4.2.7b: coefficienti percentuali di utilizzo e di inutilizzo dei macchinari

	K01	K01	K02
	[pz/anno]	[pz/h]	[h/pz]
P01	3483	0,99	5,06
P02	8050	2,29	3,48
P04	18028	5,12	4,90
P05	19545	5,55	3,52
P07	32352	9,19	2,19
P08	4352	1,24	4,89
Tot	85810	24,38	

tabella 4.2.8b: KPI riferiti ai prodotti

	K03	K04	K05 [pz]	K06
TOR	92,22%	7,78%	34,5	
FRE	77,80%	22,20%	5,0	
FOR	67,09%	32,91%	6,0	
RET	89,53%	10,47%	19,0	
BRO	62,06%	37,94%	3,0	
LAV	93,46%	6,54%	15,0	
CON	94,69%	5,31%	20,0	COLLO DI BOTTIGLIA

tabella 4.2.9b: KPI riferiti ai macchinari

Aggiungendo una macchina nel reparto di controllo e un'altra nel reparto di rettifica si può notare ancora una volta come la produttività annuale venga soddisfatta dopo aver aggiornato il sistema.

4.2.4 - Modello simulativo scenario S3

Prima di procedere con l'analisi dei modelli simulativi delle celle si vuole chiarire la nomenclatura utilizzata in queste ultime tre simulazioni:

- TOR = Tornitura cella 1;
- FRE = Fresatura cella 1;
- FORA = Foratura cella 1;
- TOR21 = Tornitura 1 cella 2;
- TOR22 = Tornitura 2 cella 2;
- RET = Rettifica cella 2;
- bro = Brocciatura in reparto;
- ret_rep = Rettifica in reparto;
- lav = Lavaggio in reparto;
- con = Controllo in reparto

Il numero di prodotti complessivo nella simulazione S3 sono 45387 pz/anno contro un livello produttivo atteso di 45300 pz/anno

Object	Working	Set-up	Waiting	Blocked	Powering up/down	Failed	Stopped	Paused	Unplanned	Portion
Buffer_bro	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_celle	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_con	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_lav	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_ret	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Drain	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
FORA	69.03%	0.00%	30.97%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
FRE	98.66%	0.00%	0.04%	1.30%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
RET	91.92%	0.00%	8.08%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Source	0.00%	0.00%	0.02%	99.98%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
TOR	89.42%	0.00%	2.48%	8.10%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
TOR21	50.90%	0.00%	26.26%	22.83%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
TOR22	38.83%	0.00%	15.45%	45.72%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
bro	37.50%	0.01%	62.49%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
con	79.30%	11.76%	8.94%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
lav	52.83%	9.34%	37.83%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
ret_rep	96.02%	3.67%	0.31%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

tabella 4.2.10: report S3

Di seguito vengono riportate le tabelle in cui sono rappresentati i seguenti KPI: K01, K03, K06.

Station	K03	K06
TOR	89,42%	
FRE	98,66%	CDB
FORA	69,03%	
TOR21	50,90%	
TOR22	38,83%	
RET	91,92%	
bro	37,50%	
ret_rep	96,02%	
lav	52,83%	
con	79,30%	

tabella 4.2.11: KPI 1 S3

Prodotti	K01 [pz/h]
P01	0,64
P02	1,28
P04	3,20
P05	2,69
P07	4,27
P08	0,81

tabella 4.2.12: KPI 2 S3

4.2.5 - Modello simulativo scenario S4

Il numero di prodotti complessivo nella simulazione S4 sono 84932 pz/anno contro un livello produttivo atteso di 85500 pz/anno, risulta quindi che l'impianto per come è stato dimensionato a livello analitico non sia in grado di soddisfare il volume produttivo atteso.

Object	Working	Set-up	Waiting	Blocked	Powering up/down	Failed	Stopped	Paused	Unplanned	Portion
Buffer_bro	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_celle	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_con	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_lav	0.00%	0.00%	74.98%	25.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_ret	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Drain	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
FORA	74.50%	0.00%	25.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
FRE	97.96%	0.00%	0.21%	1.83%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
RET	80.81%	0.00%	19.19%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Source	0.00%	0.00%	0.01%	99.99%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
TOR	91.62%	0.00%	0.98%	7.40%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
TOR21	67.74%	0.00%	26.26%	6.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
TOR22	51.61%	0.00%	44.40%	4.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
bro	59.48%	0.01%	40.52%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
con	87.56%	12.20%	0.23%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
lav	90.42%	9.45%	0.13%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
ret_rep	96.39%	3.59%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

tabella 4.2.13: report S4

Da questa simulazione si possono effettuare diverse osservazioni:

Non soddisfacendo il volume produttivo preposto possiamo sicuramente evincere che ci sono reparti che necessitano di macchinari aggiuntivi, in particolare possiamo intervenire in tutte quelle station con un alto coefficiente di utilizzo come FRE e ret_rep, inoltre è interessante notare come il buffer che precede il lavaggio risulti bloccato per il 25% del tempo circa, quindi può valere la pena di agire anche su tale reparto. Aggiungendo infatti un macchinario nella fresatura della prima cella, un macchinario nel reparto di rettifica e infine un ultimo macchinario nel reparto di lavaggio siamo in grado di portare la produzione a 89534 pz/anno, riuscendo così ad arrivare al volume di produzione di interesse.

Si vuole far notare come la semplice aggiunta dei macchinari alla stazione FRE e alla stazione ret_rep non sia in grado di soddisfare il volume produttivo target, risulta quindi fondamentale la precedente osservazione sul buffer del reparto di lavaggio.

Si riportano di seguito le tabelle con K01, K03 e K06:

Station	K03	K06
TOR	91,62%	
FRE	97,96%	CDB
FORA	74,50%	
TOR21	67,74%	
TOR22	51,61%	
RET	80,81%	
bro	59,48%	
ret_rep	87,54%	
lav	90,42%	
con	96,39%	

tabella 4.2.14: KPI 1 S4

Prodotti	K01
	[pz/h]
P01	0,97
P02	2,24
P04	5,08
P05	5,50
P07	9,10
P08	1,23

tabella 4.2.15: KPI 2 S4

4.2.6 - Modello simulativo scenario S5

Il numero di prodotti complessivo nella simulazione S5 sono 85370 pz/anno contro un livello produttivo atteso di 85500 pz/anno, risulta quindi che l'impianto per come è stato dimensionato a livello analitico non sia in grado di soddisfare il volume produttivo atteso anche aggiungendo dei buffer tra le varie station delle celle.

Object	Working	Set-up	Waiting	Blocked	Powering up/down	Failed	Stopped	Paused	Unplanned	Portion
Buffer_FF	0.00%	0.00%	42.38%	57.62%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_TF	0.00%	0.00%	12.71%	87.29%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_TR	0.00%	0.00%	92.09%	7.91%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_TT	0.00%	0.00%	99.83%	0.17%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_bro	0.00%	0.00%	7.21%	92.79%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_celle	0.00%	0.00%	45.22%	54.78%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_con	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_lav	0.00%	0.00%	26.24%	73.76%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_ret	0.00%	0.00%	5.86%	94.14%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Drain	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
FORA	75.77%	0.00%	0.79%	23.44%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
FRE	96.67%	0.00%	0.01%	3.32%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
RET	79.59%	0.00%	9.73%	10.68%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Source	0.00%	0.00%	0.02%	99.98%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
TOR	89.98%	0.00%	0.51%	9.51%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
TOR21	68.91%	0.00%	31.07%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
TOR22	52.49%	0.00%	45.23%	2.27%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
bro	59.76%	0.01%	0.06%	40.17%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
con	88.51%	11.17%	0.32%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
lav	90.86%	9.12%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
ret_rep	96.24%	3.73%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

tabella 4.2.16: report S5

Anche in questo notiamo come molti buffer siano bloccati; per ridurre al minimo gli interventi necessari consideriamo solo i reparti, in particolare quelli con buffer bloccato per molto tempo e in cui passano molti pezzi. L'attenzione ricade immediatamente sul reparto di lavaggio, infatti aggiungendo un solo macchinario siamo in grado di far incrementare la produzione a 91548 pz/anno riuscendo quindi a garantire il volume produttivo richiesto.

Vengono in seguito riportate le tabelle con K01, K03 e K06.

Station	K03	K06
TOR	89,98%	
FRE	96,67%	CDB
FORA	75,77%	
TOR21	68,91%	
TOR22	52,49%	
RET	79,59%	
bro	59,76%	
ret_rep	96,24%	
lav	90,86%	
con	88,51%	

tabella 4.2.17: KPI 1 S5

Prodotti	K01
	[pz/h]
P01	1,05
P02	2,42
P04	5,47
P05	5,93
P07	9,81
P08	1,32

tabella 4.2.18: KPI 2 S5

5 - Confronto deterministico vs. simulativo

5.1 - Confronto del sistema per reparti

In generale in tutti e tre gli scenari presi in esame si può evidenziare una differenza tra i risultati ottenuti analiticamente e quelli derivanti dalla simulazione, nello specifico in tutti e tre gli scenari il numero di macchinari che era stato previsto analiticamente non era sufficiente a soddisfare la potenzialità produttiva richiesta dall'azienda, quindi, per garantire la corretta potenzialità produttiva si è andati ad aumentare di un'unità il numero di macchinari del reparto maggiormente saturato (che inizialmente non coincideva con quello trovato analiticamente).

Il motivo di tali differenze è attribuibile ad un fenomeno che non viene considerato analiticamente, ovvero la formazione, sui buffer dei singoli reparti, delle code di prodotti che sono in attesa di essere lavorati, queste code impediscono ai prodotti in uscita dal reparto a monte, di entrare direttamente nel reparto a valle.

Questo porta all'aumento della coda stessa e di conseguenza anche ad un incremento generale del tempo medio di attraversamento del prodotto all'interno del sistema, il quale non sarà dato solo dalla somma tra il tempo necessario per eseguire tutte le lavorazioni e il setup dei macchinari, ma anche da un certo tempo di attesa, che non era stato considerato analiticamente, e durante quale i prodotti sostano davanti ai macchinari, il che porta inevitabilmente ad un aumento dei coefficienti di utilizzo ed ad una perdita di efficienza del sistema.

Una volta che la produttività richiesta è stata soddisfatta si può notare come il collo di bottiglia calcolato analiticamente corrisponda a quello della simulazione, tranne per la seconda annualità, dove il collo di bottiglia risulta essere il reparto di rettifica invece che quello di tornitura, anche questa differenza è da attribuire al fatto che analiticamente si identifica il reparto critico sulla base di: carichi medi teorici, funzionamento regolare e privo di effetti dinamici che invece vengono considerati nel modello simulativo.

	Volumi produttivi		Errore
	<i>Richiesti</i>	<i>Simulazione</i>	
	[pz/anno]	[pz/anno]	%
Anno 1	45300	45744	0,97%
Anno 2	62250	62675	0,68%
Anno 3	85500	85810	0,36%

tabella 5.1.1: confronto tra i volumi produttivi del dimensionamento analitico e della simulazione

Come si può vedere dalla tabella 5.5.1, la differenza tra la produttività richiesta e quella ottenuta con la simulazione (si considera simulazione "b", ossia quella ottenuta applicando le considerazioni sopracitate e quindi con l'aggiunta di alcuni macchinari) è minima, infatti l'errore percentuale che otteniamo è al massimo dell'1% e quindi accettabile.

5.2 - Confronto del sistema per celle

Generalmente le simulazioni hanno soddisfatto le aspettative, sono stati ottenuti dei volumi di produzione verosimili, in particolare la prima annualità è risultata essere vincente in quanto è stata rispettata a pieno la produzione prevista; per quanto riguarda invece la terza annualità, nonostante non sia stata pienamente soddisfatta la previsione di produzione, il risultato ottenuto risulta comunque essere alquanto verosimile, poiché presenta degli errori in termini percentuali sulla produzione molto bassi:

$$e_{s4} = (1 - 84932/85500) * 100 = 0,66\%$$

$$e_{s5} = (1 - 85370/85500) * 100 = 0,15\%$$

Questo ci porta infatti a validare le simulazioni.

Analizzando più accuratamente i risultati ottenuti mediante software notiamo che il numero di macchine utilizzato è corrispondente a quello calcolato nel dimensionamento analitico e siamo in grado di soddisfare pienamente la domanda riguardante il primo anno e, a meno di piccoli errori, il numero di macchinari considerato per la terza annualità riporta risultati apprezzabili.

I coefficienti di utilizzo dei macchinari risultano confermare il risultato analitico, a meno di piccoli scostamenti che variano con un errore percentuale tra il 2-10% circa.

Tali scostamenti sono giustificabili col fatto che nella simulazione analitica non si tiene conto di fenomeni complessi e di difficile previsione come il 'blocking' delle stazioni; non a caso registriamo un maggiore errore nelle stazioni in cui si ha un alto blocking e invece un errore minimo nelle stazioni in cui questo fenomeno è assente.

A titolo di esempio si considera la prima annualità e in particolare il reparto di brocciatura che non presenta blocking e il quale presenta uno scostamento pari al 1,5%, al contrario, nella tornitura 1 della cella 2 dove questo sintomo è molto marcato, si ha uno scostamento del 23% circa, abbiamo inoltre un utilizzo simulato che scende di ben 15 punti percentuale rispetto al dimensionamento analitico.

Per quanto riguarda i colli di bottiglia individuati, quelli identificati col modello analitico non vengono confermati nel modello simulativo, ciò potrebbe essere riconducibile al fatto che il dimensionamento analitico è statico, ovvero considera un volume medio di prodotti, ignorando parzialmente il mix produttivo, e non considera eventi come il starving o il blocking.

6 - Bibliografia

Per la stesura della tesi sono state consultate le fonti seguenti:

- A. Pareschi, *Impianti industriali*, 2^a ed., Esculapio, 2007
- S. Kalpakjian, S. R. Schmid, *Tecnologia meccanica*, 6^a ed., Pearson, 2021
- G. TIMELLI, *Dispense di leghe metalliche e trattamenti termici*. Materiale didattico, Università degli Studi di Padova, anno accademico 2025/2026.
- CHAN, H. Milner; MILNER, D. A. Direct clustering algorithm for group formation in cellular manufacture. *Journal of Manufacturing systems*, 1982, 1.1: 65-75.
- AMRUTHNATH, Nagdev; GUPTA, Tarun. Modified rank order clustering algorithm approach by including manufacturing data. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49.5: 138-142.