

UNIVERSITÀ DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccatronica



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

Relatore: Ing. Nicola Berti

Correlatore: Prof.ssa Martina Calzavara

Laureandi: Tommaso Bellomi

Ronnie Carollo

Giovanni Roma

Riccardo Toffali

Anno Accademico 2025-2026

ABSTRACT INIZIALE

Il presente caso studio analizza la situazione produttiva di un'azienda che opera nel settore delle lavorazioni meccaniche per asportazione di truciolo. L'azienda produce principalmente componenti in acciaio e ghisa, destinati ad applicazioni come sistemi di trasmissione del moto, organi idraulici e meccanismi di precisione.

Attualmente la produzione è organizzata secondo una struttura a Job shop, quindi per reparti funzionali.

I diversi semilavorati si spostano quindi da un reparto all'altro seguendo il ciclo di lavorazione previsto per ciascun prodotto.

Il problema nasce dal fatto che, nei prossimi tre anni, è previsto un aumento dei volumi produttivi per alcune famiglie di prodotto.

Per questo motivo, si sta valutando se l'attuale organizzazione rimarrà conveniente oppure se, per alcune lavorazioni, potrebbe essere più efficiente passare da una struttura a reparti ad una struttura organizzata per celle di lavorazione, raggruppando famiglie di prodotto secondo il principio di Group Technology.

Nell'analisi quindi, non si valuta solamente la convenienza della trasformazione in celle, ma si considera anche la possibilità di inserire all'interno di esse dei robot antropomorfi, utilizzati per lo spostamento dei pezzi tra le diverse macchine presenti.

L'obiettivo finale è capire se, quando e in quali condizioni questa riorganizzazione possa risultare economicamente e produttivamente conveniente per l'azienda.

RICHIAMI TEORICI SUI SISTEMI PRODUTTIVI

Layout per Reparti Funzionali (Job Shop): Le macchine con funzioni simili sono raggruppate in uno stesso reparto e i pezzi si spostano tra i reparti seguendo il proprio ciclo di lavorazione. Ideale quando si è di fronte ad un'alta varietà produttiva e ad una produttività medio-bassa. È capace di offrire un'elevata flessibilità nella gestione di cicli di lavorazione differenti ed un'alta tolleranza ai guasti (grazie alla presenza di molteplici macchinari identici), ma comporta spesso flussi di materiali complessi, maggiori tempi di attesa e costi di movimentazione elevati.

Layout a Celle di Produzione: I diversi macchinari sono disposti in sequenza e dedicati alla lavorazione di una specifica famiglia di prodotti, ovvero componenti che presentano cicli tecnologici molto simili tra loro. Si tratta di una soluzione ottimale per volumi produttivi medio-alti e con una discreta varietà produttiva. È capace di ridurre in modo drastico i tempi di setup, i trasporti e il lead time complessivo, facilitandone l'automazione. Richiede un investimento iniziale spesso molto alto.

OBIETTIVI

L'obiettivo dello studio è analizzare e dimensionare in modo analitico l'attuale sistema produttivo organizzato per reparti, per i diversi anni di vendita.

Successivamente, lo studio si propone di identificare le famiglie di prodotto più adatte alla lavorazione tramite celle, procedendo al dimensionamento di esse, determinando il numero di macchinari, di operatori e i relativi coefficienti di utilizzo.

Verrà quindi individuata la soglia di convenienza tecnica per il passaggio al nuovo layout, considerando un limite di saturazione minimo del 60%, e valutato l'eventuale inserimento di un robot antropomorfo.

Infine, attraverso la simulazione ad eventi discreti, verranno confrontate le prestazioni operative, definendo specifici KPI e mettendo a confronto il dimensionamento deterministico con i risultati del modello simulato.

DATI DI INPUT E PARAMETRI DEL SISTEMA PRODUTTIVO

Per dimensionare l'impianto e creare il modello di simulazione, partiamo dai dati forniti dall'azienda. Questi parametri sono validi per entrambe le soluzioni che si andranno a studiare: sia per l'attuale layout a reparti, sia per la possibile trasformazione in celle di produzione.

Parametri generali del sistema produttivo		
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 x 2 x 8
Soglia convenienza cella	≥ 60%	Coefficiente di utilizzo minimo

Lotto di produzione (L_i): Si definisce fin da subito la grandezza dei lotti di produzione. Questo dato servirà in particolare nella Fase 2 (simulazione). Per mantenere basso il WIP e non avere quindi troppi pezzi fermi in attesa, senza aumentare troppo i tempi necessari per riattrezzare le macchine, si considera un lotto settimanale. Essendoci 44 settimane lavorative all'anno, il lotto di ogni prodotto si calcola dividendo i volumi annui per le settimane disponibili:

$$L_i = \frac{Q_{annuo,i}}{44}$$

Macchinari disponibili: Nella seguente tabella sono riportate le tipologie di macchinari utilizzati, i costi di acquisto di ogni macchina e i diversi coefficienti k di ogni reparto.

Risorse disponibili								
Cod.	Tipo Macchina	Valore economico [€]	Setup medio [min/lotto]	Ingombro [m^2]	K1	K2	K3	K4
<i>TOR</i>	Tornio CNC	85.000	20	15	93,00%	96,7%	85%	45%
<i>FRE</i>	Fresatrice CNC	110.000	20	22	92,50%	92,0%	85%	42%
<i>FOR</i>	Foratrice CNC	55.000	20	18	97,10%	86,5%	85%	46%
<i>RET</i>	Rettificatrice CNC	140.000	20	16	95,60%	83,0%	85%	45%
<i>BRO</i>	Brocciatrice	75.000	20	15	97,40%	98,0%	85%	42%
<i>LAV</i>	Lavaggio industriale	35.000	20	23	100,00%	90,0%	85%	48%
<i>CON</i>	Banco controllo CMM	95.000	20	10	92,20%	93,0%	85%	45%

Prodotti e cicli di lavorazione: Lo studio si concentra su sei prodotti. Per ciascuno di essi viene fornito il ciclo tecnologico completo con i tempi macchina espressi in [min/pz]. I tempi indicati sono da intendersi come tempi netti in cui la macchina lavora il pezzo (escluso il setup).

P01 – Albero di Trasmissione			
#	Macchina	Operazione	Tempo [min/pezzo]
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

P02 – Flangia di accoppiamento			
#	Macchina	Operazione	Tempo [min/pezzo]
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

P03 – Corpo pompa idraulica			
#	Macchina	Operazione	Tempo [min/pezzo]
1	FRE	Fresatura piano di base	3,5
2	FRE	Fresatura cavità interna	6,0
3	FRE	Fresatura superfici laterali	4,5
4	FOR	Foratura passaggi fluido 8× Ø8	4,0
5	FOR	Maschiatura G1/4 4×	2,5
6	RET	Rettifica piano di tenuta	3,0
7	LAV	Lavaggio ad ultrasuoni	2,5
8	CON	Controllo tenuta e dimensionale	3,0

P06 – Piastra porta-utensile			
#	Macchina	Operazione	Tempo [min/pezzo]
1	FRE	Fresatura piano A (piano)	2,5
2	FRE	Fresatura piano B (spessore)	2,5
3	FOR	Foratura centri 12× Ø6	3,0
4	FOR	Maschiatura M6 12×	2,0
5	RET	Rettifica piano di riferimento	2,0
6	LAV	Lavaggio	1,0
7	CON	Controllo planarità e step	1,5

P08 – Sede Valvola			
#	Macchina	Operazione	Tempo [min/pezzo]
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

P09 – Coperchio riduttore			
#	Macchina	Operazione	Tempo [min/pezzo]
1	TOR	Tornitura flangia esterna	3,5
2	FRE	Fresatura superfici di tenuta	4,0
3	FOR	Foratura 6× Ø12 su BCD	3,0
4	FOR	Maschiatura M12 6×	2,0
5	BRO	Brocciatura sede OR	1,5
6	LAV	Lavaggio	1,5
7	CON	Controllo dimensionale	2,0

Previsioni di vendita: Tutti i calcoli si basano sulle previsioni di vendita dei prossimi tre anni, mostrate nella tabella sottostante. I volumi dell'Anno 1 indicano la situazione di partenza attuale, mentre i numeri degli Anni 2 e 3 riflettono la crescita attesa per ciascun prodotto.

<i>Piano di Vendita Triennale</i>				
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
P03	Corpo pompa idraulica	7500	9000	13500
P06	Piastra porta-utensile	3450	4200	5250
P08	Sede valvola	2850	3450	4350
P09	Coperchio riduttore	12000	18000	21000

FASE 1 - Dimensionamento analitico

FASE 1.1 - DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA PER REPARTI

I seguenti calcoli sono effettuati per ciascuna delle tre annualità del piano di vendita.

- **Calcolo della produttività di ciascun reparto**

$$Q_{ij} = \frac{Q_{u,i}}{\left(\prod_{s=j+1}^{n_i} k_{1,s}\right) \times \eta_j}$$

Prodotto P01 <i>Albero di trasmissione</i>				
Fase (j)	Macchina	Anno 1 [pz/anno]	Anno 2 [pz/anno]	Anno 3 [pz/anno]
1	TOR	8884,01	10660,81	13622,15
2	TOR	8262,13	9914,55	12688,60
3	FRE	8653,20	10383,84	13268,24
4	FOR	7772,87	9327,45	11918,41
5	RET	8040,52	9648,62	12328,80
6	LAV	6645,83	7974,99	10190,27
7	CON	6860,21	8232,25	10518,98

Prodotto P02 <i>Flangia di accoppiamento</i>				
Fase (j)	Macchina	Anno 1 [pz/anno]	Anno 2 [pz/anno]	Anno 3 [pz/anno]
1	TOR	16268,99	21691,98	28741,88
2	FRE	17039,05	22718,73	30102,32
3	FOR	15305,60	20407,46	27039,89
4	FOR	14861,73	19815,65	26255,73
5	LAV	13291,65	17722,20	23481,92
6	CON	13720,41	18293,88	24239,40

Prodotto P03 Corpo pompa idraulica				
Fase (j)	Macchina	Anno 1 [pz/anno]	Anno 2 [pz/anno]	Anno 3 [pz/anno]
1	FRE	34717,84	41661,41	62492,12
2	FRE	32114,01	38536,81	57805,21
3	FRE	29705,76	35646,55	53469,82
4	FOR	26683,40	32020,08	48030,12
5	FOR	25909,58	31091,49	46,637,24
6	RET	26801,74	32162,08	48243,12
7	LAV	22152,75	26583,30	39874,95
8	CON	22867,36	27440,83	41161,24

Prodotto P06 Piastra porta-utensile				
Fase (j)	Macchina	Anno 1 [pz/anno]	Anno 2 [pz/anno]	Anno 3 [pz/anno]
1	FRE	14772,44	17983,84	22479,80
2	FRE	13664,51	16635,05	20793,82
3	FOR	12274,36	14942,70	18,678,38
4	FOR	11918,41	14509,36	18136,71
5	RET	12328,80	15008,97	18761,21
6	LAV	10190,27	12405,54	15506,93
7	CON	10518,98	12805,72	16007,15

Prodotto P08 Sede valvola				
Fase (j)	Macchina	Anno 1 [pz/anno]	Anno 2 [pz/anno]	Anno 3 [pz/anno]
1	TOR	10409,10	12600,48	15887,57
2	TOR	9680,46	11718,45	14775,44
3	FOR	9845,64	11918,41	15027,56
4	RET	10184,66	12328,80	15545,01
5	LAV	8418,05	10190,27	12848,60
6	CON	8689,60	10518,98	13263,07

Prodotto P09 <i>Coperchio riduttore</i>				
Fase (j)	Macchina	Anno 1 [pz/anno]	Anno 2 [pz/anno]	Anno 3 [pz/anno]
1	TOR	44542,06	66813,09	77948,61
2	FRE	46650,37	69975,56	81638,15
3	FOR	41904,44	62856,66	73332,77
4	FOR	40689,21	61033,82	71206,12
5	BRO	38194,17	57291,25	66839,80
6	LAV	35444,40	53166,60	62027,70
7	CON	36587,77	54881,65	64028,60

- Calcolo del numero teorico di macchine**

Si sfrutta come valore delle ore totali annuali le 3520h, ovvero 220 giorni all'anno per 2 turni giornalieri da 8h ciascuno. Inoltre, essendo i tempi di lavorazione dei prodotti espressi in [minuti/pezzo], si è provveduto a convertire il tempo disponibile in minuti, ottenendo $3520 \cdot 60 = 211.200$ [min/anno].

$$M_{ij} = \frac{Q_{ij} \cdot t_{ij}}{N_{ij}}$$

Nota: Qualora il ciclo tecnologico di un prodotto preveda più passaggi sullo stesso reparto (es. Albero P01 sul Tornio passa due volte), il calcolo somma i fabbisogni specifici di ciascun passaggio. Esempio (P01 su TORNIO - Anno 1):

$$M_{TOR,P01} = \frac{8884,01 \cdot 4,5}{211200} + \frac{8262,13 \cdot 3,2}{211200} = 0,1893 + 0,1252 = 0,3145$$

Per ottenere il numero di macchine ideali basterà quindi sommare il numero di macchine appena calcolato per singolo prodotto ed otterremo il numero totale ideale per singola lavorazione:

$$M'_j = \sum_{i=1}^m M_{ij}$$

- Calcolo del numero intero di macchine e relativo coefficiente di utilizzo per reparto**

Per ottenere il numero di macchine reali è sufficiente arrotondare per eccesso il valore ideale precedentemente trovato:

$$M_j = [M']$$

Si procede ora a determinare il coefficiente di utilizzo teorico nel seguente modo:

$$Ut_j = \frac{M'_j}{M_j}$$

Per poi determinare quello reale:

$$U_{rj} = U_{tj} \cdot k_{4j}$$

Tabelle riassuntive dati ottenuti:

ANNO 1												
Reparto	P01	P02	P03	P06	P08	P09	M' _j (TOT)	M _j (TOT)	<i>U</i> _{teorico}	<i>U</i> _{teorico} [%]	<i>U</i> _{reale}	<i>U</i> _{reale} [%]
TOR	0,3145	0,2311	/	/	0,2984	0,7381	1,5821	2	0,7911	79,11	0,3560	35,60
FRE	0,1147	0,1614	2,1206	0,3366	/	0,8835	3,6168	4	0,9042	90,42	0,3798	37,98
FOR	0,0368	0,3078	0,8121	0,2872	0,0466	0,9805	2,4710	3	0,8237	82,37	0,3789	37,89
RET	0,2094	/	0,3807	0,1167	0,2170	/	0,9238	1	0,9238	92,38	0,4157	41,57
BRO	/	/	/	/	/	0,2713	0,2713	1	0,2713	27,13	0,1139	11,39
LAV	0,0472	0,0629	0,2622	0,0482	0,0399	0,2517	0,7121	1	0,7121	71,21	0,3418	34,18
CON	0,0650	0,0974	0,3248	0,0747	0,0823	0,3465	0,9907	1	0,9907	99,07	0,4458	44,58

ANNO 2												
Reparto	P01	P02	P03	P06	P08	P09	M' _j (TOT)	M _j (TOT)	<i>U</i> _{teorico}	<i>U</i> _{teorico} [%]	<i>U</i> _{reale}	<i>U</i> _{reale} [%]
TOR	0,3774	0,3081	/	/	0,3612	1,1072	2,1539	3	0,7180	71,80	0,3231	32,31
FRE	0,1377	0,2151	2,5447	0,4098	/	1,3253	4,6326	5	0,9265	92,65	0,3891	38,91
FOR	0,0442	0,4104	0,9745	0,3497	0,0564	1,4708	3,3060	4	0,8265	82,65	0,3802	38,02
RET	0,2513	/	0,4568	0,1421	0,2627	/	1,1129	2	0,5565	55,65	0,2504	25,04
BRO	/	/	/	/	/	0,4069	0,4069	1	0,4069	40,69	0,1709	17,09
LAV	0,0566	0,0839	0,3147	0,0587	0,0482	0,3776	0,9397	1	0,9397	93,97	0,4511	45,11
CON	0,0780	0,1299	0,3898	0,0909	0,0996	0,5197	1,3079	2	0,6540	65,40	0,2943	29,43

ANNO 3												
Reparto	P01	P02	P03	P06	P08	P09	M' _j (TOT)	M _j (TOT)	<i>U</i> _{teorico}	<i>U</i> _{teorico} [%]	<i>U</i> _{reale}	<i>U</i> _{teorico} [%]
TOR	0,4822	0,4083	/	/	0,4555	1,2918	2,6378	3	0,8793	87,93	0,3957	39,57
FRE	0,1759	0,2851	3,8171	0,5122	/	1,5462	6,3365	7	0,9052	90,52	0,3802	38,02
FOR	0,0564	0,5438	1,4617	0,4371	0,0712	1,7160	4,2862	5	0,8572	85,72	0,3943	39,43
RET	0,3211	/	0,6853	0,1777	0,3312	/	1,5152	2	0,7576	75,76	0,3409	34,09
BRO	/	/	/	/	/	0,4747	0,4747	1	0,4747	47,47	0,1994	19,94
LAV	0,0724	0,1112	0,4720	0,0734	0,0608	0,4405	1,2303	2	0,6152	61,52	0,2953	29,53
CON	0,0996	0,1722	0,5847	0,1137	0,1256	0,6063	1,7021	2	0,8511	85,11	0,3830	38,30

- **Calcolo del fabbisogno di operatori**

L'assegnazione delle risorse umane si basa sulla seguente formula generale teorica che lega i volumi di produzione ai tempi richiesti:

$$O_{ij} = \frac{Q_{ij} \cdot t_{OPij}}{N_{ij}}$$

dove t_{OPij} è il tempo effettivo dell'operatore, tenuto conto delle inefficienze dovute a pause fisiologiche, affaticamento e normali cali di attenzione durante il turno.

Tuttavia, i tempi indicati nella tabella iniziale, rappresentano il tempo effettivo di lavorazione della sola macchina (Run).

Si considera che le macchine siano automatizzate, con un tempo di carico/scarico del tutto trascurabile rispetto al tempo di lavorazione, dove l'operatore si occupa solo della loro supervisione. Si assume quindi un tempo nominale (ideale) di 0,5 min/pz, pari al tempo di spostamento; la formula riadattata alle ipotesi fatte assume quindi la seguente forma:

$$O_{ij} = \frac{Q_{ij} \cdot t_{travel}}{N_{ij} \cdot \eta_{op}}$$

Dove:

- N_{ij} (Tempo disponibile): 3520 h/anno * 60 = 211.200 (min/anno).
- η_{op} (Rendimento Operatore): ipotizzato all'85%.
- Denominatore totale: 211.200 (min/anno) * 0,85 = 179.520 (min/anno).

Fabbisogno Teorico e Reale (Operatori Dedicati): Si determina ora il numero di operatori totale necessario in un singolo reparto j , sommando il fabbisogno generato da tutti gli m prodotti che vi vengono lavorati:

$$O'_j = \sum_{i=1}^m O_{ij}$$

Per determinare quindi il numero reale si arrotonda all'intero superiore il valore ottenuto del singolo reparto:

$$O_j = \lceil O'_j \rceil$$

Infine, per ricavare il numero totale di operatori fisici necessari nell'intero stabilimento, si sommano i valori interi di tutti gli n reparti:

$$O_{TOT} = \sum_{j=1}^n O_j$$

ANNO 1								
Reparto	P01	P02	P03	P06	P08	P09	O _j (TOT)	O _j (TOT)
<i>TOR</i>	0,0478	0,0453	/	/	0,0560	0,1241	0,2732	1
<i>FRE</i>	0,0241	0,0475	0,2689	0,0792	/	0,1299	0,5496	1
<i>FOR</i>	0,0216	0,0840	0,1465	0,0674	0,0274	0,2300	0,5769	1
<i>RET</i>	0,0224	/	0,0746	0,0343	0,0284	/	0,1597	1
<i>BRO</i>	/	/	/	/	/	0,1064	0,1064	1
<i>LAV</i>	0,0185	0,0370	0,0617	0,0284	0,0234	0,0987	0,2677	1
<i>CON</i>	0,0191	0,0382	0,0637	0,0293	0,0242	0,1019	0,2764	1

ANNO 2								
Reparto	P01	P02	P03	P06	P08	P09	O _j (TOT)	O _j (TOT)
<i>TOR</i>	0,0573	0,0604	/	/	0,0677	0,1861	0,3715	1
<i>FRE</i>	0,0289	0,0633	0,3227	0,0964	/	0,1949	0,7062	1
<i>FOR</i>	0,0260	0,1120	0,1758	0,0820	0,0332	0,3451	0,7741	1
<i>RET</i>	0,0269	/	0,0896	0,0418	0,0343	/	0,1926	1
<i>BRO</i>	/	/	/	/	/	0,1596	0,1596	1
<i>LAV</i>	0,0222	0,0494	0,0740	0,0346	0,0284	0,1481	0,3567	1
<i>CON</i>	0,0229	0,0510	0,0764	0,0357	0,0293	0,1529	0,3682	1

ANNO 3								
Reparto	P01	P02	P03	P06	P08	P09	O _j (TOT)	O _j (TOT)
<i>TOR</i>	0,0732	0,0801	/	/	0,0854	0,2171	0,4558	1
<i>FRE</i>	0,0370	0,0838	0,4840	0,1205	/	0,2274	0,9527	1
<i>FOR</i>	0,0332	0,1484	0,2637	0,1025	0,0419	0,4026	0,9923	1
<i>RET</i>	0,0343	/	0,1344	0,0523	0,0433	/	0,2643	1
<i>BRO</i>	/	/	/	/	/	0,1862	0,1862	1
<i>LAV</i>	0,0284	0,0654	0,1111	0,0432	0,0358	0,1728	0,4567	1
<i>CON</i>	0,0293	0,0675	0,1146	0,0446	0,0369	0,1783	0,4712	1

Fabbisogno Operatori RIEPILOGO TRIENNALE						
Reparto	Anno 1 (O'_j)	Anno 1 (O_j)	Anno 2 (O'_j)	Anno 2 (O_j)	Anno 3 (O'_j)	Anno 3 (O_j)
<i>TOR</i>	0,2732	1	0,3715	1	0,4558	1
<i>FRE</i>	0,5496	1	0,7062	1	0,9527	1
<i>FOR</i>	0,5769	1	0,7741	1	0,9923	1
<i>RET</i>	0,1597	1	0,1926	1	0,2643	1
<i>BRO</i>	0,1064	1	0,1596	1	0,1862	1
<i>LAV</i>	0,2677	1	0,3567	1	0,4567	1
<i>CON</i>	0,2764	1	0,3682	1	0,4712	1
$O_{TOT} = \sum O_j$		7		7		7

- Identificazione del reparto Collo di bottiglia**

Il reparto che rappresenta il collo di bottiglia (CDB) del sistema in esame è quello con il coefficiente di utilizzo teorico U_t più elevato. Più l' U_t si avvicina ad 1 (al 100%), maggiore è la saturazione e minore è il margine disponibile dal reparto per assorbire variabilità, guasti o ritardi, dettando di fatto il ritmo dell'intero impianto. Il collo di bottiglia è dinamico e può cambiare da un anno all'altro a causa dell'aumento dei volumi e dell'acquisto di nuovi macchinari. Per ogni anno viene quindi evidenziato il reparto collo di bottiglia dell'impianto.

Anno 1: Banco Controllo CMM (CON)

Utilizzo Teorico: 99,07%

Macchine installate (M_j): 1

Dinamica: Nel primo anno, il Banco Controllo è quasi completamente saturo (99,07%), diventando il principale collo di bottiglia. Anche la Rettifica è molto utilizzata, con una saturazione del 92,38%.

Anno 2: Lavaggio Industriale (LAV)

Utilizzo Teorico: 93,98%

Macchine installate (M_j): 1

Dinamica: Nell'Anno 2, il fabbisogno del Controllo supera la capacità di una sola macchina, rendendo necessario l'acquisto di una seconda e facendone crollare l'utilizzo al 65,40%. Il Lavaggio, invece, raggiunge circa il 94% di saturazione e diventa il principale collo di bottiglia.

Anno 3: Fresatrice CNC (FRE)

Utilizzo Teorico: 90,52%

Macchine installate (M_j): 7

Dinamica: Nell'ultimo anno, l'aumento dei volumi richiede nuove macchine in quasi tutti i reparti. La Fresatura diventa il reparto più sfruttato, con 6,33 macchine richieste su 7 disponibili, mentre il Lavaggio passa da 1 a 2 macchine, con una saturazione del 61,52%.

Vengono riportati i dati ottenuti nella seguente tabella:

Annualità	Reparto Collo di Bottiglia	Utilizzo Teorico (U_t)	Utilizzo Reale (U_r)
Anno 1	CON (Controllo)	99,07%	44,58%
Anno 2	LAV (Lavaggio)	93,98%	45,11%
Anno 3	FRE (Fresatura)	90,52%	38,02%

- **Calcolo del Costo al Pezzo**

Per determinare il costo di produzione unitario nel layout a reparti (Job Shop), è necessario calcolare un costo orario per ciascun centro di lavoro, basato sui costi di ammortamento dei macchinari e sul costo della manodopera necessaria. Trattandosi di un'analisi triennale, il costo unitario dei prodotti non è fisso, ma varia di anno in anno in funzione della saturazione delle diverse risorse (il numero di macchinari e operatori installati cambia per far fronte all'aumento dei volumi).

I parametri economici mancanti sono stati integrati con le seguenti assunzioni:

- **Vita Utile Macchinari:** Si ipotizza un ammortamento in 10 anni a quote costanti.
- **Costo Manodopera (C_{op}):** Il costo aziendale di un operatore è di 35.000 €/anno.

Considerando un contratto standard (220 giorni/anno * 8 ore/turno = 1760 ore/anno lavorabili dal singolo dipendente), il costo orario della manodopera risulta:

$$c_{op} = \frac{35.000 \left[\frac{\text{€}}{\text{anno}} \right]}{1760 \left[\frac{\text{ore}}{\text{anno}} \right]} = 19,89 \text{ [€/h]}$$

Costo orario di ammortamento: Per ogni tipologia di macchina j , si rapporta il costo di acquisto alle ore totali di vita utile dell'impianto:

$$c_{mj} = \frac{\text{Costo di Acquisto}_j}{10 \text{ anni} \cdot 3520 \text{ [h/anno]}}$$

Si ottengono dunque i seguenti risultati:

- **TOR:** 85.000/35.200 = 2,41 €/h
- **FRE:** 110.000/35.200 = 3,13 €/h
- **FOR:** 55.000/35.200 = 1,56 €/h
- **RET:** 140.000/35.200 = 3,98 €/h
- **BRO:** 75.000/35.200 = 2,13 €/h
- **LAV:** 35.000/35.200 = 0,99 €/h
- **CON:** 95.000/35.200 = 2,70 €/h

Costo del Reparto e Costo al Pezzo: Trattandosi di macchine automatizzate, un operatore può presidiare più macchine contemporaneamente ($M_j > O_j$). Per ottenere il costo unitario, la metodologia analitica si articola in tre passaggi fondamentali.

Al fine di illustrare il procedimento, si riportano di seguito le formule generali applicate ad un singolo caso esemplificativo: il prodotto P01 in lavorazione nel reparto di Tornitura (TOR) durante l'Anno 1.

- a. **Costo Orario complessivo del Reparto (C_R):** Si somma il costo orario di tutte le macchine installate (M_j) e di tutti gli operatori assegnati al reparto (O_j) in quel preciso anno:

$$C_R = (M_j \cdot c_{mj}) + (O_j \cdot c_{op})$$

Costi Base Orari per Centro di Lavoro (Tariffe iniziali)				
Stadio (Reparto j)	Valore economico macchinario [€]	c_{mj} [€/h]	c_{op} [€/h]	C_j (base) [€/h]
TOR	85.000	2,41	19,89	22,30
FRE	110.000	3,13	19,89	23,02
FOR	55.000	1,56	19,89	21,45
RET	140.000	3,98	19,89	23,87
BRO	75.000	2,13	19,89	22,02
LAV	35.000	0,99	19,89	20,88
CON	95.000	2,70	19,89	22,59

Esempio applicativo (P01 su TOR - Anno 1): Il reparto richiede $M_j = 2$ torni e $O_j = 1$ operatore. Ipotizzando un costo macchina $c_{mj} = 2,41$ €/h e un costo operatore $c_{op} = 19,89$ €/h:

$$C_R = (2 \cdot 2,41) + (1 \cdot 19,89) = 24,71 \text{ €/h}$$

- b. **Tempo Ciclo Lordo (t_c) e Produttività Oraria di Reparto (Q_R):** Si calcola il tempo di ciclo lordo (t_c) dividendo la somma dei tempi netti (t_{ij}) per l'efficienza globale della macchina (η_j). Successivamente si ricava la produttività oraria dell'intero reparto:

$$t_c = \frac{\sum t_{ij}}{\eta_j} \quad \rightarrow \quad Q_R = M_j \cdot \frac{60}{t_c}$$

Esempio applicativo (P01 su TOR - Anno 1): Il prodotto P01 richiede due passaggi al tornio per un tempo netto totale $t_{ij} = 7,7$ min/pz. Con un rendimento $\eta = 0,3440$, si ottiene:

$$t_c = 7,7 / 0,3440 = 22,38 \text{ min/pz} \quad Q_R = 2 \cdot (60 / 22,38) = 5,36 \text{ pz/h}$$

- c. **Costo unitario al pezzo (c_{ij}) e Costo Totale:** Il costo unitario relativo ad una singola operazione (es. la sola Tornitura) si ottiene dividendo il costo orario del reparto per la sua produttività oraria effettiva:

$$c_{ij} = \frac{C_R}{Q_R}$$

Esempio applicativo (P01 su TOR - Anno 1):

$$c_{P01, TOR} = 24,71 / 5,36 = 4,61 \text{ €/pz}$$

Il costo finale di produzione di un prodotto (C_{TOT}) si calcola invece come la sommatoria dei costi unitari di tutte le fasi attraversate nel suo ciclo tecnologico.

Esempio applicativo (Costo finale P01 - Anno 1):

$$C_{TOT} = c_{TOR} + c_{FRE} + c_{FOR} + c_{RET} + c_{LAV} + c_{CON}$$

$$C_{TOT} = 4,61 + 1,24 + 0,42 + 7,21 + 1,42 + 2,30 = 17,20 \text{ €/pz}$$

Risultati triennali (Tabelle di sintesi): Il modello analitico sopra descritto è stato applicato sistematicamente all'intero mix di prodotti per i tre anni del piano di vendita. I risultati globali sono riportati nelle tabelle riassuntive sottostanti.

ANNO 1 Costi di Produzione (€/pz)								
Prodotto	TOR	FRE	FOR	RET	BRO	LAV	CON	Costo Totale (€/pz)
P01	4,61	1,24	0,42	7,21	/	1,42	2,30	17,20
P02	1,80	0,89	1,79	/	/	0,95	1,72	7,15
P03	/	6,22	2,70	3,93	/	2,37	3,44	18,66
P06	/	2,22	2,08	2,62	/	0,95	1,72	9,59
P08	3,77	/	0,42	5,90	/	0,95	2,30	13,34
P09	2,10	1,78	2,08	/	1,62	1,42	2,30	11,30

ANNO 2 Costi di Produzione (€/pz)								
Prodotto	TOR	FRE	FOR	RET	BRO	LAV	CON	Costo Totale (€/pz)
P01	3,37	1,09	0,33	4,20	/	1,42	1,28	11,69
P02	1,31	0,78	1,43	/	/	0,95	0,96	5,43
P03	/	5,45	2,16	2,29	/	2,37	1,93	14,20
P06	/	1,95	1,66	1,53	/	0,95	0,96	7,05
P08	2,76	/	0,33	3,44	/	0,95	1,28	8,76
P09	1,53	1,56	1,66	/	1,62	1,42	1,28	9,07

ANNO 3 Costi di Produzione (€/pz)								
Prodotto	TOR	FRE	FOR	RET	BRO	LAV	CON	Costo Totale (€/pz)
P01	3,37	0,92	0,28	4,20	/	0,74	1,28	10,79
P02	1,31	0,65	1,21	/	/	0,50	0,96	4,63
P03	/	4,58	1,83	2,29	/	1,24	1,93	11,87
P06	/	1,64	1,41	1,53	/	0,50	0,96	6,04
P08	2,76	/	0,28	3,44	/	0,50	1,28	8,26
P09	1,53	1,31	1,41	/	1,62	0,74	1,28	7,89

I dati evidenziano che, nel corso del triennio, il costo unitario totale diminuisce.

In questo specifico scenario, infatti, per far fronte all'aumento dei volumi, l'impianto viene potenziato con l'acquisto di nuovi macchinari (incrementando in modo proporzionale la produttività Q_R), ma il numero di operatori per reparto rimane bloccato ad 1 sola unità.

Di conseguenza, il costo fisso della manodopera sul singolo pezzo prodotto si riduce significativamente.

FASE 1.2 - CLASSIFICAZIONE DEI PRODOTTI

L'obiettivo di questa fase è valutare la fattibilità di una transizione da un layout funzionale (Job Shop) ad un layout a celle di produzione. A tal fine, è necessario raggruppare i prodotti in famiglie in base alle affinità dei loro cicli tecnologici e assegnare a ciascun gruppo i macchinari dedicati.

Matrice di incidenza e pulizia dei dati: L'analisi si basa sulla matrice binaria Prodotti-Macchine, dove si inserisce il valore 1 se un prodotto necessita di una lavorazione in un determinato reparto, e 0 altrimenti.

Prima di applicare gli algoritmi di clustering, i reparti di Lavaggio (LAV) e Controllo (CON) sono stati esclusi dall'indagine; essendo infatti operazioni universali di fine linea richieste dalla totalità dei prodotti, la loro inclusione ridurrebbe il potere discriminante dell'algoritmo sulle lavorazioni e potrebbe rendere più difficile individuare le reali somiglianze. Il reparto Foratura (FOR) è stato invece mantenuto in quanto operazione centrale nei cicli produttivi, evitando l'interruzione nella continuità del flusso.

<i>Matrice iniziale Completa</i>							
Prodotto	TOR	FRE	FOR	RET	BRO	LAV	CON
P01	1	1	1	1	0	1	1
P02	1	1	1	0	0	1	1
P03	0	1	1	1	0	1	1
P06	0	1	1	1	0	1	1
P08	1	0	1	1	0	1	1
P09	1	1	1	0	1	1	1

<i>Matrice iniziale Ridotta</i>					
Prodotto	TOR	FRE	FOR	RET	BRO
P01	1	1	1	1	0
P02	1	1	1	0	0
P03	0	1	1	1	0
P06	0	1	1	1	0
P08	1	0	1	1	0
P09	1	1	1	0	1

Applicazione Algoritmo ROC

Il metodo consiste nel riordinare iterativamente la matrice assegnando pesi binari decrescenti (2^n) alle righe e alle colonne.

Calcolo dei pesi per riga (DE_i) e riordino: Si parte dalla matrice di incidenza ridotta a 5 colonne. Si assegnano i pesi binari alle colonne (BW_j) procedendo da sinistra verso destra. Per ogni prodotto si sommano poi i pesi delle colonne in cui compare 1, ottenendo così il relativo valore decimale per ogni riga (DE_i).

Pesi colonne (BW_j): TOR ($2^4 = 16$), FRE ($2^3 = 8$), FOR ($2^2 = 4$), RET ($2^1 = 2$), BRO ($2^0 = 1$).

Prodotto	TOR	FRE	FOR	RET	BRO	Riga Equivalente (DE_i)
P01	1	1	1	1	0	$16 + 8 + 4 + 2 + 0 = 30$
P02	1	1	1	0	0	$16 + 8 + 4 + 0 + 0 = 28$
P03	0	1	1	1	0	$0 + 8 + 4 + 2 + 0 = 14$
P06	0	1	1	1	0	$0 + 8 + 4 + 2 + 0 = 14$
P08	1	0	1	1	0	$16 + 0 + 4 + 2 + 0 = 22$
P09	1	1	1	0	1	$16 + 8 + 4 + 0 + 1 = 29$

Si riordinano quindi le righe (i prodotti) in senso decrescente rispetto ai valori DE_i appena trovati. Il nuovo ordine è: P01, P09, P02, P08, P03, P06.

Calcolo dei pesi per colonna (D_j) e riordino: Sulla matrice riordinata, si inverte il procedimento; si assegnano i pesi binari alle righe (BW_i) dall'alto verso il basso e si calcola l'equivalente decimale per ogni colonna (D_j).

Pesi righe (BW_i): P01 ($2^5 = 32$), P09 ($2^4 = 16$), P02 ($2^3 = 8$), P08 ($2^2 = 4$), P03 ($2^1 = 2$), P06 ($2^0 = 1$).

Prodotto	Peso Riga (Bw_i)	TOR	FRE	FOR	RET	BRO
P01	32	1	1	1	1	0
P09	16	1	1	1	0	1
P02	8	1	1	1	0	0
P08	4	1	0	1	1	0
P03	2	0	1	1	1	0
P06	1	0	1	1	1	0
	Equivalente Colonna (D_j)	60	59	63	39	16

Infine, si riordinano le colonne (i reparti) da sinistra verso destra, in ordine decrescente rispetto ai valori D_j ottenuti (FOR, TOR, FRE, RET, BRO), ottenendo così la seguente configurazione finale del clustering.

	FOR	TOR	FRE	RET	BRO
P01	1	1	1	1	0
P09	1	1	1	0	1
P02	1	1	1	0	0
P08	1	1	0	1	0
P03	1	0	1	1	0
P06	1	0	1	1	0

Conclusioni dell'Analisi ROC e Individuazione della cella: Osservando la matrice ROC finale, si nota un cluster dominante nella porzione in alto a sinistra. Questo blocco 4×3 ci fornisce la base di partenza per la nostra cella produttiva:

- **Prodotti:** P01, P09, P02, P08
- **Macchinari:** FOR, TOR, FRE

La logica dietro questa scelta è la seguente:

Il Tornio (TOR) e la Foratrice (FOR) sono impiegati in lavorazioni comuni a tutti e quattro i prodotti, mentre la Fresa (FRE) serve solo a tre di essi.

Il fatto che il P08 non richieda la fresatura non crea problemi al flusso; all'interno della cella il pezzo farà semplicemente un *bypass*, passando direttamente dal Tornio alla Foratrice.

Si decide invece di tener fuori la rettifica (RET) e la brocciatrice (BRO).

La Rettifica serve solo a due prodotti, la Brocciatrice ad uno solo; inserirle nella cella significherebbe tenerle inutilizzate per gran parte del tempo, abbassando l'efficienza complessiva; resteranno quindi nel layout a reparti (Job Shop).

Di conseguenza, anche i prodotti P03 e P06 vengono scartati e gestiti nel Job Shop, dato che i loro cicli tecnologici sono troppo diversi dal gruppo principale.

Per avere un'ulteriore conferma matematica della validità di questa cella, si procede ora con la verifica tramite il metodo SLCA.

Applicazione Algoritmo SLCA

Questo metodo raggruppa i prodotti in base al Coefficiente di Somiglianza di Jaccard (S_{ij}).

La similarità tra due prodotti P_i e P_j si calcola infatti con:

$$S_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_{ij} + b_{ij} + c_{ij}}$$

dove:

- a_{ij} = numero di macchinari utilizzati da entrambi i prodotti;
- b_{ij} = numero di macchinari utilizzati solo dal primo prodotto;
- c_{ij} = numero di macchinari utilizzati solo dal secondo prodotto.

Coerentemente con quanto assunto nel metodo ROC, l'analisi si concentra sulle sole lavorazioni primarie (TOR, FRE, FOR, RET, BRO), escludendo i servizi di fine linea condivisi da tutti, partendo dalla medesima matrice operativa ridotta.

Calcolo delle similarità e formazione dei gruppi: Si costruisce la prima matrice calcolando l'indice di Jaccard per tutte le coppie di prodotti. Il procedimento consiste poi nell'unire passo dopo passo i prodotti (o i gruppi) con la similarità più alta. Ad ogni nuova unione si ricalcolano i valori della matrice, scegliendo di mantenere sempre il coefficiente più alto tra quelli disponibili.

	P01	P02	P03	P06	P08	P09
P01	-	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{5}$
P02		-	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$
P03			-	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{5}$
P06				-	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{5}$
P08					-	$\frac{2}{5}$
P09						-

Formazione del 1° gruppo: Il valore più alto è 1 e si trova tra P03 e P06.

I due prodotti vengono quindi raggruppati nel primo gruppo: [P03_06].

Ora si ricalcolano le similarità tra i singoli prodotti e il nuovo gruppo [P03_06], ricavando la seguente matrice:

	P01	P02	P03	P06	P03 P06
P01	-	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{3}{4}$
P02		-	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{2}$
P08			-	$\frac{2}{5}$	$\frac{1}{2}$
P09				-	$\frac{2}{5}$
P03 P06					-

Si forma così il secondo gruppo: [P02_09].

	P01	P08	P03 P06	P02 P09
P01	-	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$
P08		-	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
P03 P06			-	$\frac{1}{2}$
P02 P09				-

Si uniscono P01 e P08 poiché sono gli unici due prodotti che, oltre alle lavorazioni principali, utilizzano anche la Rettifica (RET).

Si forma così il terzo gruppo: [P01_08] e si ottiene la seguente matrice:

	P01 P08	P02 P09	P03 P06
P01 P08	-	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$
P02 P09		-	$\frac{1}{2}$
P03 P06			-

Analisi finale e scelta della cella: Leggendo i risultati dell'ultima matrice, si nota che il gruppo [P01_08] mantiene una buona affinità ($\frac{3}{4}$) con entrambi gli altri due cluster.

Tuttavia, il dato davvero rilevante è la similarità diretta tra il gruppo [P02_09] e il gruppo [P03_06]: il valore crolla infatti ad $\frac{1}{2}$.

Questo conferma matematicamente la scarsa somiglianza tra queste due famiglie, dimostrando che unirle nella stessa cella non sarebbe conveniente.

Si decide quindi di estrarre e unire i gruppi [P01_08] e [P02_09], dato che condividono saldamente le lavorazioni principali di Tornitura e Foratura.

Il gruppo [P03_06] viene invece escluso e mantenuto nel Job Shop; se venisse inserito nella cella costringerebbe ad includere anche la Rettifica (RET), un macchinario che verrebbe usato limitatamente, abbassando l'efficienza globale.

La cella candidata definitiva è quindi confermata: **P01, P02, P08 e P09**.

Il metodo SLCA convalida l'intuizione ottenuta con il ROC, confermando sia la famiglia di prodotti sia le macchine necessarie (TOR, FRE, FOR), escludendo la RET.

Applicazione Algoritmo DCA

Si applica ora, come ulteriore verifica dei risultati ottenuti, un terzo metodo, il DCA (Direct Clustering Algorithm).

Il metodo riordina la matrice in modo da avvicinare i prodotti e le macchine che hanno più lavorazioni in comune.

Procedura di riordino: Il primo passo consiste nel sommare i valori "1" presenti in ogni colonna (Σ_C , che indica quanti prodotti utilizzano quella macchina) e in ogni riga (Σ_R , che indica quante macchine sono necessarie per quel prodotto).

Prodotto	TOR	FRE	RET	BRO	FOR	Somma Riga (Σ_R)
P01	1	1	1	0	1	4
P02	1	1	0	0	1	3
P03	0	1	1	0	1	3
P06	0	1	1	0	1	3
P08	1	0	1	0	1	3
P09	1	1	0	1	1	4
Somma Colonna (Σ_C)	4	5	4	1	6	

Successivamente, si riordinano le colonne (le macchine) da sinistra verso destra in base a Σ_C , dalla più utilizzata alla meno utilizzata.

Essendoci una parità di valore (4) tra TOR e RET, si mantiene l'ordine iniziale, ottenendo la sequenza: FOR (6), FRE (5), TOR (4), RET (4), BRO (1).

Prodotto	FOR	FRE	TOR	RET	BRO	Somma Riga (Σ_R)
P01	1	1	1	1	0	4
P02	1	1	1	0	0	3
P03	1	1	0	1	0	3
P06	1	1	0	1	0	3
P08	1	0	1	1	0	3
P09	1	1	1	0	1	4

Infine, si riordinano le righe spostando verso l'alto i prodotti con Σ_R maggiore.

In caso di parità, la regola del DCA prevede di allineare a sinistra i valori "1" per evidenziare visivamente la macro-famiglia.

Il risultato di questo riordino incrociato è la seguente matrice finale:

Prodotto	FOR	FRE	TOR	RET	BRO
P01	1	1	1	1	0
P09	1	1	1	0	1
P02	1	1	1	0	0
P08	1	0	1	1	0
P03	1	1	0	1	0
P06	1	1	0	1	0

Analisi della matrice e conclusioni finali: Dalla lettura della matrice finale del DCA, si nota subito che i raggruppamenti emersi sono in perfetto accordo con quelli già individuati dai metodi precedenti. Le macchine FOR e FRE si confermano come lavorazioni base condivise dalla maggior parte dei prodotti.

Il Torno (TOR) fa nuovamente da divisore: i prodotti che lo utilizzano (P01, P09, P02, P08) si compattano in un blocco ben definito, mentre P03 e P06, non utilizzandolo, risultano legati maggiormente alla Rettifica (RET).

La matrice evidenzia quindi due blocchi distinti:

- Gruppo principale: P01, P09, P02, P08 (legati a FOR, FRE e TOR).
- Gruppo separato: P03, P06 (legati alla RET).

A questo punto, la scelta più logica ed efficiente per la creazione della cella produttiva ricade sull'estrazione del gruppo principale, assegnandogli le macchine FOR, TOR e FRE.

I prodotti P03 e P06 vengono lasciati nel Job Shop.

Questa decisione permette infatti di tenere la Rettifica fuori dalla cella, evitando di inserirvi un macchinario che verrebbe usato in modo marginale e ne abbasserebbe la saturazione complessiva.

Tutti e tre i metodi hanno restituito esattamente lo stesso risultato: l'identificazione di una macro-famiglia composta dai prodotti **P01**, **P02**, **P08** e **P09** supportata dalle macchine **FOR**, **TOR** e **FRE**. Questa totale convergenza conferma definitivamente che la configurazione scelta è la suddivisione più corretta e adatta agli attuali cicli di lavorazione dello stabilimento.

FASE 1.3 - DIMENSIONAMENTO DELLA CELLA PRODUTTIVA

I seguenti calcoli vengono effettuati per ciascuna delle tre annualità del piano di vendita.

- **Calcolo della produttività della cella**

La produttività della cella indica il numero di pezzi che l'impianto deve produrre ogni ora per riuscire a soddisfare la domanda annua prevista.

Si calcola dividendo la somma dei volumi annui dei prodotti della cella (P01, P02, P08, P09) per le ore lavorative annue disponibili ($H_{anno} = 3520$ h/anno).

La formula è:

$$Q_{cella} = \frac{\sum Q_{annuo,i}}{H_{anno}}$$

Anno 1

Volumi: $2250 + 4500 + 2850 + 12.000 = 21.600$ pz/anno

Produttività richiesta: $21.600/3520 = 6,136$ pz/h

Anno 2

Volumi: $2700 + 6000 + 3450 + 18.000 = 30.150$ pz/anno

Produttività richiesta: $30.150/3520 = 8,565$ pz/h

Anno 3

Volumi: $3450 + 7950 + 4350 + 21.000 = 36.750$ pz/anno

Produttività richiesta: $36.750/3520 = 10,440$ pz/h

L'analisi mostra una forte crescita della produttività, che passa da circa 6 (pz/h) nel primo anno ad oltre 10 (pz/h) nel terzo.

- **Calcolo del numero di macchine nella cella e coefficiente di utilizzo complessivo della cella**

Per la determinazione del numero teorico di macchine necessarie (M'_j) e del conseguente numero di macchine fisiche da installare (M_j), si applicano le medesime formule e logiche di arrotondamento già introdotte nella fase di dimensionamento del Job Shop.

L'utilizzo complessivo della cella (U_{cella}) si calcola come rapporto tra la somma dei fabbisogni teorici e il numero di macchine realmente installate.

$$U_{cella} = \frac{\sum M'_j}{\sum M_j}$$

Di seguito sono riportati i calcoli ottenuti, usando i tempi ciclo espressi in [min/pz].

ANNO 1 (Volumi di vendita: P01 = 2250 P02 = 4500 P08 = 2850 P09 = 12000)				
Macchinario	Tempo Ciclo P01, P02, P08, P09 (min/pz)	Fabbisogno teorico (M')	Macchine Reali (M)	Utilizzo Stadio
Tornio (TOR)	7,7 3,0 6,3 3,5	0,4298	1	42,98%
Fresa (FRE)	2,8 2,0 0,0 4,0	0,2997	1	29,97%
Foratrice (FOR)	1,0 4,3 1,0 5,0	0,3998	1	39,98%
TOTALE CELLA		$\sum M' = 1,1293$	$\sum M = 3$	$U_{cella} = 37,64\%$

ANNO 2 (Volumi di vendita: P01 = 2700 P02 = 6000 P08 = 3450 P09 = 18000)				
Macchinario	Tempo Ciclo P01, P02, P08, P09 (min/pz)	Fabbisogno teorico (M')	Macchine Reali (M)	Utilizzo Stadio
Tornio (TOR)	7,7 3,0 6,3 3,5	0,5849	1	58,49%
Fresa (FRE)	2,8 2,0 0,0 4,0	0,4335	1	43,35%
Foratrice (FOR)	1,0 4,3 1,0 5,0	0,5774	1	57,74%
TOTALE CELLA		$\sum M' = 1,5958$	$\sum M = 3$	$U_{cella} = 53,19\%$

ANNO 3 (Volumi di vendita: P01 = 3450 P02 = 7950 P08 = 4350 P09 = 21000)				
Macchinario	Tempo Ciclo P01, P02, P08, P09 (min/pz)	Fabbisogno teorico (M')	Macchine Reali (M)	Utilizzo Stadio
Tornio (TOR)	7,7 3,0 6,3 3,5	0,7165	1	71,65%
Fresa (FRE)	2,8 2,0 0,0 4,0	0,5188	1	51,88%
Foratrice (FOR)	1,0 4,3 1,0 5,0	0,696	1	69,60%
TOTALE CELLA		$\sum M' = 1,9313$	$\sum M = 3$	$U_{cella} = 64,37\%$

- **Verifica del superamento della soglia di utilizzo del 60% e determinazione del momento di convenienza per la transizione**

Dai dati riportati nelle tabelle si osserva che l'utilizzo della cella cresce dal 37,64% al 64,37%. Si verifica quindi che il coefficiente di utilizzo cresce progressivamente e supera la soglia target del 60% per la prima volta durante il terzo anno del piano di vendita. Sulla base di questo dato, si determina che il momento di convenienza ottimale per effettuare la transizione dal Job Shop al layout a Cella si colloca tra la fine del secondo e l'inizio del terzo anno. Anticipare il passaggio prima di questa data comporterebbe una bassa saturazione delle risorse, rendendo l'impianto inefficiente.

- **Modifiche alla parte di produzione a reparti (Job Shop)**

L'introduzione della Cella 1 porta ad avere un layout di tipo ibrido: la cella gestisce i prodotti P01, P02, P08 e P09, mentre il Job Shop rimane attivo per i restanti P03 e P06 e per le lavorazioni di finitura dei pezzi in uscita dalla cella. Di seguito le modifiche per ogni reparto:

- TOR: viene eliminato dal Job Shop, poiché viene utilizzato esclusivamente all'interno della cella.

- FOR e FRE: vengono divisi tra cella e Job Shop, comportando una possibile variazione del numero complessivo di macchine necessarie.
- RET e BRO: rimangono nei reparti tradizionali. Oltre a lavorare i pezzi del Job Shop, gestiscono anche i prodotti in uscita dalla cella che richiedono una lavorazione finale.
- LAV e CON: rimangono invariati rispetto al layout originale.

In sintesi, il layout ibrido riduce drasticamente gli spostamenti dei materiali, ma richiede un leggero ridimensionamento del parco macchine, in particolar modo per FOR e FRE.

Ricalcolo del Fabbisogno totale di macchine nell'Anno 3 per i prodotti P03 e P06:

Prendiamo i fabbisogni teorici (M') già calcolati per P03 e P06 dalla tabella nella FASE 1.1:

- (FRE)

$$M'_{P03} = 3,8171 \quad \text{e} \quad M'_{P06} = 0,5122$$

$$\text{Totale teorico Job Shop: } 3,8171 + 0,5122 = 4,3293$$

Macchine fisiche nel Job Shop: arrotondiamo per eccesso → **5 Fresatrici**.

- (FOR)

$$M'_{P03} = 1,4617 \quad \text{e} \quad M'_{P06} = 0,4371$$

$$\text{Totale teorico Job Shop: } 1,4617 + 0,4371 = 1,8988$$

Macchine fisiche nel Job Shop: arrotondiamo per eccesso → **2 Foratrici**.

Situazione Totale dello Stabilimento (Layout Ibrido):

FRE totali: 5 (Job Shop) + 1 (Cella) = **6 Fresatrici totali**

FOR totali: 2 (Job Shop) + 1 (Cella) = **3 Foratrici totali**

La grandissima efficienza ottenuta nella cella dimostra addirittura una riduzione del numero complessivo di macchinari necessari installati nello stabilimento (le FRE totali passano da 7 a 6, le FOR passano da 5 a 3).

- **Calcolo del costo al pezzo per ogni prodotto considerando una cella manuale (servita da operatori). Costo operatore ≈ 35.000 €/anno tutto compreso.**

Costo orario della cella (C_{cella}): Il costo orario si ottiene sommando il costo dei macchinari e quello dell'operatore tramite la seguente formula:

$$C_{cella} = \sum_{j=1}^m (M_j \cdot c_{m,j}) + (O_{cella} \cdot c_{op})$$

La cella è composta da:

- 1 Tornio: 2,41 €/h
- 1 Fresatrice: 3,13 €/h
- 1 Foratrice: 1,56 €/h
- 1 operatore: 19,89 €/h

Il costo orario totale della cella è quindi:

$$C_{cella} = 2,41 + 3,13 + 1,56 + 19,89 = \mathbf{26,99 \text{ €/h}}$$

Calcolo della produttività (Q_i): I macchinari sono automatizzati e l'operatore si limita a spostarsi tra le macchine per supervisionarle, impiegando un tempo complessivo di 1,5 min. Poiché i tempi delle macchine sono molto più lunghi, riesce a servirle senza creare attese; di conseguenza, la produttività della cella dipende dalla macchina più lenta, che rappresenta il collo di bottiglia.

$$Q_i = \frac{60}{t_{c,max}} \text{ [pz/h]}$$

Calcolo del costo unitario (c_i): Il costo di produzione di ogni pezzo si ottiene dividendo il costo orario della cella per la produttività oraria del pezzo stesso:

$$c_i = \frac{C_{cella}}{Q_i} \text{ [€/pz]}$$

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva per ciascun prodotto all'interno della cella:

Prodotto	Tempi cella (TOR, FRE, FOR) [min/pz]	Macchina Collo di Bottiglia ($t_{c,max}$)	Produttività oraria (Q_i)	Costo Unitario ($c_i = C_{cella}/Q_i$)
P01	TOR: 7,7 FRE: 2,8 FOR: 1,0	Tornio (7,7 min)	7,79 pz/h	3,46 €/pz
P02	TOR: 3,0 FRE: 2,0 FOR: 4,3	Foratrice (4,3 min)	13,95 pz/h	1,93 €/pz
P08	TOR: 6,3 FRE: 0,0 FOR: 1,0	Tornio (6,3 min)	9,52 pz/h	2,83 €/pz
P09	TOR: 3,5 FRE: 4,0 FOR: 5,0	Foratrice (5,0 min)	12,00 pz/h	2,25 €/pz

- **Calcolo del costo al pezzo per ogni prodotto considerando una cella servita da un robot antropomorfo.** Costo del robot (hardware + integrazione + programmazione) $\approx$ 120.000 €/anno.

Costo orario del robot: Considerando il costo complessivo annuo e l'impiego su 2 turni, per un totale di 3520 ore lavorabili all'anno, si ricava la seguente tariffa oraria:

$$C_{robot} = \frac{120.000 \text{ €/anno}}{3520 \text{ h/anno}} = 34,09 \text{ €/h}$$

Costo orario della cella robotizzata: Sostituendo l'operatore con un robot, la voce di costo legata alla manodopera dell'operatore viene eliminata e rimpiazzata con quella del robot:

$$C_{cella_robot} = 2,41 + 3,13 + 1,56 + 34,09 = 41,19 \text{ €/h}$$

Costo unitario: La produttività della cella rimane invariata, poiché ritmo produttivo è dettato dai tempi di lavorazione delle macchine e non dal tempo di intervento dell'operatore.

Il costo unitario di ogni prodotto si ottiene quindi dividendo il costo orario della cella (41,19 €/h) per la relativa produttività oraria, ottenendo i seguenti risultati:

Prodotto	Macchina Collo di Bottiglia ($t_{c,max}$)	Produttività oraria (Q_i)	Costo Unitario ($c_i =$ $C_{cella\ robot}/Q_i$)
P01	Tornio (7,7 min)	7,79 pz/h	3,46 €/pz
P02	Foratrice (4,3 min)	13,95 pz/h	1,93 €/pz
P08	Tornio (6,3 min)	9,52 pz/h	2,83 €/pz
P09	Foratrice (5,0 min)	12,00 pz/h	2,25 €/pz

Conclusioni: In questo scenario, l'introduzione del robot non è economicamente conveniente.

Il suo costo orario (34,09 €/h) è infatti maggiore di quello dell'operatore umano (19,89 €/h), facendo aumentare il costo per pezzo, senza offrire però alcun incremento sulla produttività.

L'investimento potrebbe diventare economicamente conveniente cambiando scenario, abbattendo il costo annuo o aumentando i volumi di produzione, introducendo ad esempio un terzo turno lavorativo.

FASE 2 – Modelli di simulazione ad eventi discreti

FASE 2.1 – REQUISITI DEL MODELLO DI SIMULAZIONE

- **Cicli Tecnologici:** Sono stati rispettati i cicli tecnologici forniti, andando però ad unire lavorazioni consecutive sulla stessa macchina in modo da semplificare la logica di gestione dei cicli per singolo prodotto ed ottenere un unico tempo di lavorazione dato dalla somma dei due.
- **Mix di Produzione:** È stata scelta una produzione a lotti settimanale, basandosi sui valori forniti, ovvero 3520 ore lavorative annuali su 2 turni da 8 ore ciascuno; si sono dunque suddivisi i prodotti in 11 lotti per prodotto, con cadenza di 20 giorni lavorativi (320 ore).
- **Gestione Risorse:** Per la simulazione degli operatori e dei robot, non essendo stati calcolati come parte attiva alla produzione, si è deciso di assegnare la gestione dei guasti (failures) nel seguente modo:
 - MTTR di 1 min ed efficienza all' 85% per operatori;
 - MTTR di 30 sec ed efficienza del 100% per il robot;
- **Setup:** I tempi di setup ad ogni cambio pezzo sono stati rispettati ed essendo tempi molto lunghi (20 min) hanno comportato notevoli incrementi nei tempi di simulazione; a partire già dal Job Shop dell'Anno2, hanno superato il tetto delle 3520 ore annue. Per ridurre questi tempi si è scelto di sostituire i buffer delle stazioni più critiche con alcuni sorter.

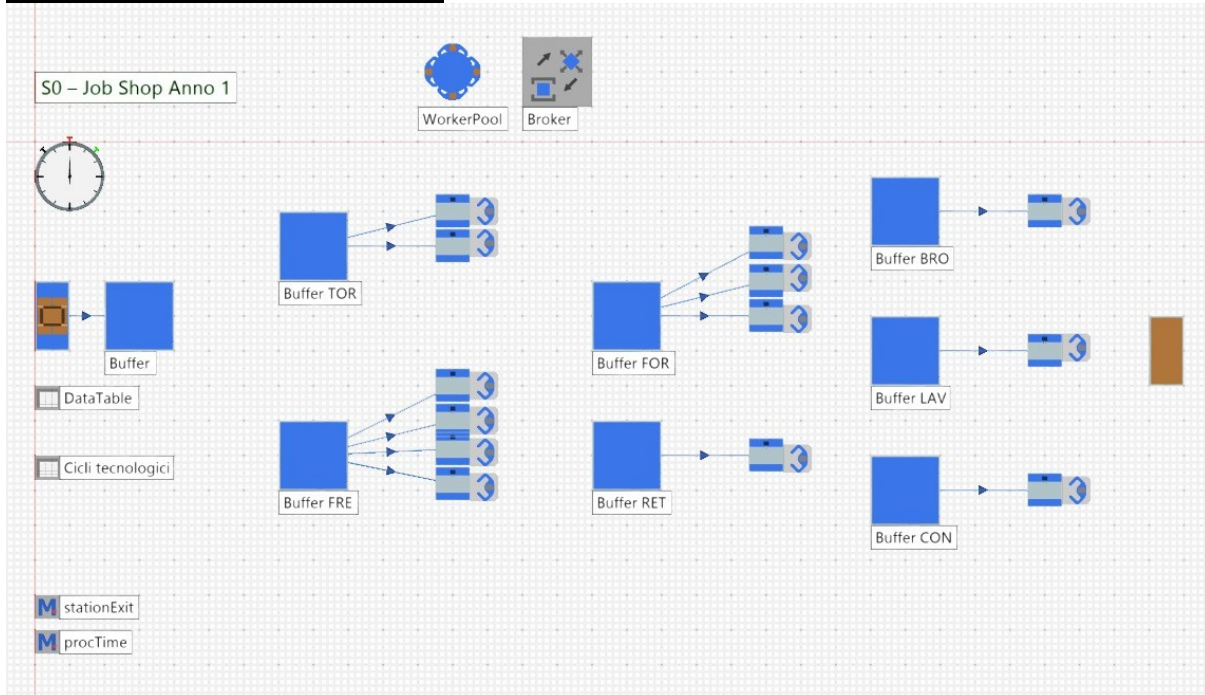
Il Sorter non è altro che un buffer specializzato nel riordinamento dei pezzi (sorting) secondo precisi criteri. I pezzi con lo stesso nome vengono raggruppati, in modo da ridurre drasticamente i tempi di setup sui reparti finali (LAV e CON) che, trovandosi a valle, accumulano tutti e 6 i prodotti subendo maggiormente gli effetti dell'arrivo disordinato.

- **Logica Dispatching:** Sono state testate sia la logica FIFO (exit = cyclic per i buffer) che la SPT. Questi 2 metodi influenzano in maniera minima i tempi di simulazione. Per coerenza e semplicità nella parte di confronto si è scelto di mantenere la logica SPT che, seppur di poco, garantisce prestazioni migliori.

FASE 2.2 – SCENARI SIMULATI

Precisazione sui tempi simulati: Il formato è **DD:HH:MM:SS.0000**; le simulazioni non contano i momenti di inattività; quindi, un anno lavorativo composto da 3520 ore, corrisponde a **146:16:00:00.0000** ovvero **146 giorni e 16 ore**.

Scenario S0 (Job Shop Anno 1)



Questa simulazione è la base di tutte le altre che seguiranno. I 2 Method `procTime` e `StationExit` restano invariati.

- **Method `StationExit`:**

```
var destReparto : string
var destBufferName : string
var destBuffer : object
var subTable : table

subTable := root.Cicli_tecnologici[1, @.name]

if subTable = void
  //nessun ciclo tecnologico: mando a Drain
  @.move(Drain)
else
  @.op := @.op + 1 //counter che mi permette di aumentare la variabile op
  if @.op <= subTable.yDim
    destReparto := subTable[2, @.op] // prendo il nome del reparto dalla sottotabella dentro a cicli tecnologici colonna 2 e riga= op
    destBufferName := "Buffer_" + destReparto // associo il nome del reparto al buffer specifico
    destBuffer := str_to_obj(destBufferName)

    if destBuffer /= void
      @.move(destBuffer)
    else
      //buffer non trovato: per sicurezza mando a Drain
      @.move(Drain)
    end
  else
    //finite le operazioni previste
    @.move(Drain)
  end
end
```

Di seguito è riportata la tabella *Cicli Tecnologici* da cui si ricavano i nomi e l'ordine con cui indirizzare i prodotti:

	string 0	table 1	st 2
string	Prodotto	Ciclo tecnologico	
1	P01	x	
2	P02	x	
3	P03	x	
4	P06	x	
5	P08	x	
6	P09	x	
7			
8			

Facendo doppio clic sulla "x" del Ciclo Tecnologico si accede alla sotto-tabella dedicata:

	string 1	string 2	time 3	strin 4
string	Processo	Reparto	procTime	
1	tornio CNC	TOR	7:42.0000	
2	fresatrice CNC	FRE	2:48.0000	
3	Foratrice CNC	FOR	1:00.0000	
4	rettificatrice CNC	RET	5:30.0000	
5	lavaggio industriale	LAV	1:30.0000	
6	banco controllo CMM	CON	2:00.0000	
7				
8				

- **Method procTime:**

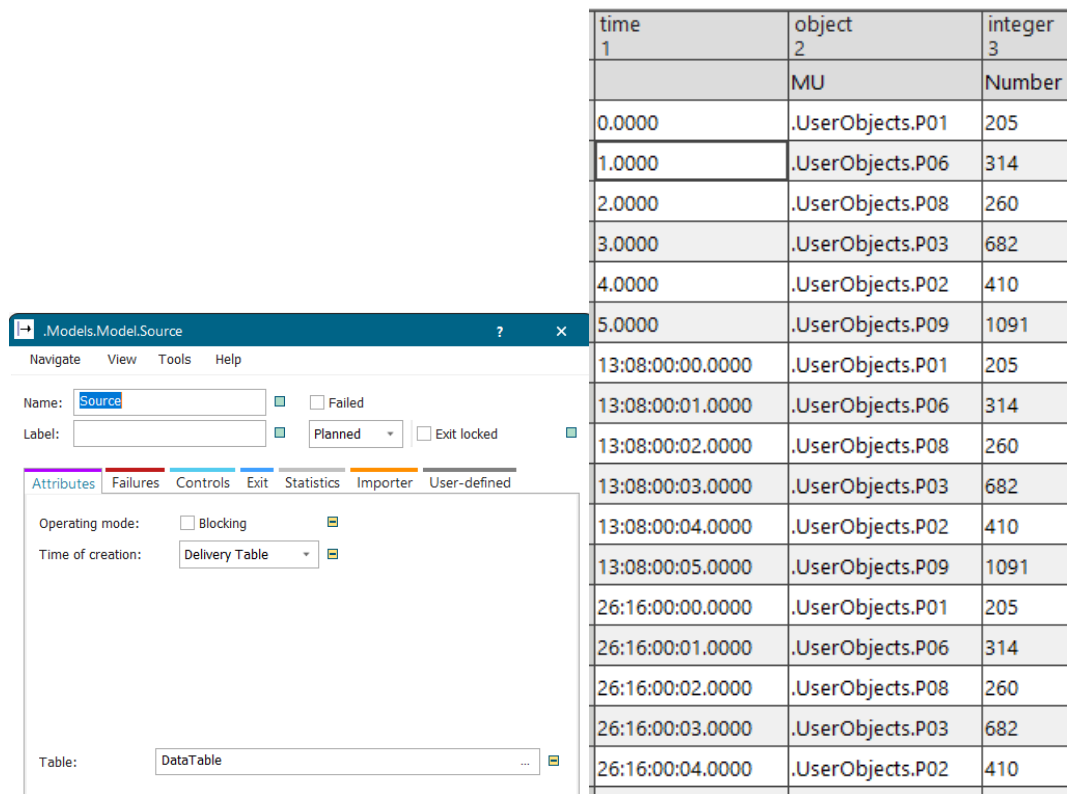
```
-> time
var subTable : table
var baseTime : time

// Legge la tabella del ciclo tecnologico specifico per il pezzo in ingresso (P01,P02,...,P09)
subTable := root.Cicli_tecnologici[1, @.name]

/* Estrae dalla sotto tabella di Cicli tecnolgici il tempo nominale in base al numero
dell'operazione dettata dalla stessa variabile "op" che usiamo in StationExit*/
baseTime := subTable[3, @.op]

// Restituisce direttamente il tempo base puro alla Station
return baseTime
```

- **Source:**

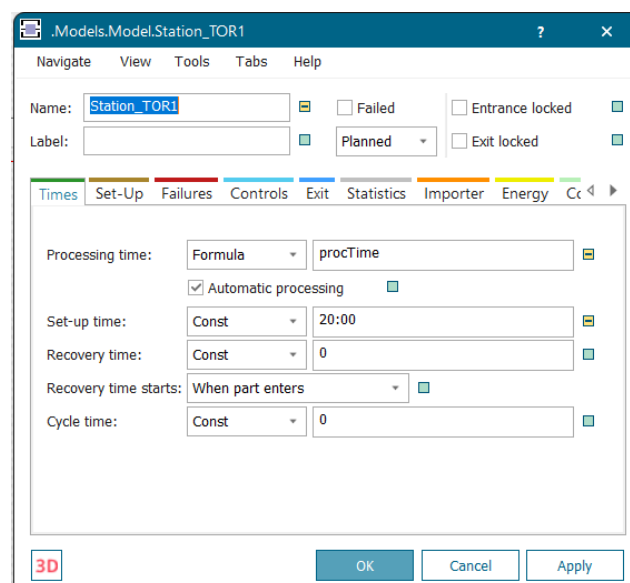


The screenshot shows the **.Models.Model.Source** dialog box on the left and a data table on the right. The dialog box has tabs for **Attributes**, **Failures**, **Controls**, **Exit**, **Statistics**, **Importer**, and **User-defined**. The **Attributes** tab is active, showing fields for **Name** (Source), **Label**, **Operating mode** (Blocking), **Time of creation** (Delivery Table), and **Table** (DataTable). The data table on the right has three columns: **time**, **object**, and **integer**. The first row is a header with values 1, 2, and 3. The second row is a header with values MU, MU, and Number. The table contains 16 rows of data, showing a sequence of times, objects, and integers.

time	object	integer
1	2	3
	MU	Number
0.0000	.UserObjects.P01	205
1.0000	.UserObjects.P06	314
2.0000	.UserObjects.P08	260
3.0000	.UserObjects.P03	682
4.0000	.UserObjects.P02	410
5.0000	.UserObjects.P09	1091
13:08:00:00.0000	.UserObjects.P01	205
13:08:00:01.0000	.UserObjects.P06	314
13:08:00:02.0000	.UserObjects.P08	260
13:08:00:03.0000	.UserObjects.P03	682
13:08:00:04.0000	.UserObjects.P02	410
13:08:00:05.0000	.UserObjects.P09	1091
26:16:00:00.0000	.UserObjects.P01	205
26:16:00:01.0000	.UserObjects.P06	314
26:16:00:02.0000	.UserObjects.P08	260
26:16:00:03.0000	.UserObjects.P03	682
26:16:00:04.0000	.UserObjects.P02	410

Come si può notare, la Source è impostata su Delivery Table. Si basa dunque su una tabella per generare i pezzi, che in questo caso è proprio la DataTable (della quale viene riportato un estratto); la prima riga indica il tempo in cui generare un determinato numero di oggetti (MU) definiti nella colonna 2. La colonna 3 indica invece il numero di oggetti.

- **Station e Gestione Set-up:**

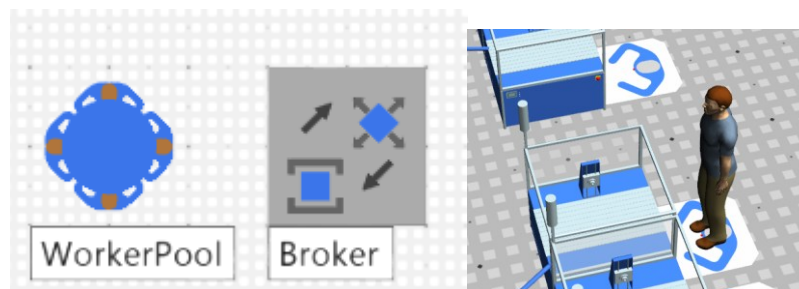


The screenshot shows the **.Models.Model.Station_TOR1** dialog box. It has tabs for **Times**, **Set-Up**, **Failures**, **Controls**, **Exit**, **Statistics**, **Importer**, **Energy**, and **Cc**. The **Set-Up** tab is active, showing fields for **Processing time** (Formula, procTime), **Automatic processing** (checked), **Set-up time** (Const, 20:00), **Recovery time** (Const, 0), **Recovery time starts** (When part enters), and **Cycle time** (Const, 0). The dialog box also has buttons for **OK**, **Cancel**, and **Apply**.

Tutte le Station sono impostate in modo tale da avere il Processing Time gestito dal Method procTime e Set-up time fisso a 20 min.

- **Gestione Failures:** Le diverse failures sono dimensionate in base alle availability fornite dalla consegna, cambiando da Station a Station.

- **Risorse:**



La gestione degli operatori e successivamente del robot si basa su ipotesi e ragionamenti presentati nella Fase 1: le macchine sono autonome e gli operatori servono unicamente come supervisori. È stato quindi deciso di renderli Failure Importers, ovvero sono gli operatori stessi che si occupano di gestire le riparazioni dovute alle failures che si andranno a generare.

Scenario S1 (Job Shop Anno 2)

Dalla simulazione del secondo anno sono stati riscontrati problemi causati dai tempi eccessivi dovuti in gran parte all'accumulo di tutte e 6 le tipologie di prodotto in modo disordinato a valle, in particolar modo nel reparto LAV.

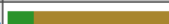
Simulation time 261:16:52:50.4533

Object	Working	Set-up	Waiting	Blocked	Powering up/down	Failed	Stopped	Paused	Unplanned	Portion
Station_LAV	17.83%	82.12%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_CON	12.93%	55.40%	30.58%	0.00%	0.00%	1.10%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_CON1	11.11%	30.74%	57.24%	0.00%	0.00%	0.90%	0.00%	0.00%	0.00%	

Come prima soluzione si è pensato di aggiungere un' ulteriore macchina per il reparto LAV, per poi sostituire invece il tradizionale Buffer LAV con un Sorter.

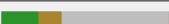
Aggiunta macchina (LAV):

Simulation time 155:02:29:23.0506

Object	Working	Set-up	Waiting	Blocked	Powering up/down	Failed	Stopped	Paused	Unplanned	Portion
Station_LAV	15.12%	81.20%	3.68%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_CON	20.37%	77.43%	0.47%	0.00%	0.00%	1.73%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_CON1	20.19%	77.60%	0.56%	0.00%	0.00%	1.65%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_LAV2	14.97%	81.24%	3.80%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

Implementazione del Sorter:

Simulation time 139:11:48:55.5029

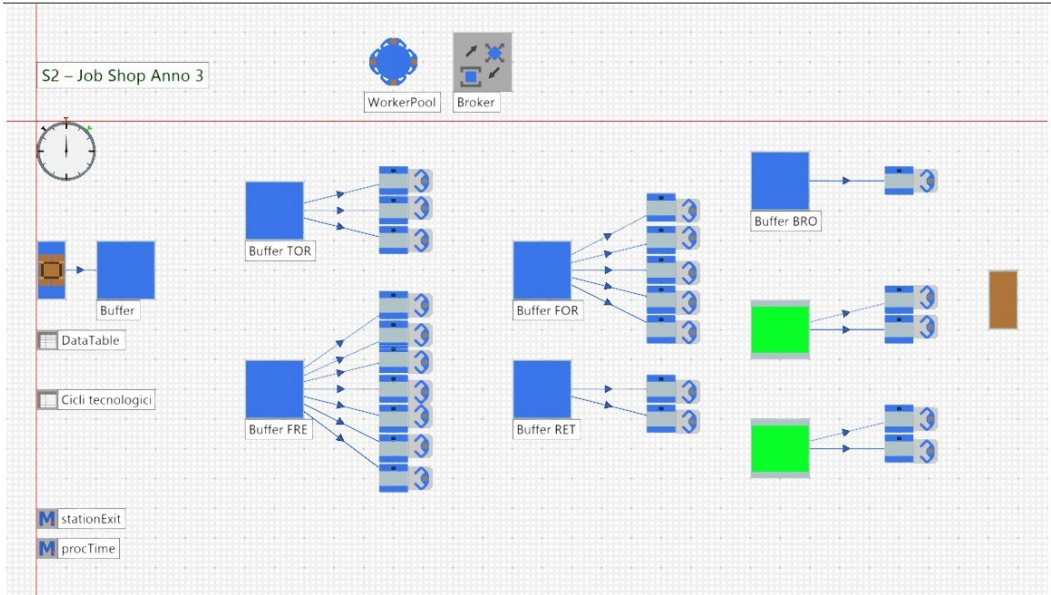
Object	Working	Set-up	Waiting	Blocked	Powering up/down	Failed	Stopped	Paused	Unplanned	Portion
Station_LAV	33.45%	14.37%	52.18%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_CON	22.39%	13.15%	62.55%	0.00%	0.00%	1.90%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_CON1	22.71%	8.95%	66.48%	0.00%	0.00%	1.85%	0.00%	0.00%	0.00%	

È immediato notare dai report il notevole abbassamento dei tempi per entrambe le soluzioni. L'implementazione del Sorter permette infatti di intervenire sul problema alla radice abbattendo drasticamente l'incidenza dei tempi di setup, mentre l'aggiunta di una macchina si limita ad aumentare solamente la pura capacità fisica del sistema.

D'ora in poi si considera il Sorter come soluzione applicativa anche per le successive simulazioni.

Scenario S2 (Job Shop Anno 3)

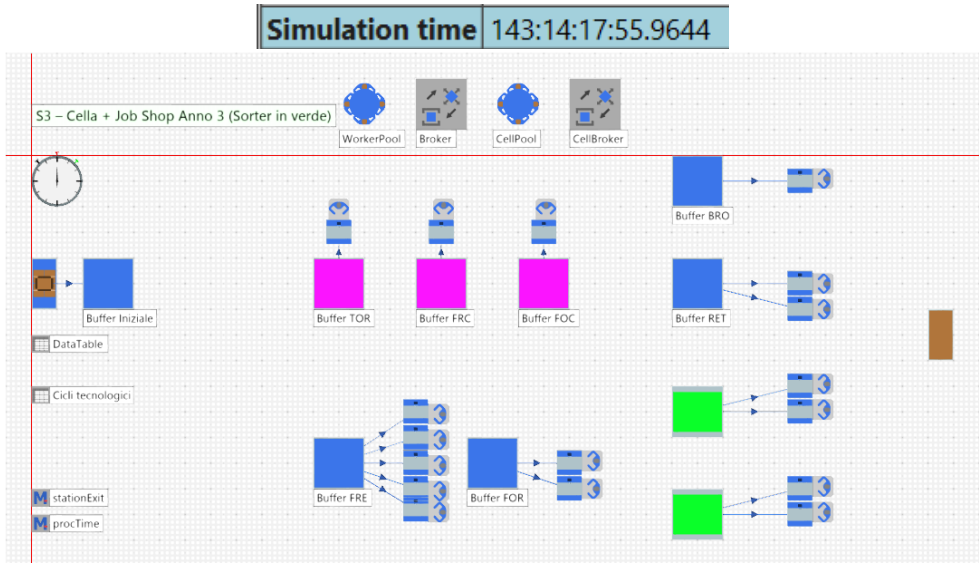
Al fine di rendere più facile distinguere Sorter e Buffer tradizionali, sono stati evidenziati i primi con il colore verde.



In questa simulazione si è implementando il Sorter anche per il reparto CON.

Simulation time		140:10:09:57.8530								
Object	Working	Set-up	Waiting	Blocked	Powering up/down	Failed	Stopped	Paused	Unplanned	Portion
Station_LAV	21.90%	25.16%	52.94%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_CON	29.15%	21.36%	47.02%	0.00%	0.00%	2.47%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_CON1	29.15%	21.42%	47.03%	0.00%	0.00%	2.39%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_LAV2	21.61%	25.28%	53.11%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

Scenario S3 (Layout ibrido Anno 3)



L'introduzione della cella è stata realizzata modificando i cicli tecnologici dei pezzi attraverso i nuovi Buffer (FRC e FOC), azzerando i tempi di setup esclusivamente per questa area dedicata.

Scenario S4 (Layout ibrido con Robot Anno 3)

Simulation time	143:14:23:00.1285
------------------------	-------------------

L'introduzione del Robot, simulato come un operatore con efficienza ideale del 100% ed MTTR dimezzato, ci ha permesso di ricorrere ad un solo Sorter per ottenere tempi molto vicini a quelli della simulazione S3.

Scenario S5 (Layout ibrido con robot e Buffer interoperazionali finiti Anno 3)

Simulation time	144:19:32:21.3868
------------------------	-------------------

Object	Working	Set-up	Waiting	Blocked	Powering up/down	Failed	Stopped	Paused	Unplanned	Portion
Station_FOR1	53.71%	0.00%	44.61%	0.00%	0.00%	1.68%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_TOR	0.00%	0.00%	21.98%	78.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_FRC	0.00%	0.00%	48.99%	51.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_FOC	0.00%	0.00%	49.13%	50.87%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_TOR1	60.82%	0.00%	21.90%	15.12%	0.00%	2.16%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_FRE1	39.12%	0.00%	43.58%	13.98%	0.00%	3.32%	0.00%	0.00%	0.00%	

È possibile notare come, nonostante il ridimensionamento dei Buffer generi inevitabili saturazioni e micro-blocchi a catena, l'incremento del tempo totale di simulazione risulti minimo, gravando per poco più di 1 giorno e 5 ore complessive.

FASE 3 – KPI e confronto dei risultati

Dopo aver svolto i calcoli teorici sul dimensionamento (Fase 1) e aver costruito il modello simulato (Fase 2), si passa all'analisi dei risultati ottenuti tramite simulazione software, confrontando il comportamento reale con i dati ricavati inizialmente.

FASE 3.1 – INDICATORI DI PRESTAZIONE

Si riportano di seguito alcuni KPI forniti in partenza dalle specifiche del progetto:

#	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	[-]
K07	Utilizzo operatori	Frazione del tempo in cui l'operatore è impegnato	[%]

Il software utilizzato durante le simulazioni ha permesso di generare una grandissima quantità di dati ma, per mantenere l'analisi chiara e mirata, ci si è focalizzati solamente su tre indicatori chiave (KPI), per ciascun scenario simulato:

- **K01 - Throughput (Produttività)**
- **K03 - Utilizzo delle macchine**
- **K06 – Collo di bottiglia.**

Si procede dunque con la loro estrazione e lettura per tutti gli scenari previsti dal progetto.

Risultati simulazioni

Scenario S0 (Job Shop Anno 1)

- **K01 – Throughput = 8,19 [pz/h]**

Resource Statistics - Drain Statistics

Object	Working	Set-up	Waiting	Stopped	Failed	Paused	Mean Life Time	Mean Exit Time	Total Throughput	Throughput per Hour	Throughput per Day
Drain	0.18%	0.11%	99.70%	0.00%	0.01%	0.00%	7:08:50:34.4075	6:31.4468	32550	9.1919778	220.60747

Cumulated Statistics of the Parts which the Drain Deleted

- **K03 - Utilizzo Macchine**

Resource Statistics - Resource Statistics

Object	Working	Set-up	Waiting	Blocked	Powering up/down	Failed	Stopped	Paused	Unplanned	Portion
Source	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_TOR	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_FRE	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_FOR	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%	
Buffer_BRO	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%	
Drain	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%	
Station_TOR1	21.36%	0.41%	77.49%	0.00%	0.00%	0.74%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_TOR2	21.37%	0.41%	77.48%	0.00%	0.00%	0.74%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_FRE1	21.85%	0.52%	75.93%	0.00%	0.00%	1.71%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_FRE2	21.81%	0.52%	75.93%	0.00%	0.00%	1.75%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_FRE3	21.80%	0.52%	75.93%	0.00%	0.00%	1.75%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_FRE4	21.88%	0.52%	75.92%	0.00%	0.00%	1.68%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_FOR2	23.58%	10.97%	64.80%	0.00%	0.00%	0.66%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_RET	25.70%	21.53%	51.58%	0.00%	0.00%	1.20%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_BRO	8.47%	0.01%	91.29%	0.00%	0.00%	0.23%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_LAV	23.97%	59.21%	16.82%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_CON	32.30%	59.21%	5.76%	0.00%	0.00%	2.73%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_FOR3	23.57%	10.89%	64.84%	0.00%	0.00%	0.70%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_FOR1	23.67%	10.91%	64.74%	0.00%	0.00%	0.69%	0.00%	0.00%	0.00%	

Portions of the States

Si riporta il valore di utilizzo medio percentuale di ogni reparto estratto dalla tabella *Resource Statistics*, isolando la colonna “Working”:

- Tornitura (TOR): 21,37%
- Fresatura (FRE): 21,84%
- Foratura (FOR): 23,61%
- Rettifica (RET): 25,70%
- Brocciatura (BRO): 8,47%
- Lavaggio (LAV): 23,97%
- Controllo (CON): 32,30%

- **K06 – Collo di bottiglia e confronto con previsione analitica**

Per individuare la risorsa con l'utilizzo massimo si analizza l'occupazione totale delle stazioni, data dal tempo di *Working* sommato a quello di *Set-up*.

- **K06 (S0):** Stazione di Controllo (CON), con un'occupazione del **91,51%** (di cui il 59,2% in Set-up).
- **K06 (previsione analitica della Fase 1):** Stazione di Controllo (CON), con un Utilizzo Teorico del **99,07%**.

La medesima procedura di calcolo dei KPI è stata quindi estesa alla totalità delle simulazioni previste dal progetto, mantenendo e documentando non solo gli scenari “base” (derivanti direttamente dal dimensionamento teorico), ma anche le versioni “ottimizzate”, al fine di risolvere criticità fisiche del sistema e rientrare negli standard produttivi richiesti.

I risultati di tutte le simulazioni sono sintetizzati in due tabelle riassuntive: la prima raggruppa le configurazioni con layout a puro Job Shop, mentre la seconda mostra gli scenari ibridi dati dalla successiva introduzione della cella di produzione.

#	Scenario	K01 [pz/h]	K03 TOR [%]	K03 FRE [%]	K03 FOR [%]	K03 RET [%]	K03 BRO [%]	K03 LAV [%]	K03 CON [%]	K06 Saturazione [%]
S0	Job Shop Anno 1	8,19	21,37	21,84	23,61	25,70	8,47	23,97	32,30	(CON) 91,51
S1	Job Shop Anno 2	6,9	10,93	12,66	13,36	8,73	7,16	17,83	12,02	(LAV) 99,95
S1 Ottimizzato	Anno 2 (+ 1 LAV)	11,65	18,44	21,36	22,55	14,73	12,09	15,05	20,28	(CON) 97,80
S2	Job Shop Anno 3	11,19	16,95	15,59	17,54	15,05	10,58	14,78	19,81	(CON) 97,80
S2 Ottimizzato	Anno 3 (+ Sorter)	16,47	24,94	22,95	25,81	22,14	15,58	21,75	29,15	(CON) 50,50

#	Scenario	K01 [pz/h]	K03 Cella TOR1 [%]	K03 Cella FRE1 [%]	K03 Cella FOR1 [%]	K03 JS FRE [%]	K03 JS FOR [%]	K03 JS RET [%]	K03 JS BRO [%]	K03 JS LAV [%]	K03 JS CON [%]	K06 Saturazione [%]
S3	Cella + Sorter Job Shop	16,1	73,18	52,98	71,08	20,82	27,57	21,65	15,23	21,27	28,51	(TOR1) 73,18
S4	Cella Robot + 1 Sorter	16,08	73,06	52,89	70,96	20,80	27,50	26,44	15,21	21,31	28,46	(TOR1) 73,06
S5	Buffer Cella a 3 pz	13,96	60,83	39,13	53,72	20,60	27,30	21,40	10,08	18,50	24,91	(CON) 80,50

FASE 3.2 – CONFRONTO DETERMINISTICO vs SIMULATIVO

Di seguito si riporta l'analisi e l'esposizione delle somiglianze e delle differenze emerse confrontando i dati ottenuti inizialmente tramite dimensionamento analitico e quelli ricavati dalle simulazioni nella precedente Fase 2, cercando di evidenziare gli elementi più interessanti emersi durante lo studio. I calcoli matematici teorici hanno fornito una solida base di partenza per quanto riguarda l'impianto. Tuttavia, grazie al modello simulato, è stato possibile osservare il comportamento reale del sistema, introducendo aspetti difficilmente, se non impossibili, da osservare con l'utilizzo delle sole formule matematiche.

- **Sufficienza del dimensionamento teorico e impatto delle variabili reali**

Il numero di macchine calcolato analiticamente si è rivelato sufficiente solo a patto di introdurre migliorie logistiche.

Il modello teorico, infatti, ipotizza flussi costanti e continui, andandosi a scontrare con ostacoli del mondo reale simulato in cui la sequenza caotica di arrivo dei lotti fa lievitare i tempi di setup.

Negli scenari in cui l'impianto opera esclusivamente come Job Shop, in particolare nell'S1, l'impianto non è riuscito a smaltire i volumi previsti nei tempi limite. Nell'Anno 2, infatti, il tempo di completamento ha raggiunto ben 261 giorni, a fronte di un limite annuo di soli 146 giorni circa.

L'unica soluzione in grado di rendere valido il dimensionamento teorico iniziale senza aggiungere ulteriori macchinari è stata l'introduzione di ottimizzazioni logistiche.

L'inserimento del Sorter (S2 ottimizzato) ha abbattuto i setup riducendo i tempi a 140 giorni, mentre il layout a Cella (S3 e S4) ha confermato la sufficienza di sole 3 macchine dedicate, azzerando i riattrezzaggi interni.

Tuttavia, l'ultimo scenario simulato (S5), ha mostrato come il sistema risulti altamente sensibile allo spazio fisico disponibile.

Limitando la capacità dei buffer a soli 3 pezzi, le fisiologiche micro-attese e i guasti (*failures*) non vengono ammortizzati. Questo innesca un effetto a catena (*Blocked* sul TOR e *Waiting* sulla FRE) che fa crollare la produzione totale sotto la soglia richiesta (arrivando a soli 48.505 pezzi), vanificando la correttezza del dimensionamento teorico. Il TOR, ad esempio, riempie immediatamente il piccolo buffer a valle ed è costretto ad arrestarsi (*Blocked* per oltre il 15% del tempo); la FRE, di conseguenza, rimane quindi spesso in attesa di materiale (*Waiting* per oltre il 43%).

- **Differenze e analogie nel coefficiente di utilizzo**

Confrontando i coefficienti di utilizzo reali calcolati analiticamente e riportati nelle tabelle della Fase 1, con l'indicatore K03 ricavato dalle simulazioni, si osserva che generalmente i valori non coincidono direttamente.

Analizzando, ad esempio, il reparto di Lavaggio (LAV) nel Layout Job Shop per l'Anno 2, il calcolo analitico prevedeva un coefficiente del 45,11%; tuttavia, nello scenario simulato (S1 base), la percentuale K03 di Working si è fermata ad appena il 17,83%.

Una differenza simile la si può riscontrare anche nel primo anno (S0), dove il Controllo (CON) stimava un coefficiente del 44,58% a fronte di un K03 simulato del 32,30%.

Le grosse discrepanze derivano dai limiti della formula analitica; nel dimensionamento matematico i tempi di setup vengono mediati tramite coefficienti statistici, andando a ridurre in modo significativo il loro impatto rispetto alla simulazione reale.

La formula analitica prevede inoltre che i pezzi siano sempre disponibili davanti alla macchina, mentre la simulazione è capace di replicare l'esatto momento di arrivo del materiale, frammentando il tempo totale di utilizzo (attesa, blocco, setup).

Al contrario, però, estrapolando alcuni dati delle macchine presenti nella cella di produzione (Scenario S3 dell'Anno 3), i valori teorici convergono con quelli simulati.

Ad esempio, il calcolo analitico per il TOR prevedeva un utilizzo del 71,65%, valore che trova una quasi perfetta corrispondenza nel 73,18% del K03 simulato; una dinamica identica si riscontra per la FRE, con un valore stimato del 51,88% contro uno reale di 52,98%.

Questa forte analogia si verifica proprio perché all'interno della cella dedicata, la logistica del sistema si avvicina enormemente alle condizioni ideali ipotizzate algebricamente.

Dedicare le macchine ad un'unica famiglia di prodotti ad altissimi volumi azzerava praticamente la necessità di continui cambi di setup.

Disponendo inoltre di buffer capienti si minimizzano gli stati di *Blocked* e *Waiting*.

Si può quindi concludere che il coefficiente analitico di utilizzo coincide con il K03 simulato solo in condizioni ideali di flusso ininterrotto e dedicato.

- **Identificazione e natura del Collo di bottiglia**

L'analisi permette di affermare che il collo di bottiglia teorico e quello simulato coincidono nei primi due anni di studio, per poi divergere significativamente nel terzo.

Confrontando l'indicatore K06 con i dati riportati nella tabella della Fase 1, l'impianto ha mostrato i seguenti comportamenti:

- **Anno 1 (Scenario S0):** la simulazione conferma la previsione teorica; il CON risulta essere la risorsa più satura, superando in entrambi i casi il 90%. Tuttavia, il software rivela come quasi il 60% della saturazione sia dato da tempi di setup.
- **Anno 2 (Scenario S1):** si verifica una corrispondenza iniziale, confermando la previsione analitica riguardante il LAV, che si avvicina però pericolosamente al 100%. L'aggiunta di un macchinario per rientrare nei tempi previsti porta alla quasi completa saturazione del CON, mentre il LAV, pur avendo raddoppiato la capacità, rimane saturo al 96,3% a causa dei riattrezzaggi.
- **Anno 3 in Job Shop (Scenario S2):** sebbene la teoria prevedesse che la FRE diventasse il collo di bottiglia, la simulazione mostra come LAV (97,8%) e CON (97,5%) diventino in realtà i nuovi colli di bottiglia, sempre a causa delle difficoltà logistiche e dei continui tempi di setup. L'inserimento dei Sorter (Scenario S2 ottimizzato) abbassa l'occupazione del CON, portandola al 50,5%.

- **Variazione della produttività dal Job Shop alla Cella**

Partendo dal calcolo teorico dell'Anno 3, il piano di vendita prevedeva un volume complessivo di 55.500 pezzi e 3520 ore disponibili; l'impianto avrebbe quindi dovuto mantenere una produttività media costante di 15,77 [pz/h].

Mantenendo un layout interamente a reparti (Scenario S2 base), la simulazione ha mostrato come il sistema si sia fermato ad un Throughput effettivo di soli 11,19 [pz/h], ben al di sotto del valore atteso.

La successiva introduzione di Sorter ha permesso di ricavare un valore pari a 16,47 [pz/h] che, seppur al di sopra del valore desiderato, nella realtà obbligava il sistema a raggruppare i prodotti in lotti enormi prima del lavaggio, generando un enorme aumento degli ingombri fisici e di materiale in attesa all'interno dell'azienda.

La soluzione vincente si è rivelata essere, come previsto, l'introduzione di un layout ibrido, capace di unire alta produttività e ordine logistico (scenario S3).

In questa configurazione la simulazione ha registrato un Throughput di 16,1 [pz/h], permettendo un aumento di produttività del 44% rispetto al Job Shop caotico di partenza.

È bene notare come la limitazione strutturale dei buffer (scenario S5) abbia invece riportato il Throughput ad un valore pari a 13,96 [pz/h], ben al di sotto del target richiesto inizialmente.

Bibliografia e Sitografia

- Calzavara M., Berti N., Materiale didattico e dispense del corso di Impianti Industriali Automatizzati (INQ1097478), Università degli Studi di Padova, A.A. 2025-2026.
- Chan, H. M., & Milner, D. A. (1982). Direct clustering algorithm for group formation in cellular manufacture. Journal of Manufacturing Systems.
- Wikipedia, portale open-source consultato per i riferimenti metodologici preliminari sulle logiche di raggruppamento.
- Forum ufficiale Siemens e tutorial YouTube (canali Siemens), consultati come supporto tecnico e guida passo-passo per l'apprendimento e l'utilizzo del software di simulazione.

Dichiarazione sull'utilizzo di strumenti di Intelligenza Artificiale (AI)

Gli autori dell'elaborato dichiarano di aver utilizzato strumenti basati su Intelligenza Artificiale (nello specifico Gemini, Grok, Chat GPT, Claude Sonnet e Microsoft Copilot) esclusivamente come supporto operativo e di consultazione.

Nel dettaglio sono stati utili per le seguenti finalità:

- **Supporto metodologico:** per comprendere meglio e sintetizzare i concetti teorici legati agli algoritmi di clusterizzazione (come il DCA).
- **Verifica analitica:** come strumento di controllo, in affiancamento a Microsoft Excel, per incrociare i calcoli matematici e assicurarsi della coerenza del dimensionamento.
- **Apprendimento del software di simulazione:** come guida per capire come implementare specifiche logiche all'interno del programma e per chiarire dubbi tecnici. Le soluzioni suggerite dall'AI sono state poi costantemente analizzate ed approfondite tramite la consultazione di forum di settore (citati in Sitografia).
- **Revisione linguistica:** per la rilettura del documento, la correzione di eventuali refusi e il miglioramento della scorrevolezza del testo.

Si certifica che il dimensionamento analitico, l'analisi critica, lo sviluppo del caso studio e la scrittura vera e propria del documento sono interamente opera degli autori.

L'Intelligenza Artificiale non è mai stata impiegata per generare automaticamente i contenuti dell'elaborato, ma esclusivamente per facilitare il processo di stesura e revisione.