



PROGETTAZIONE DI UNA LINEA DI MONTAGGIO

Si debba progettare una linea di assemblaggio che realizzi il prodotto evidenziato nell'esploso.

La gerarchia delle operazioni di montaggio è riportata nell'apposito diagramma "a pettine", il montaggio prevede l'impiego di pre-montaggi.

Attraverso una campagna di prove sperimentali (cfr. tabella) sono state ricavate le tempistiche relative alle operazioni di montaggio.

Per alcune fasi le operazioni possono essere alternativamente realizzate dall'operatore umano o da un mezzo robotizzato; per queste sono state stimate entrambe le durate.

La produttività richiesta alla linea sia di 60 prodotti finiti per ora. Il collaudo è realizzato alla fine del ciclo in una apposita stazione dedicata non oggetto dello studio.

L'orario di lavoro è previsto in 8 ore/giorno per 220 gg/anno. Il costo orario di un operatore sia di 17 €/h.

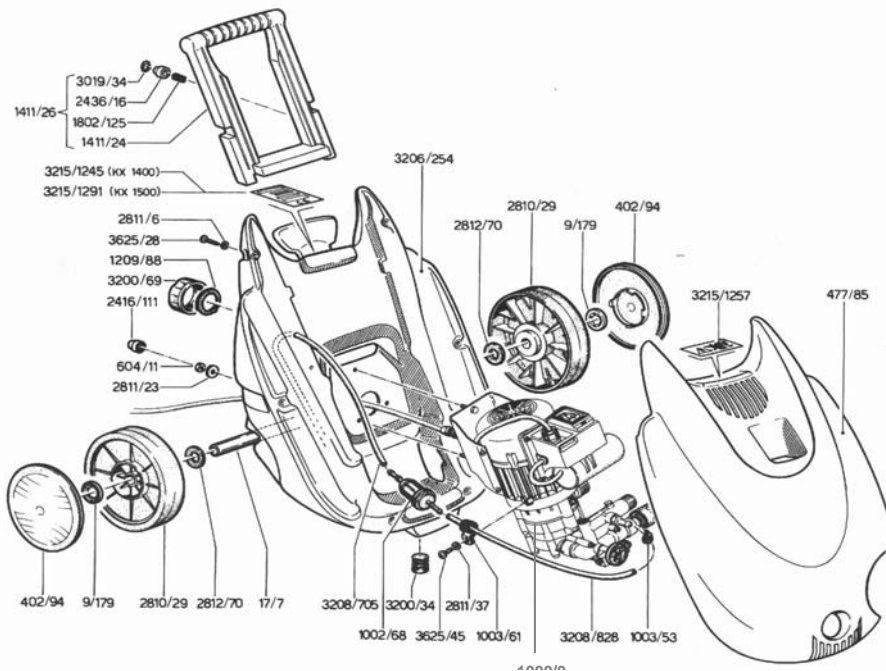
La linea oltre agli operatori direttamente impiegati nelle operazioni di montaggio richiede un carrellista (costo orario 17 €/h) per l'alimentazione dei componenti e 1 responsabile di impianto (il cui costo orario è di 51 €/h).

Si consideri un costo dell'energia elettrica pari a 0,14 €/kwh.

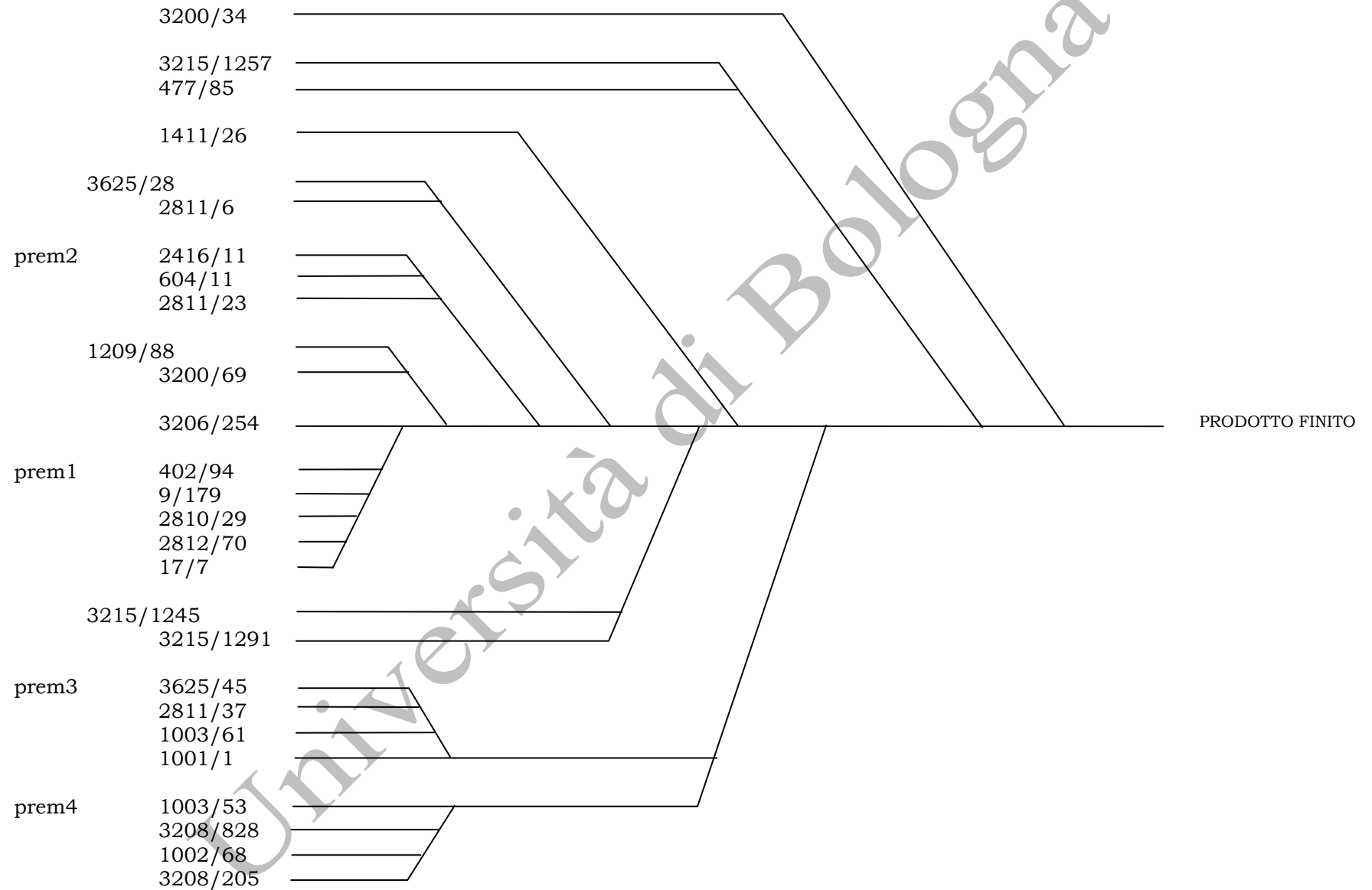
Si consideri un orizzonte temporale di 5 anni ed un costo del denaro pari ad $i=8\%$.

Ogni prodotto non completato viene "recuperato" con l'esecuzione delle operazioni mancanti fuori linea. Tali operazioni hanno una durata media stimabile con un valore pari al TRIPLO della durata media in linea.

Calcolare il costo del montaggio ed il costo di mancato completamento.



Gerarchia di montaggio



Tempistica di montaggio

ID	fase	OPERAZIONI MANUALI										OPERAZIONI ROBOTIZZATE	
		rilevi operazione manuale (sec)										durata operazione robotizzata (sec)	attrezzatura necessaria
10	bloccare unità base su vassoio	24,3	25,6	18,4	19,4	20,7	26,8	24,6	22,8	27,5	26,4		banco semplice + 1 mod. trasporto
20	eseguire prem 1 (gruppo ruota)	46,7	48,7	42,5	49,1	42,6	45,8	47,5	47,6	40,5	49,1	26,1	robot scara + 2 mod trasporto
30	prem 1 su unità base	10,2	14,5	13,4	11,2	14,5	13,2	13,3	14,1	12,5	15,5		banco semplice + 1 mod. trasporto* + 1 mod buffer*
40	1209/88 + 3200/69 su unità base	6,5	4,5	8,6	6,7	7,9	7,8	6,5	6,6	6,8	7,0	3,8	robot scara + 2 mod trasporto
50	eseguire prem 2 (gruppo reg post)	24,5	26,5	27,4	21,5	23,6	24,5	29,1	22,5	24,5	23,6	15,4	robot scara + 2 mod trasporto
60	prem 2 su unità base	15,4	16,4	18,5	12,6	14,5	13,6	14,5	16,5	14,7	15,5	7,5	robot scara + 2 mod trasporto
70	3625/28 + 2811/6 su unità base											4,6	robot scara + 2 mod trasporto
80	3215/1245 + 3215/1291 su unità base	39,2	38,7	36,5	34,5	39,5	38,7	34,5	36,7	38,2	38,3		banco attrezzato + 1 mod. trasporto + 1 mod buffer
90	1411/26 su unità base	10,2	10,3	11,4	12,5	9,9	10,6	10,4	10,6	10,7	11,3		banco semplice + 1 mod. trasporto + 1 mod buffer
100	eseguire prem 3 (gruppo motopompa)	175,6	177,8	179,5	171,3	176,5	174,8	180,5	177,8	171,2	176,5	50,3	robot antropomorfo + 2 mod traspo
110	eseguire prem 4 (circuito aliment)	22,3	24,6	21,3	25,6	27,4	26,8	24,9	25,6	24,8	26,4	10,7	robot scara + 2 mod trasporto
120	prem 3 + prem 4 su unità base	124,6	126,8	127,5	123,6	121,5	128,4	129,4	124,6	125,8	121,8		banco attrezzato + 1 mod. trasporto + 1 mod buffer
130	3215/1257 + 477/85 su unità base	47,5	46,7	46,5	46,5	49,2	41,5	42,6	44,7	48,5	47,7		banco semplice + 1 mod. trasporto + 1 mod buffer
140	3200/34 su unità base	24,4	25,6	23,5	24,8	21,9	23,8	24,7	26,4	28,8	24,3	12,2	robot scara + 2 mod trasporto
150	smontaggio da vassoio	16,6	15,4	14,9	16,8	17,5	16,5	14,2	13,9	18,4	15,5	7,9	robot scara

* se il premontaggio è inserito in linea

Note

Quando è indicata l'alternativa fra l'operazione manuale e quella robotizzata, esse sono da intendersi mutuamente esclusive.
Gli eventuali dispositivi di alimentazione dei componenti sono compresi nelle diciture "banco semplice"....

operazione	rilevi (sec)									
10	24,3	25,6	18,4	19,4	20,7	26,8	24,6	22,8	27,5	26,4
20	46,7	48,7	42,5	49,1	42,6	45,8	47,5	47,6	40,5	49,1
30	10,2	14,5	13,4	11,2	14,5	13,2	13,3	14,1	12,5	15,5
40	6,5	4,5	8,6	6,7	7,9	7,8	6,5	6,6	6,8	7
50	24,5	26,5	27,4	21,5	23,6	24,5	29,1	22,5	24,5	23,6
60	15,4	16,4	18,5	12,6	14,5	13,6	14,5	16,5	14,7	15,5
70										
80	39,2	38,7	36,5	34,5	39,5	38,7	34,5	36,7	38,5	38,3
90	10,2	10,3	12,5	12,5	9,9	10,6	10,4	10,6	10,7	11,3
100	175,6	177,8	171,3	171,3	176,5	174,8	180,5	177,8	171,2	176,5
110	22,3	24,6	25,6	25,6	27,4	26,8	24,9	25,6	24,8	26,4
120	124,6	126,8	123,6	123,6	121,5	128,4	129,4	124,6	125,8	121,8
130	47,5	46,7	46,5	46,5	49,2	41,5	42,6	44,7	48,7	47,7
140	24,4	25,6	24,8	24,8	21,9	23,8	24,7	26,4	28,8	24,3
150	16,6	15,4	16,8	16,8	17,5	16,5	14,2	13,9	18,4	15,5

media	scarto
sec	
23,7	3,2
46,0	3,1
13,2	1,6
6,9	1,1
24,8	2,3
15,2	1,7
4,6	
37,5	1,9
10,9	0,9
175,3	3,2
25,4	1,4
125,0	2,6
46,2	2,5
25,0	1,8
16,2	1,4

Attrezzature

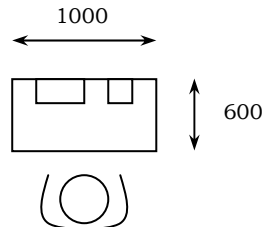
L'analisi del mercato delle attrezzature ha portato a questi risultati:

Banco semplice

Postazione di lavoro per operatore umano con posto vassoio, senza possibilità di buffer, compresa dei sistemi di caricamento dei componenti e di utensileria di avvitatura.

C = 15.500 €

Potenza elettrica= 2.0 kw

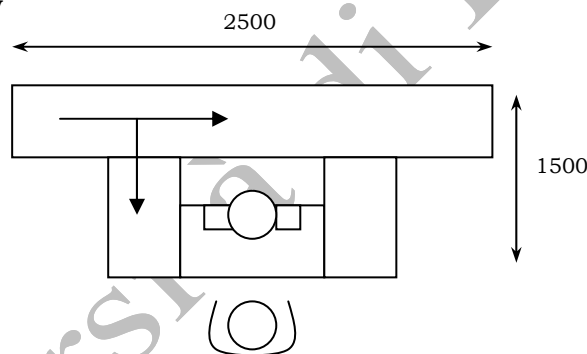


Banco attrezzato

Postazione di lavoro per operatore umano con posto vassoio, con possibilità di 2 posti buffer, compresa dei sistemi di caricamento dei componenti e di utensileria di avvitatura e di pressatura.

C = 26.500 €

Potenza elettrica= 2.5 kw

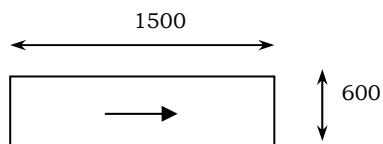


Modulo di trasporto

Modulo adibito al trasporto dei vassoi, di ingombro fisico pari a 2 vassoi, senza possibilità di eseguire buffer (a comando on-off)

C = 2.500 €

Potenza elettrica= 1.2 kw

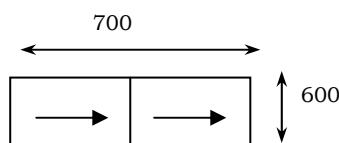


Modulo buffer

Modulo adibito al trasporto dei vassoi, di ingombro fisico pari a 2 vassoi, con possibilità di eseguire buffer (quindi gestioni separate fra i due vassoi)

C = 6.500 €

Potenza elettrica= 1.0 kw

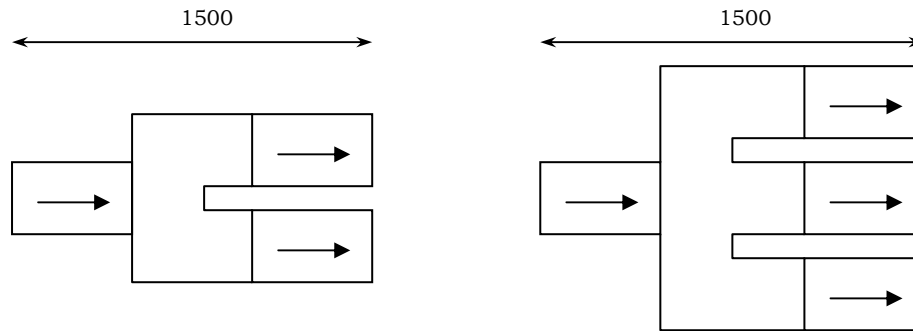


Modulo di derivazione del sistema di trasporto

Modulo adibito alla “divisione” della linea del trasporto in 2 o 3 sotto-linee.

C = 10.000 € (indipendentemente dal numero di derivazioni)

Potenza elettrica= 2.0 kw

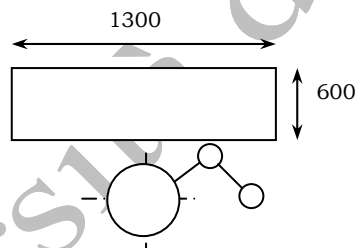


Robot scara

Unità robotizzata SCARA completa di alimentatori dei componenti ed utensileria

C = 34.000 €

Potenza elettrica= 5.0 kw

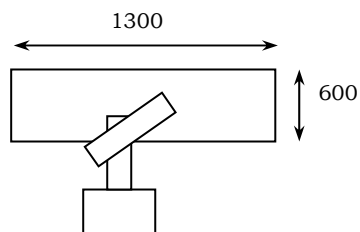


Robot antropomorfo

Unità robotizzata antropomorfa completa di alimentatori dei componenti ed utensileria

C = 94.000 €

Potenza elettrica= 6.0 kw



PRINCIPI PROGETTUALI

Determinazione del “tempo di ciclo”

Visto l’elevato contenuto di lavoro manuale si sceglie la soluzione della linea a “cadenza non imposta”. Di conseguenza nonostante non sia necessario determinare un tempo ciclo “rigoroso” è utile determinare una tempistica orientativa che fungerà da riferimento per il bilanciamento delle singole stazioni. Chiaramente questo tempo è legato alla produttività richiesta dalla linea.

$$Q = 60 \text{ PF/h}$$

$$T_c = 3600 \text{ (sec/h)} / 60 \text{ (PF/h)} = 60 \text{ sec/PF}$$

Calcolo delle statistiche sui tempi di realizzazione delle operazioni

Le campagne sperimentali di misura sulle durate delle operazioni di montaggio manuale permettono il calcolo di valori medi e di scarti quadratici che consentiranno il bilanciamento delle stazioni.

operazione	rilevi (sec)										media	scarto
											sec	
10	24,3	25,6	18,4	19,4	20,7	26,8	24,6	22,8	27,5	26,4	23,7	3,2
20	46,7	48,7	42,5	49,1	42,6	45,8	47,5	47,6	40,5	49,1	46,0	3,1
30	10,2	14,5	13,4	11,2	14,5	13,2	13,3	14,1	12,5	15,5	13,2	1,6
40	6,5	4,5	8,6	6,7	7,9	7,8	6,5	6,6	6,8	7	6,9	1,1
50	24,5	26,5	27,4	21,5	23,6	24,5	29,1	22,5	24,5	23,6	24,8	2,3
60	15,4	16,4	18,5	12,6	14,5	13,6	14,5	16,5	14,7	15,5	15,2	1,7
70											4,6	
80	39,2	38,7	36,5	34,5	39,5	38,7	34,5	36,7	38,5	38,3	37,5	1,9
90	10,2	10,3	12,5	12,5	9,9	10,6	10,4	10,6	10,7	11,3	10,9	0,9
100	175,6	177,8	171,3	171,3	176,5	174,8	180,5	177,8	171,2	176,5	175,3	3,2
110	22,3	24,6	25,6	25,6	27,4	26,8	24,9	25,6	24,8	26,4	25,4	1,4
120	124,6	126,8	123,6	123,6	121,5	128,4	129,4	124,6	125,8	121,8	125,0	2,6
130	47,5	46,7	46,5	46,5	49,2	41,5	42,6	44,7	48,7	47,7	46,2	2,5
140	24,4	25,6	24,8	24,8	21,9	23,8	24,7	26,4	28,8	24,3	25,0	1,8
150	16,6	15,4	16,8	16,8	17,5	16,5	14,2	13,9	18,4	15,5	16,2	1,4

Bilanciamento della linea: il carico di lavoro delle stazioni

Il cuore del problema consta nella divisione della linea in differenti stazioni all’interno delle quali operatori ovvero robot eseguono un certo numero di operazioni di montaggio.

Questo assegnamento è da eseguire alla luce del tempo “mediamente concesso” ad ogni singola stazione (linea a cadenza libera, $T_c = 60 \text{ sec/PF}$), alla luce della durata delle singole operazioni e alla luce della gerarchia di montaggio.

Per il bilanciamento possono essere impiegati differenti algoritmi di calcolo con differenti funzioni obiettivo.

In questo caso si procederà con la semplice procedura della saturazione del tempo di ciclo: si assegneranno operazioni alla stazione sino a saturare “ragionevolmente” il tempo concesso.

Si fa notare come “il carico ragionevole” sia legato alla natura probabilistica dei tempi per operazione. Il riferimento esclusivo alla durata media di una operazione ha collegata una probabilità di mancato completamento pari al 50%.

Senza procedere con l’approccio matematico volto alla valutazione della probabilità di mancato completamento (cfr. approccio di Kottas-Lau) il bilanciamento terrà in considerazione questo aspetto cercando di “caricare” le stazioni con un tempo complessivo che consenta una certa tolleranza fra la somma dei valori medi delle singole operazioni e il tempo ciclo orientativo.

I dati di progetto consentono la progettazione di differenti linee di montaggio con differenti gradi di automazione: alcune operazioni possono essere svolte sia manualmente sia automaticamente con robot. La soluzione ottimale sarà quella che garantisce il minimo costo di montaggio.

Nelle pagine seguenti verrà riportato il caso della progettazione della linea con il minimo grado di automazione. Il bilanciamento delle linee alternative si può condurre secondo le medesime procedure.

Linea “manuale”

Stazione 1

Op disponibili: op10 (blocco dell'unità di base sulla linea di trasporto, operazione obbligata)

Op assegnate: op10 carico assegnato: 23.7 sec

Si valuta l'introduzione di altre operazioni

Op disponibili: op20, op50, op100, op110 (i pre-montaggi sono considerati sempre disponibili)

$op10+op20=23.7+46.0=69.7$ sec

$op10+op50=23.7+24.8=48.5$ sec ←

$op10+op100=23.7+175.3=199.0$ sec

$op10+op110=23.7+25.4=49.1$ sec

L'introduzione della operazione op20 e op100 a valle della op10 è da scartare per l'eccessivo carico di lavoro prodotto. Restano interessanti le operazioni op50 e op110. Si preferisce introdurre la op50 in quanto a fronte di un carico operatore, nelle 2 configurazioni, praticamente uguale questa, rispetto alla op110, è un'operazione all'inizio del ciclo, e quindi un suo precoce assegnamento potrebbe “svincolare”, cioè rendere possibili, altre operazioni per gli assegnamenti futuri.

Op assegnate: op10+op50

Ogni altra operazione produrrebbe un carico di stazione non accettabile e quindi si decide di aprire una nuova stazione.

Stazione 1: op10 + op50

Stazioni successive

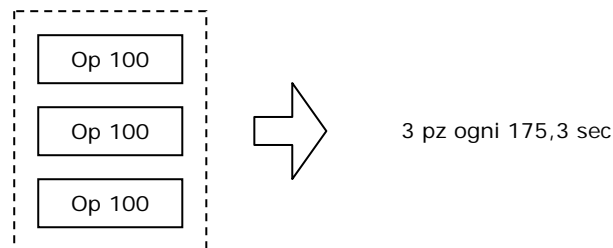
Per il bilanciamento delle stazioni successive si procede allo stesso modo, per ragioni di brevità si riportano solamente i risultati finali con il tempo corrispondente di carico delle singole stazioni.

Prima di procedere può essere interessante fare qualche riflessione relativamente alla operazione op100.

In effetti questa operazione ha un tempo medio di completamento pari a 175,3 sec/pz decisamente superiore al tempo di ciclo orientativo di 60 sec/pz.

Vista l'impossibilità di “frazionare” l'operazione si deve obbligatoriamente procedere alla duplicazione dei mezzi di produzione.

In questo caso $175,3 / 3 = 58,43$ sec può essere considerato il tempo fittizio di funzionamento di una stazione contenente 3 operatori impegnati parallelamente sulla operazione op100



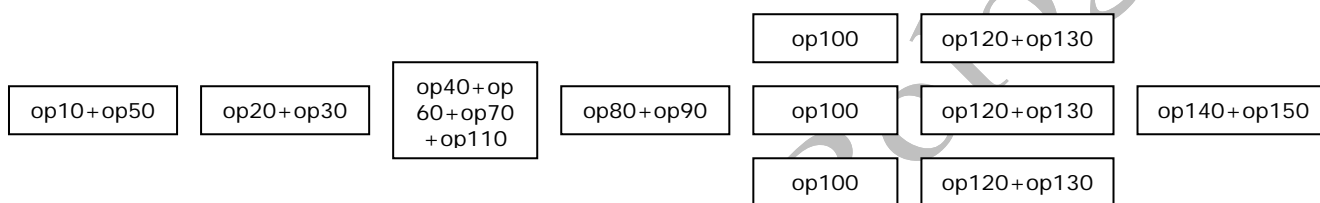
Chiaramente nella pratica risulta impossibile equidistanziare nel tempo le uscite dei 3 operatori, questo fenomeno non rappresenta un problema in quanto è eliminato dalla presenza dei buffer interoperazionali a valle della stazione (la linea è a cadenza non imposta).

Proseguendo secondo la metodologia fin qui adottata, in definitiva il carico delle singole stazioni può essere riassunto nella tabella sottoriportata.

stazione	operazioni assegnate	tempo assegnato (sec)
1	op10+op50	48,5
2	op20+op30	59,2*
3	op40+op60+op70+op110	52,1
4	op80+op90	48,8
5	op100 (3 operatori)	$175,3/3=58,4$
6	op120+op130 (3 operatori)	$(125,0+46,2)/3= 57,1$
7	op140+op150	41,2

* la stazione 2 appare al limite del tempo ciclo (potrebbe essere interessante una stima della probabilità di mancato completamento)

Schema logico del bilanciamento della linea



Scelta delle attrezzature

Al passo precedente è stato ottenuto un dimensionamento “logico” della linea nel senso che sono state assegnate le operazioni alle singole stazioni. Per il dimensionamento finale è necessario analizzare le attrezzature richieste dalle singole operazioni in modo da scegliere la configurazione impiantistica della linea.

Esempio - Stazione 4

Op80: banco attrezzato + 1 mod. di trasporto + 1 mod. buffer

Op90: banco semplice + 1 mod. di trasporto + 1 mod. buffer

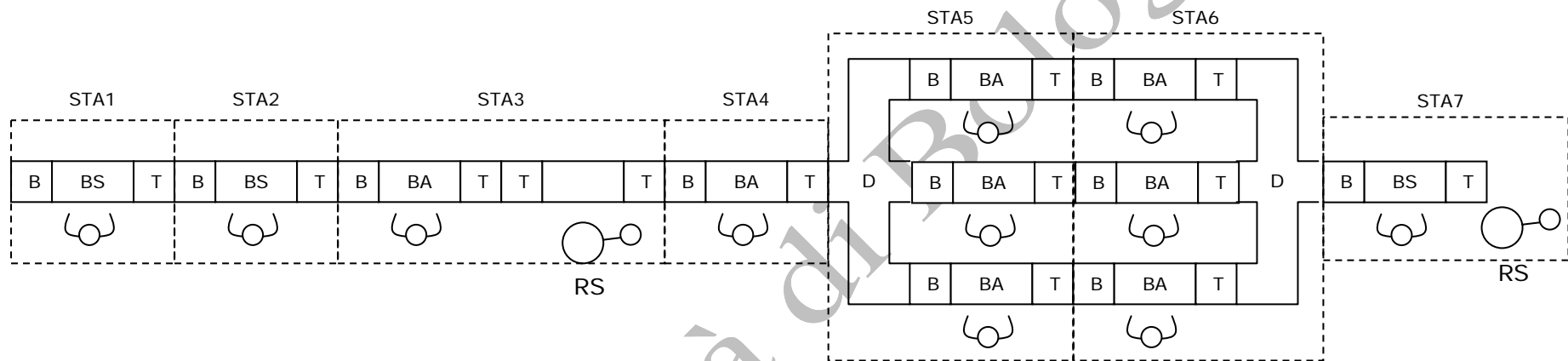
Visto che l'operatore deve svolgere le operazioni in tempi differenti sulle medesime attrezzature si sceglierà l'impiantistica maggiormente sofisticata (considerando che in genere tale attrezzatura ha la possibilità di garantire anche le operazioni più “semplici”).

Quindi nel caso in oggetto la scelta cadrà su: banco attrezzato + 1 mod. di trasporto + 1 mod. buffer.

Di conseguenza lo schema della linea “manuale” progettata potrebbe essere quello della figura seguente.

Visto il ridotto numero di stazioni è stata scelta una configurazione rettilinea (a bastone).

Schema della linea



Legenda

B – buffer
 BA – banco attrezzato
 BS – banco semplice
 D – derivazione
 RS – robot scara
 T – trasporto

Valutazioni economiche

A questo punto si possono condurre delle valutazioni circa il costo della operazione di montaggio per ciascun prodotto.

Per brevità si valuteranno le principali voci di costo diretto, lo scopo sarà semplicemente quello della determinazione del costo della sola operazione di assemblaggio. *Per una valutazione del costo complessivo del prodotto intervengono innumerevoli altre causali di costo non oggetto della presente trattazione.*

Costo delle attrezzature

attrezzatura	quantità	costo unitario (€)	costo tot (€)
<i>mod buffer</i>	11	6.500	71.500
<i>mod trasporto</i>	13	2.500	32.500
<i>banchi semplici</i>	3	15.500	46.500
<i>banchi attrezzati</i>	8	26.500	212.000
<i>robot scara</i>	2	34.000	68.000
<i>derivazioni</i>	2	10.000	20.000
			450.500

Procedendo al calcolo di un costo orario si prevede di considerare una vita utile di impianto pari a 5 anni con un costo del denaro $i=8\%$, risulta:

$$\text{coeff. ammortamento } s = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} = 0.25$$

Di conseguenza:

$$C_{attr} = s \cdot \frac{450.000}{220 \cdot 8} = 64.0 \text{ €/h}$$

Costo dell'energia elettrica

attrezzatura	quantità	pot unitaria (kw)	pot tot (kw)
<i>mod buffer</i>	11	1,0	11,0
<i>mod trasporto</i>	13	1,2	15,6
<i>banchi semplici</i>	3	2,0	6,0
<i>banchi attrezzati</i>	8	2,5	20,0
<i>robot scara</i>	2	5,0	10,0
<i>derivazioni</i>	2	2,0	4,0
			66,6

Considerando una tariffa per l'energia elettrica per utenza industriale pari a 0,11 €/kwh si ottiene un costo orario della linea pari a:

$$C_{elettr} = 66.6 \cdot 0.11 = 7.3 \text{ €/h}$$

Costo della MdO

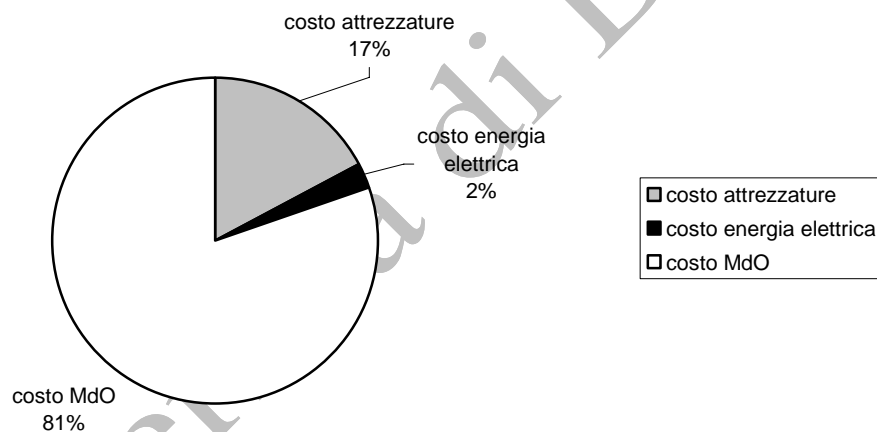
tipo di MdO	quantità	costo unitario (€)	costo tot (€)
operatori di linea	10	17	170
carrellista	1	17	17
responsabile linea	1	51	51
			238

Quindi il costo orario della MdO è $C_{MdO}=238 \text{ €/h}$

Costo complessivo assemblaggio di 1 pezzo

$$C_{1pz} = \frac{C_{attr} + C_{elettr} + C_{MdO}}{Q} = \frac{64 + 7.3 + 238}{60} = 5.155 \text{ €/h}$$

La distribuzione dei costi può essere evidenziata con il seguente grafico:



Nota importante

L'ottimizzazione del problema si raggiunge attraverso la progettazione di differenti linee con differenti gradi di automazione (inserimento più o meno intensiva delle operazioni robotizzate, secondo lo schema di pagina 3).

Introducendo l'automazione in linea di principio si produce un aumento dei costi di investimento e dei costi per le energie, di converso una diminuzione del costo di manodopera. Si tratta quindi di un problema di ricerca del miglior trade-off e la scelta cadrà sulla linea che consente il costo post-montaggio inferiore.