



Industrial Design Manufacturing&Plants

**Dimensionamento di una linea a
trasferimento vincolato**

**Marco Raimondi
(mraimondi@liuc.it)**

Numero minimo di operatori

<u>VALUTAZIONE NUMERO MINIMO OPERATORI</u>	
Sommatoria di tutti i tempi attivi di ciclo (minuti)	23 min
Volume produttivo impostato (pezzi)	178 pezzi
Tempo totale di lavoro per turno (min) = sommetoria dei tempi attivi x numero pezzi a turno	4094 min
Tempo di durata del turno (60 min/h x 8 ore = 480 min)	480 min
Tempo di disponibilità di linea (considerando una pausa di 30 min: 480 min - 30 min = 450 min.)	450 min
Tempo di presenza in linea dell'operatore: 450 min - 38 min (per pause e attività diverse) = 412 min	412 min
Tempo di ciclo stimato (minuti) = tempo di disponibilità linea / volume produttivo	2,53 min
Livello massimo di saturazione:	87%
84% per Tciclo fino a 1 minuto	
86% per Tciclo fino a 2 minuti	
87% per Tciclo fino a 4 minuti	
88%-90% per tempi di ciclo superiori a 4 minuti	
Numero minimo di operatori calcolato = Tempo totale di lavoro turno / (tempo di presenza * saturaz. Max)	11,42 n°op.
Numero minimo di operatori necessari*	12 n°op.

Metodi per il dimensionamento delle linee

- **Esistono due famiglie di metodi:**
 - **Metodi di programmazione lineare, ovvero algoritmi della ricerca operativa, che portano ad una soluzione ottimizzata ma sono applicabili solo a problemi la cui funzione obiettivo sia espressa da una funzione lineare**
 - **Metodi euristici, ovvero metodi che per un dato problema portano ad una soluzione accettabile, anche se non ottimale, attraverso un procedimento intuitivo**
- **Problemi tipici nella progettazione di una linea:**
 1. **Fattibilità dato il tempo di ciclo e il numero delle stazioni**
 2. **Minimizzare il numero di stazioni dato il tempo di ciclo**
 3. **Minimizzare il tempo di ciclo dato il numero di stazioni**
 4. **Minimizzare il tempo di ciclo ed il numero di stazioni**

LCR (Largest Candidate Rule)

- **Obiettivo**
 - Dato il tempo di ciclo, ottimizzare il numero di stazioni cercando la maggiore saturazione possibile
- **Dati in ingresso**
 - Numero e durata delle operazioni
 - Diagramma delle precedenze
 - Tempo di ciclo
- **Procedimento**
 - Ordinare le operazioni per durata decrescente

- **Assegnare le operazioni alle stazioni facendo riferimento al diagramma delle precedenze scegliendo l'operazione di durata maggiore**
- **Prima di ogni assegnazione controllare che la somma delle durate per stazione non superi il tempo di ciclo, altrimenti aprire un'altra stazione**
- **E' importante cercare una saturazione del 100%**
- **E' quindi opportuno calcolare l'efficienza del bilanciamento che dovrebbe essere compreso tra 85-90%**

$$\text{Efficienza} = \frac{\Sigma \text{Carico di lavoro di ogni stazione}}{\text{Numero delle stazioni} \times \text{Tempo di ciclo}}$$

RPW (Ranked Positional Weights)

- **Obiettivo**
 - Dato il tempo di ciclo, ottimizzare il numero di stazioni cercando la maggiore saturazione possibile
- **Dati in ingresso**
 - Numero e durata delle operazioni
 - Diagramma delle precedenze
 - Tempo di ciclo
- **Procedimento**
 - Calcolare per ogni operazione j il punteggio associato

$$RPW_j = t_j + \sum_{h \in S_j} t_h$$

Ove

$T_{j,h}$ è la durata dell'operazione j o h

S_j è l'insieme di tutte le operazioni che seguono l'operazione j

- Dopo aver calcolato tutti i punteggi RPW, ordinare le operazioni in modo decrescente secondo il punteggio
- Assegnare le operazioni alle stazioni facendo riferimento al diagramma delle precedenze scegliendo l'operazione con punteggio RPW maggiore
- Prima di ogni assegnazione controllare che la somma delle durate per stazione non superi il tempo di ciclo, altrimenti aprire un'altra stazione
- E' importante cercare una saturazione del 100%
- E' quindi opportuno calcolare l'efficienza del bilanciamento che dovrebbe essere compreso tra 85-90%

$$\text{Efficienza} = \frac{\Sigma \text{Carico di lavoro di ogni stazione}}{\text{Numero delle stazioni} \times \text{Tempo di ciclo}}$$

Kilbridge Western (del bilanciamento)

- **Obiettivo**
 - Dato il tempo di ciclo, ottimizzare il numero di stazioni prediligendo il bilanciamento dei carichi di lavoro
- **Dati in ingresso**
 - Numero e durata delle operazioni
 - Diagramma delle precedenze
 - Tempo di ciclo
- **Procedimento**
 - **Strutturare il diagramma di precedenza per livelli:**
 1. Operazioni senza predecessori
 2. Operazioni con almeno un predecessore
 3. Operazioni con almeno un predecessore diretto di livello 2
 4. Cercare di spostare ogni operazione al livello più alto possibile

- Dopo aver assegnato le operazioni a tutti i livelli, assegnare le operazioni alle stazioni facendo riferimento al diagramma delle precedenze scegliendo questa volta l'operazione disponibile a livello più basso
- Prima di ogni assegnazione controllare che la somma delle durate per stazione non superi il tempo di ciclo, altrimenti aprire un'altra stazione
- E' importante cercare una saturazione del 100%
- E' quindi opportuno calcolare l'efficienza del bilanciamento che dovrebbe essere compreso tra 85-90%

$$\text{Efficienza} = \frac{\Sigma \text{Carico di lavoro di ogni stazione}}{\text{Numero delle stazioni} \times \text{Tempo di ciclo}}$$

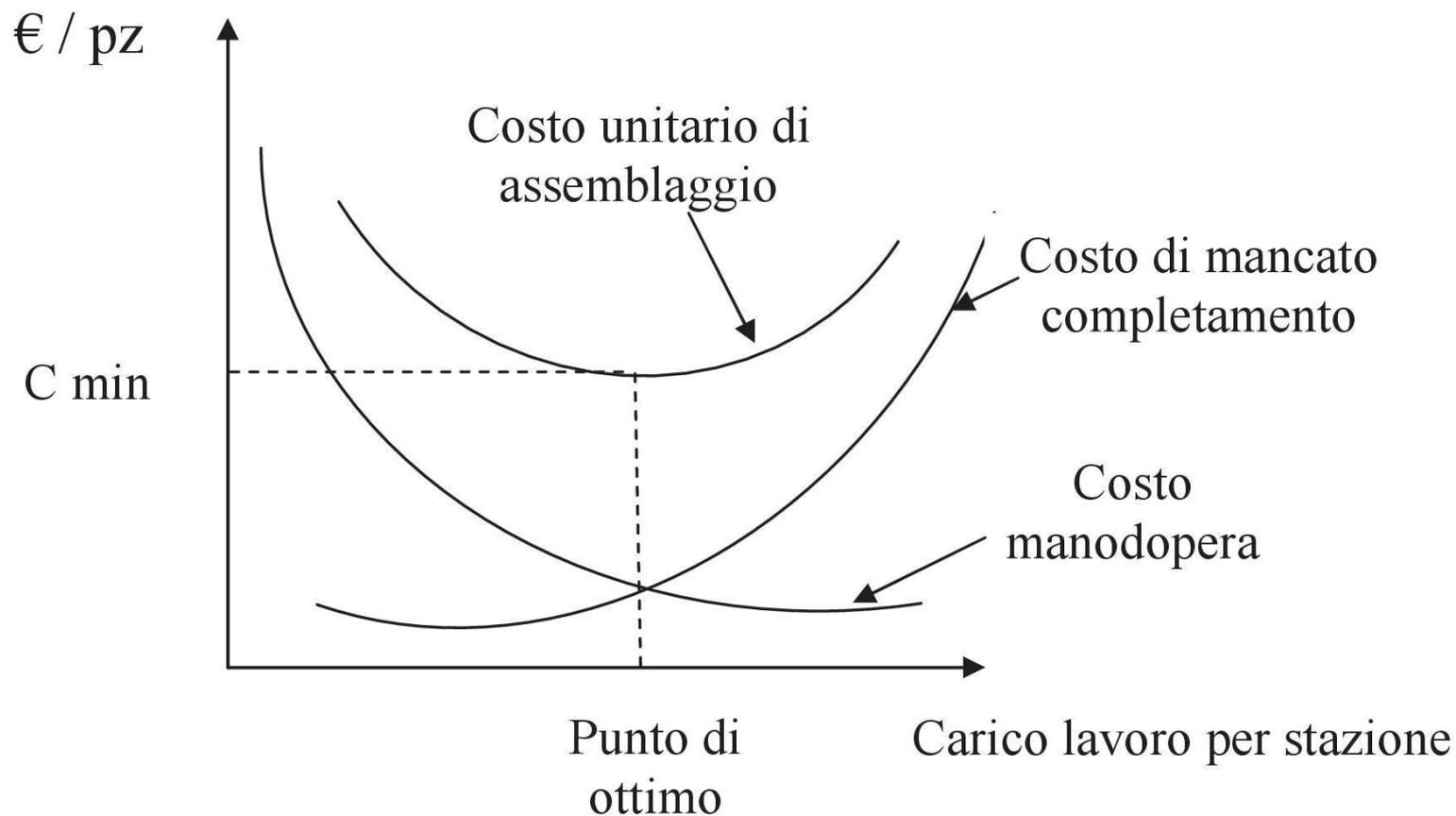
Kottas Lau (della desiderabilità marginale)

- **Si pone il problema dell'incompletezza di un'operazione da parte dell'operatore preposto**
- **L'incompletezza comporta un costo in quanto il pezzo dovrà essere completato fuori linea (stazione ospedale)**
- **Quando un'operazione non viene completata tutte le operazioni a valle non vengono completate**
- **L'attività di completamento fuori linea sarà tanto più onerosa quanto più avviene nelle prime stazioni della linea**
- **Il trade off diventa scegliere tra bassa incompletezza e operatori poco saturi**

Bilanciamento della linea

- **Obiettivo**
 - Stabilire quante e quali operazioni assegnare a ciascuna stazione per bilanciare la linea minimizzando il costo atteso per rischi di mancato completamento e stazioni poco saturate
- **Dati in ingresso**
 - Numero, durata media e deviazione standard delle operazioni
 - Diagramma delle precedenze
 - Tempo di ciclo
 - Costo di ogni operatore
 - Costo di mancato completamento di ogni operazione e della sua esecuzione fuori linea

Funzione obiettivo



Ipotesi semplificative per l'applicazione

- 1. Il tempo ciclo e i vincoli di precedenza tra una operazione e l'altra costituiscono gli unici vincoli per l'assegnazione dei compiti**
- 2. Le retribuzioni degli operatori sono identiche**
- 3. Un'operazione può essere iniziata solo se tutte le operazioni con vincoli di precedenza sono state completate**
- 4. Il tempo di completamento di ogni operazione è aleatorio e caratterizzato da una distribuzione normale di cui si possono calcolare il valore medio M_k e la deviazione standard σ_k**
- 5. La durata di ciascuna operazione è indipendente da quelle delle altre operazioni e dall'ordine con cui sono eseguite**
- 6. Le operazioni incomplete possono essere completate fuori linea: il costo di completamento fuori linea della singola operazione non dipende dalla probabilità di completamento in linea**

Definizioni

T = 1/q = tempo ciclo della linea,

C = costo orario del lavoro,

M_K, σ_K = valor medio e deviazione standard della durata della operazione k-sima,

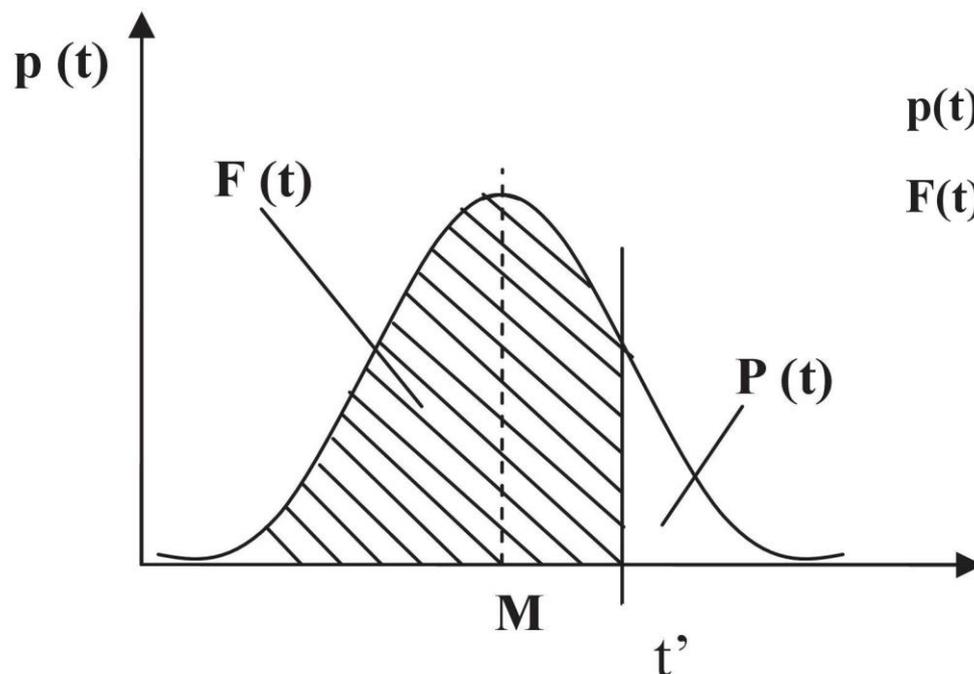
$I_K = \sum_{K=1}^n I'_K$ Costo totale di mancato completamento causato dovuto alla operazione k-sima e a tutte le successive

v = numero operazioni immediatamente successive alla generica operazione,

$L_K = M_K \frac{C}{60}$ (€/unità) = Costo MdO per l'esecuzione della operazione k-sima

Se la durata delle operazioni t può essere assimilata ad una variabile aleatoria con distribuzione normale $p(t)$, dal seguente grafico si possono calcolare:

- la probabilità $F(t)$ che l'operazione k abbia una durata $T < t'$
- la probabilità $P(t) = 1 - F(t)$ che l'operazione k abbia una durata $T > t'$, ovvero che all'istante t' l'operazione k non sia ancora terminata)

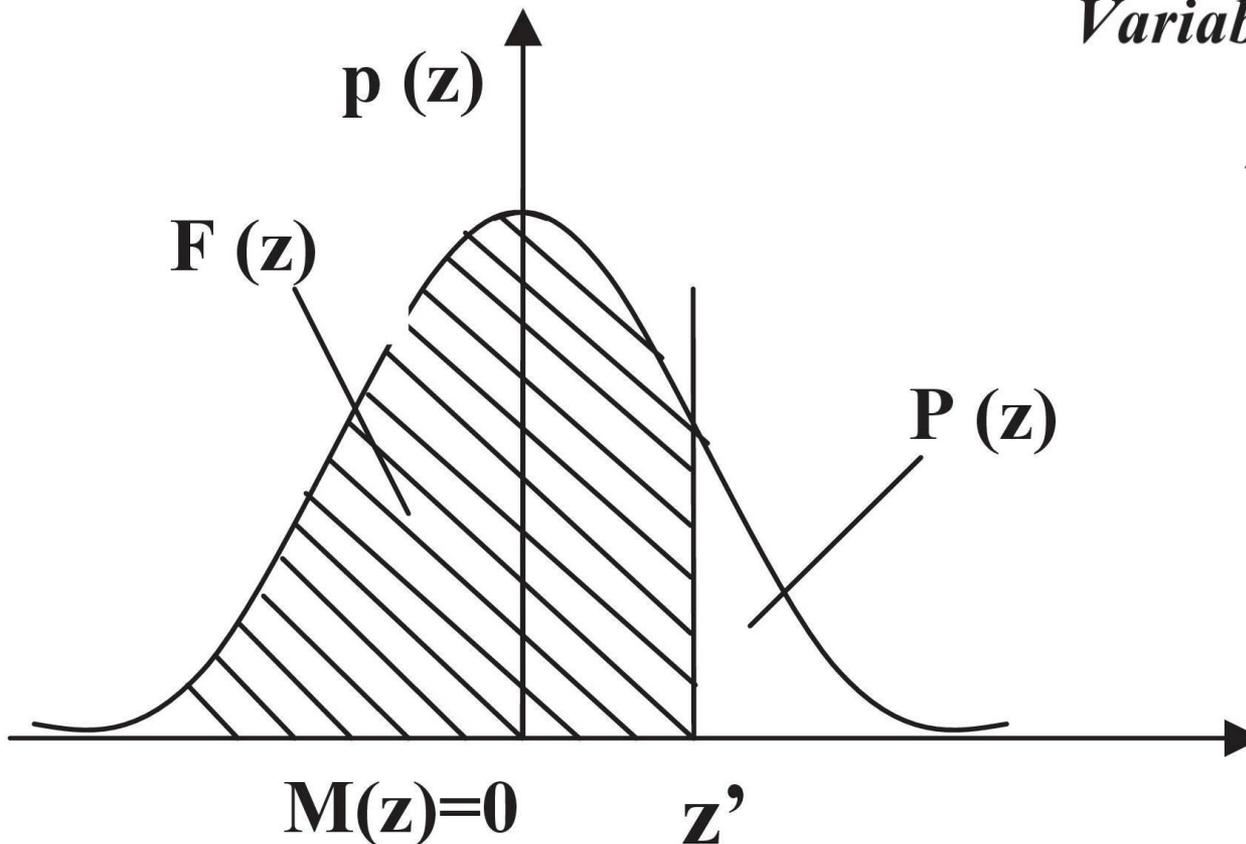


$p(t)$ = funzione densità di probabilità

$F(t)$ = funzione di distribuzione

$$F(t) = \int_0^{t'} p(\tau) d\tau$$

Se consideriamo in luogo di t una variabile normalizzata z , una volta noti i valori del tempo medio M e della deviazione standard σ , i valori della densità di probabilità saranno tabulati



Variabile normalizzata

$$z = \frac{t - M}{\sigma}$$



Valori tabulati

$F(z_K) = F_K =$ probabilità che tutte le operazioni assegnate alla stazione, compresa la k-sima siano ultimate entro il tempo ciclo T.

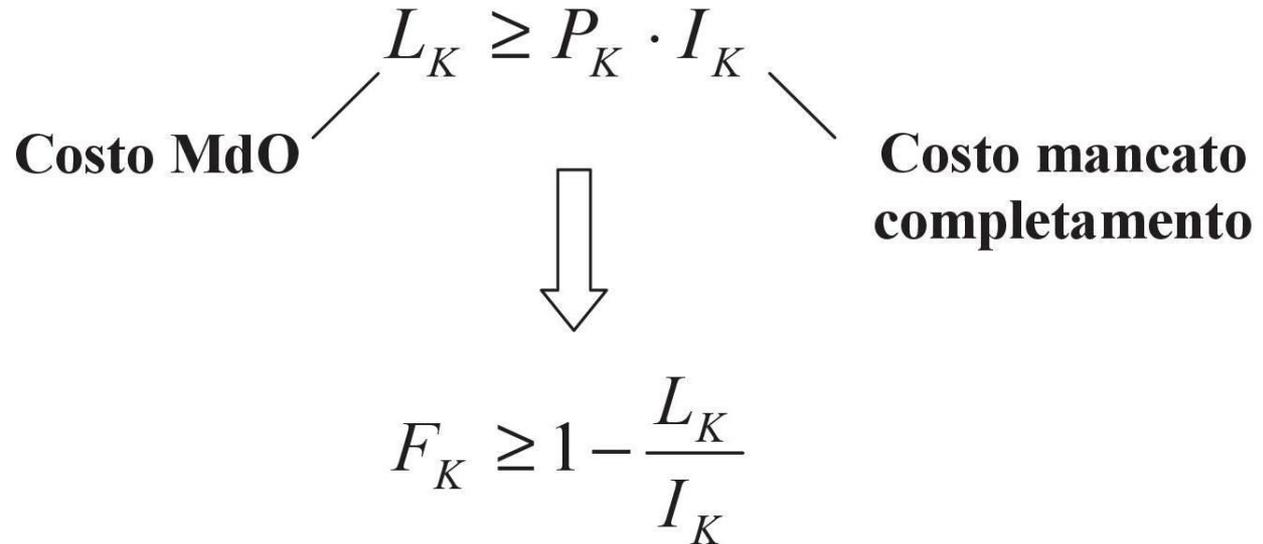
$P(z_K) = P_K = 1 - F(z_K) =$ probabilità di mancato completamento della k-sima operazione entro il tempo ciclo T.

E se alla stazione sono assegnate una serie di operazioni con vincoli di precedenza, occorre considerare l'aleatorietà di tutte le operazioni precedenti

Essendo j la generica operazione assegnata alla stazione considerata

$$z_K = \frac{T - \sum_j M_j}{\sqrt{\sum_j \sigma_j^2}}$$

Desiderabilità marginale



Soglia di desiderabilità:

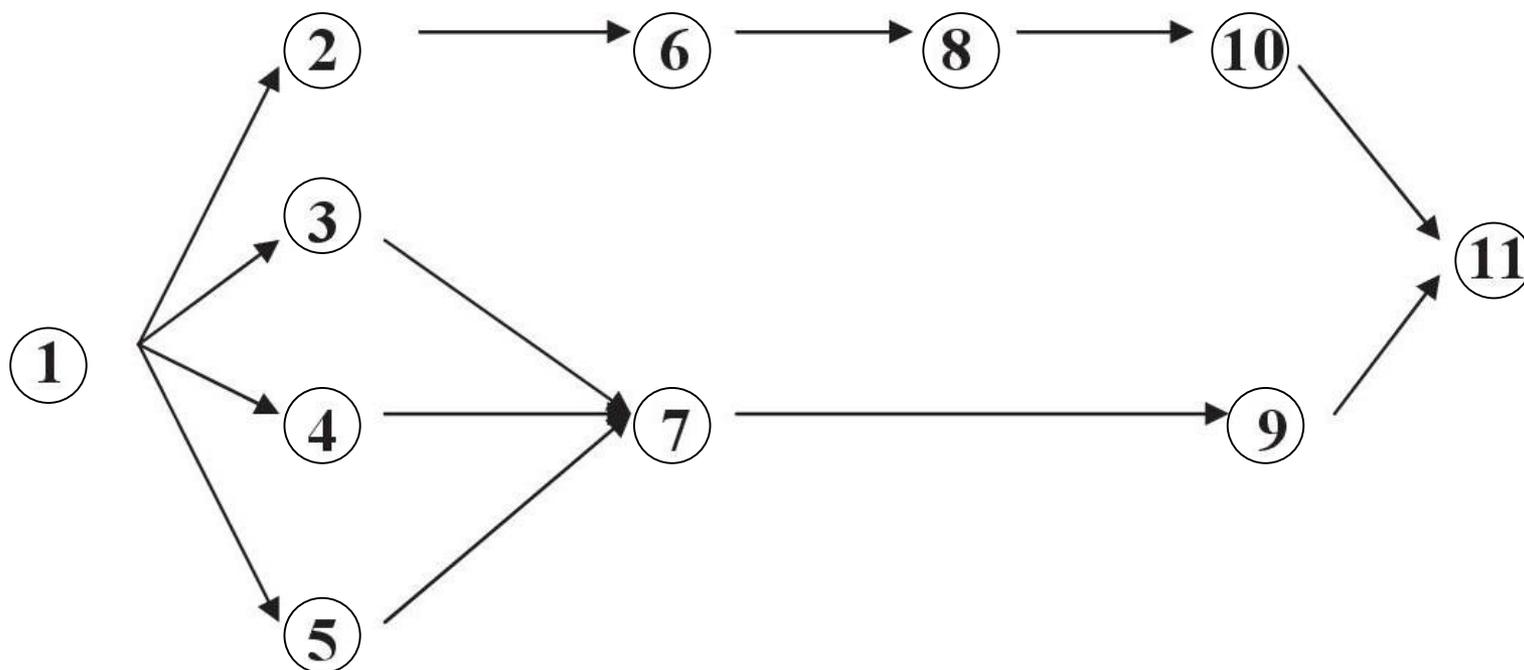
$$F(z_K^*) = 1 - \frac{L_K}{I_K}$$

z_K^* si ricava dalla tabella

Allocazione delle operazioni

- Il metodo si basa sull'allocazione delle diverse operazioni nelle stazioni dopo aver classificato ciascuna operazione nelle seguenti tipologie:
 - Disponibile: quando rispetta i vincoli di precedenza
 - Sicura: quando cioè $z_k \geq z^*k = 2,575$, ovvero $F_k > 0,995$, ovvero è considerabile completabile con una probabilità superiore al 99,5%
 - Desiderabile: quando $L_k \geq P_k \times I_k$, cioè $z_k \geq z^*k$, ovvero il costo del suo potenziale mancato completamento è inferiore al costo della sua realizzazione in linea
 - Critica: quando non risulta desiderabile neanche a stazione vuota
- Di seguito una applicazione pratica del metodo

Esempio di ciclo di assemblaggio

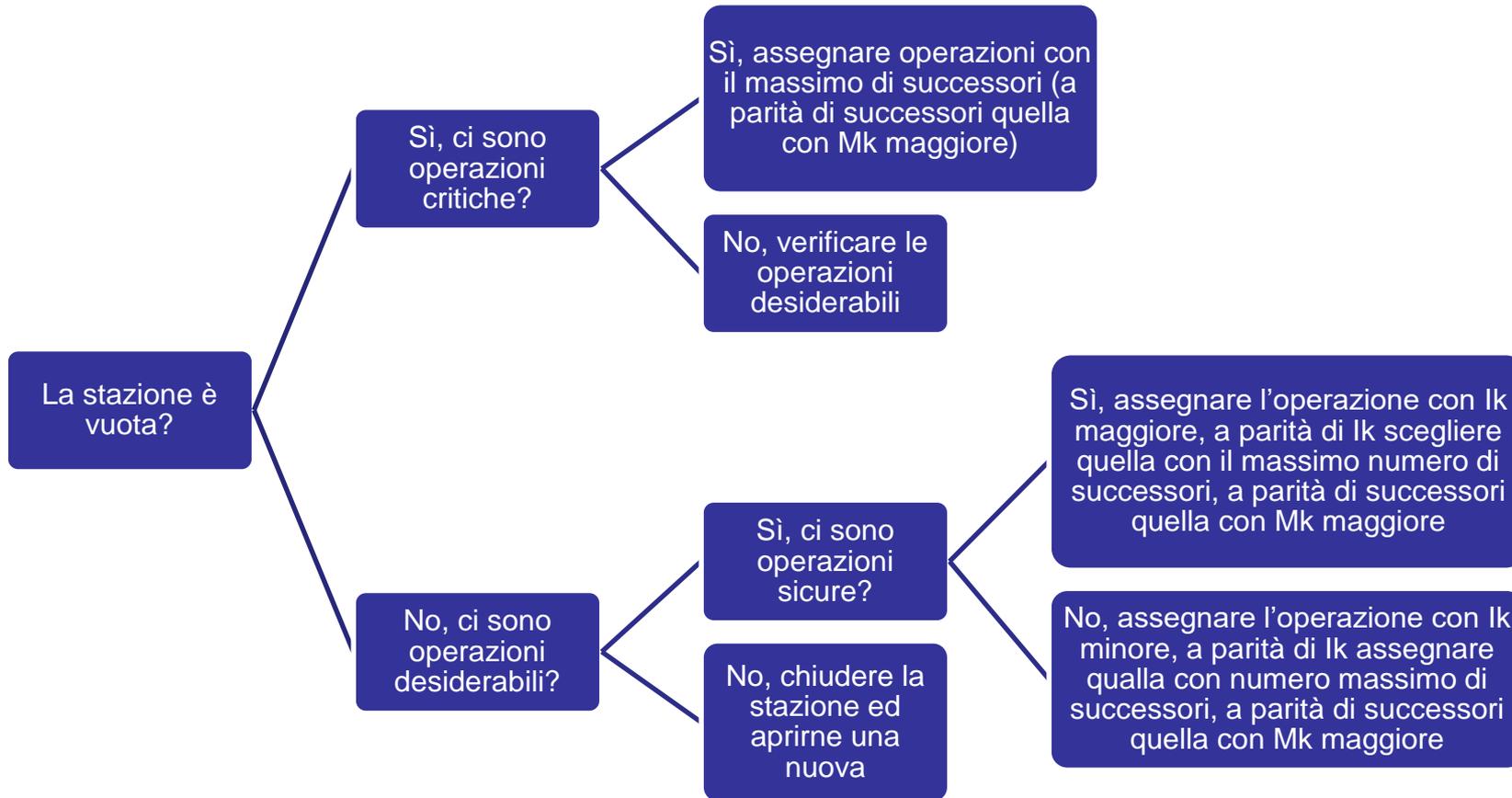


Preparare una tabella con le operazioni

Dati:	Numero delle operazioni		11
	Cadenza	q	[pz/ora] 6
	Tempo di ciclo	T = 60/q	[min/pz] 10
	Costo del lavoro	C	[euro/h] 30

Operaz.	Mk	σk^2	Op.imm.	Op. imm.	Lk	l'k	lk	F(Z*k)	Pk	Z*k
[#]	[min]		preced.	success.	(€/pz)	(€/pz)	(€/pz)	=1-Lk/lk	=1-F(k)	(tab.distr)
1	6	1,2	nessuna	2,3,4,5	3,00 €	3,00 €	31,50 €	0,9048	0,0952	1,31
2	2	0,4	1	6	1,00 €	2,00 €	12,50 €	0,9200	0,0800	1,41
3	4	1	1	7	2,00 €	2,50 €	9,50 €	0,7895	0,2105	0,80
4	9	5	1	7	4,50 €	7,00 €	14,00 €	0,6786	0,3214	0,46
5	2	0,4	1	7	1,00 €	1,50 €	8,50 €	0,8824	0,1176	1,19
6	2	0,4	2	8	1,00 €	1,50 €	10,50 €	0,9048	0,0952	1,31
7	3	0,6	3,4,5	9	1,50 €	2,00 €	7,00 €	0,7857	0,2143	0,79
8	6	1,2	6	10	3,00 €	4,00 €	9,00 €	0,6667	0,3333	0,43
9	5	1	7	11	2,50 €	3,00 €	5,00 €	0,5000	0,5000	0,00
10	5	1	8	11	2,50 €	3,00 €	5,00 €	0,5000	0,5000	0,00
11	3	1,8	9,10	nessuna	1,50 €	2,00 €	2,00 €	0,2500	0,7500	-0,67

Albero decisionale



Allocazione delle operazioni nelle stazioni

Stazione [#]	Operaz. Assegn.	Operaz. Dispon.	Zk $= (T - \Sigma M) / \text{rad} q(\Sigma \sigma^2)$	Z*k (tab.distr)	Desider. $Z_k \geq Z^*k$	Sicure $Z_k \geq 2,575$	Critiche $Z_k < Z^*k$	Note
1	nessuna	1	3,33	1,31	1	1	–	
	1	2	1,58	1,41	2	–	–	le operazioni 2 e 5 sono desiderabili ma non sicure, si assegna la 5 in quanto ha un Ik minore
		3	0,00	0,80	–	–	3	
		4	-0,97	0,46	–	–	4	
		5	1,58	1,19	5	–	–	
1 e 5	2	0,00	1,41	–	–	2	non ci sono stazioni desiderabili pertanto si apre una nuova stazione	
	3	-1,24	0,80	–	–	3		
	4	-0,60	0,46	–	–	4		
2	nessuna	2	20,00	1,41	2	2	–	con la stazione vuota si assegna l'operazione 4 che risulta critica
		3	6,00	0,80	3	3	–	
		4	0,20	0,46	–	–	4	
	4	etc...						

Risultato finale del bilanciamento

Stazione	1	2	3	4	5	6
Operazioni	1	4	2	8	7	10
	5		6		9	11
			3			

Simulazione

- **Ove possibile è opportuno condurre una verifica di quanto progettato attraverso una simulazione tramite software.**
- **Il software Arena con linguaggio Siman, dispone di una interfaccia interattiva e consente diverse analisi tra cui:**
 - **Misurare i processi aziendali (as-is)**
 - **Analisi "what-if" valutando possibili alternative (to-be)**
 - **Identificare i colli di bottiglia (bottle necks)**
 - **quantificare i costi di processo e ridurre il tempo ciclo**
 - **Schedulare e allocare le risorse in modo ottimo**