UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale Industriale

GESTIONE DELLA PRODUZIONE

Modello matematico del job-shop: applicazione al caso Aero Components Ltd.

prof. ing. Alberto F. De Toni

Sommario

1. Costruzione di un modello matematico per un sistema produttivo job-shop

2. Modello matematico: *rappresentazione grafica*

3. Caso Aero Components Ltd.: *applicazione del modello matematico*

Modello matematico:
esempio di sistema produttivo job-shop

Un'officina meccanica fabbrica componenti destinati ad una successiva fase di montaggio:

- $NC = 4000 \quad [codici]$
- $NR = 60 \quad (reparti)$
- $n = 6 \quad [operazioni]$ $\Rightarrow$ $\begin{cases} \text{valore minimo: } n_{\min} = 2 \quad [operazioni] \\ \text{valore massimo: } n_{\max} = 20 \quad [operazioni] \end{cases}$
- $\lambda = 6 \quad \left[\dfrac{ore}{operazione}\right]$
- $\dfrac{1}{\Delta T} = 40 \quad \left[\dfrac{1}{giorno}\right]$
- $WIP = 800 \quad (lotti)$ $\Rightarrow$ $WIP^{*} = 1.000.000 \quad [€]$
- Cicli di lavorazione tutti diversi l'uno dall'altro ed un turno di lavoro al giorno

Calcolo numero medio operazioni e costi diretti

Ricaviamo i parametri:

- n, numero medio di operazioni del ciclo, dalla relazione:

$$x = \frac{n}{a} \quad \left[\frac{operazioni}{giorno} \right] \tag{1.1}$$

ossia si ha, in base all'Eq. (1.1):

$$n = a\,x \quad [operazioni] \tag{1.2}$$

- λ^*, valore medio dei costi diretti (manodopera, ammortamento, ecc.) imputabile ad ogni operazione di un lotto esprimibile come:

$$\lambda^* = \frac{l^*}{a\,x} \quad \left[\frac{€}{operazione} \right] \tag{1.3}$$

Calcolo del Work In Process

Il WIP (*Work In Process*), numero di lotti mediamente presenti nel sistema produttivo, è esprimibile come:

$$WIP = \frac{a}{\Delta T} \quad (lotti) \tag{1.4}$$

Può essere espresso in funzione dei parametri assunti come indipendenti, ottenendo quindi:

$$WIP^* = \frac{a}{\Delta T}\left(m^* + \frac{l^*}{2}\right) \quad [€] \tag{1.5}$$

dato dal prodotto di:

- $a / \Delta T$, numero di lotti mediamente presenti nel sistema produttivo;
- ($m^* + l^*/2$), somma del valore delle materie prime e della metà dei costi diretti del lotto medio; mediamente ogni lotto ha un 50% di costi già assorbiti e un 50% di costi da assorbire.

Calcolo di tempo di attraversamento e operazioni in un giorno

Il tempo medio di attraversamento può essere calcolato in base all'Eq. (1.4). Si ha così:

$$a = WIP\,\Delta T = \frac{800}{40} = 20 \quad [giorni]$$

dove il WIP (*Work In Process*) rappresenta il numero di lotti mediamente presenti nel sistema produttivo e ΔT è l'intervallo medio di tempo tra l'ingresso nel sistema produttivo di un lotto ed un altro. Il numero medio di operazioni eseguite in un giorno risulta essere:

$$X = n\frac{1}{\Delta T} \quad \left[\frac{operazioni}{giorno}\right] \qquad (1.6)$$

dove n è il numero medio di operazioni del ciclo e $1/\Delta T$ è il numero di lotti entranti mediamente in un giorno. Con riferimento all'Eq. (1.6), dai dati in ingresso si ottiene:

$$X = n\frac{1}{\Delta T} = 6 \cdot 40 = 240 \quad \left[\frac{operazioni}{giorno}\right]$$

Calcolo del numero medio di operazioni per giorno lotto

Dalle Eq. (1.1), (1.4) e (1.6) il parametro x, numero medio di operazioni eseguite su un lotto in un giorno, è pari a:

$$x = \frac{n}{a} = \frac{n/\Delta T}{a/\Delta T} = \frac{X}{WIP} = \frac{240}{800} = 0,3 \quad \left[\frac{operazioni}{giorno}\right]$$

Il numero di operazioni relative ai lotti che costituiscono il *WIP* risulta essere:

$$WIP\ n = 4800 \quad [operazioni]$$

Si noti che:

$$\frac{WIP\ n}{2} = 2400 \quad [operazioni]$$

coincide con numero di operazioni mediamente già eseguite in ogni istante: 50% (il lotto “medio” del *WIP* ha 50% di operazioni eseguite e 50% da eseguire).

Calcolo di tempo di attraversamento e capacità produttiva

In base all'Eq. (1.1), il tempo medio di attraversamento valutato secondo il numero minimo e massimo di operazioni eseguite su un lotto risulta rispettivamente:

$$a_{\min} = \frac{n_{\min}}{x} = \frac{2}{0,3} = 6,6 \quad [giorni]$$

con il ciclo più breve, e

$$a_{\max} = \frac{n_{\max}}{x} = \frac{20}{0,3} = 66,6 \quad [giorni]$$

con ciclo più lungo.

La capacità produttiva giornaliera *CP* risulta:

$$CP = X\,\lambda \quad \left[\frac{ore}{giorno}\right] \qquad (1.7)$$

dove X è il numero medio di operazioni eseguite in un giorno e λ è il tempo medio di impegno di una macchina per l'esecuzione di una operazione del ciclo su un lotto.

Calcolo del tempo medio di lavorazione di un lotto

Si noti che il parametro λ, può essere espresso come:

$$\lambda = t_{attrezz.} + \eta\, \lambda_j \quad \left[\frac{ore}{operazione} \right] \qquad (1.8)$$

dove $t_{attrezz.}$ è il tempo medio di attrezzaggio, λ_j è il tempo unitario medio di lavorazione e η è la dimensione del lotto; è inoltre esprimibile come rapporto fra *l*, tempo medio di lavorazione per l'esecuzione di tutte le operazioni di un lotto ed *n*, numero medio di operazioni di un ciclo, ossia si ha:

$$\lambda = \frac{l}{n} \quad \left[\frac{ore}{operazione} \right] \qquad (1.9)$$

In base all'Eq. (1.9), si ha:

$$l = \lambda\, n = 6 \cdot 6 = 36 \quad [ore]$$

Calcolo della capacità produttiva

Dalle Eq. (1.6) (1.7) e (1.9), la capacità produttiva *CP* può essere scritta nella forma:

$$CP = X\,\lambda = \frac{n}{\Delta T}\,\lambda = \frac{l}{\Delta T} \quad \left[\frac{ore}{giorno}\right] \tag{1.10}$$

cioè come prodotto di *l*, tempo medio di lavorazione per l'esecuzione di tutte le operazioni di un lotto e $1/\Delta T$, numero di lotti entranti mediamente in un giorno nel sistema produttivo.
Con riferimento all'Eq. (1.10), si ha:

$$CP = X\,\lambda = 240 \cdot 6 = 1440 \quad \left[\frac{ore}{giorno}\right]$$

Calcolo del numero di macchine

Il numero complessivo di macchine *NM* risulta:

$$NM = \frac{CP}{h} = \frac{1440}{8} = 180 \quad (macchine)$$

dove *h* è il numero di ore lavorative al giorno. Infine il numero medio di macchine per reparto è dato dal rapporto:

$$numero\ medio\ di\ macchine\ per\ reparto = \frac{NM}{NR} = \frac{180}{60} = 3$$

dove *NM* è il numero totale di macchine e *NR* è il numero di reparti.

Rapporto fra value added time e total time

Un primo parametro fondamentale per la valutazione dell'efficienza e produttività del sistema produttivo risulta il rapporto tra *value added time* e *total time,* ossia fra il parametro l, tempo medio di lavorazione per l'esecuzione di tutte le operazioni di un lotto ed a, tempo medio di attraversamento:

$$\frac{value\ added\ time}{total\ time} = \frac{l}{a} \qquad (1.11)$$

Posto il numero di ore lavorative al giorno pari a:

$$h = 8 \quad \left[\frac{ore}{giorno} \right]$$

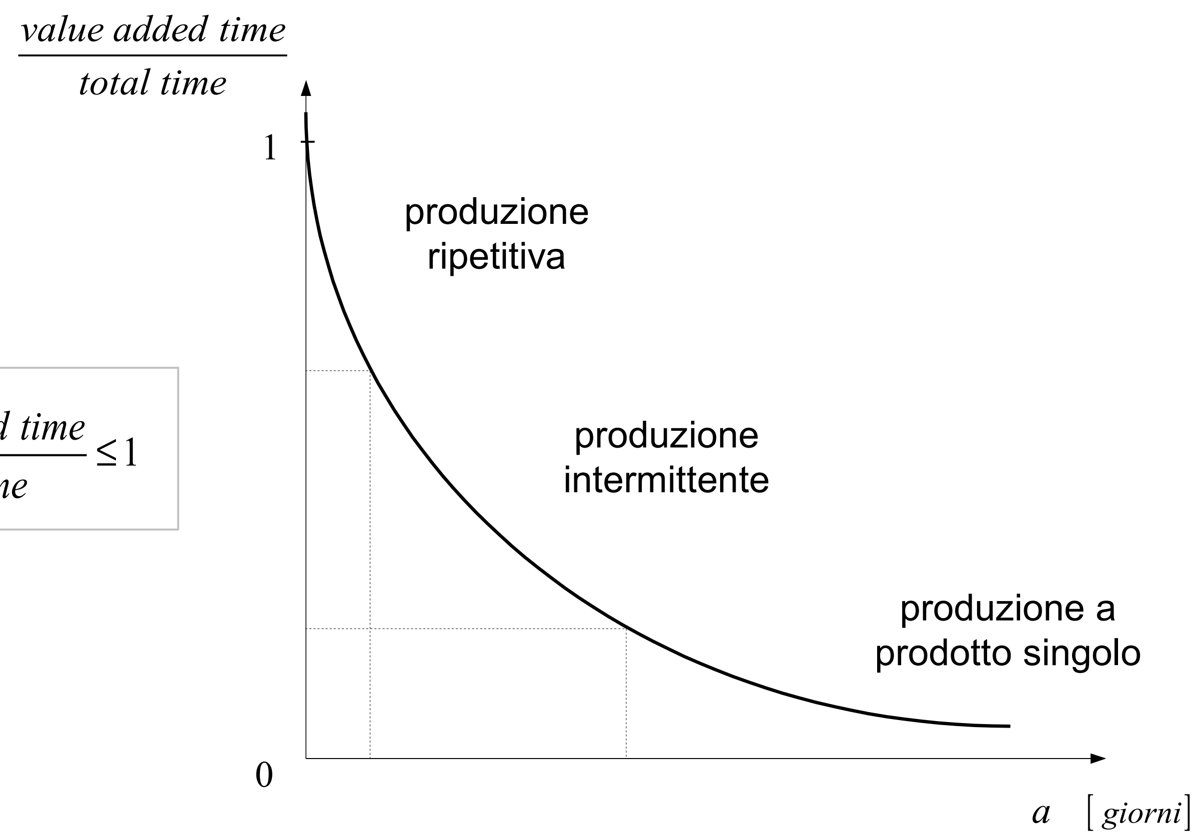
il tempo medio di attraversamento a risulta quindi:

$$a = 160 \quad [ore]$$

In base all'Eq. (1.11), si ha:

$$\frac{value\ added\ time}{total\ time} = \frac{l}{a} = \frac{36}{160} = 0,225 = 22,5\%$$

Value added time, total time e lead time



$$0 \leq \frac{value\ added\ time}{total\ time} \leq 1$$

Valori del parametro x

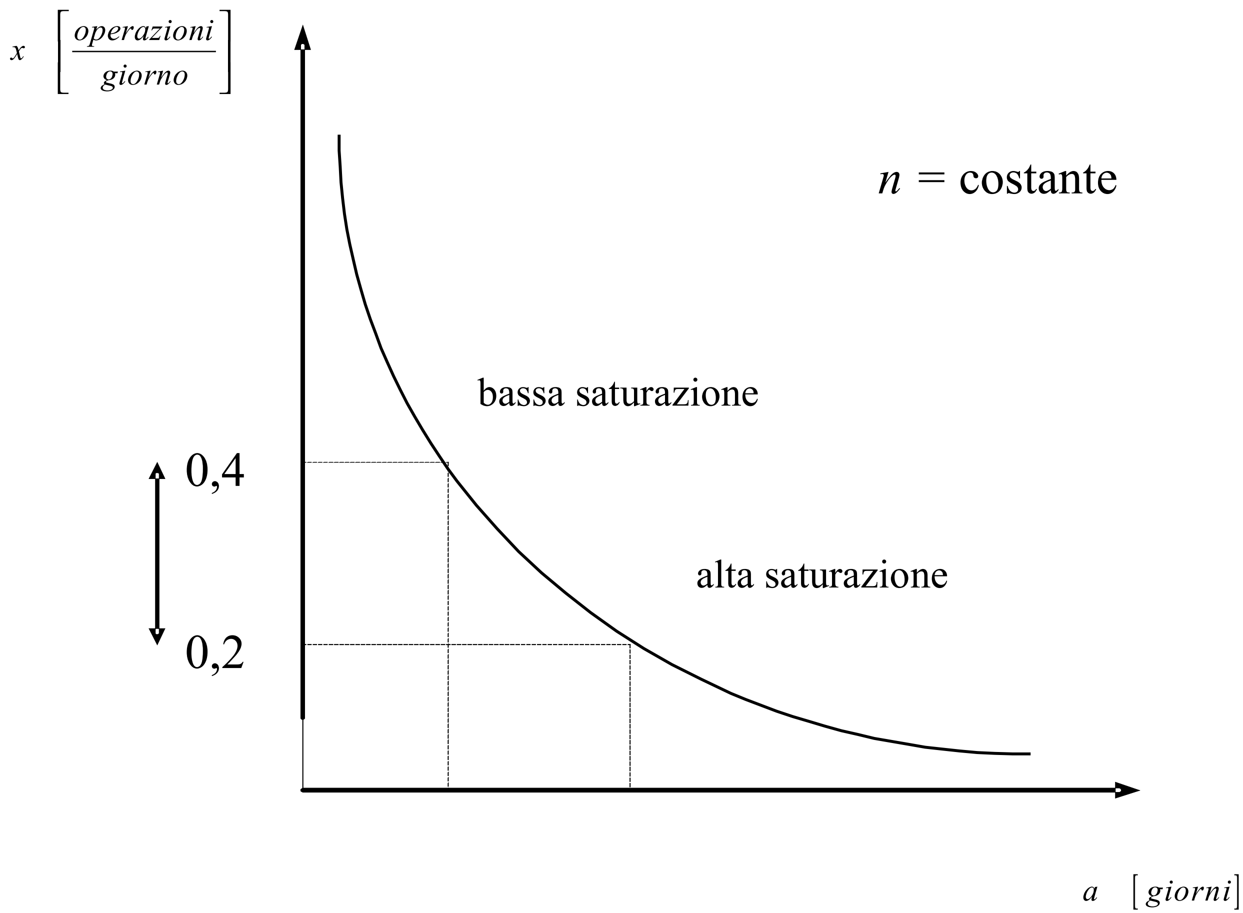
Una particolare attenzione merita inoltre il parametro *x,* numero di operazioni per lotto e per giorno:

$$x = \frac{n}{a} \quad \left[\frac{operazioni}{giorno}\right]$$

che risulta una caratteristica di ciascun sistema produttivo; dove *n* è il numero medio di operazioni di un ciclo ed *a* è il tempo medio di attraversamento.
Nei casi realmente osservati tale parametro assume valori compresi nell'intervallo:

$$0{,}2 \leq x \leq 0{,}4$$

Valutazione della saturazione tramite il parametro x



Definizioni del parametro x

Nell'esempio considerato il parametro x è pari a:

$$x = \frac{n}{a} = \frac{6}{20} = 0,3 \quad \left[\frac{operazioni}{giorno}\right]$$

Un'altra possibile definizione del parametro x, emersa durante la ricerca, è la seguente:

$$x = \frac{n}{a} = \frac{n/\Delta T}{a/\Delta T} = \frac{X}{WIP} \quad \left[\frac{operazioni}{giorno}\right] \qquad (1.13)$$

dove X è il numero di operazioni eseguite mediamente in un giorno e il *WIP* è il numero medio di lotti presenti nel sistema produttivo.

x determina il tempo di attraversamento

Sia dato ad esempio:

$$x = 0,25 \quad [operazioni\,/\,giorno]$$

se

$$n_i = 2 \quad \Rightarrow \quad a_i = \frac{2}{0,25} = 8 \quad [giorni]$$

$$n_i = 6 \quad \Rightarrow \quad a_i = \frac{6}{0,25} = 24 \quad [giorni]$$

$$n_i = 10 \quad \Rightarrow \quad a_i = \frac{10}{0,25} = 40 \quad [giorni]$$

Il parametro x è quindi di estrema utilità in programmazione della produzione per la determinazione degli attraversamenti standard dei singoli lotti in funzione del numero di operazioni.

Modello matematico: *riassunto dei parametri (1/7)*

valore / *descrizione*	valore medio di sistema	valore medio di sistema valorizzato (€)	valore medio riferito al lotto	valore riferito al lotto i-esimo	valore medio riferito al lotto valorizzato (€)	valore riferito al pezzo j-esimo
Tempo di attraversamento	-	-	a $[giorni]$	a_i $[giorni]$	-	-
Numero di operazioni di un ciclo	-	-	n $[operazioni]$	n_i $[operazioni]$	-	-
Intervallo di tempo tra l'ingresso nel sistema produttivo di un lotto ed un altro	ΔT $[giorni]$	-	-	-	-	-
Valore del materiale	-	-	-	m_i^* $[€]$	m^* $[€]$	m_j^* $\left[\frac{€}{pezzo}\right]$

Riassunto dei parametri (2/7)

valore / *descrizione*	valore medio di sistema	valore medio di sistema valorizzato (€)	valore medio riferito al lotto	valore riferito al lotto i-esimo	valore medio riferito al lotto valorizzato (€)	valore riferito al pezzo j-esimo
Numero di differenti componenti che costituiscono la gamma di codici lavorati	NC $[codici]$	-	-	-	-	-
Numero di ordini all'anno dello stesso codice	NO $\left[\frac{1}{anno\ codice}\right]$	-	-	-	-	-
Dimensione del lotto	-	-	η $[pezzi]$	η_i $[pezzi]$	-	-
Numero di giorni lavorativi nel mese	G $\left[\frac{giorni}{mese}\right]$	-	-	-	-	-

Riassunto dei parametri (3/7)

valore / *descrizione*	valore medio di sistema	valore medio di sistema valorizzato (€)	valore medio riferito al lotto	valore riferito al lotto i-esimo	valore medio riferito al lotto valorizzato (€)	valore riferito al pezzo j-esimo
Numero di ore lavorative al giorno	h $\left[\frac{ore}{giorno}\right]$	-	-	-	h^* $\left[\frac{€}{giorno}\right]$	-
Numero di reparti	NR $(reparti)$	-	-	-	-	-
Tempo di lavorazione per l'esecuzione di tutte le operazioni del ciclo	-	-	l $[ore]$	l_i $[ore]$	l^* $[€]$	l_j $\left[\frac{ore}{pezzo}\right]$
Tempo di attrezzaggio	-	-	$t_{attrezz.}$ $\left[\frac{ore}{operazione}\right]$	$t_{attrezz.\ i}$ $\left[\frac{ore}{operazione}\right]$	-	-

Riassunto dei parametri (4/7)

valore / *descrizione*	valore medio di sistema	valore medio di sistema valorizzato (€)	valore medio riferito al lotto	valore riferito al lotto i-esimo	valore medio riferito al lotto valorizzato (€)	valore riferito al pezzo j-esimo
Tempo di coda per l'esecuzione di una operazione	-	-	$t_{coda/oper.}$ $\left[\frac{ore}{operazione}\right]$	$t_{coda/oper.\,i}$ $\left[\frac{ore}{operazione}\right]$	-	-
Tempo di movimentazione per l'esecuzione di una operazione	-	-	$t_{mov./oper.}$ $\left[\frac{ore}{operazione}\right]$	$t_{mov./oper.\,i}$ $\left[\frac{ore}{operazione}\right]$	-	-
Tempo di coda e movimentazione per l'esecuzione di una operazione	-	-	t_{cm} $= t_{coda/op.} + t_{mov./op.}$ $\left[\frac{ore}{operazione}\right]$	$t_{cm\,i}$ $= t_{coda/op.\,i} + t_{mov./op.\,i}$ $\left[\frac{ore}{operazione}\right]$	-	-

Riassunto dei parametri (5/7)

valore / descrizione	valore medio di sistema	valore medio di sistema valorizzato (€)	valore medio riferito al lotto	valore riferito al lotto i-esimo	valore medio riferito al lotto valorizzato (€)	valore riferito al pezzo j-esimo
Tempo di coda per l'esecuzione di tutte le operazioni del ciclo	-	-	$t_{coda/ciclo} = \sum_{k=1}^{n} t_{coda/oper.\,k}$ $[giorni]$	$t_{coda/ciclo\,i} = \sum_{k=1}^{n} t_{coda/oper.\,i_k}$ $[giorni]$	-	-
Tempo di movimentazione per l'esecuzione di tutte le operazioni del ciclo	-	-	$t_{mov./ciclo} = \sum_{k=1}^{n} t_{mov./oper.\,k}$ $[giorni]$	$t_{mov./ciclo\,i} = \sum_{k=1}^{n} t_{mov./oper.\,i_k}$ $[giorni]$	-	-
Numero di lotti entranti in un giorno nel sistema produttivo	$\frac{1}{\Delta T} = NC \cdot NO$ $\left[\frac{1}{giorno}\right]$	-	-	-	-	-

Riassunto dei parametri (6/7)

valore / *descrizione*	valore medio di sistema	valore medio di sistema valorizzato (€)	valore medio riferito al lotto	valore riferito al lotto i-esimo	valore medio riferito al lotto valorizzato (€)	valore riferito al pezzo j-esimo
Totale pezzi lavorati annualmente	$N = \frac{1}{\Delta T}\eta$ $\left[\frac{pezzi}{anno}\right]$	-	-	-	-	-
Tempo totale di impegno di una macchina per l'esecuzione di una operazione	-	-	$\lambda = \frac{l}{n}$ $\left[\frac{ore}{operazione}\right]$	$\lambda_i = \frac{l_i}{n_i}$ $\left[\frac{ore}{operazione}\right]$	$\lambda^* = \frac{l^*}{n}$ $\left[\frac{€}{operazione}\right]$	$\lambda_j = \frac{l_j}{n}$ $\left[\frac{ore}{oper.\ pezzo}\right]$
Numero di lotti presenti nel sistema produttivo	WIP $= \frac{a}{\Delta T}$ $(lotti)$	WIP^* $= \frac{a}{\Delta T}\left(m^* + \frac{l^*}{2}\right)$ $[€]$	-	-	WIP^* $= m^* + \frac{l^*}{2}$ $[€]$	-

Riassunto dei parametri (7/7)

valore / *descrizione*	valore medio di sistema	valore medio di sistema valorizzato (€)	valore medio riferito al lotto	valore riferito al lotto i-esimo	valore medio riferito al lotto valorizzato (€)	valore riferito al pezzo j-esimo
Numero di operazioni eseguite in un giorno	$X = \frac{n}{\Delta T}$ $\left[\frac{operazioni}{giorno}\right]$	-	$x = \frac{n}{a}$ $\left[\frac{operazioni}{giorno}\right]$	$x_i = \frac{n_i}{a_i}$ $\left[\frac{operazioni}{giorno}\right]$	-	-
Durata di una operazione	-	-	$y = \frac{a}{n}$ $\left[\frac{giorni}{operazione}\right]$	$y_i = \frac{a_i}{n_i}$ $\left[\frac{giorni}{operazione}\right]$	-	-
Capacità produttiva	$CP = \frac{l}{\Delta T}$ $\left[\frac{ore}{giorno}\right]$	-	-	-	-	-
Numero di macchine	$NM = \frac{CP}{h}$ $(macchine)$	-	-	-	-	-

Sommario

1. Costruzione di un modello matematico per un sistema produttivo job-shop

2. Modello matematico: *rappresentazione grafica*

3. Caso Aero Components Ltd.: *applicazione del modello matematico*

2. Rappresentazione grafica: *rapporto fra value added time e total time*

- Definizione geometrica del rapporto tra *value added time* e *total time*:

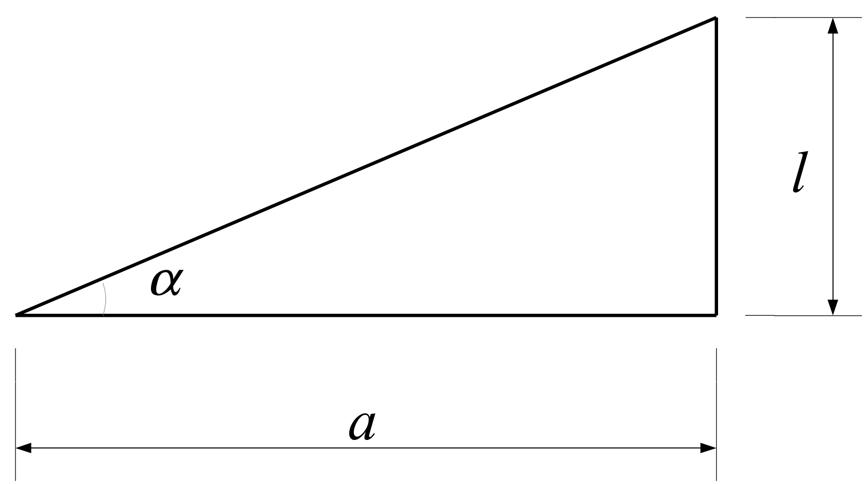
$$\frac{value\ added\ time}{total\ time} = \frac{l}{a} = tg\,\alpha \qquad \text{dove} \qquad \boxed{l \leq a}$$

- Valore limite massimo:

$$\frac{value\ added\ time}{total\ time} = 1$$

- Angolo limite massimo:

$$\boxed{\alpha = \frac{\pi}{4}} \quad = 45°$$



Legge di Little

Lead time è proporzionale al WIP $\qquad$ (a α WIP)

WIP = CAPACITA' PRODUTTIVA * LEAD TIME = CP * a

$$\begin{aligned} \text{WIP} &= (m + l/2) * a/\Delta T \\ &= (m/\Delta T + l/2\,\Delta T) * a \\ &= (m/\Delta T + CP/2) * a \\ &= (a/\Delta T) * m + (1/2)CP * a \\ &= \text{n. lotti presenti} * m + (1/2)CP * a \end{aligned}$$

Modello del Job Shop

$1/\Delta T = 40$ [1/gg]

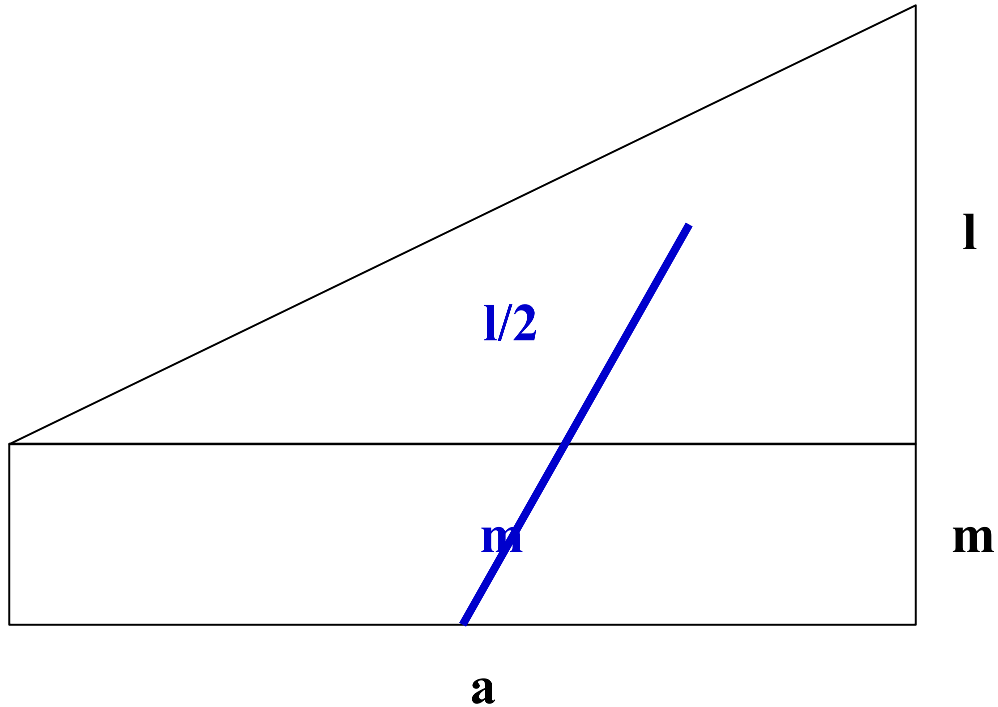
$800 = a/\Delta T =$ n° lotti presenti

$1/\Delta T$

$a = 20$ gg

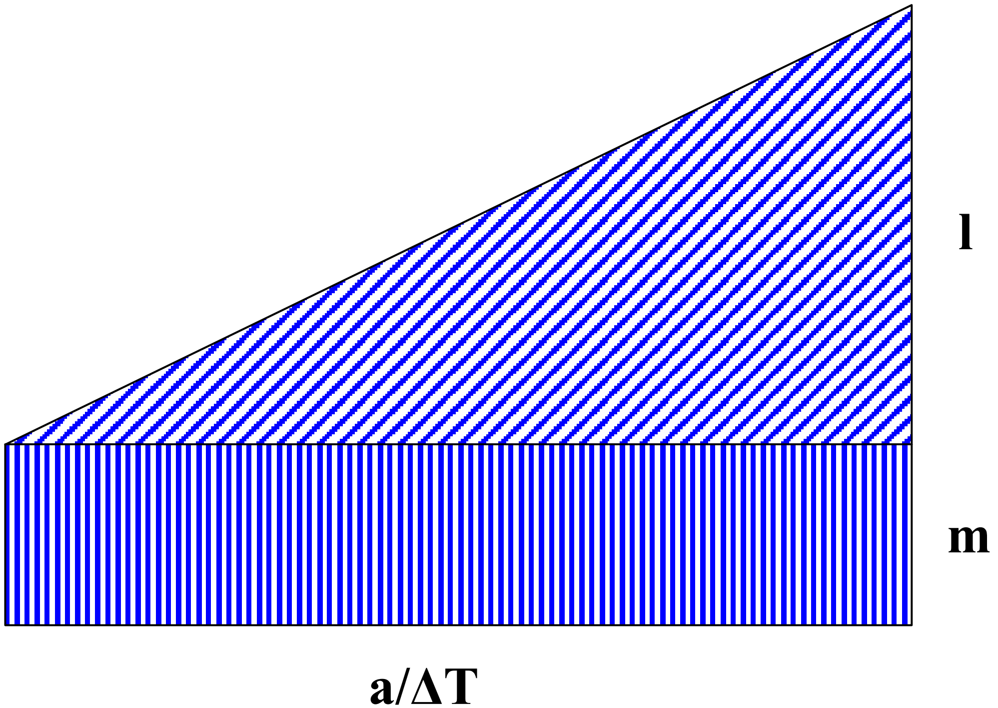
$CP = l/\Delta T = 36 * 40 = 1440$

Rappresentazione grafica del WIP (lotto singolo)



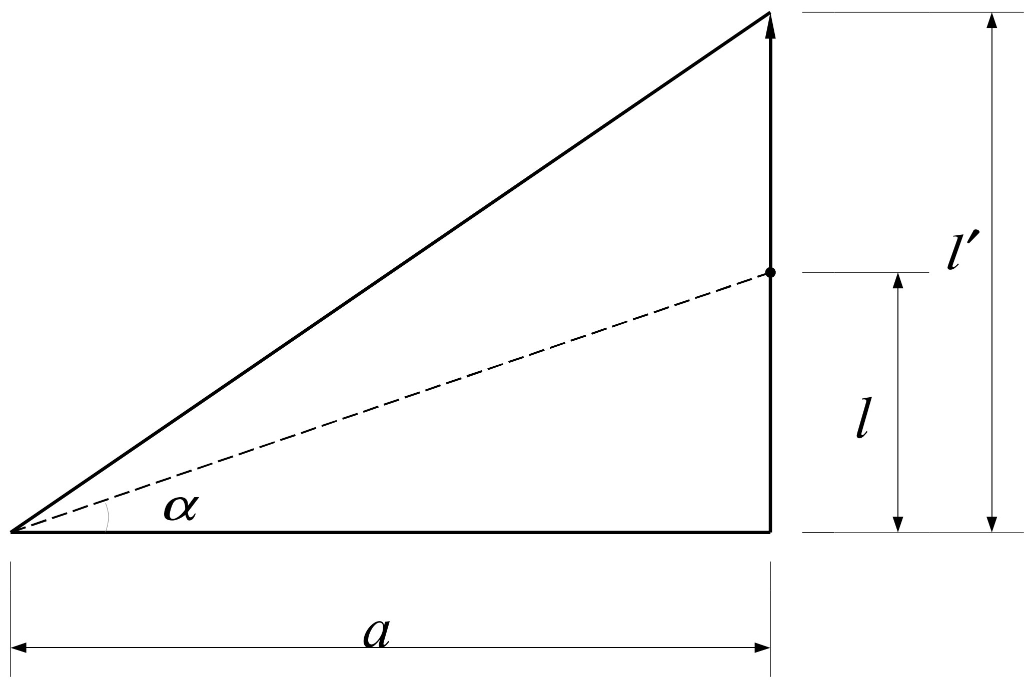
WIP* (lotto singolo) = m + l/2

Rappresentazione grafica del WIP



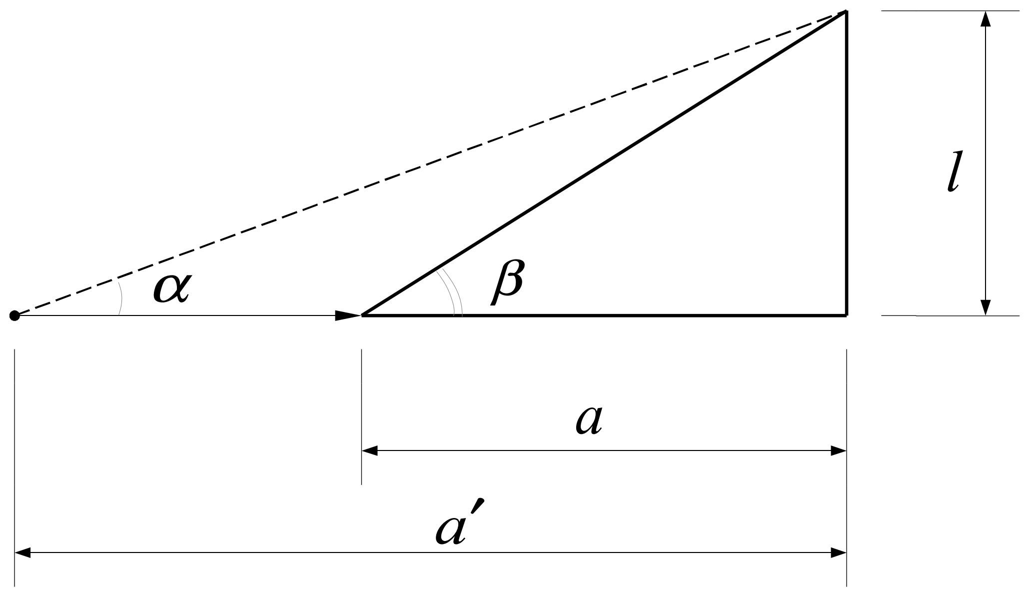
WIP* = n° lotti * WIP* (lotto singolo)
= a/ΔT * (m + l/2)

Aumento del valore aggiunto

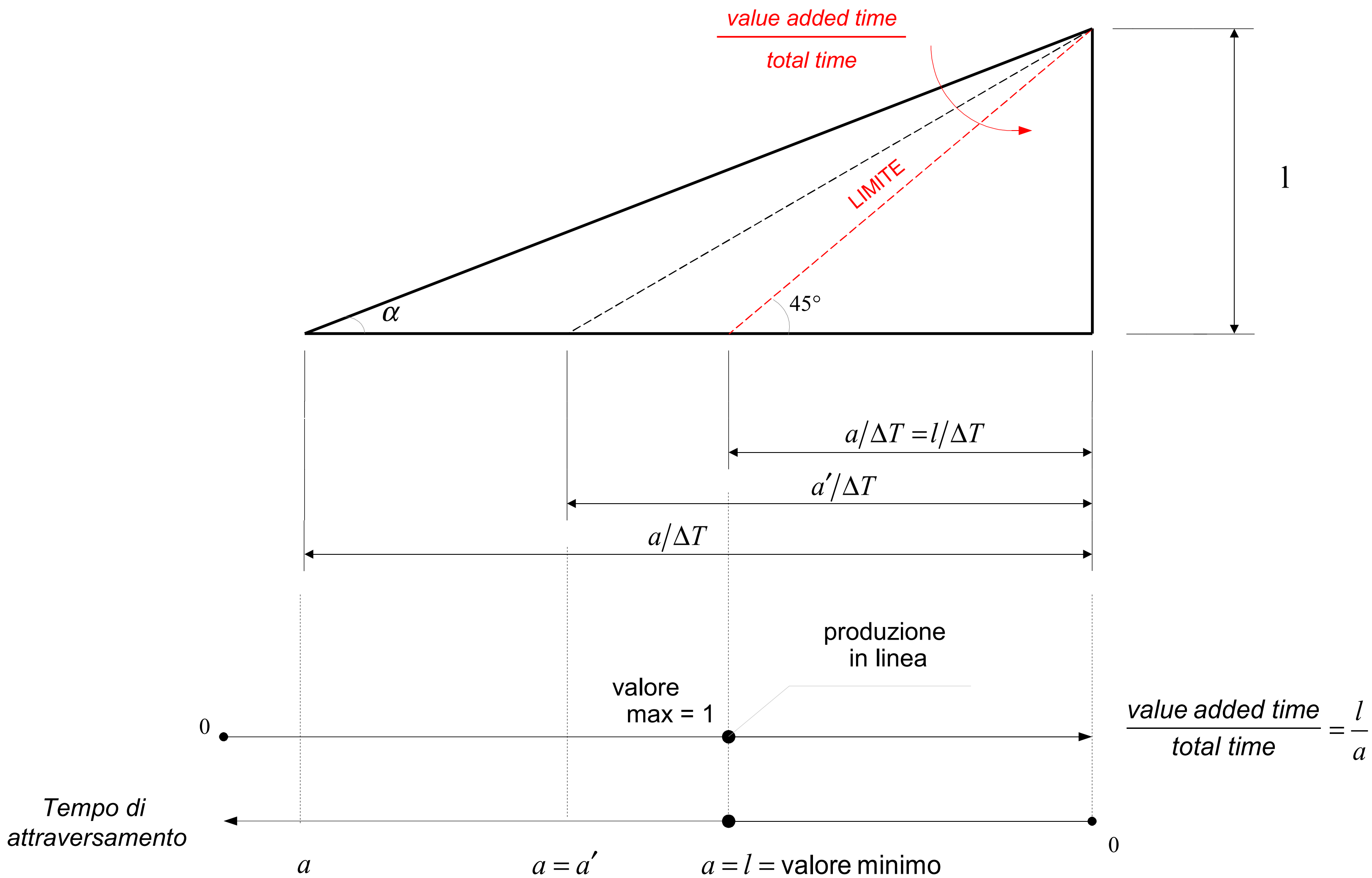


Compressione dei tempi

- Diminuzione tempo di coda e movimentazione



Diminuzione del WIP fino al valore minimo



Sommario

1. Costruzione di un modello matematico per un sistema produttivo job-shop

2. Modello matematico: *rappresentazione grafica*

3. Caso Aero Components Ltd.: *applicazione del modello matematico*

3. Caso Aero Components Ltd.: *descrizione dell’azienda*

- Sub-fornitore di aziende per la costruzione di turbine idrauliche, a vapore, a gas
- Costruzione di grandi componenti (o particolari)
- Lavorazioni presso terzi: trattamento termico, fusioni speciali
- Consegne alla fine di ciascuno dei successivi 12 mesi
- Manodopera di altissimo livello nell’allestimento ed azionamento delle macchine utensili

Dati in ingresso

- $l_j = 15 \quad \left[\frac{ore}{pezzo}\right]$ $\longrightarrow$ tempo medio di lavorazione per l'esecuzione di tutte le operazioni del ciclo su un pezzo
- $n = 30 \div 40 \cong 35 \quad [operazioni]$ $\longrightarrow$ numero medio di operazioni di un ciclo
- $NR = 15 \quad (reparti)$ $\longrightarrow$ numero di reparti
- $a = 3 \div 7 \cong 5 \quad [mesi]$ $\longrightarrow$ tempo medio di attraversamento
- $NC = 500 \quad [codici]$ $\longrightarrow$ numero di differenti componenti che costituiscono la gamma di codici lavorati
- $m_j^* + l_j^* = 100 \div 300 \cong 200 \quad \left[\frac{€}{pezzo}\right]$ $\longrightarrow$ costo di fabbricazione singolo pezzo (di cui il 50% è costituito dalle materie prime procurate dal cliente)
- $\eta = 10 \quad [pezzi]$ $\longrightarrow$ dimensione del lotto
- $NO = 5 \quad \left[\frac{1}{anno \quad codice}\right]$ $\longrightarrow$ numero medio di ordini (lotti) all'anno dello stesso codice

Calcolo del Work In Process

- $$\frac{1}{\Delta T} = NC \cdot NO = 500 \cdot 5 = 2500 \quad \left[\frac{1}{anno}\right] = 208,3 \quad \left[\frac{1}{mese}\right]$$ → numero di lotti entranti mediamente in un mese nel sistema produttivo

- $$WIP = \frac{a}{\Delta T} = 5 \cdot 208,3 = 1042 \quad (lotti)$$ → numero medio di lotti presenti nel sistema produttivo

- $$WIP^* = \frac{a}{\Delta T}\,\eta\left(m_j^* + \frac{l_j^*}{2}\right) = \underbrace{1.042.000}_{\text{gravante sul cliente}} + \underbrace{521.000}_{\text{gravante sull'azienda}} = 1.563.000 \quad [€]$$ → valore dei lotti presenti nel sistema produttivo

Ipotesi:

$$G = 20 \quad \left[\frac{giorni}{mese}\right] \quad \Longrightarrow \quad \frac{1}{\Delta T} = \frac{208,3}{20} = 10,4 \quad \left[\frac{1}{giorno}\right]$$

Calcolo della capacità produttiva e del numero di macchine

- $X = n \dfrac{1}{\Delta T} = 35 \cdot 10,4 = 364 \quad \left[\dfrac{operazioni}{giorno}\right]$ → numero medio di operazioni eseguite in un giorno

- $x = \dfrac{n}{a} = \dfrac{n / \Delta T}{a / \Delta T} = \dfrac{X}{WIP} = \dfrac{364}{1042} = 0,35 \quad \left[\dfrac{operazioni}{giorno}\right]$ → numero medio di operazioni eseguite su un lotto in un giorno

- $CP = \eta \, l_j \dfrac{1}{\Delta T} = 10 \cdot 15 \cdot 10,4 = 1560 \quad \left[\dfrac{ore}{giorno}\right]$ → **capacità produttiva**

- $NM = \dfrac{CP}{h} = \dfrac{1560}{8} = 195 \quad (macchine)$ → numero medio di macchine

- $\dfrac{NM}{NR} = \dfrac{195}{15} = 13 \quad \left(\dfrac{macchine}{reparto}\right)$ → **numero medio di macchine per reparto**

Rapporto fra value added time e total time

$$\frac{value\ added\ time}{total\ time} = \frac{l}{a} = x\frac{l}{n} = x\,\lambda$$

- $l = \sum_{k=1}^{n} \lambda_{k} = \eta \sum_{k=1}^{n} \lambda_{j\,k} = \eta\, l_{j} = 10 \cdot 15 = 150 \quad [ore]$ → tempo medio di lavorazione per l'esecuzione di tutte le operazioni di un lotto
- $a = l + t_{coda/ciclo} + t_{mov./ciclo} = 800 \quad [ore]$ → tempo medio di attraversamento
- $\frac{value\ added\ time}{total\ time} = \frac{l}{a} = \frac{150}{800} = 0{,}1875 = 18{,}75\ \%$

Calcolo dei tempi di impegno macchina, coda e movimentazione

- $\lambda = t_{attrezz.} + \eta\, \lambda_j = 1 \quad \left[\dfrac{giorni}{operazione}\right]$ → tempo medio di impegno di una macchina per l'esecuzione di una operazione su un lotto
- $\dfrac{value\ added\ time}{total\ time} = \dfrac{l}{a} = x\dfrac{l}{n} = x\,\lambda = x = 0{,}1875$
- $a = \dfrac{n}{x} = \dfrac{35}{0{,}1875} = 187 \quad [\,giorni\,]$
- $y = \dfrac{1}{x} = \dfrac{a}{n} = \dfrac{187}{35} = 5{,}3 \quad \left[\dfrac{giorni}{operazione}\right]$ → durata media della singola operazione
- $\lambda = y\,\dfrac{value\ added\ time}{total\ time} = 5{,}3 \cdot 0{,}1875 = 1 \quad \left[\dfrac{giorni}{operazione}\right]$
- $t_{cm} = y\left(1 - \dfrac{value\ added\ time}{total\ time}\right) = 5{,}3 \cdot (1 - 0{,}1875) = 4{,}3 \quad \left[\dfrac{giorni}{operazione}\right]$ → tempo di coda e movimentazione

Valutazione del grado di saturazione dell'impianto

$$0,2 \le x \le 0,4$$