



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Analisi dei Sistemi di Produzione

Automazione

Alessandro De Luca

Principali tipologie di sistemi di produzione manifatturiera (discreta)

- linee di trasferta (sequenza rigida, ad es. catene di montaggio)
- flow shop (le singole lavorazioni seguono flussi diversi tra macchinari)
- job shop (percorsi complessi tra macchinari o reparti)
- celle di produzione (lavorazioni complete, omogenee per prodotto)
- FMS (flussi diversi tra celle di produzione)

Aspetti rilevanti per la loro analisi

- numero di attività ripetitive
- tempi di attesa / down-time / work in process (WIP)
- instradamento (routing) complesso delle parti/lavorazioni
- importanza della serializzazione
- rispetto di schedule real-time
- task semplici e ripetitivi per l'operatore

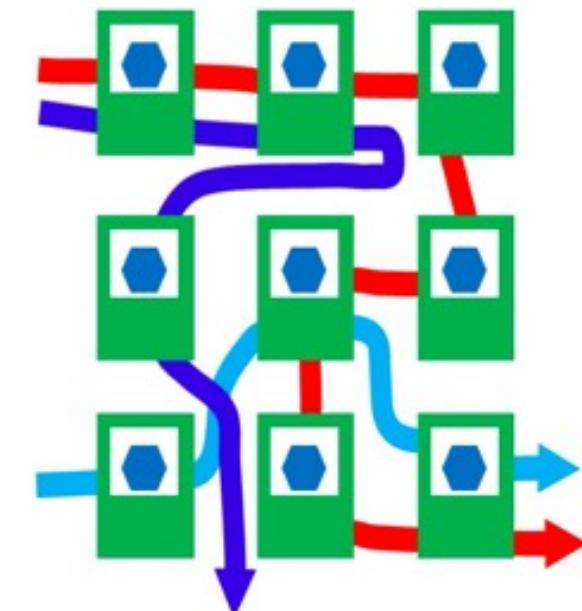
Transfer line



Flow shop



Job shop

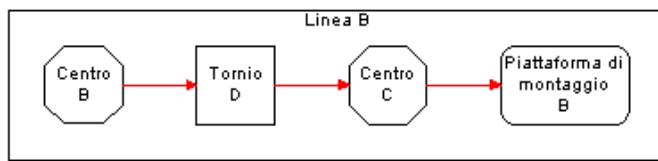
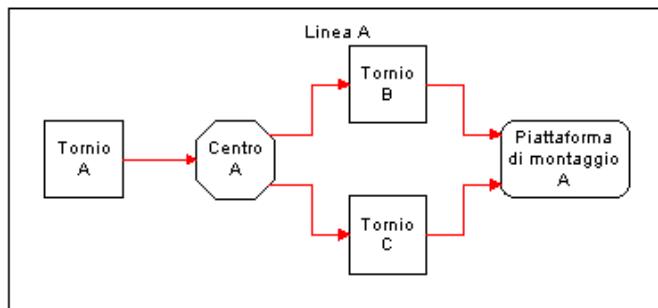


Flessibilità

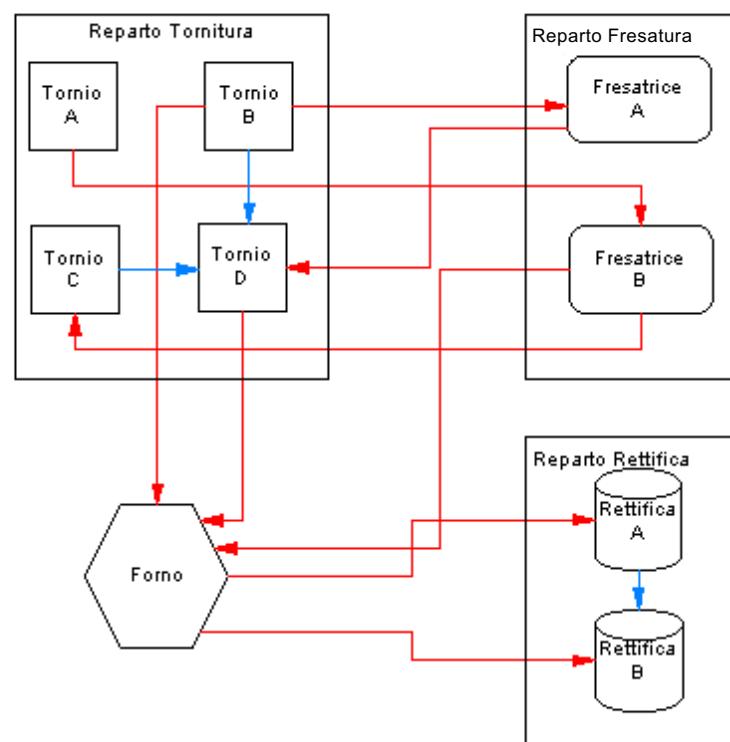
Produttività

Produzione per flussi, reparti e celle

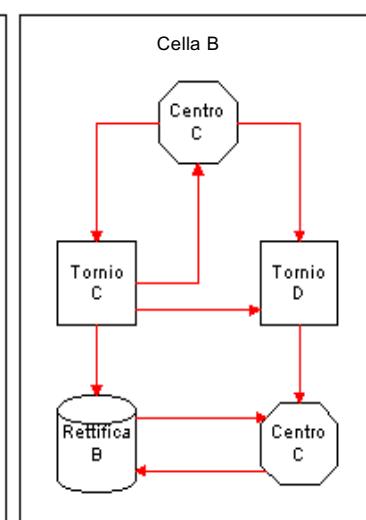
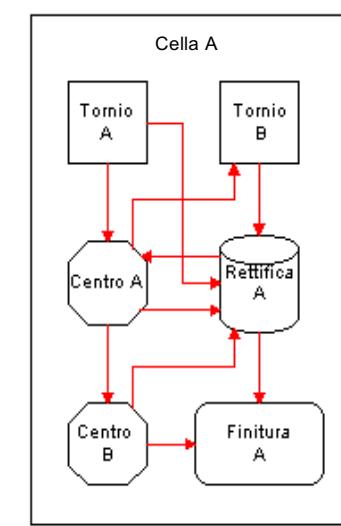
Flow shop



Job shop

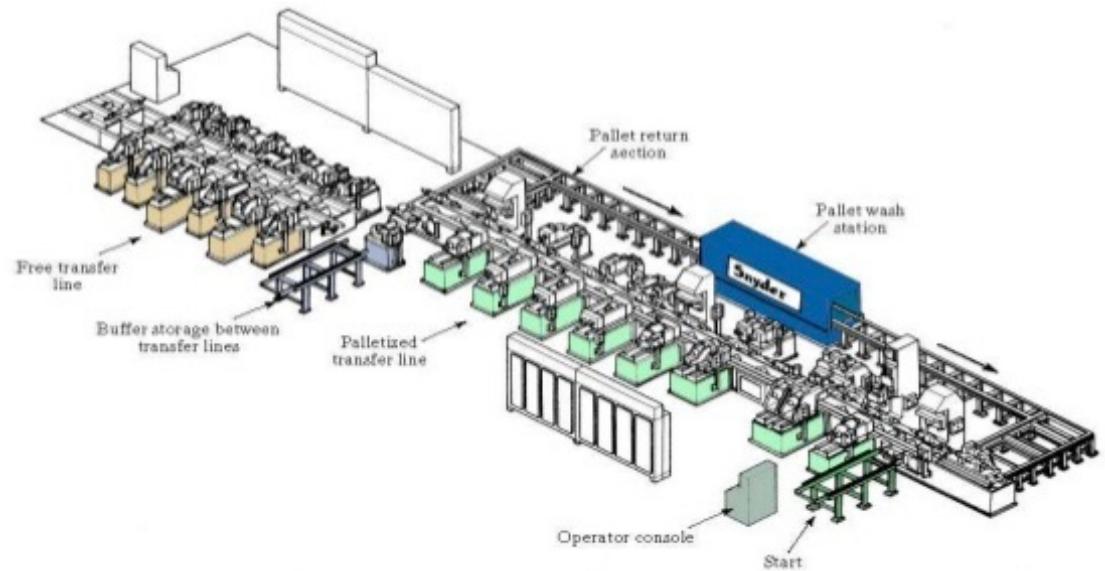


Production cells



Linee di produzione a trasferimento di prodotto (transfer lines)

- insieme di macchine/stazioni connesse in linea da un sistema di trasporto che realizzano rigidamente una **sequenza prefissata** di lavorazioni
- progettate per un solo prodotto (o famiglie piccole di prodotti molto simili)
- flusso continuo di singoli pezzi, senza necessità di avere lotti
- linee sincrone (i pezzi avanzano alla stessa velocità) o asincrone, con buffer tra stazioni in cui i pezzi attendono la prossima lavorazione



Linee di produzione a trasferimento di prodotto (transfer lines)

□ vantaggi

- ➔ è un layout orientato (= dedicato in modo specifico) al singolo prodotto
- ➔ produzione di massa ed elevato livello di saturazione delle macchine
- ➔ minori materie prime in lavorazione (ridotto WIP = work in process)
- ➔ trasporto e gestione molto semplici (non occorre mettere in sequenza simultaneamente differenti prodotti)
- ➔ necessità di poca manodopera e uso relativamente ridotto di spazi
- ➔ minima variabilità del prodotto finito e controllo di qualità più efficiente
- ➔ tempi rapidi di avvio

□ svantaggi

- ➔ flessibilità molto bassa o del tutto assente
- ➔ rischio di rapida obsolescenza dovuta all'introduzione di nuovi prodotti
- ➔ alta vulnerabilità ai guasti: un malfunzionamento di una singola macchina blocca l'intero sistema in un tempo molto breve

- legge di Little (sui sistemi di code, 1954), adattata a linee di trasferta **deterministiche e mono-prodotto**

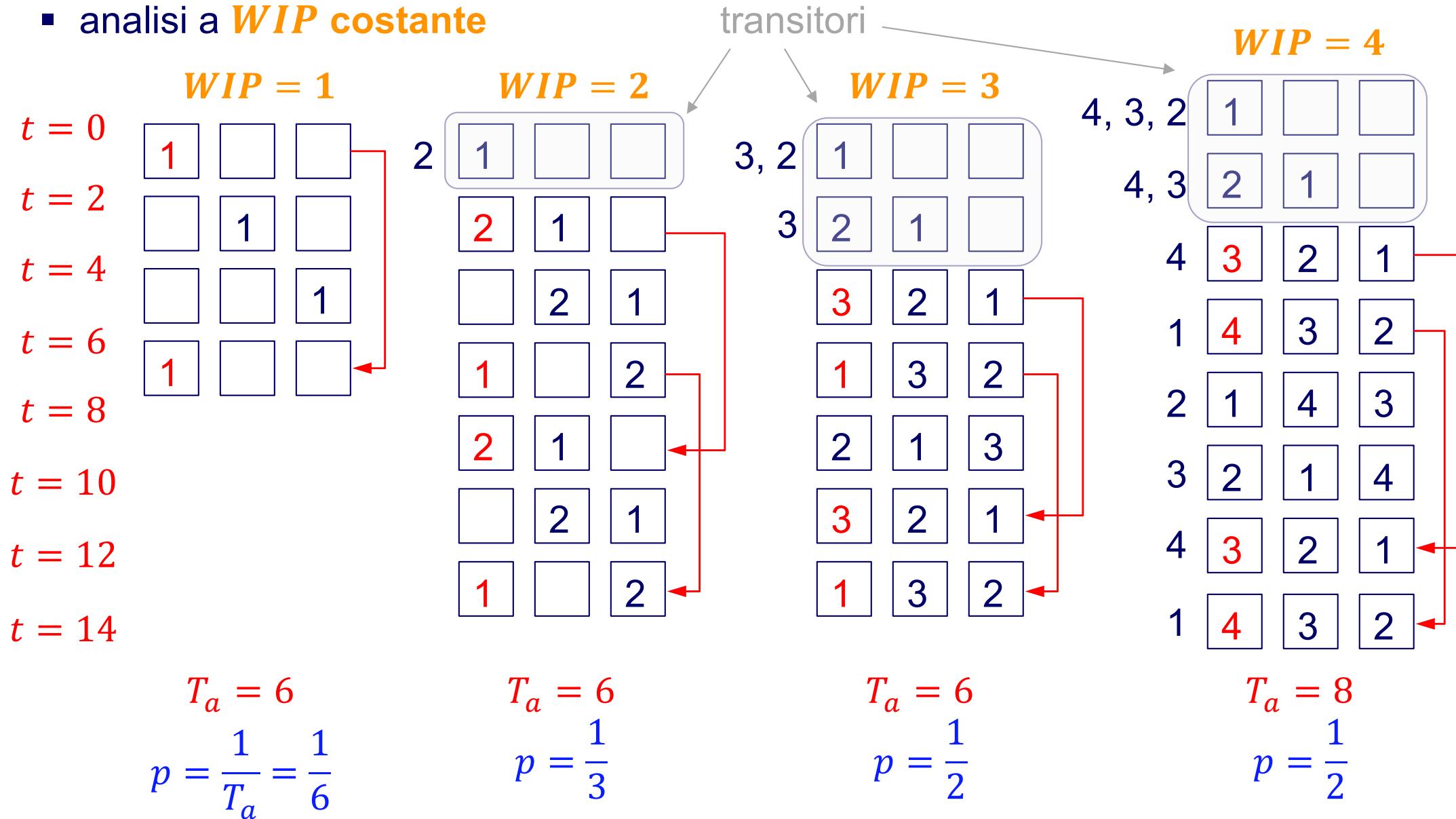
WIP (Work In Process) =

tasso di produzione (o throughput) $p \times T_a$ tempo di attraversamento linea

- si riferisce ai valori medi in **regime stazionario**, esaurito il transitorio di caricamento delle macchine (e prima di un transitorio di uscita)
- dato un tasso p = volume produzione/tempo (anno, mese, giorno), ridurre il *WIP* vuol dire ridurre il tempo di attraversamento T_a
- con alcuni semplici esempi, verifichiamo tale legge generale
 - ➔ determinando i valori di p e di T_a quando si mantiene **costante** il *WIP*
 - ➔ studiando il loro andamento al variare del *WIP*
 - ➔ individuando un possibile *WIP** **ottimo**

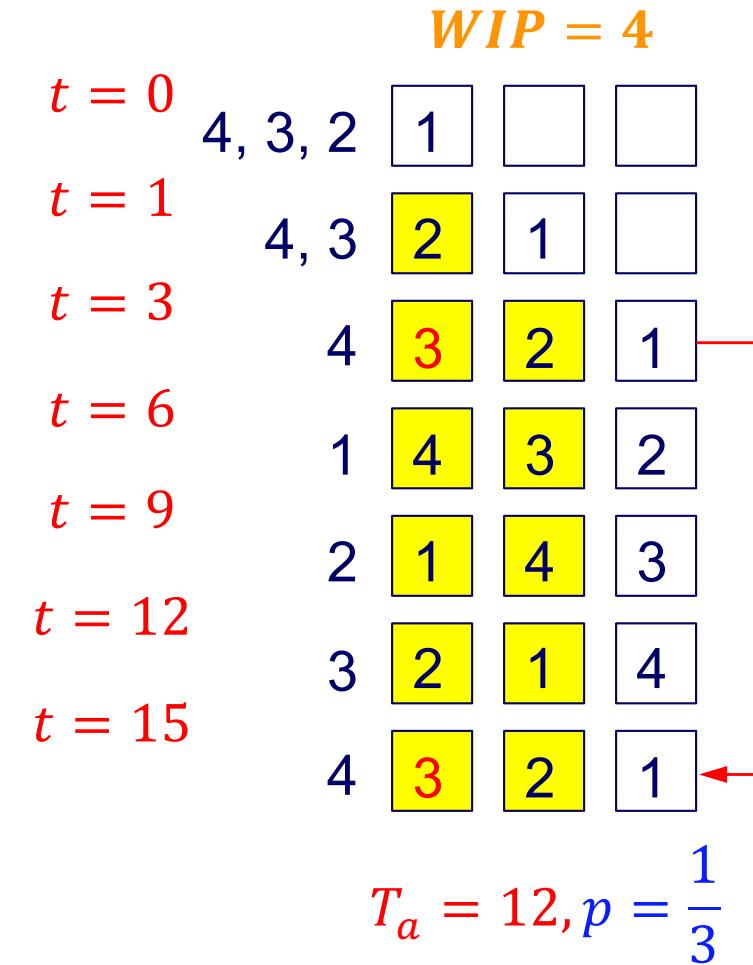
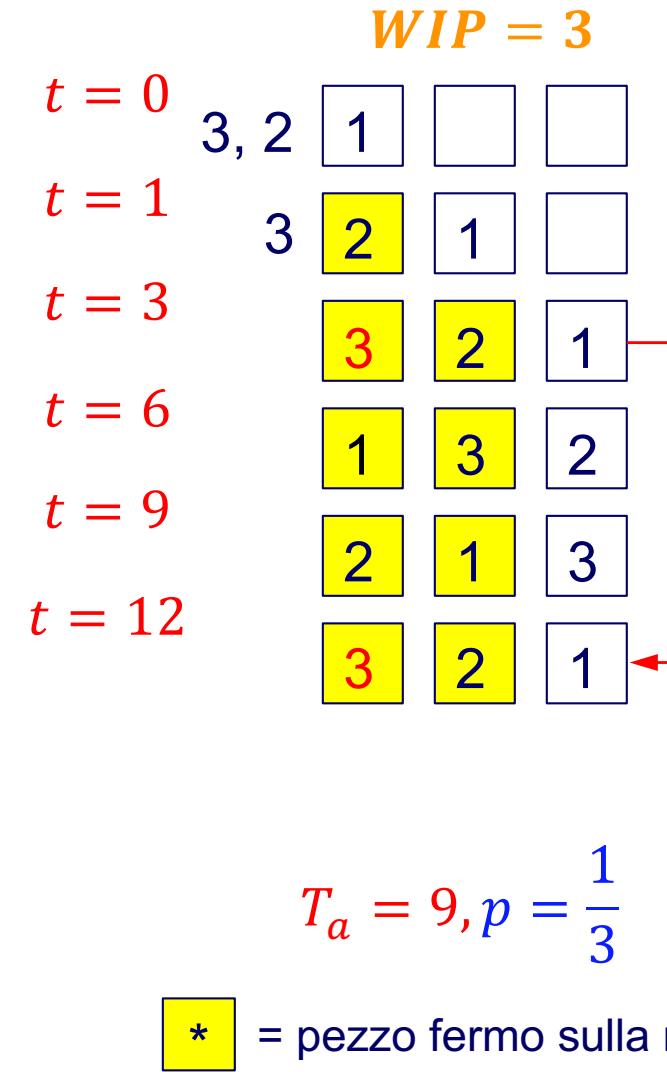
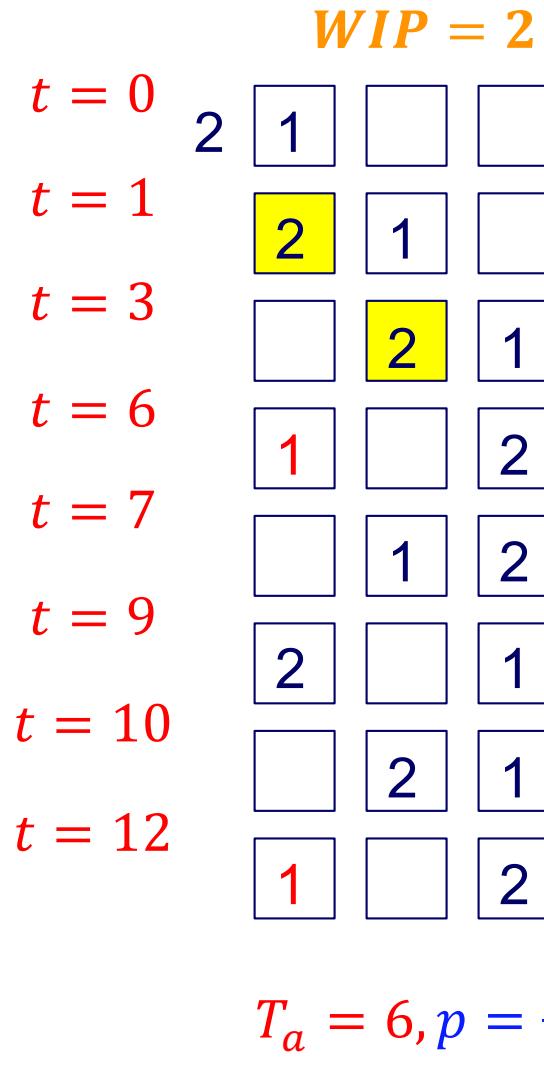
Tre macchine, tempi uguali

- tre macchine in serie, con tempi di lavoro uguali: $T_i = 2$, $i = 1, 2, 3$
- analisi a **WIP costante**



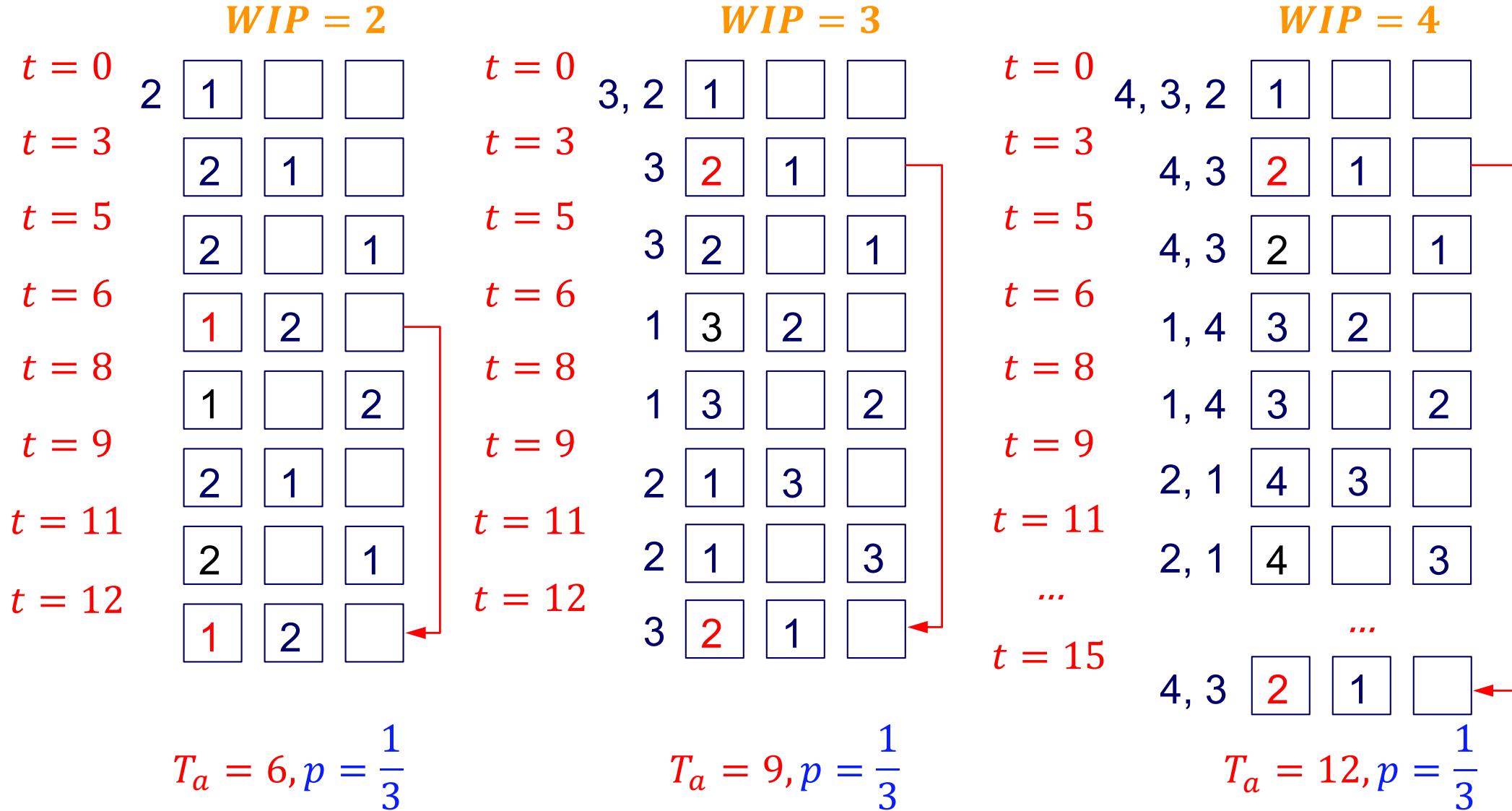
Tre macchine, tempi crescenti

- tre macchine in serie, con tempi di lavoro **crescenti**: $T_1 = 1, T_2 = 2, T_3 = 3$
- analisi con **WIP costante**: $WIP = 1 \Rightarrow T_a = \sum T_i (= 6)$, $p = 1/T_a (= 1/6)$



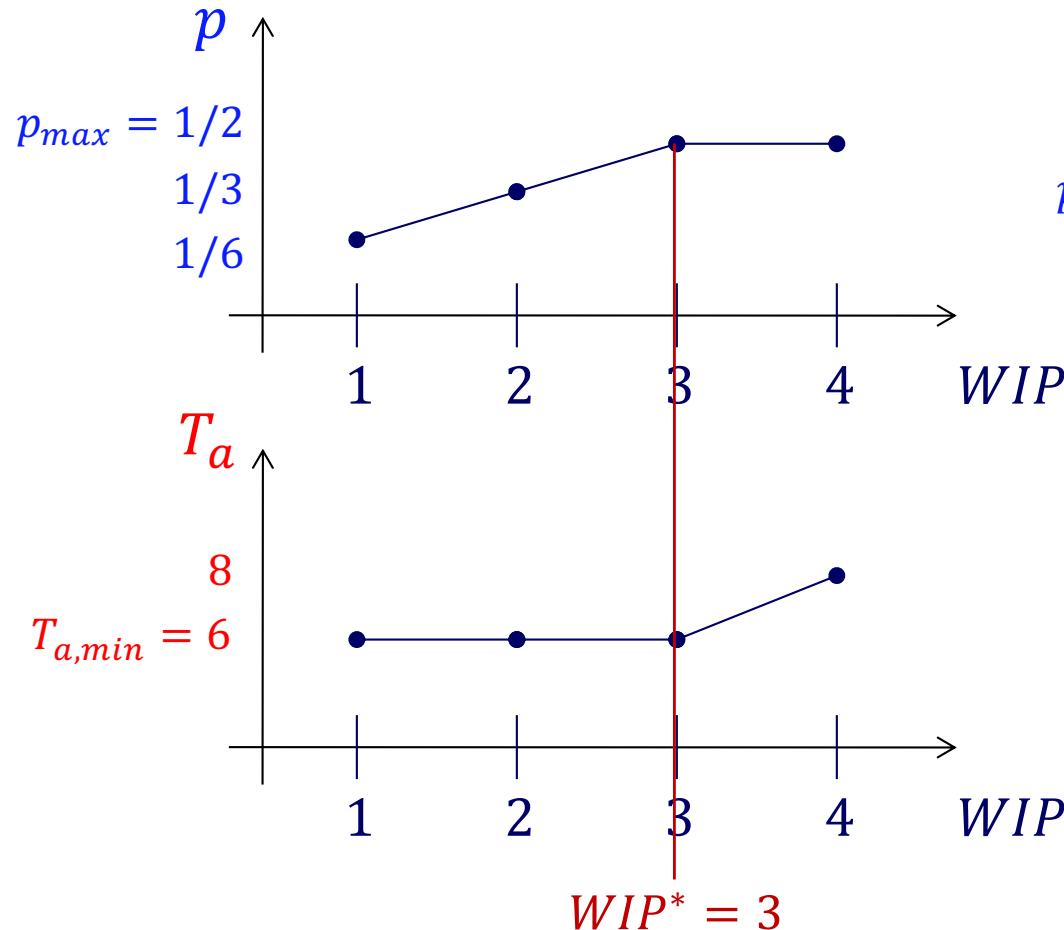
Tre macchine, tempi decrescenti

- tre macchine in serie, con tempi di lavoro crescenti: $T_1 = 3, T_2 = 2, T_3 = 1$
- analisi con **WIP costante**: $WIP = 1 \Rightarrow T_a = \sum T_i (= 6)$, $p = 1/T_a (= 1/6)$



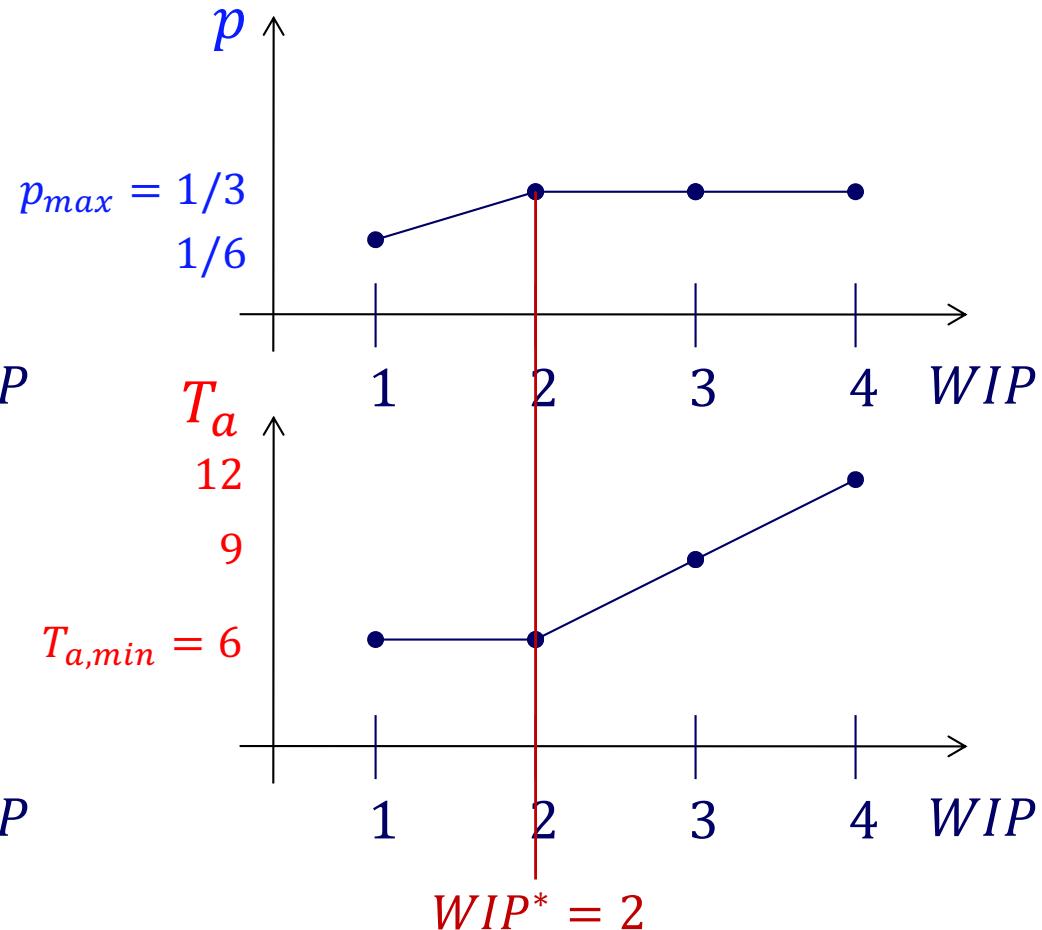
Analisi in funzione del *WIP*

- macchine con tempi di lavoro uguali



qui, per
 $N = 3$ macchine

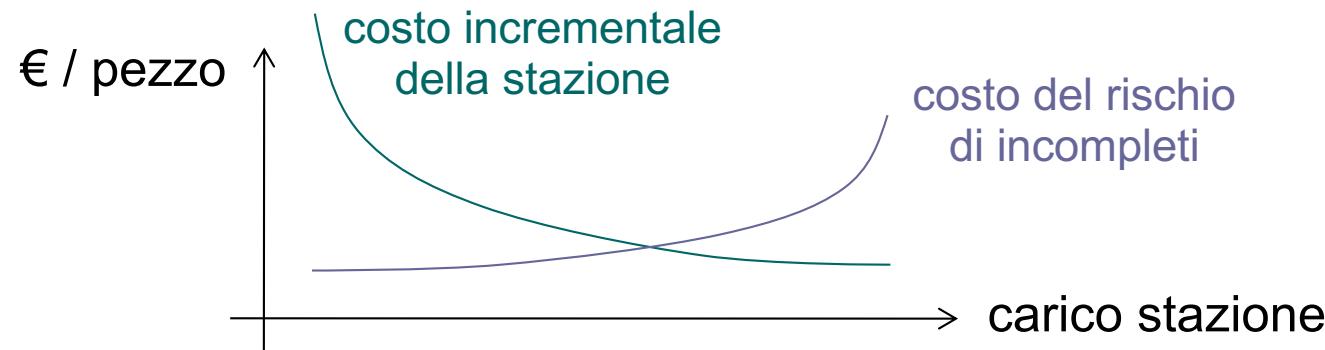
- macchine con tempi di lavoro differenti (crescenti o decrescenti, qualsiasi...)



$$WIP = p \times T_a$$

Dimensionamento di una linea di trasferta

- **dimensionamento e bilanciamento di linea:** compromesso tra aumento di produttività e riduzione di costi a parità di tempo totale di lavorazione
- l'allocazione delle lavorazioni alle stazioni (e quindi il loro carico C_i) e il numero N di stazioni da utilizzare dipendono da **due curve** di costo



- maggiore è il numero di stazioni utilizzate, **minore** sarà il carico medio delle stazioni e **maggiore** il costo unitario del singolo pezzo prodotto
- minore è il numero di stazioni utilizzate, **maggiore** sarà il carico medio delle stazioni e **maggiore** il costo del rischio di effettuare *lavorazioni incomplete*
 - ➔ a causa della elevata saturazione nell'impiego dei macchinari della stazione

Dimensionamento di una linea di trasferta

- aumentare il numero N di stazioni (dimensionamento della linea) e cercare il loro bilanciamento riduce il tempo di attraversamento T_a
- ridurre il numero di stazioni N e farle lavorare con carico C_i (tasso di utilizzo) vicino al massimo ammissibile riduce viceversa i costi
- nella forma di una ottimizzazione discreta (a numeri interi), il problema del **dimensionamento della linea** (o del **bilanciamento** delle stazioni) ha una complessità (\sim tempo per ricavare una soluzione esatta) di tipo esponenziale nel numero di lavorazioni \Rightarrow uso di **euristiche di soluzione**
- nota importante
 - ➔ non si considera qui il **costo delle attrezzature** di una stazione: maggiore è il numero di lavorazioni diverse che una stazione dovrà eseguire, maggiore è il costo dei diversi utensili e macchinari di cui deve essere dotata
 - ➔ tale costo **esclude soluzioni alternative** alla linea di trasferta, nelle quali si replicano e si **usano in parallelo** stazioni con dotazioni più ampie, in numero sufficiente a garantire il tasso di produzione desiderato: i costi di tali stazioni sono però progressivamente crescenti (al limite, si replicherebbero solo le stazioni più costose, quelle con una dotazione “completa” di mezzi per svolgere tutte le lavorazioni)

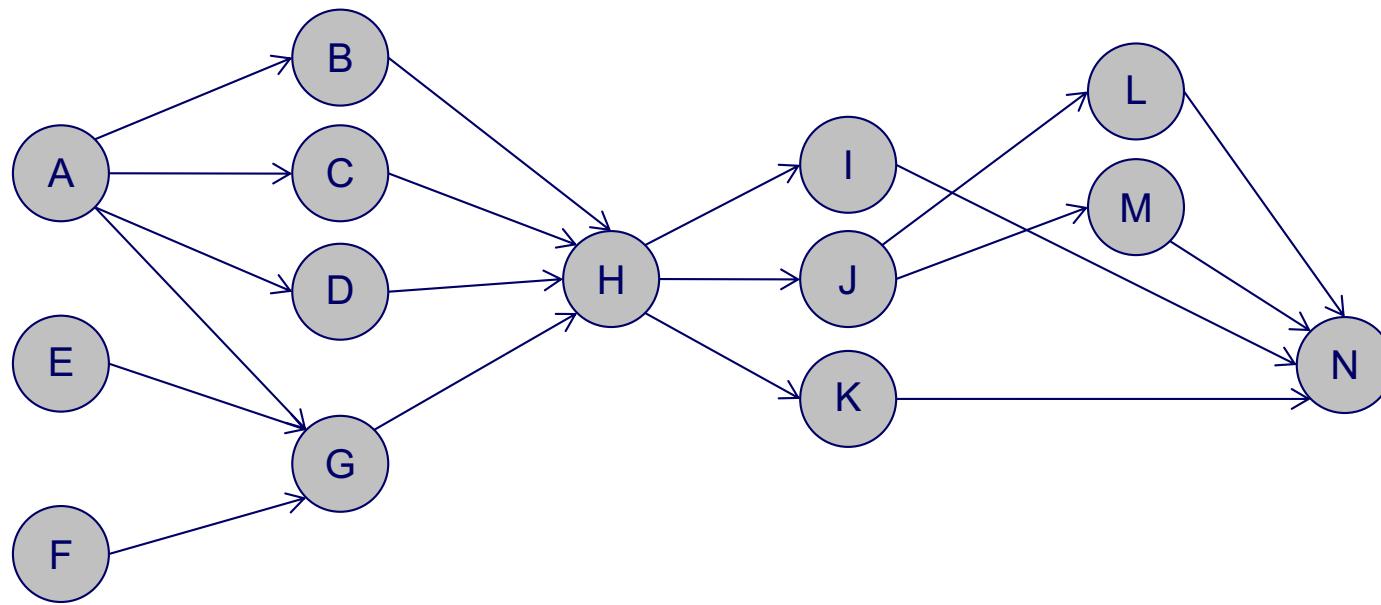
Formulazione del problema

- una linea di trasferta è costituita da N stazioni in sequenza
- ogni stazione ha un *carico di lavoro* C_i (tempo necessario alla stazione per svolgere le lavorazioni **ad essa assegnate** su una unità di prodotto)
- la stazione con il *carico massimo* definisce il *tasso di produzione* della linea
 - se il carico max è $CM = 10$ min/pezzo \Rightarrow il tasso di produzione è $p = 1/CM = 6$ pezzi/ora
- specificato il prodotto richiesto nel periodo, si ha il *carico massimo teorico*
 - 7200 pz/mese $\Rightarrow 30$ gg/mese, 24 ore/gg $\Rightarrow p = 10$ pezzi/ora $\Rightarrow CMT = 6$ min/pezzo
- le L lavorazioni da effettuare hanno ciascuna un *tempo* T_i ($i = 1, \dots, |L|$) necessario, con relazioni di causalità tra loro espresse da un *grafo di precedenze* $G(L, A)$ con archi orientati A
- **dimensionamento della linea:** trovare un'assegnazione *ammissibile* delle lavorazioni alle N stazioni tale che
 - soddisfi la specifica di produzione: carico $C_j \leq CMT, \forall j = 1, \dots, N$
 - soddisfi i vincoli di precedenza delle lavorazioni dati dal grafo $G(L, A)$
 - **minimizzi il numero N di stazioni**

Esempio di dimensionamento

- una nuova linea per l'assemblaggio di computer richiede $L = 14$ lavorazioni, con tempi e grafo $G(L, A)$ così specificati:

lavorazione	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
tempo T_i (sec)	55	30	50	42	20	25	45	60	36	42	30	40	36	40
lavorazioni precedenti	-	A	A	A	-	-	AEF	B C D G	H	H	H	J	J	I K L M



specifica di produzione:
300 computer / 7h

$$CMT = \left(\frac{300}{7 \cdot 3600} \right)^{-1} = 84 \text{ sec/pezzo}$$

tempo totale lavorazioni

$$T_{op} = \sum_{i=1}^{14} T_i = 551 \text{ sec}$$

lower bound # macchine

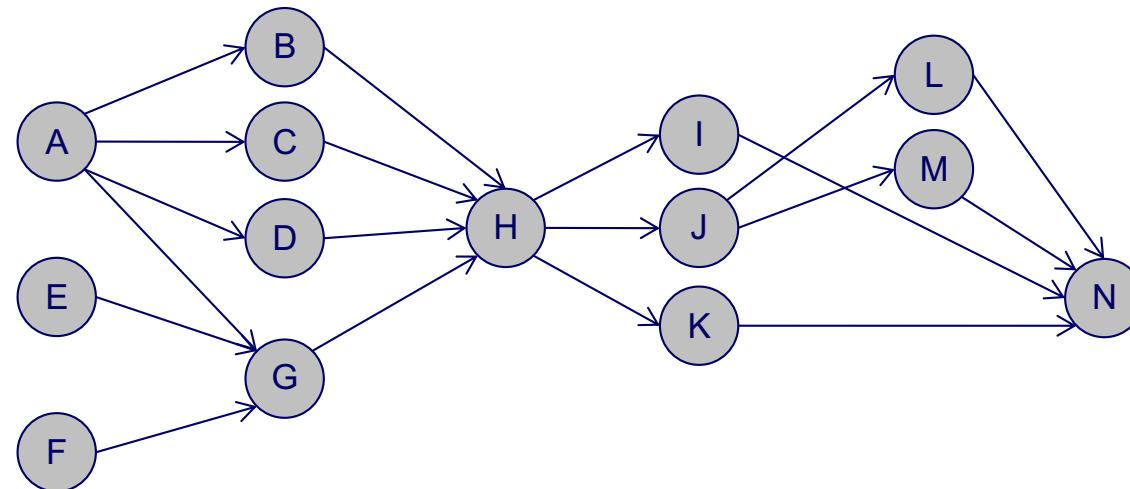
$$\left\lceil \frac{T_{op}}{CMT} \right\rceil = \left\lceil \frac{551}{84} \right\rceil = 7$$

Esempio di dimensionamento

□ euristica RPWT (Ranked Positional Weight Technique)

1. insieme S_i delle lavorazioni **successive** alla lavorazione i -esima, per $i = 1, \dots, L$
2. peso posizionale della lavorazione i -esima $PW_i = T_i + \sum_{k \in S_i} T_k$

lavorazione	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
tempo	55	30	50	42	20	25	45	60	36	42	30	40	36	40
S_i	B C D G ... N	H I ... N		G H I ... N		H I ... N	I ... N	N	L M N	N	N	N	N	-
PW_i (sec)	506	314	334	326	349	354	329	284	76	158	70	80	76	40

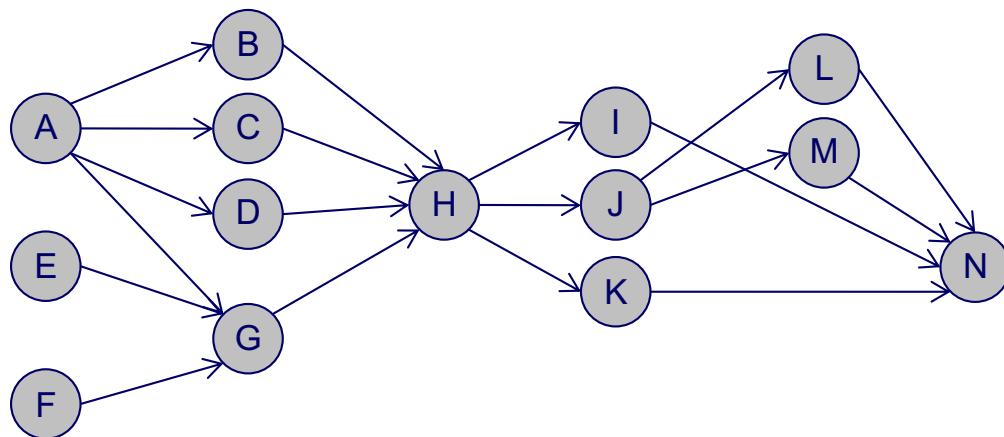


Esempio di dimensionamento

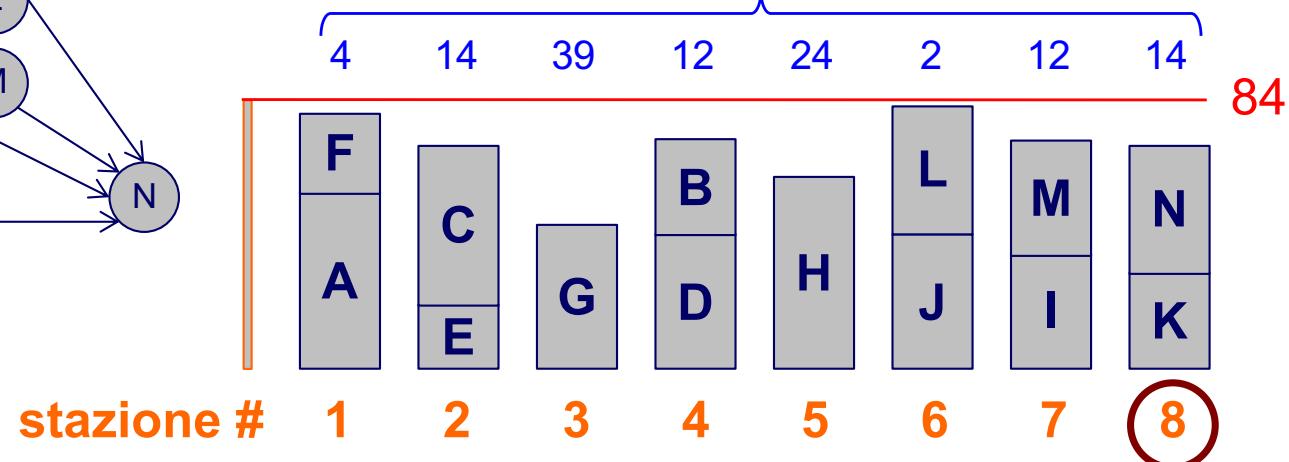
□ euristica RPWT (Ranked Positional Weight Technique)

3. ordinare per peso posizionale decrescente le lavorazioni
4. fino a esaurimento di tutte le lavorazioni, assegnare la lavorazione con il più alto peso posizionale alla prima stazione ammessa (ancora capiente rispetto a $CMT = 84$ sec per pezzo), altrimenti aggiungere una nuova stazione

lavorazione	A	F	E	C	G	D	B	H	J	L	I	M	K	N
tempo	55	25	20	50	45	42	30	60	42	40	36	36	30	40
PW_i	506	354	349	334	329	326	314	284	158	80	76	76	70	40
stazione	1	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8	8



sbilanciamento medio = $111/8 = 13.875$ sec (16,5%)



Evoluzione temporale

lavorazione	A	F	E	C	G	D	B	H	J	L	I	M	K	N
tempo	55	25	20	50	45	42	30	60	42	40	36	36	30	40
PW_i	506	354	349	334	329	326	314	284	158	80	76	76	70	40
stazione	1	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8	8

Ipotesi di lavoro: linea di trasferta **sincrona** (senza buffer intermedi)

tempi lavorazioni	55	25	20	50	45	42	30	60	42	40	36	36	30	40	tempo morti	distanza da CMT = 84		
macchina															82 sec/pezzo			
1	A	F	..	..	..	..	ripete A, F su nuovi pezzi	..	..	..	..	..	80		A = 55	F = 25	2	4
2		E	C	..	..	..	ripete E, C su nuovi pezzi	..	..	..	..	..	70	a regime con	E = 20	C = 50	12	14
3			G	..	..	..	..	ecc	..	..	..	..	45	avanzamento	G = 45	-	37	39
4				D	B	..	..	..	ecc	..	..	..	72	sincrono	D = 42	B = 30	10	12
5					H	..	..	..	..	..	..	..	60	della linea	H = 60	-	22	24
6						J	L	..	..	..	..	..	82	di trasferta	J = 42	L = 40	0	2
7							I	M	..	..	72	ogni 82 sec		I = 36	M = 36	10	12	
8								N	..	..	K	N	70		K = 30	N = 40	12	14
tempo totale lavorazioni (effettivo sul primo pezzo)	551										tempo totale lavorazioni (a regime)	$8 \times 82 = 656$						

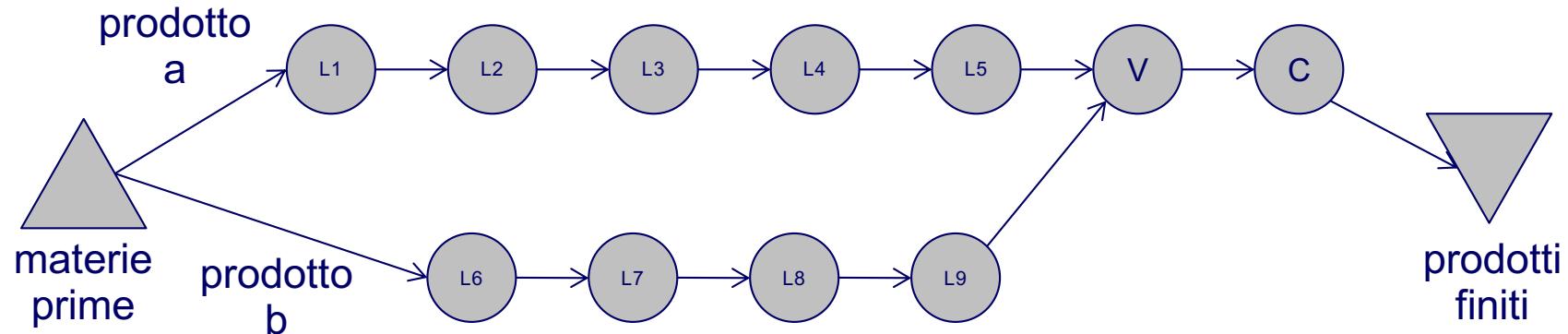
all'avvio le $N = 8$ macchine sono caricate una dopo l'altra dal primo pezzo del lotto...

a regime le macchine lavorano su 8 pezzi successivi del lotto (una linea "sbilanciata" avrà tempi morti con pezzi già semi-lavorati che rimangono fermi sulle macchine)

Linee multiple di trasferta

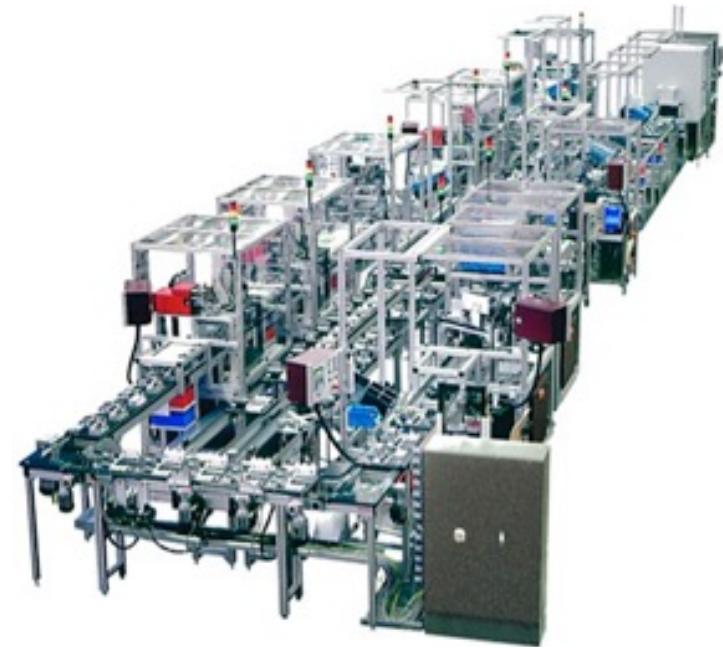
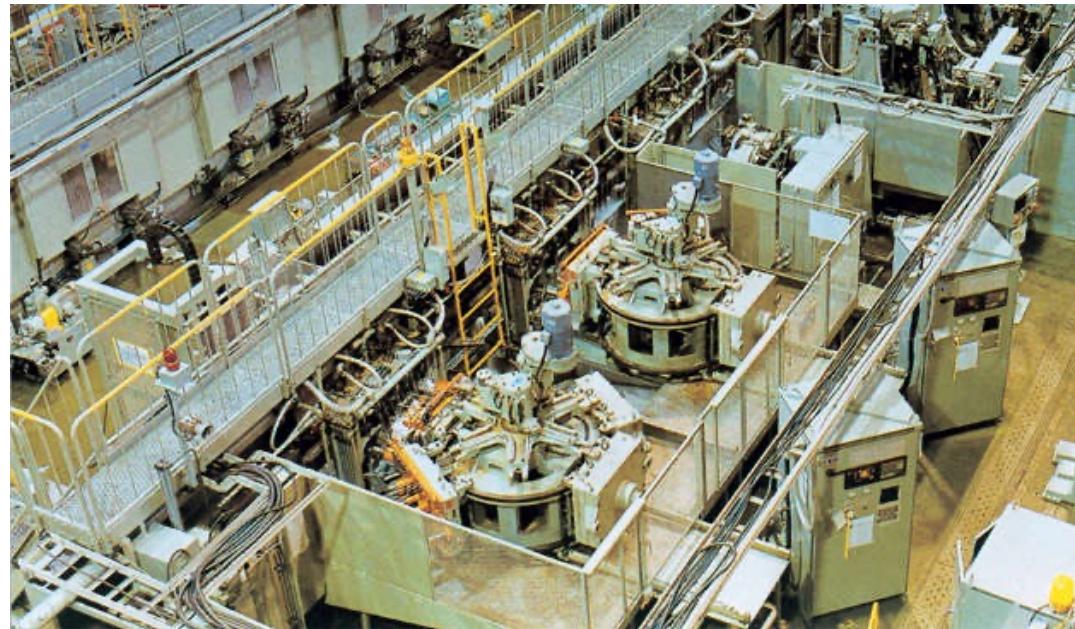
Linee multiple di trasferta

- gestiscono in parallelo più prodotti, uno per linea
- possono eventualmente condividere alcune stazioni, richiedendo la gestione e il coordinamento dei flussi



Produzione per flussi (flow shop)

- le stazioni/macchine sono disposte in linea (o con semplici tavole rotanti)
- n diversi prodotti, ma (nello schema base) tutti i prodotti seguono la stessa sequenza di m lavorazioni su m macchine
- ogni macchina esegue una singola lavorazione su prodotti diversi, in modo ripetitivo ed esclusivo (tempo dato per ogni coppia lavorazione/prodotto)
- problemi di sequenziamento sulle risorse (flow shop **scheduling**)



□ flow shop scheduling

- si vuole sequenziare la lavorazione di n prodotti (**job**) su m macchine in modo da **minimizzare** il tempo totale di completamento (**makespan**) T_{max}
- sono presenti **buffer** tra le macchine per metter in attesi i prodotti semi-lavorati
- caso di $m = 2$ macchine: soluzione con la **regola di Johnson** che schedula i job sulla macchina 1 (la sequenza sarà poi la stessa anche sulla macchina 2)
- $t_{i1} > 0$ e $t_{i2} > 0$ sono i tempi di lavoro (noti) del job i sulle macchine 1 e 2
- in una **soluzione ottima**, il job i precede il job j se

$$\min(t_{i1}, t_{j2}) < \min(t_{j1}, t_{i2})$$

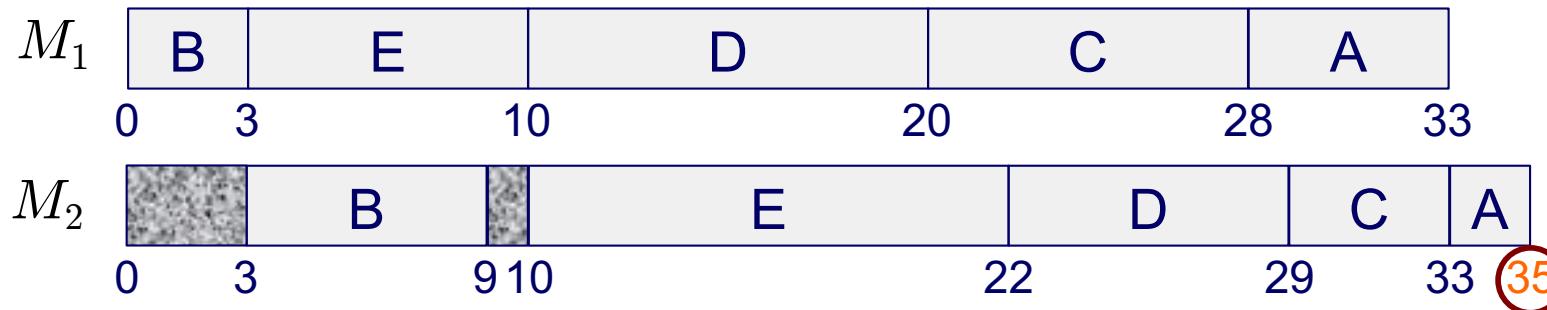
- passo 1: formare il **set1** con tutti i jobs che hanno $t_{i1} < t_{i2}$
- passo 2: formare il **set2** con tutti i jobs che hanno $t_{i1} > t_{i2}$
(jobs con $t_{i1} = t_{i2}$ possono essere messi ovunque)
- passo 3: sequenziare i job sulla prima macchina secondo la regola
 - i) i job nel **set1** sono eseguiti per primi e in ordine **crescente** di t_{i1} (SPT)
 - ii) seguono quindi i job nel **set2** in ordine **decrescente** di t_{i2} (LPT)

Esempio di flow shop scheduling

Job	A	B	C	D	E	T_{tot}
t_{i1}	5	3	8	10	7	= 33
t_{i2}	2	6	4	7	12	= 31

- $n = 5$, set1 = {B, E}, set2 = {A, C, D}
- sequenza $S^* = \{B \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow A\}$
- makespan $T_{max} = 35$
- $T_{idle,1} = 0$ (sempre!), $T_{idle,2} = 4$

diagrammi di Gantt per le due macchine



la sequenza ottima qui è unica (non ci sono “ties”)

buffer intermedio necessario per i jobs D (2 unità di tempo) e C (1 unità di tempo)

- mai attese su macchina 1; l'algoritmo minimizza il tempo di attesa sulla macchina 2
- la versione originale di Johnson (1954) era espressa in un modo equivalente:
 - scegliere il job i nella lista che ha il minimo tempo t_{ij} tra tutti i tempi delle coppie job/macchina
 - se questo job i ha $t_{i1} < t_{i2}$ metterlo per **primo**, altrimenti metterlo per **ultimo**
 - scartare il job i così assegnato e ripetere i passi i)-ii) fino allo svuotamento della lista
- l'algoritmo si generalizza al caso $m = 3$, sotto una tra le seguenti due ipotesi semplificative: $\max_i(t_{i2}) \leq \min_i(t_{i1})$ oppure $\max_i(t_{i2}) \leq \min_i(t_{i3})$

Esempio con $m = 3$ macchine

Esame dell'11 febbraio 2019

Esercizio 2

Una linea di produzione gestisce quattro prodotti $\{A, B, C, D\}$ che necessitano di tre lavorazioni nella stessa sequenza, effettuate rispettivamente dalle macchine #1, #2 e #3. In Tab. 1 sono riportati i tempi (in ore) necessari per le lavorazioni. Mostrare che utilizzando l'algoritmo di Johnson per due macchine equivalenti aventi tempi di lavorazione dei prodotti $\tau_{i1} = t_{i1} + t_{i2}$ e $\tau_{i2} = t_{i2} + t_{i3}$ è possibile sequenziare le lavorazioni in modo da minimizzare il tempo totale T di completamento (*makespan*). Riportare il risultato graficamente con un diagramma di Gantt.

Prodotto	A	B	C	D
Macchina #1	4	1	5	2
Macchina #2	3	2	3	3
Macchina #3	3	4	5	4

Tabella 1: Tempi di lavorazione sulle tre macchine.

soddisfa alla condizione
sufficiente per applicare
il teorema di Johnson ...

$$\max_{i=1,\dots,n} t_{i2} \leq \min_{i=1,\dots,n} t_{i1} \quad \text{e/o}$$

$$\max_{i=1,\dots,n} t_{i2} \leq \min_{i=1,\dots,n} t_{i3}$$

Esempio con $m = 3$ macchine

Prodotto	A	B	C	D
Macchina equivalente #1	7	3	8	5
Macchina equivalente #2	6	6	8	7

Prodotto	A	B	C	D
Macchina #1	4	1	5	2
Macchina #2	3	2	3	3
Macchina #3	3	4	5	4

Tabella 2: Tempi di lavorazione cumulati sulle due macchine equivalenti, con durate $\tau_{i1} = t_{i1} + t_{i2}$ per la prima e $\tau_{i2} = t_{i2} + t_{i3}$ per la seconda (con $i = A, \dots, D$).

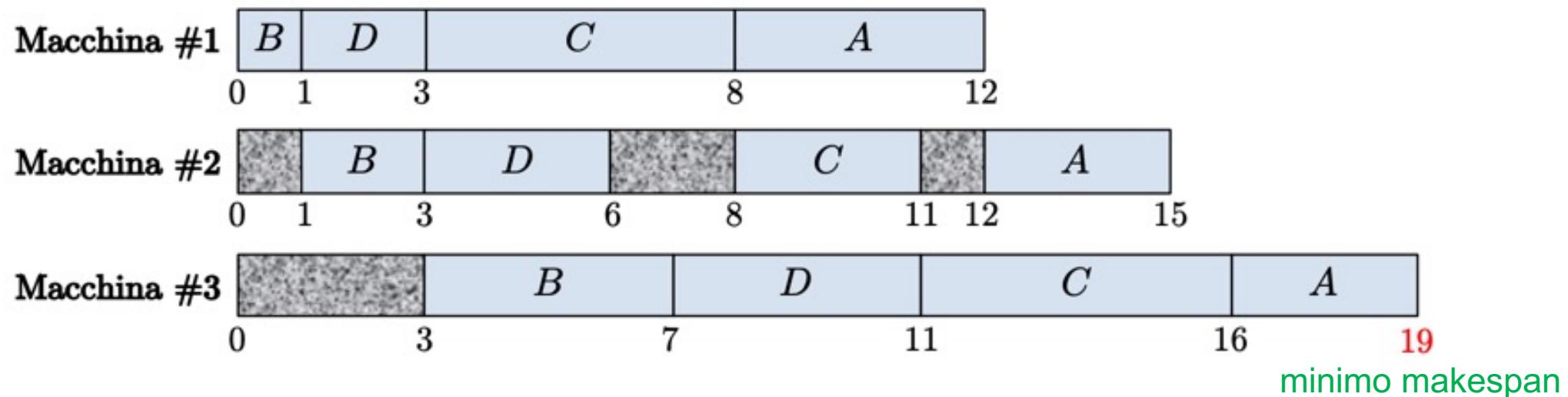
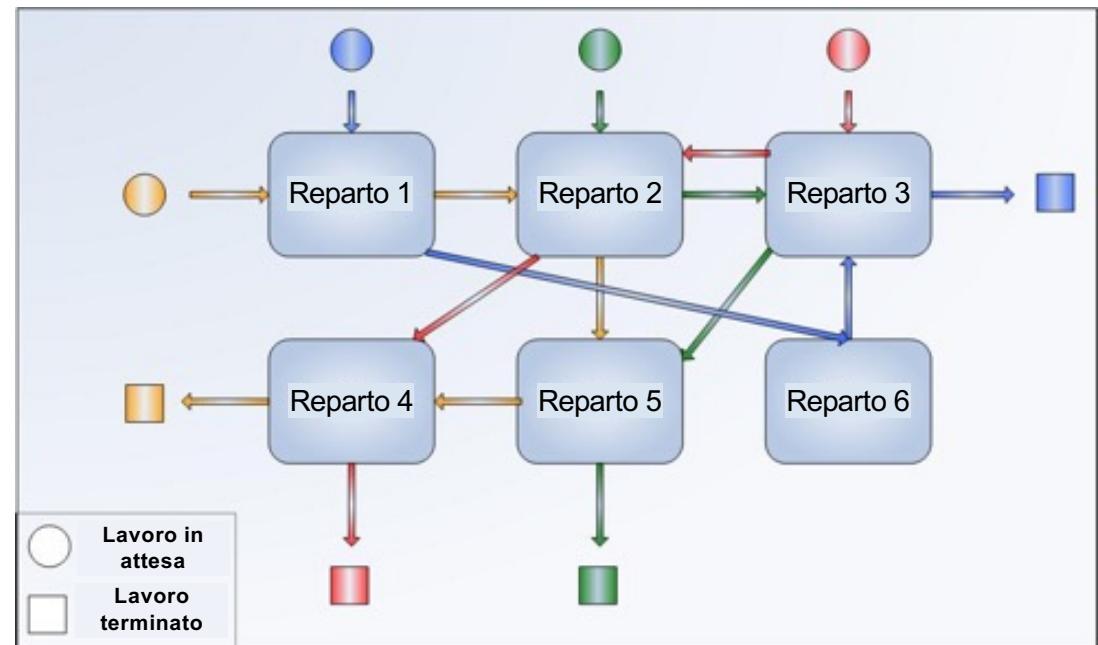


Figura 6: Diagramma di Gantt con la soluzione flow shop scheduling.

Produzione per reparti (job shop)

- ❑ ogni pezzo (o insieme di pezzi = lotto) richiede l'esecuzione di una serie di operazioni da un gruppo di **centri di lavoro** (macchine, stazioni, gruppi di operatori) in una sequenza prefissata (*ciclo tecnologico*)
- ❑ la varietà dei cicli è tale che conviene aggregare i macchinari in **reparti** omogenei per tipo di lavorazione (tornitura, fresatura, collaudo...)
- ❑ il pezzo (o lotto) si sposta da reparto a reparto tramite un sistema di trasporto o su pallet seguendo un percorso prefissato (**routing**)



Produzione per reparti (job shop)

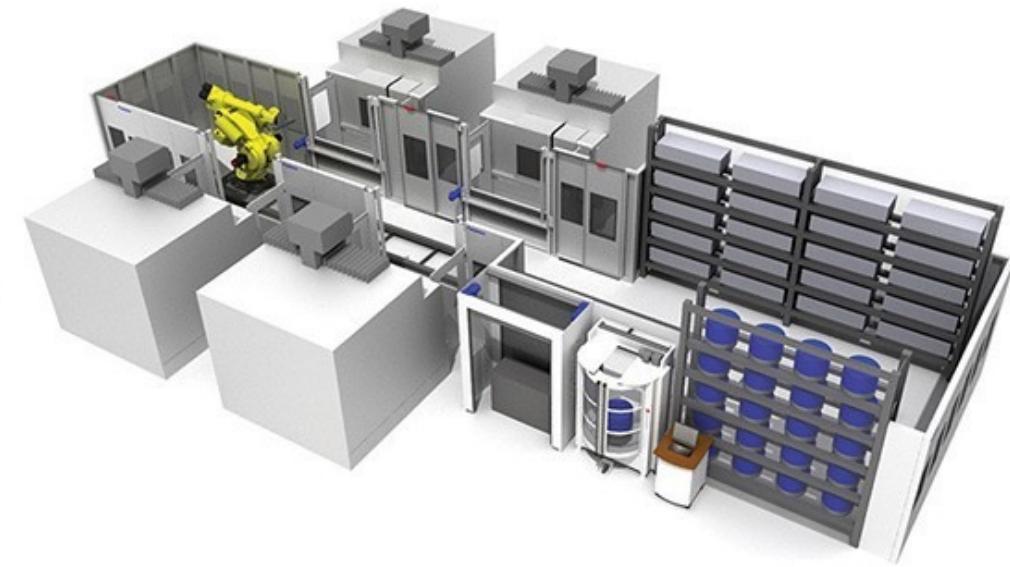
- diverse categorie di prodotti
- i prodotti subiscono lavorazioni con **sequenze differenti**
- le operazioni non sono ripetitive
- alta flessibilità (cicli alternativi)
- più materiale in lavorazione (WIP) rispetto al flow shop (code, attese)
- flussi produttivi molto intrecciati
- problemi di sequenziamento sulle singole risorse
- limiti alle prestazioni
 - ➔ elevati tempi di attraversamento
 - ➔ scarsa saturazione delle risorse
 - ➔ qualità non sempre omogenea

<https://www.youtube.com/watch?v=gJWMCUMdO4Q>

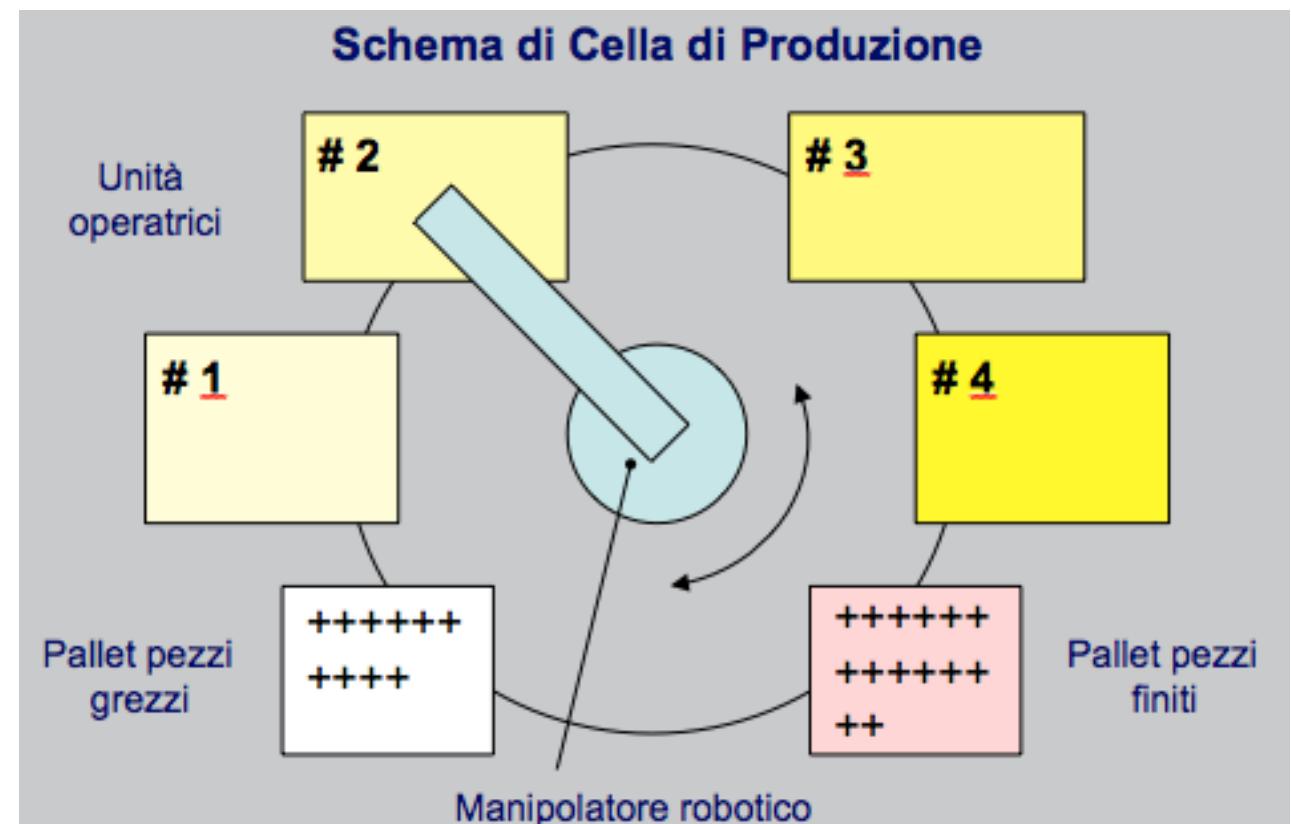
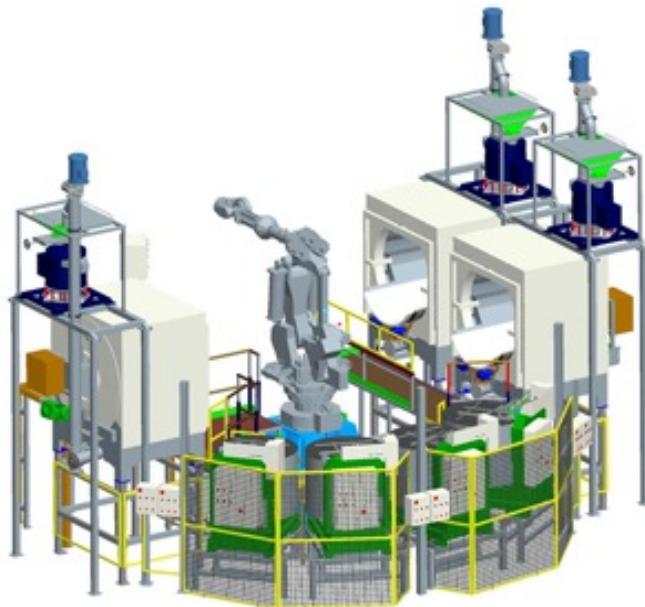


Produzione per celle (cell production)

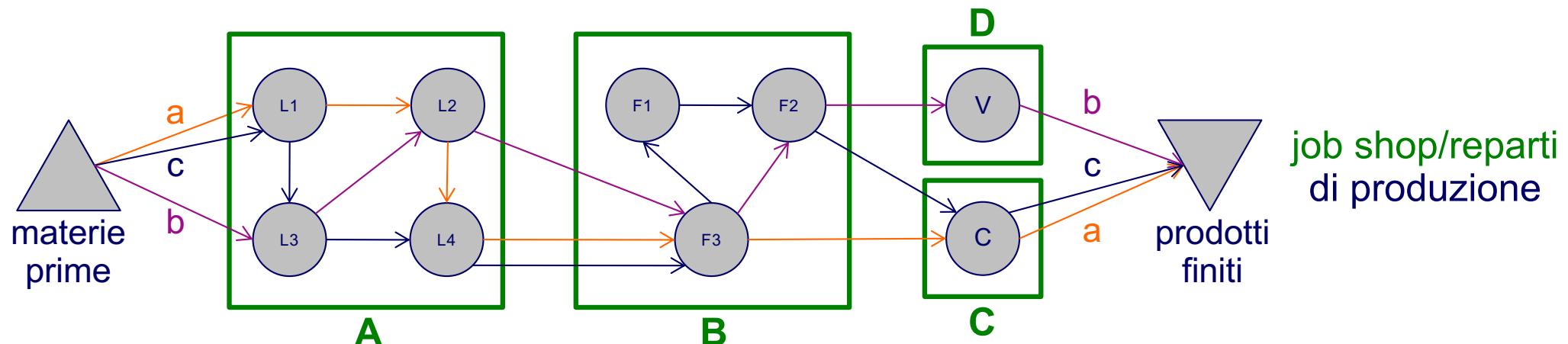
- quando è possibile individuare **famiglie di prodotti** con cicli di lavorazione sufficientemente omogenei, conviene riunire **gruppi di macchine (di natura diversa)** adibite alle lavorazioni richieste da una intera famiglia
- flussi produttivi meno intrecciati
- trasporto e gestione più semplici, ma minore flessibilità
- celle indipendenti per aspetti di pianificazione, controllo e amministrazione



Cella o isola robotizzata



Produzione in reparti o per cellule



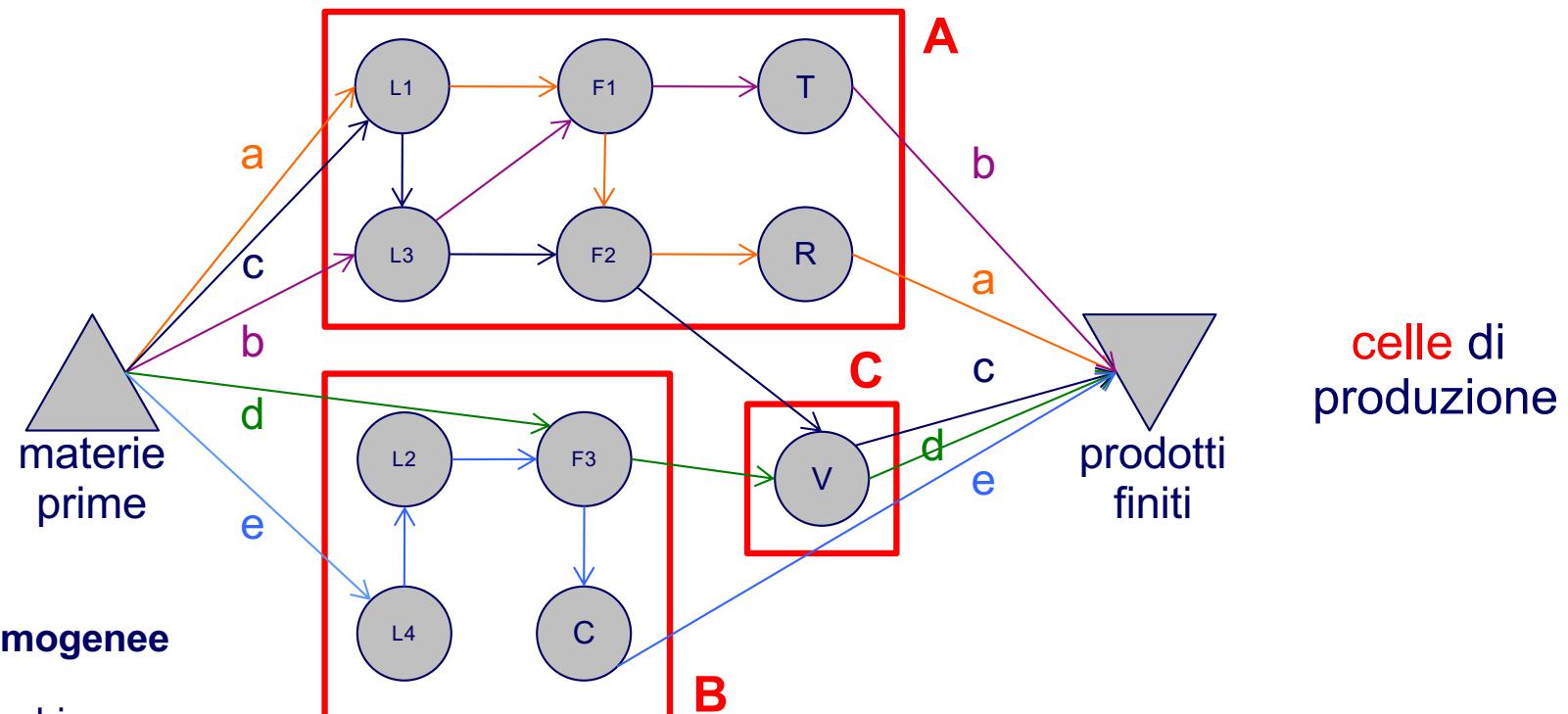
→ = flussi di pezzi, lotti, o famiglie di pezzi

○ = lavorazioni/operazioni macchina

▽ = magazzini

□ = reparto/stazioni di **lavoro omogenee**

□ = cella (gruppo di macchine specifiche per **famiglie di prodotti**)



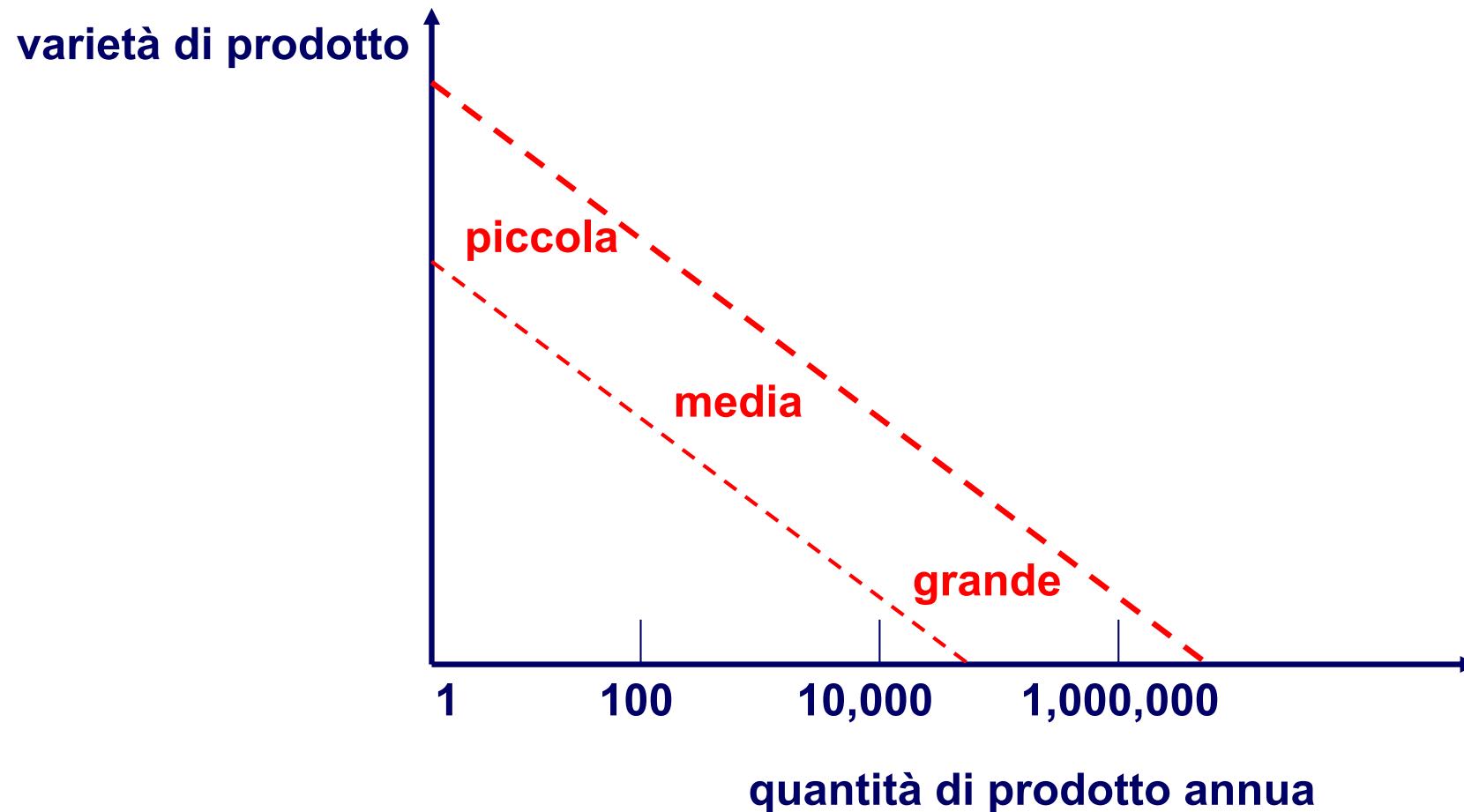
Sistemi manifatturieri flessibili

Flexible Manufacturing/Assembly Systems (FMS/FAS)

- sistemi dotati di flessibilità riguardo alle diverse sequenza delle lavorazioni e/o all'assegnamento di operazioni alle risorse
- non molto diversi dalle celle, con prestazioni migliori grazie a un sistema di trasporto automatico e un calcolatore che controlla il processo produttivo
 - ➔ diversi prodotti
 - ➔ lavorazioni eseguite su più di una risorsa/macchina
 - ➔ problemi di assegnazione di operazioni alle risorse (sizing e routing dei flussi)
 - ➔ problemi di sequenziamento locale dell'impiego delle risorse
 - ➔ grande flessibilità e alto grado di automazione



Classificazione dei sistemi produttivi



esiste una correlazione inversa tra **entità** della produzione e sua varietà!

Automazione del sistema di produzione

Automazione rigida: la sequenza delle operazioni di produzione è fissa

- il processo di produzione è realizzato mediante una sequenza di operazioni elementari relativamente semplici
- destinata a grandi produzioni con varietà di prodotto molto bassa

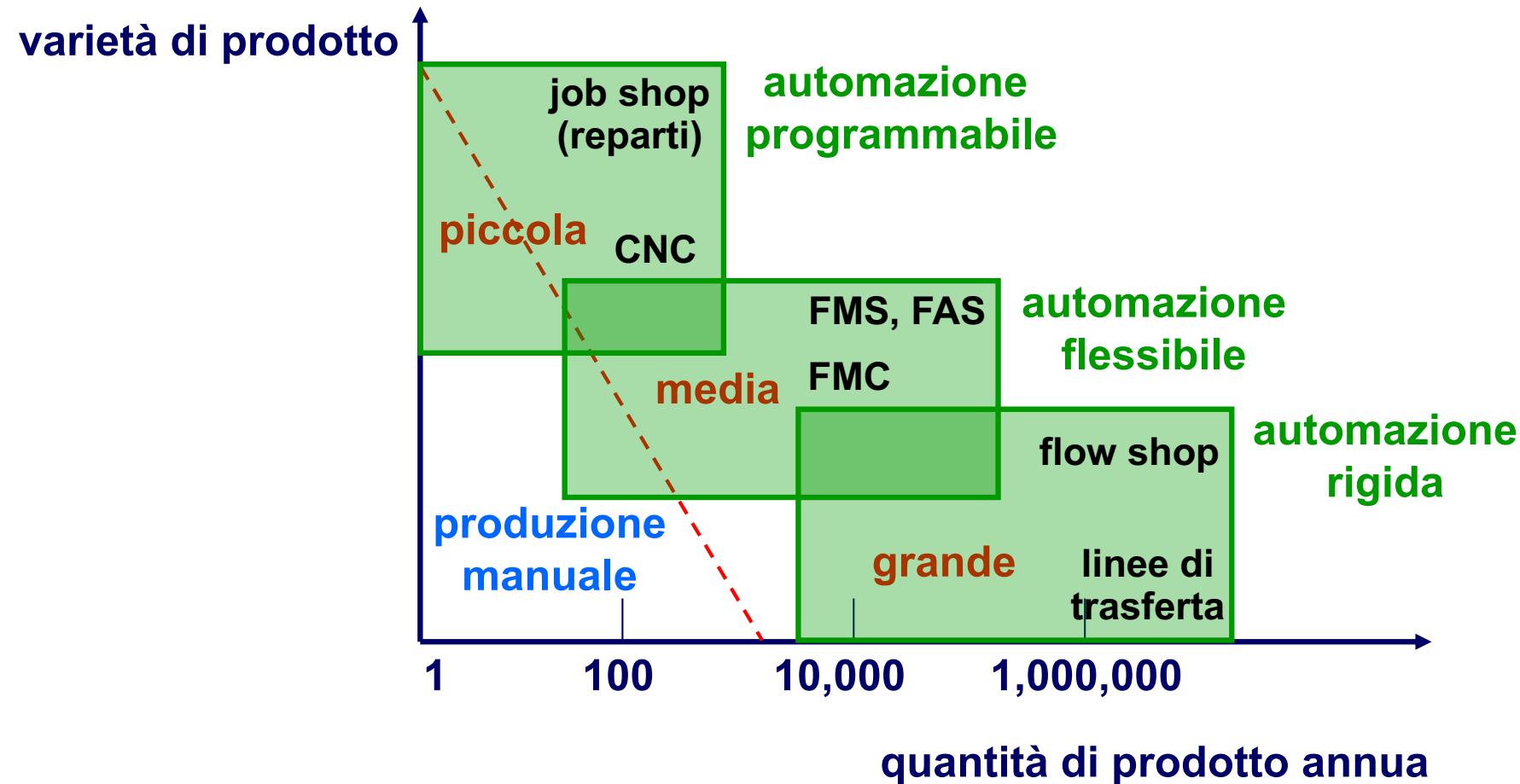
Automazione programmabile: è possibile cambiare la sequenza di operazioni in modo da cambiare la configurazione finale del prodotto

- si trova in industrie con entità di produzione medio-bassa caratterizzate da produzione a lotti
- tra un lotto e l'altro è necessario attendere la riconfigurazione dell'impianto di produzione

Automazione flessibile: estensione dell'automazione programmabile in cui è possibile diversificare la produzione senza avere tempi morti di conversione dell'impianto

- possibile se le varietà di prodotto finale sono abbastanza simili
- i macchinari sono caratterizzati da un'alta configurabilità e flessibilità di impiego (**FMS** e **FAS**)

Automazione del sistema di produzione



Sommario del modulo: Linee di produzione

Processo per vetro temperato



Processo per vetro laminato

c/o STAR Glass Division,
Latina
www.icapgroup.it

