

# Modelli di programmazione aggregata della produzione

Lucidi per gli allievi del corso di Gestione della  
Produzione Industriale del II° anno

# Programmazione lineare (monoprodotto)

- Ipotesi:
  - Monoprodotto
  - Domanda prevedibile (determ.)
  - Tempi e costi di setup trascurabili
  - No backlog

**Funzione obiettivo:**

$$\begin{aligned} \mathit{Min}(Z) = & \sum_1^T [\mathit{m}(t) * X(t) + \mathit{i}(t) * \mathit{INV}(t)] \\ & + \sum_1^T [\mathit{r}(t) * W(t) + \mathit{s}(t) * S(t)] \end{aligned}$$

# Programmazione lineare (monoprodotto)

**Vincoli:**

$$X(t) + INV(t-1) - INV(t) = D(t)$$

$$h(t) * X(t) = W(t) + S(t)$$

$$0 \leq W(t) \leq MAXW(t)$$

$$0 \leq S(t) \leq MAXS(t)$$

$$INV(t) \geq 0$$

# Programmazione lineare (multiprodotto)

- Ipotesi
  - Multiprodotto
  - Monomacchina
  - Domanda prevedibile (deterministica)
  - Tempi di setup trascurabili
  - Setup indipendenti dalla sequenza
  - No backlog

# Programmazione lineare (multiprodotto)

- Simbologia
  - $X(i,t)$  quantità da produrre di  $i$  in  $t$
  - $Cp(t)$  capacità disponibile in  $t$
  - $D(i,t)$  domanda del prodotto  $i$  nel periodo  $t$
  - $e(i,t)$  eccesso di produzione vs domanda fino a  $t$
  - $c(i,t)$  costo unitario di mantenimento a scorta
  - $a(i,t)$  costo di setup di  $i$  al periodo  $t$
  - $k(i,t) = 0$  se non si produce, 1 se si produce

# Programmazione lineare (multiprodotto)

- Funzione obiettivo

$$\begin{aligned} \text{Min}(z) = & \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T [k(i,t) \times a(i,t)] + \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T [c(i,t) \times e(i,t)] \end{aligned}$$

# Programmazione lineare (multiprodotto)

- Vincoli

$$e(i, t) = \sum_{j=1}^t X(i, j) - \sum_{j=1}^t D(i, j)$$

$$e(i, t) \geq 0 \quad \forall i, \forall t \quad (\text{no backlog})$$

$$\sum_{i=1}^I X(i, t) \leq Cp(t) \quad \forall t \quad (\text{rispetto capacità})$$

# Wagner - Whitin

- Ipotesi
  - Monoprodotto
  - Domanda prevedibile (deterministica)
  - Capacità infinita
  - Costo prod./acq. costante nel tempo
  - Setup solo come costi
  - No backlog



# Wagner - Whitin

- Il funzionale ricorsivo

$$f_t(INV) = \text{Min} [i(t-1) * INV + \tau(X(t)) * a(t) + f_{t+1}(INV + X(t) - D(t))]$$

# Wagner - Whitin

- dove

$$\tau ( X ( t ) ) = 0 , \quad \text{se } X ( t ) = 0 ,$$

$$\tau ( X ( t ) ) = 1 , \quad \text{se } X ( t ) > 0$$

con i vincoli  $(\forall t)$

$$X ( t ) \geq 0$$

$$INV \geq 0 ,$$

$$INV + X ( t ) \geq D ( t )$$

# Il modello di Wagner-Whitin

- Esiste una soluzione ottima per la quale:

$$INV * X(t) = 0 \quad \forall t$$

# Il modello di Wagner-Whitin

- Se in un periodo  $t$  si verifica che  $INV=0$ , allora è ottimale considerare i periodi da 0 a  $t$  indipendentemente dai successivi

$$f_{t-1}(INV) = \text{Min} [i(t-2) * INV + \tau(X(t-1)) * a(t-1) + f_t(0)]$$

$$g_{t-1}(INV) = \text{Min} [i(t-2) * INV + \tau(X(t-1)) * a(t-1)]$$

# Il modello di Wagner-Whitin

- Esiste una soluzione ottima per la quale la produzione di un periodo soddisfa un numero intero di domanda di periodo per i periodi successivi
- Se la domanda di un periodo  $t''$  è soddisfatta dalla produzione del periodo  $t$ , allora anche la domanda di  $t'$  ( $t < t' < t''$ ) è soddisfatta dalla produzione di  $t$ .

# Il modello di Wagner-Whitin

- Sintesi del modello

$$F(t) = \text{Min} [A, B] \quad \text{dove}$$

$$A = a(t) + F(t - 1)$$

$$B = \text{Min} \left[ a(j) + \left( \sum_j^{t-1} \sum_{h+1}^t i(h) D(k) \right) + F(j - 1) \right]$$

$$F(1) = a(1)$$

$$F(0) = 0$$

# Il modello di Wagner-Whitin

- Se al periodo  $t'$  il minimo della relazione è ottenuto in corrispondenza di  $j=t''$  con  $t'' \leq t'$ , allora al periodo  $t$ , con  $t > t'$ , è sufficiente considerare solo  $t'' \leq j \leq t$ .
- In particolare se  $t'=t''$  è sufficiente considerare solo i programmi per cui  $X(t') > 0$ .

# Esempio applicazione Wagner-Whitin

<b>Mese</b>	<b>D(t)</b>	<b>a(t)</b>	<b>i(t)</b>
<b>1</b>	<b>69</b>	<b>85</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>29</b>	<b>102</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>36</b>	<b>102</b>	<b>1</b>
<b>4</b>	<b>61</b>	<b>101</b>	<b>1</b>
<b>5</b>	<b>61</b>	<b>98</b>	<b>1</b>
<b>6</b>	<b>26</b>	<b>114</b>	<b>1</b>
<b>7</b>	<b>34</b>	<b>105</b>	<b>1</b>
<b>8</b>	<b>67</b>	<b>86</b>	<b>1</b>
<b>9</b>	<b>45</b>	<b>119</b>	<b>1</b>
<b>10</b>	<b>67</b>	<b>110</b>	<b>1</b>
<b>11</b>	<b>79</b>	<b>98</b>	<b>1</b>
<b>12</b>	<b>56</b>	<b>114</b>	<b>1</b>



# Esempio applicazione Wagner-Whitin

Mese	1	2	3	4	5	6
<b>a(t)</b>	<b>85</b>	<b>102</b>	<b>102</b>	<b>101</b>	<b>98</b>	<b>114</b>
<b>D(t)</b>	<b>69</b>	<b>29</b>	<b>36</b>	<b>61</b>	<b>61</b>	<b>26</b>
	<b>85</b>	<b>187</b>	<b>216</b>	<b>287</b>	<b>375</b>	<b>462</b>
		<b>114</b>	<b>223</b>	<b>277</b>	<b>348</b>	<b>401</b>
			<b>186</b>			<b>400</b>
<b>F(t)</b>	<b>85</b>	<b>114</b>	<b>186</b>	<b>277</b>	<b>348</b>	<b>400</b>
<b>Polit.</b>	<b>1</b>	<b><u>1 2</u></b>	<b><u>1 2 3</u></b>	<b><u>12 34</u></b>	<b><u>123 45</u></b>	<b><u>123 456</u></b>

**Politica ottima: 1,2 3,4 5,6,7 8,9 10 11,12**

# Il modello di Magee Boodman

- Ipotesi:
  - Multiprodotto
  - Monomacchina
  - Domanda stazionaria
  - Domanda prevedibile (deterministica)
  - Tempi di setup trascurabili
  - Setup indipendenti dalla sequenza
  - No backlog
- Concetto di Campagna:
  - In una campagna di produzione si realizzano in sequenza tutti i prodotti

# Il modello di Magee Boodman

- Simbologia

- $k$             indice di prodotto
- $H$             giorni lavorativi annui
- $r(k)$         ritmo produttivo del prodotto  $k$
- $D(k)$         domanda annua del prodotto  $k$
- $C_m$         costo unitario di mantenimento a scorta
- $p(k)$         costo variabile di produzione di  $k$
- $a(k)$         costo di setup del prodotto  $k$

# Il modello di Magee Boodman

- Costo totale di mantenimento a scorta

$$C_{totMant} = \sum_{k=1}^K \frac{p(k) \times C_m \times D(k) \times \left(1 - \frac{D(k)}{H \times r(k)}\right)}{2 \times n_o}$$

# Il modello di Magee Boodman

- Costo totale di setup

$$C_{totSetup} = n_o \times \sum_{k=1}^K a(k)$$

# Il modello di Magee Boodman

- Numero ottimo di campagne

$$n_o = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K p(k) \times Cm \times D(k) \times \left(1 - \frac{D(k)}{H \times r(k)}\right)}{2 \times \sum_{k=1}^K a(k)}}$$

# Il modello di Magee Boodman

- Il lotto di produzione ad ogni campagna

$$Q_o(k) = \frac{D(k)}{n_o}$$

# Limiti del modello di Magee Boodman

- Campagne degeneri
- Domanda non stazionaria
- Incertezza nelle previsioni di domanda
- Setup dipendenti dalla sequenza
- Vincoli di capacità
- Tempi di setup



# Il modello di Magee Boodman

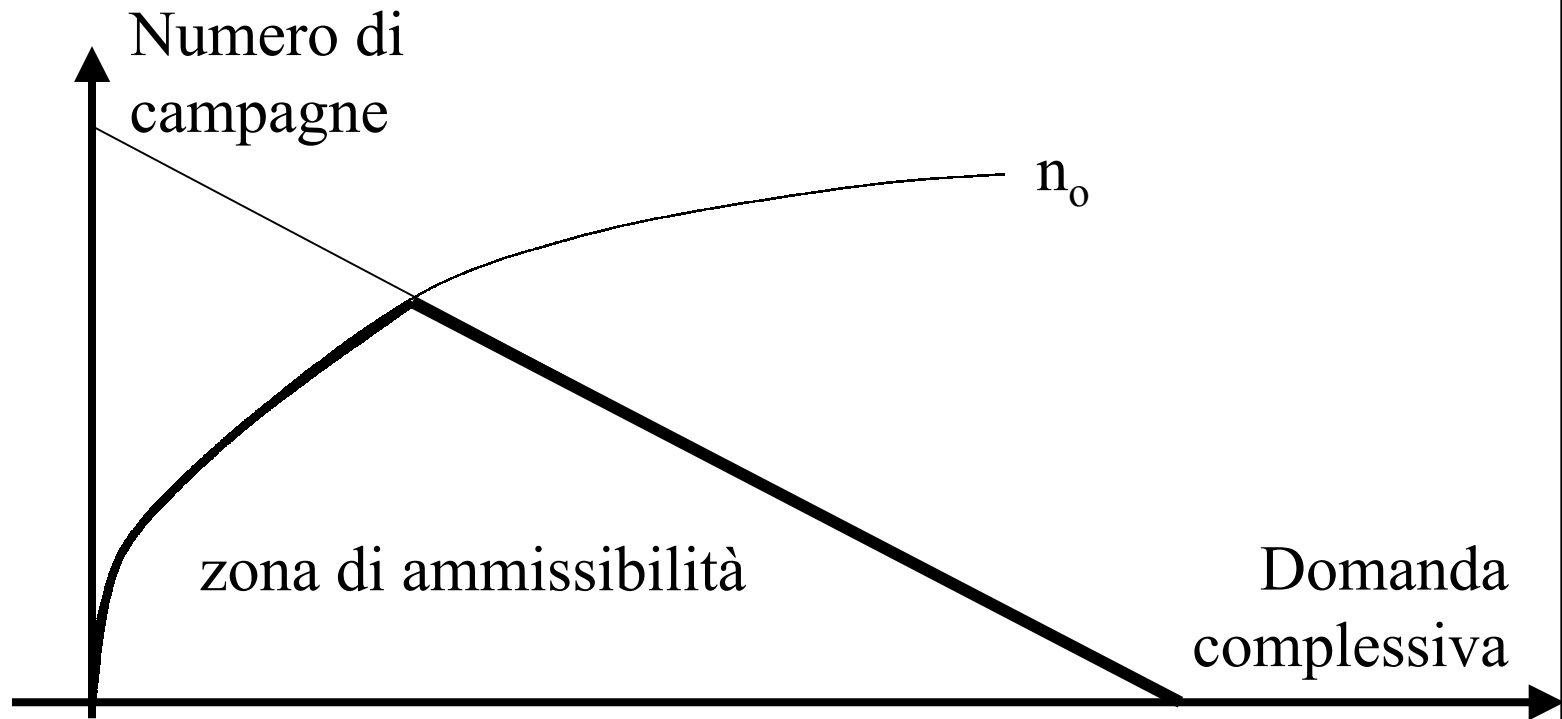
- Campagne degeneri: non sempre conviene produrre a ogni campagna prodotti con domanda limitata e costi di setup elevati:
  - si calcola il lotto economico per ciascuno di questi prodotti considerato separatamente
  - se  $Q(k) \gg Q_0(k)$  si considera la possibilità di produzione a campagne alterne o occasionali
  - si valutano i costi delle varie alternative e si sceglie la soluzione a minor costo complessivo
- Domanda non stazionaria: si utilizza il modello come se la domanda fosse stazionaria:
  - anticipando il trend
  - segmentando il periodo di pianificazione

# Il modello di Magee Boodman

- Incertezza nelle previsioni di domanda: si utilizzano delle opportune scorte di sicurezza
- Setup dipendenti dalla sequenza: poiché la campagna non vincola sulla sequenza, si ottimizza la sequenza a monte dell'applicazione del modello e si utilizza il costo di setup derivante da tale sequenza

# Il modello di Magee Boodman

- Vincoli di capacità / tempi di setup
  - Si tiene conto di un ritmo produttivo
  - I setup sottraggono tempo alla produzione



# Euristico per la programmazione operativa

- Si basa su  $R_k$ , rapporto tra la scorta massima e la scorta media del ciclo

$$SCMax = Q'_o(k) = \frac{D(k)}{n_o} \times \left( 1 - \frac{D(k)}{H \times r(k)} \right)$$

$$SCMed = \sum_{k=1}^K \frac{Q'_o(k)}{2}$$

# Euristico per la programmazione operativa

- Da cui

$$R(k) = \frac{2 \times D(k) \times \left( 1 - \frac{D(k)}{H \times r(k)} \right)}{\sum_{k=1}^K D(k) \times \left( 1 - \frac{D(k)}{H \times r(k)} \right)}$$

# Euristico per la programmazione operativa

- Procedura:
  - si calcola una tantum  $R(k)$  in occasione del calcolo di  $n_0$
  - si monitorizza il rapporto tra  $R'(k)$ , fra la scorta istantanea del prodotto  $k$  e la scorta media
  - quando  $R'(k)$  raggiunge  $R(k)$  si arresta la produzione del prodotto  $k$  e si passa a produrre il prodotto per il quale è più basso il rapporto tra scorta istantanea e consumo nell'unità di tempo
  - NB. Si può perdere ottimizzazione sequenze

# Il modello di Karni-Roll

- Ipotesi
  - Multiprodotto
  - Domanda di forma qualsiasi
  - Domanda nota deterministicamente
  - Ci sono limiti di capacità produttiva
  - Setup da considerare come costi
  - Non è ammesso backlog

## Il modello di Karni-Roll

<b>Prodotti</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>A</b>	<b>100</b>	<b>50</b> →	<b>30</b>	<b>70</b>
<b>B</b>	<b>60</b> ←	<b>70</b>	<b>60</b>	<b>20</b>
<b>C</b>		<b>70</b>	<b>40</b>	<b>60</b>
<b>Totale</b>	<b>160</b>	<b>190</b>	<b>130</b>	<b>150</b>
<b>Capacità</b>	<b>170</b>	<b>170</b>	<b>160</b>	<b>160</b>



## Il modello di Karni-Roll

<b>Prodotti</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>A</b>	<b>100</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>70</b>
<b>B</b>	<b>70</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>20</b>
<b>C</b>		<b>70</b>	<b>40</b>	<b>60</b>
<b>Totale</b>	<b>170</b>	<b>170</b>	<b>140</b>	<b>150</b>
<b>Capacità</b>	<b>170</b>	<b>170</b>	<b>160</b>	<b>160</b>

# Il modello di Karni-Roll

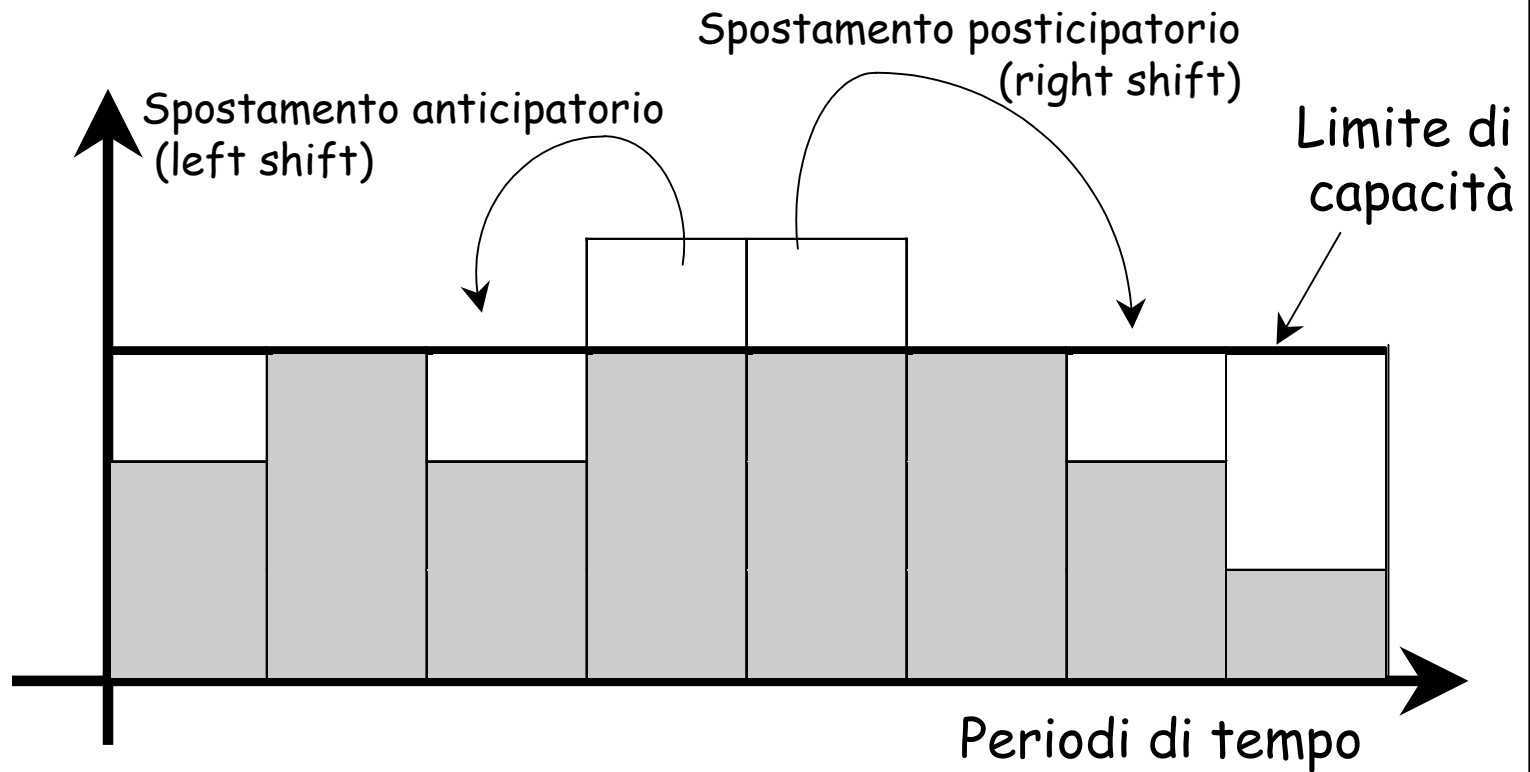
- la formulazione analitica è del tutto simile a quella di PL intera, ma il metodo risolutivo è euristico
  - non fornisce la migliore soluzione possibile, dato l'obiettivo e i vincoli, ma una soluzione “ragionevolmente buona” ...
  - ... per contro è maggiormente applicabile in pratica

# Il modello di Karni-Roll

- La procedura di funzionamento:
  - si parte dalla soluzione offerta dall'algoritmo di Wagner-Whitin (EOQ dinamico)
    - tale soluzione è il limite inferiore del costo, in quanto effettua un caricamento a capacità infinita
  - se tale soluzione è fattibile, l'algoritmo termina
  - se tale soluzione è infattibile ...
    - il vincolo di capacità produttiva è violato in uno o più periodi
  - ... l'algoritmo cerca una soluzione ammissibile effettuando degli spostamenti (shift) di quantità da un periodo all'altro dell'orizzonte

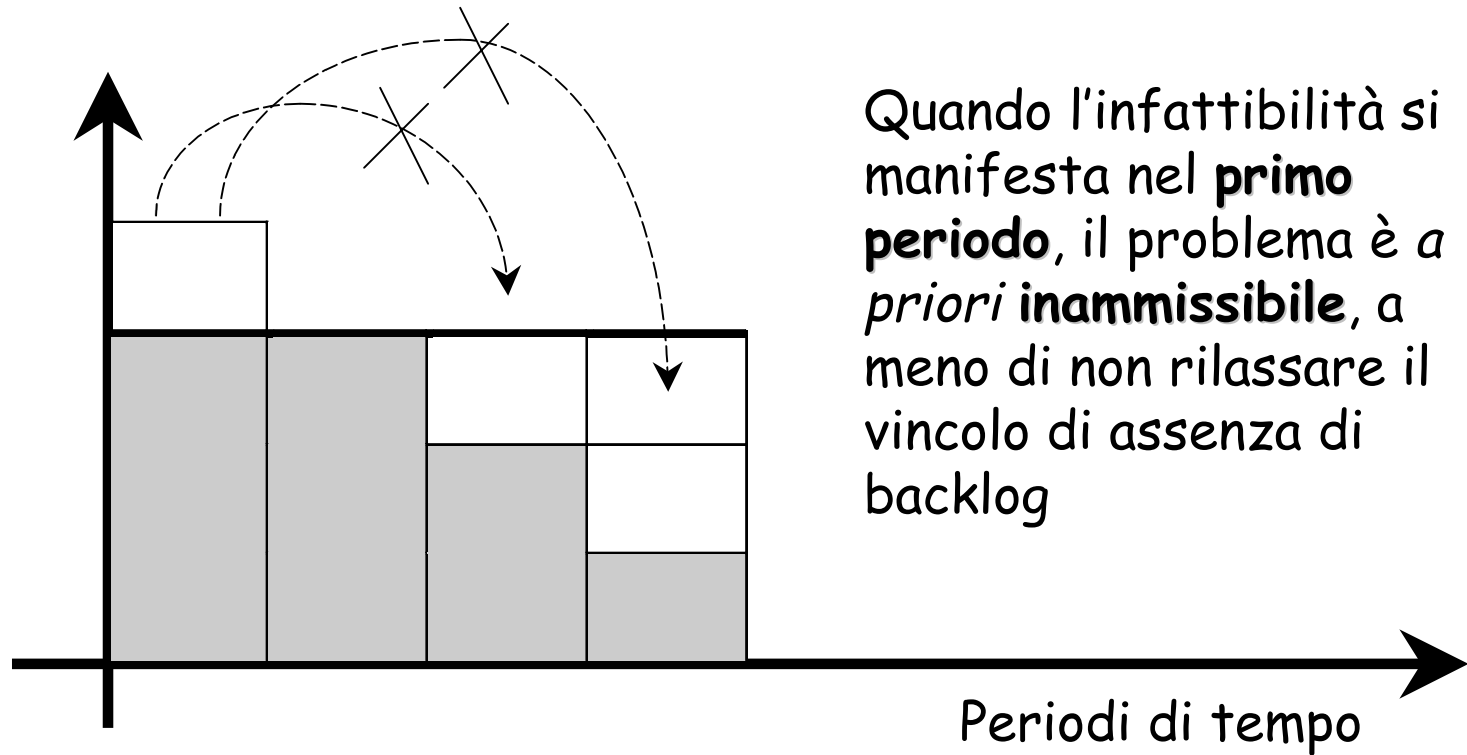
# Il modello di Karni-Roll

- Il concetto di shift:



# Il modello di Karni-Roll

- Nota bene:



# Il modello di Karni-Roll

- **Caratteristiche degli shift:**
  - dimensione, ossia la quantità che deve essere spostata
  - direzione, ossia il numero di periodi (a destra o a sinistra) di cui si effettua lo spostamento
- **Obiettivi degli shift:**
  - eliminazione dell'infattibilità al minimo costo
  - riduzione del costo complessivo del piano ...
    - costo totale di setup e costo totale di mantenimento a scorta
  - ... attraverso modifiche della matrice del piano

# Il modello di Karni-Roll

- Regole degli shift:
  - spostare la minor quantità possibile per eliminare le infattibilità
  - spostare la maggior quantità possibile per ridurre il costo di mantenimento
  - spostare tutta la quantità possibile per:
    - eliminare un setup
    - ridurre il costo di mantenimento senza generare nuovi setup
  - spostare a destra (posticipare) la maggior quantità possibile senza generare infattibilità
  - spostare a sinistra (anticipare) la minor quantità possibile senza generare infattibilità

# Il modello di Karni-Roll

- L'effetto di ciascuno shift si valuta in termini di riduzione del costo del piano (ridC) e sovrapponendo gli effetti.
- In simboli, considerando il singolo shift ...
  - quindi riferendosi ad un assegnato prodotto, oggetto dello shift (per il quale si è omissso l'indice):

$$\text{ridC} = \text{Mant}(i) \cdot \text{QuantShift} \cdot (\tau - t) + k \cdot a(i)$$

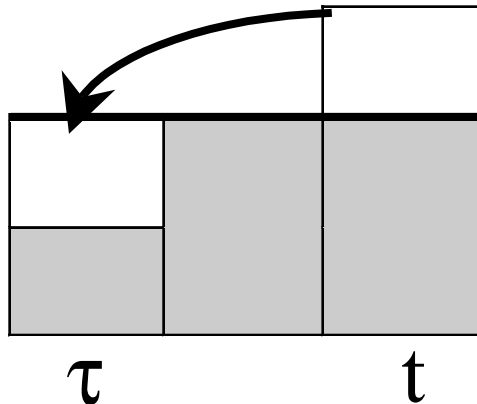


# Il modello di Karni-Roll

quantità spostata (pezzi o  
frazione della capacità)

Moltiplicatore di creazione  
o eliminazione di un setup  
 $k \in \{-1;0;+1\}$

$$\text{ridC} = \text{Mant}(i) \cdot \text{QuantShift} \cdot (\tau - t) + k \cdot a(i)$$



periodo “di partenza”  
della quantità spostata

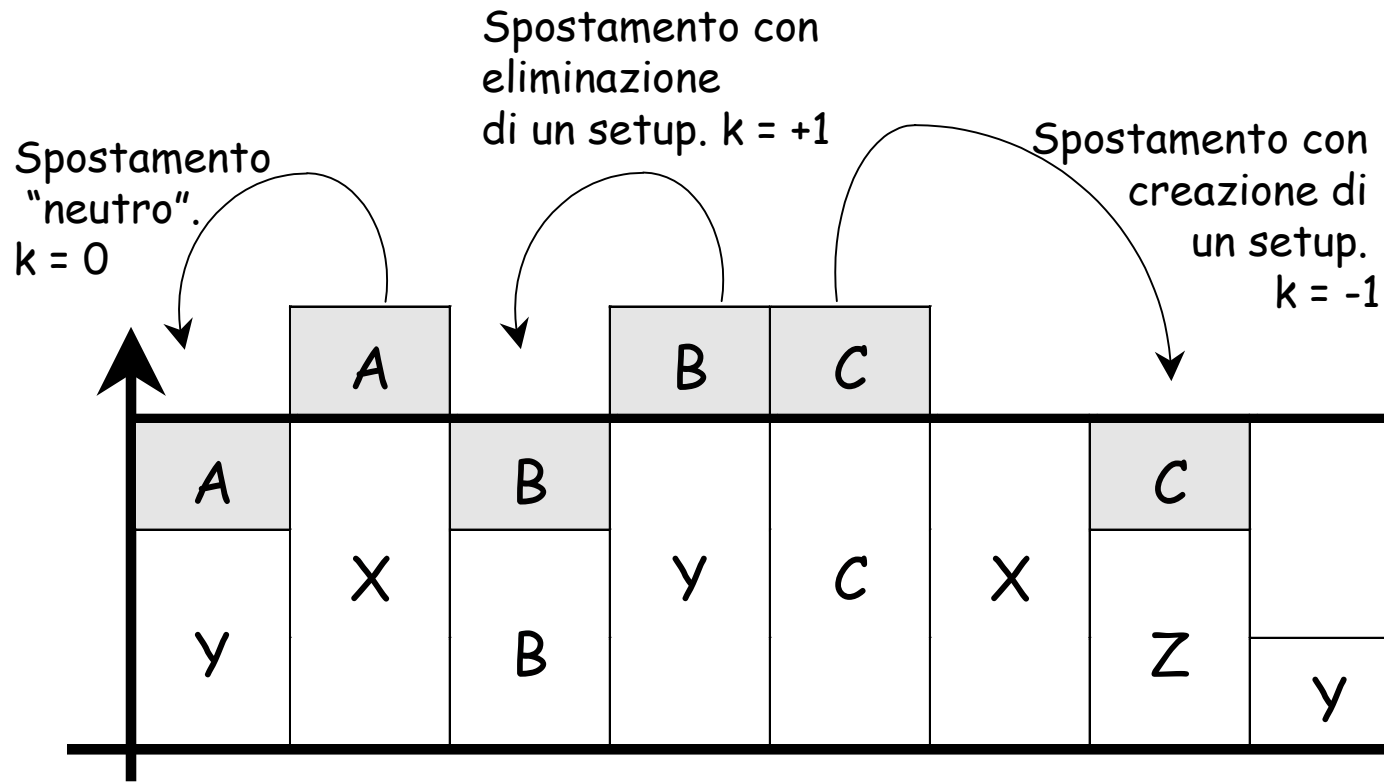
periodo “di destinazione”  
della quantità spostata

# Il modello di Karni-Roll

- Osservazioni:
  - $ridC$  rappresenta la diminuzione del costo totale del piano dovuta allo shift ...
    - quindi per esempio, quando si sposta a sinistra (indietro nel tempo; cioè  $t > \tau$ ), il costo di mantenimento aumenta e dunque  $ridC$  è positivo
  - il moltiplicatore  $k$  può assumere tre valori:
    - -1 quando si “crea” un setup, per esempio spostando parte di un lotto e nel periodo destinazione c’è un altro prodotto
    - 1 quando si “elimina” un setup, per esempio spostando un lotto intero e nel periodo destinazione c’è lo stesso prodotto
    - 0 in caso “neutro”

# Il modello di Karni-Roll

- Esempi:

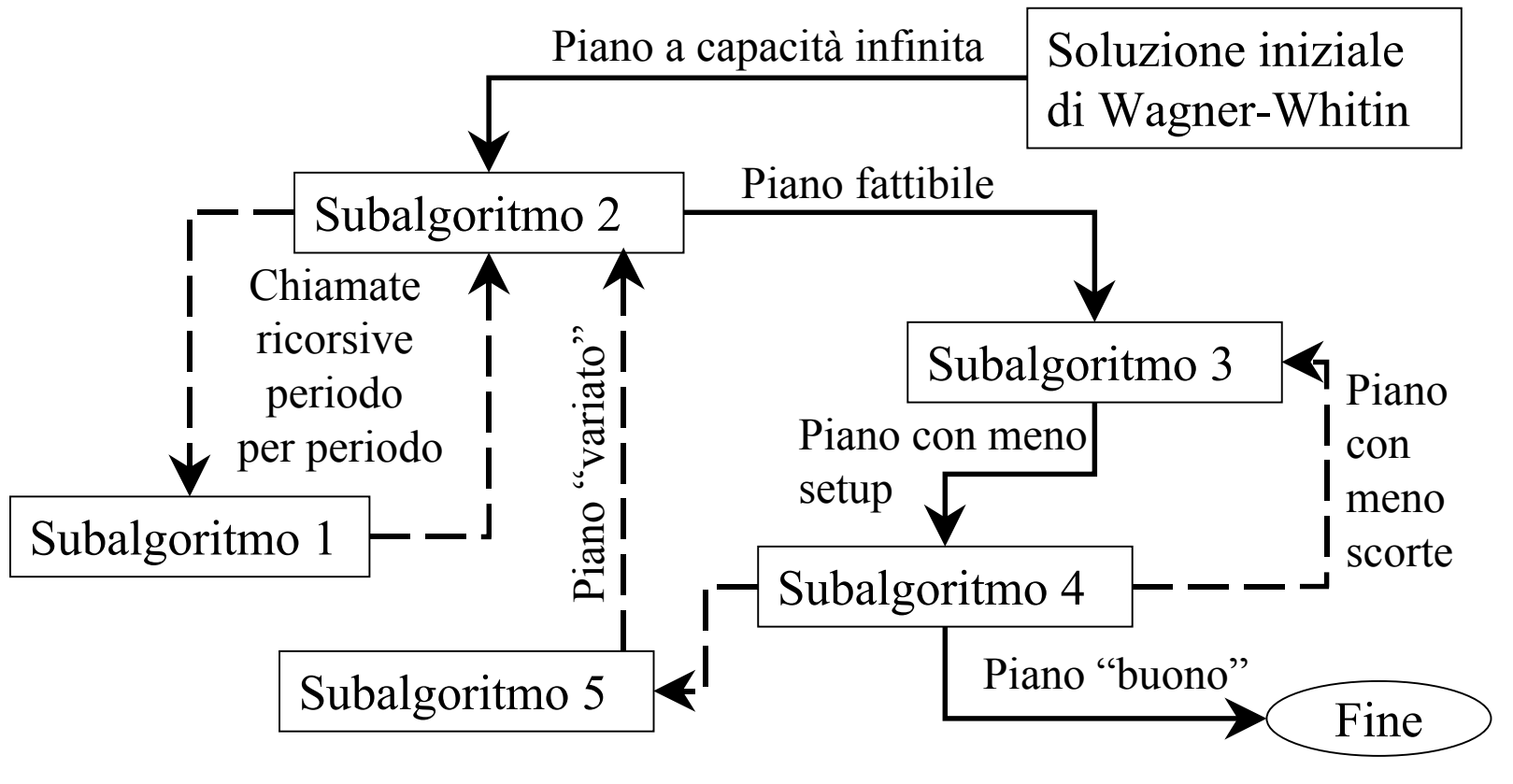


# Il modello di Karni-Roll

- Gli shift contenuti in 5 subalgoritmi:
  - subalgoritmo 1: elimina tutte le infattibilità tra il periodo 1 e un periodo  $\tau$  qualsiasi ( $\tau > 1$ )
  - subalgoritmo 2: elimina tutte le infattibilità di una data soluzione (applicando ricorsivamente il subalgoritmo 1)
  - subalgoritmo 3: riduce i costi di setup con shift verso sinistra (accorpando i lotti)
  - subalgoritmo 4: riduce i costi di mantenimento con shift verso destra (pianificando “al più tardi”)
    - dopo ogni shift richiama il subalgoritmo 3
  - subalgoritmo 5: perturba la soluzione

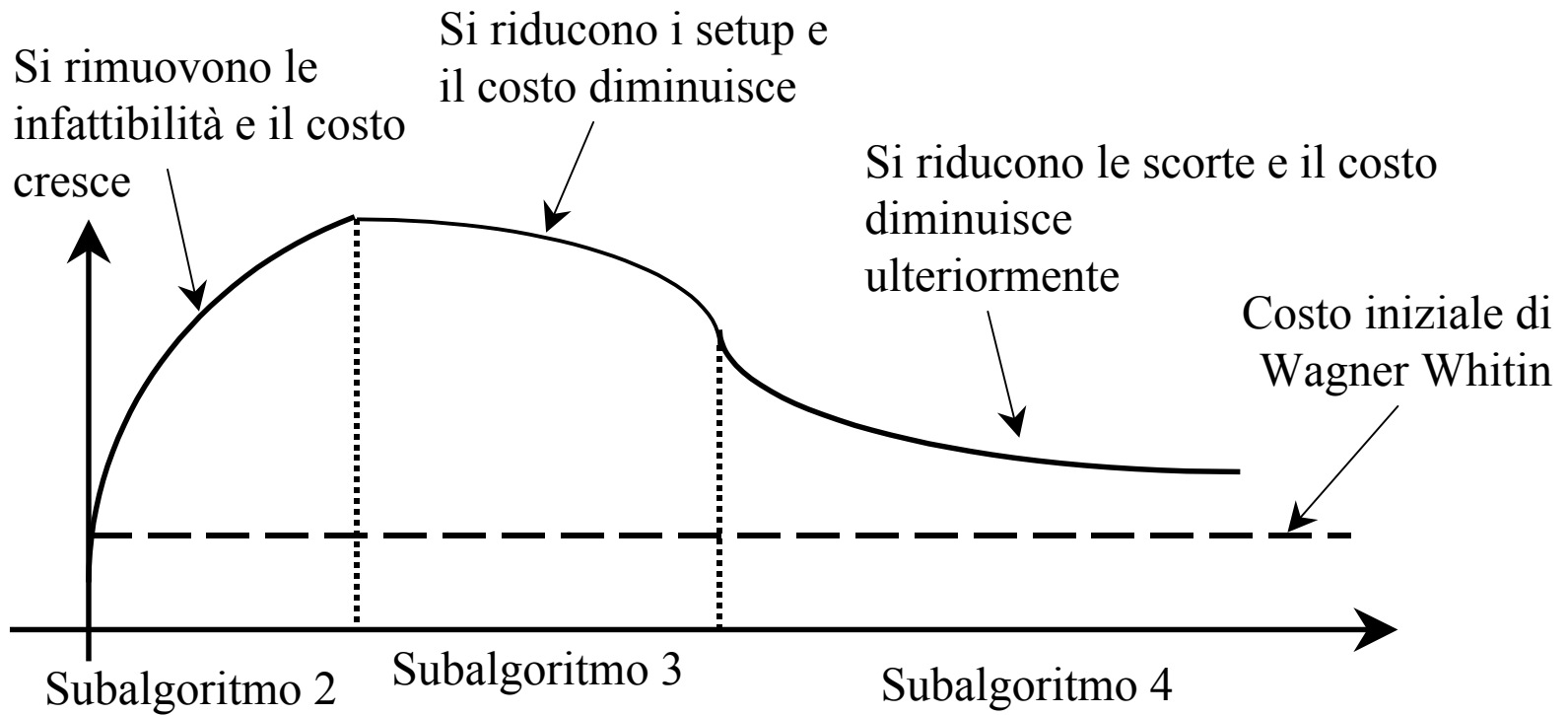
# Il modello di Karni-Roll

- Il flusso ...



# Il modello di Karni-Roll

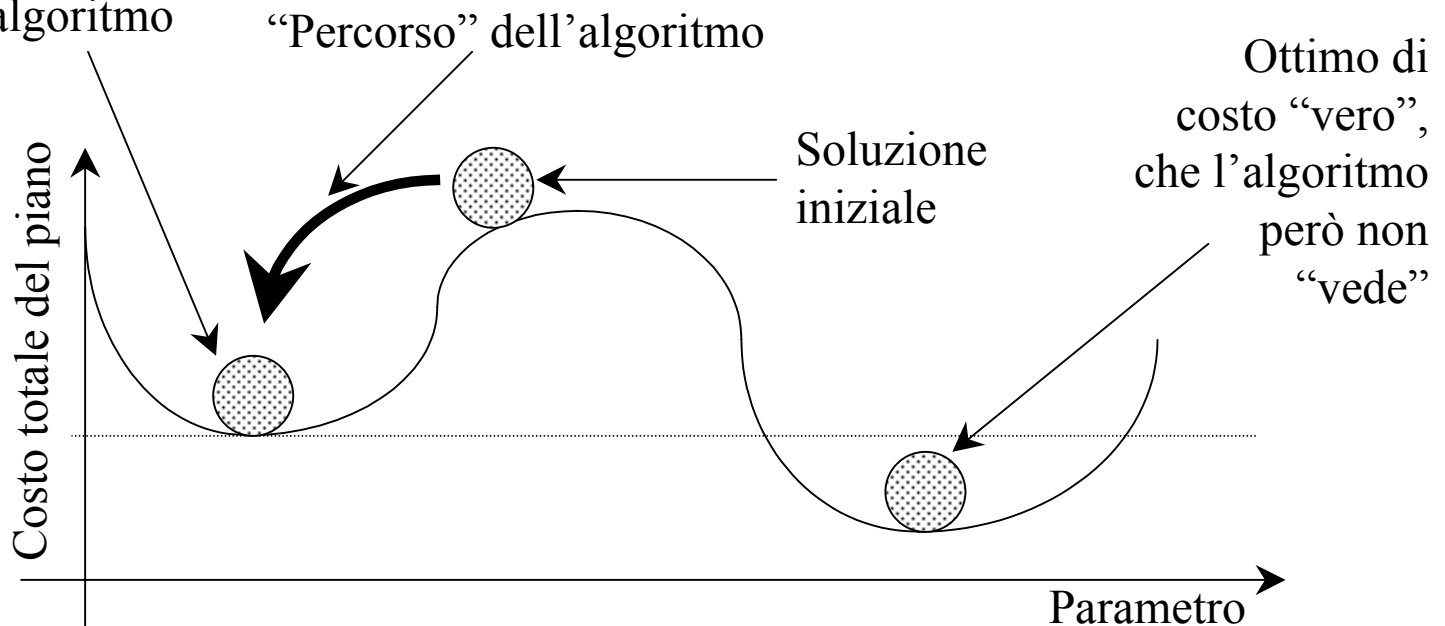
- Andamento “tipico” del costo totale al procedere dell’algoritmo



# Il modello di Karni-Roll

- Il subalgoritmo 5 serve a ridurre il rischio di porsi in minimi locali

Soluzione trovata dall'algorithm



# Il modello di Karni-Roll

- Vantaggi e svantaggi del modello:
  - è assai più efficiente del modello di PL intera
    - la funzione obiettivo peggiora di circa l'1% a fronte di una riduzione del tempo di elaborazione di circa 140 volte
  - l'elaborazione è comunque piuttosto complessa
    - vi sono molti subalgoritmi che “ricircolano”
    - il tempo di elaborazione resta comunque piuttosto “lungo”
  - comunque non si tengono in considerazione i tempi di setup
    - una soluzione potrebbe risultare ulteriormente infattibile una volta introdotti il trade-off tra produzione e setup



# Il modello di Karni-Roll

- Vantaggi e svantaggi del modello:
  - le prestazioni sono molto influenzate dallo shift factor (SF),
    - ossia dal rapporto tra il costo di setup e il costo di mantenimento:

$$SF = \frac{SU}{Mant}$$

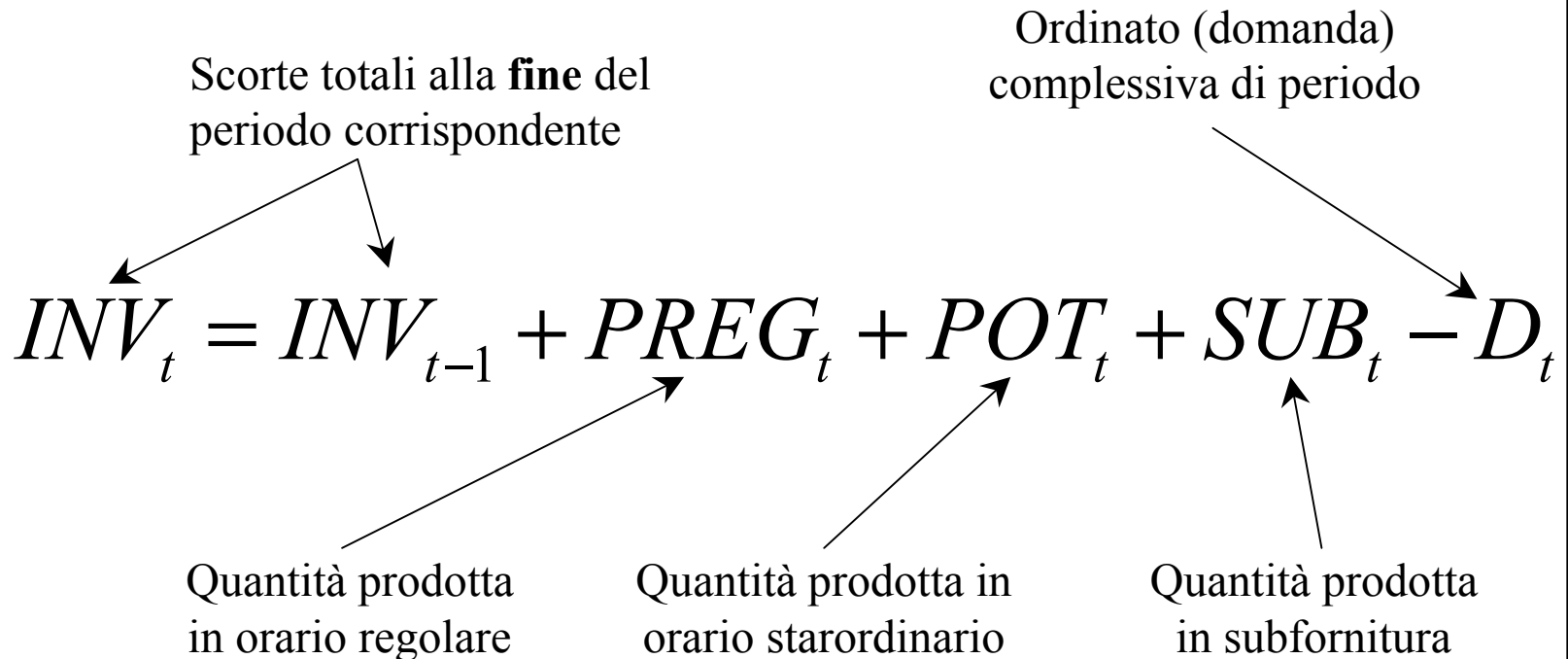
- Per shift factor **bassi**
  - il costo di mantenimento è prevalente su quello di setup
- la soluzione di partenza di Wagner Whitin è poco significativa
  - banalmente si colloca la produzione nel periodo in cui si manifesta la domanda
- Per shift factor alti, le prestazioni del modello risultano complessivamente “scarse”
  - una volta introdotti i setup (che non sono considerati nel modello) il vincolo di capacità potrebbe risultare comunque violato

# Il modello di Aucamp

- Ipotesi
  - Multiprodotto
  - Domanda di forma qualsiasi
  - Domanda nota deterministicamente
  - Ci sono limiti di capacità produttiva
  - Considerati straordinari e subfornitura
  - Setup da considerare come tempi
  - Non è ammesso backlog
  - Euristico

# Il modello di Aucamp

- Bilancio dei materiali:



# Il modello di Aucamp

- Bilancio della manodopera:

Addetti disponibili durante  
il periodo corrispondente

$$WORKERS_t = WORKERS_{t-1} + HIRE_t - FIRE_t$$

Numero di nuovi assunti  
all'inizio del periodo

Numero di addetti che  
lasciano il servizio

# Il modello di Aucamp

- Legame produzione - tempo:

$$MHPREG_t = TIME \cdot PREG_t$$

Ore uomo dedicate  
alla produzione in  
orario regolare

Tempo standard di  
lavorazione unitario (h/pz)

$$MHPOT_t = TIME \cdot POT_t$$

Ore uomo dedicate alla produzione  
in orario straordinario

*Nota bene:  
MHPREG e MHPOT  
non includono  
(ovviamente) i tempi  
di setup*

# Il modello di Aucamp

- Vincoli aggiuntivi sui setup:

$$MHPREG_t + SUREG_t \leq HOURS_t \cdot WORKERS_t$$

Ore totali disponibili **in orario regolare** per operatore

Ore uomo dedicate alla **produzione** in orario regolare

Ore uomo dedicate al **setup** in orario regolare

# Il modello di Aucamp

- Vincoli aggiuntivi sui setup:

Rapporto di straordinario della manodopera (al più 0,3)

Ore totali disponibili **in orario regolare** per operatore

$$MHPOT_t + SUOT_t \leq f_t \cdot HOURS_t \cdot WORKERS_t$$

Ore uomo dedicate alla produzione in orario **straordinario**

Ore uomo dedicate al setup in orario **straordinario**

# Il modello di Aucamp

- La funzione obiettivo
  - consiste nella minimizzazione dei costi totali attualizzati relativi a tutto l'orizzonte di pianificazione

$$\min(Z) = \sum_{t=1}^T \frac{\text{COST}_t}{(1+i)^t}$$



# Il modello di Aucamp

- La funzione di costo:

Costo di assunzione e addestramento  
di ogni nuovo addetto

Costo di licenziamento  
di ogni nuovo addetto

$$COST_t = C_{HIRE} \cdot HIRE_t + C_{FIRE} \cdot FIRE_t + C_{SUB} \cdot SUB_t + WAGES_t + C_{MAT} (PREG_t + POT_t)$$

Costo unitario  
di subfornitura

Salario della  
manodopera  
impegnata

Costo unitario **variabile**  
diretto (materiali,  
energia ecc.)

# Il modello di Aucamp

- Il costo della manodopera (WAGES):

$$\begin{aligned}
 WAGES_t = & C_{REG} \cdot HOURS_t \cdot WORKERS_t + \\
 & + C_{OT} \underbrace{(MHPOT_t + SUOT_t)}
 \end{aligned}$$

Costo orario per addetto in orario regolare

Costo per ogni ora di straordinario lavorata

Ore dedicate alla produzione e al setup in orario straordinario

# Il modello di Aucamp

- Osservazioni sul costo della manodopera:
  - la manodopera è considerata come un a risorsa molto rigida in orario regolare
  - in straordinario, il costo della manodopera è invece proporzionale alle ore effettivamente lavorate
  - i costi della manodopera nei due orari sono differenziati
    - si può considerare indirettamente la perdita di efficienza in straordinario ecc.

# Il modello di Aucamp

- Osservazioni generali sul modello:
  - il setup è considerato NON attraverso un costo esplicito, ma come sottrazione di capacità
    - i vincoli aggiuntivi impongono che le ore totali disponibili siano assegnate o alla produzione o al setup
  - il costo di mantenimento NON è una voce esplicita, ma è tradotto dal tasso barriera
    - in questo modo si considerano anche i costi accessori di mantenimento (obsolescenza ecc.)
- Fino a questo punto la struttura del modello è rigorosamente di PL ...

# Il modello di Aucamp

- Introduciamo ora la dimensione del lotto
  - standard  $Q(i)$ , per ogni prodotto
  - “perturbata”  $Q_t(i)$ ,

$$Q_t(i) = k_t \cdot Q(i)$$

Moltiplicatore del lotto



## Il moltiplicatore del lotto

- è un “vettore” di variabili, una per ogni periodo dell’orizzonte di pianificazione
- deve essere determinato accanto alle tre variabili per periodo (PREG, POT e SUB)
- riflette la politica di *lot sizing* dell’azienda

# Il modello di Aucamp

- Equazione di bilanciamento addizionale di lot sizing: si impone che la giacenza media (MINV) effettivamente sia superiore alla somma delle scorte di sicurezza e della metà del lotto

$$MINV_t \geq \sum_i \left( SS_i + \frac{1}{2} Q_t(i) \right)$$

$$MINV_t = \frac{1}{2} (INV_t + INV_{t-1})$$

# Il modello di Aucamp

- Vincoli ulteriori sulle ore di setup:

$$SUREG_t = \frac{SUTPU \cdot PREG_t}{k_t}$$

Ore uomo totali  
dedicate ai setup in  
orario **regolare**

Tempo medio di setup per unità  
di prodotto (è un **termine noto**  
calcolato sul lotto standard)

Ore uomo totali  
dedicate ai setup in  
orario **straordinario**

$$SUOT_t = \frac{SUTPU \cdot POT_t}{k_t}$$

# Il modello di Aucamp

- Il termine SUTPU (set-up per unit) si può **stimare** come:

$$SUTPU = \frac{\sum_{i,t} SUT(i) \cdot \frac{D_t(i)}{Q(i)}}{\sum_{i,t} D_t(i)}$$

Tempo standard unitario di setup (dato tecnico)

Numero totale di lotti lanciati

Ore totali di setup

Domanda totale (ovvero produzione totale)



# Il modello di Aucamp

- Estensioni del modello:

- si può considerare la possibilità di effettuare consegne differite nel tempo (backlog, bakorder):

- il bilancio dei materiali diventa:

$$INV_t - BO_t = INV_{t-1} + PREG_t + POT_t + SUB_t - D_t - BO_{t-1}$$

- parallelamente si modifica anche la funzione di costo:

$$COST_t = C_{HIRE} \cdot HIRE_t + \dots + C_{MAT} (PREG_t + POT_t) + C_{Bo} \cdot BO_t$$

# Il modello di Aucamp

- Estensioni del modello:
  - si può introdurre una limitazione alla giacenza
    - per esempio per considerare la limitata potenzialità ricettiva dei magazzini

$$INV_t \leq MAXINV$$

- si può introdurre una subfornitura differenziata per tener conto che alcuni terzisti hanno costi inferiori a altri, ma limiti di capacità

$$C_{SUB-1} < C_{SUB-2}$$

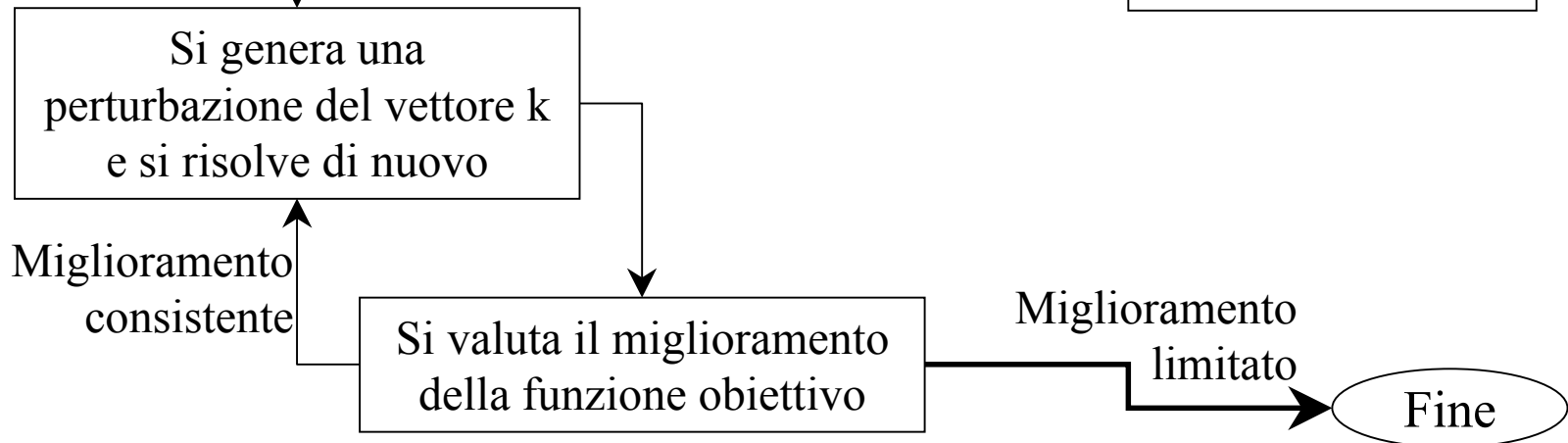
$$SUB-1_t \leq MAXSUB$$

$$C_{SUB-1} \cdot SUB_1 + C_{SUB-2} \cdot SUB_2$$

# Il modello di Aucamp

- Funzionamento della procedura:
  - il modello è strutturalmente di PL, a meno dei termini di perturbazione del lotto ( $k$ ), quindi:

Soluzione iniziale  
di PL con  $k=1$  per  
tutti i prodotti



# Il modello di Aucamp

- Considerazioni conclusive
  - la particolarità del modello risiede nella gestione del setup
    - come riduzione della capacità in termini quantitativi
    - come costo di mancata produzione implicito in termini di funzione obiettivo
  - tuttavia:
    - i costi “vivi” di setup non sono rappresentati
    - il tempo di setup è comunque indipendente dalla sequenza
    - il costo di mantenimento a scorta è solo costo opportunità