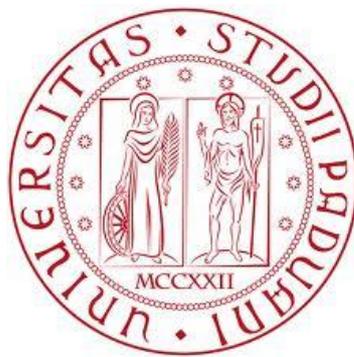


Università degli studi di Padova

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di tecnica e gestione dei sistemi industriali

Tesi di Laurea in Ingegneria Gestionale



PRODUZIONE SU MACCHINE PARALLELE NON CORRELATE. ALGORITMI ESATTI PER LA MINIMIZZAZIONE DEI TEMPI CON COSTO MASSIMO DI PRODUZIONE

Relatore: prof Giorgio Romanin-Jacur

Laureando: Davide Zanetti

Matricola: 618165-IG

ANNO ACCADEMICO 2011/2012

INDICE

1. Introduzione	3
2. Dati del problema	4
2.1. Dati relativi alle macchine	4
2.2. Dati relativi agli articoli	4
2.3. Dati relativi al set-up	5
3. Modello ed Obiettivo del problema	6
3.1. Modello del problema	6
3.2. Obiettivo del problema	6
4. Variabili del problema	7
4.1. Variabili binarie	7
4.2. Variabili non negative	8
5. Equazioni del problema	9
6. Programma Gams	11
7. Risultati	15
8. Conclusioni	17
9. Bibliografia	18
10. Allegati	19
10.1. Esempio di SOLVE SUMMARY	19
10.2. Risultati con 10 articoli e dati ravvicinati	19
10.3. Risultati con 10 articoli e dati distanti	20
10.4. Risultati con 10 articoli e costo max aumentato	21
10.5. Risultati con 10 articoli e costo max diminuito	22
10.6. Risultati con 11 articoli e dati ravvicinati	23
10.7. Risultati con 11 articoli e dati distanti	24
10.8. Risultati con 11 articoli e costo max aumentato	25
10.9. Risultati con 11 articoli e costo max diminuito	26
10.10. Risultati con 12 articoli e dati ravvicinati	27
10.11. Risultati con 12 articoli e dati distanti	28
10.12. Risultati con 12 articoli e costo max aumentato	29
10.13. Risultati con 12 articoli e costo max diminuito	30

CAPITOLO 1

Introduzione

Al giorno d'oggi l'inasprimento della concorrenza a livello globale rende sempre maggiore la necessità delle imprese di ottimizzare l'uso delle risorse aziendali al fine di massimizzare i profitti ed essere competitive nel mercato. Grazie ad un buon piano di lavoro è possibile, infatti, ridurre il tempo di lavorazione e, di conseguenza, i costi di produzione. Viene affrontato questo problema nell'elaborato: la schedulazione di più lavori su macchine parallele non correlate (macchine che hanno tempi di processo varianti in modo del tutto arbitrario a seconda dell'articolo prodotto). In altre parole si vuole individuare una sequenza di lavoro sulle singole risorse aziendali al fine di minimizzare il tempo di lavorazione di un insieme di determinati articoli dato un costo massimo di produzione. Il problema affrontato è un problema di allocazione di risorse con delle differenze rispetto a quelli considerati usualmente. Vi sono presenti, infatti, vincoli dovuti alle finestre di tempo, numeri variabili di articoli e di macchine, tempi e costi di set-up dipendenti dai 2 articoli e dalla macchina.

Nell'elaborato ho sviluppato io stesso degli algoritmi in grado di calcolare la sequenza di produzione e fornire un dettagliato piano di lavoro.

Questi permettono di calcolare l'istante in cui la lavorazione di un articolo deve iniziare ed individuano la macchina, tra quelle disponibili, che dovrà eseguirne la lavorazione. Rispettando tali indicazioni sarà possibile minimizzare il tempo per concludere il progetto, non superando il costo massimo di produzione fissato.

Nell'elaborato ho considerato i seguenti elementi che caratterizzano il problema affrontato:

- m macchine parallele non correlate, rappresentate con un cerchio
- n articoli da produrre, rappresentati con un rettangolo
- relativi tempi e costi di set-up e di produzione
- costo massimo di produzione

Successivamente questi algoritmi sono stati implementati nel linguaggio di programmazione gams e testati su delle istanze di prova.

Da tali test si sono potute valutare anche le prestazioni che gli algoritmi sviluppati garantiscono.

CAPITOLO 2

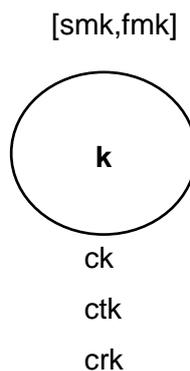
Dati del Problema

2.1 Dati relativi alle macchine

Ogni macchina k ha una propria finestra di lavoro $[smk, fmk]$ da rispettare, cioè il momento in cui può essere avviata e il momento entro il quale deve essere spenta. Vi è inoltre un dato costo di accensione ck , che potrebbe essere, per esempio, il costo di un operaio addetto al controllo della macchina.

La macchina, inoltre, ha un proprio costo orario (ctk), che si applicherà al tempo totale in cui la macchina sarà accesa, e un certo costo sull'eventuale ritardo d'accensione (crk).

Possiamo riassumere i dati come segue:



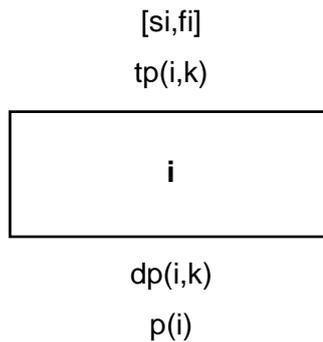
2.2 Dati relativi agli articoli

Ogni articolo i , che presenta una quantità positiva $p(i)$ da produrre, deve essere processato interamente da un'unica macchina k .

Tempo di lavorazione per articolo in min/pz (tp) e costo di lavorazione per articolo in €/pz (dp) sono noti per ogni coppia macchina-articolo.

Ogni articolo, inoltre, ha una propria finestra di lavorazione (si, fi), cioè il momento in cui si può iniziare la produzione e il momento entro il quale deve essere terminata.

Possiamo riassumere i dati come segue:



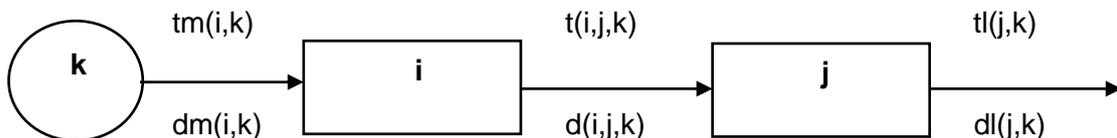
2.3 Dati relativi al set-up

Ogni articolo per essere processato su una macchina ha bisogno di un proprio set-up. Quando si passa dalla produzione di un dato articolo ad un altro, dunque, bisogna reimpostare la macchina in modo che sia configurata correttamente per la produzione del nuovo articolo. Queste operazioni comportano perdita di tempo e, di conseguenza, costi aggiuntivi.

Nel nostro problema tempi e costi di set-up sono dati nei seguenti casi:

- $tm(i, k)$ e $dm(i, k)$: tempo e costo di set-up per ogni coppia articolo-macchina nel caso in cui l'articolo i sia il primo ad essere lavorato dalla macchina k dopo l'accensione.
- $t(i, j, k)$ e $d(i, j, k)$: tempo e costo di set-up per ogni macchina k per passare dalla produzione dell'articolo i alla produzione dell'articolo j .
- $tl(j, k)$ e $dl(j, k)$: tempo e costo per resettare il set-up di j dalla macchina k nel caso in cui l'articolo j sia l'ultimo ad essere lavorato dalla macchina k prima dello spegnimento.

I dati possono essere riassunti come segue:



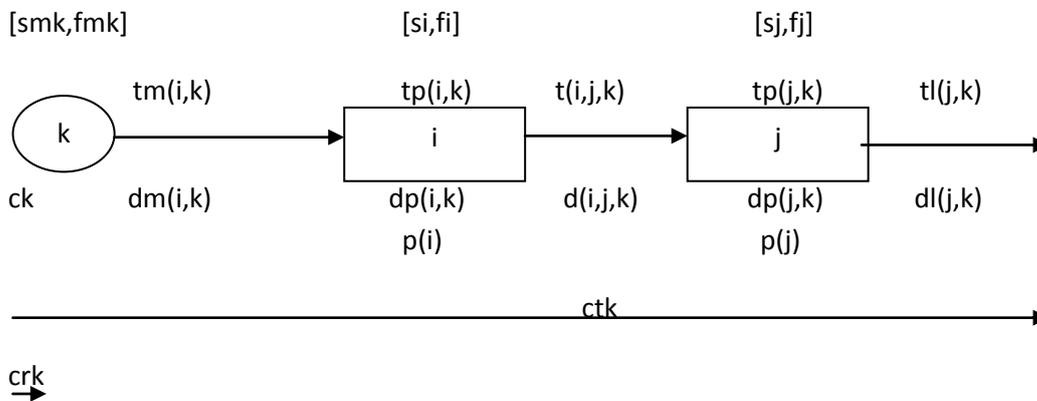
CAPITOLO 3

Modello ed obiettivo del problema

3.1 Modello del problema

Rielaborando i dati di cui al cap.2, possiamo rappresentare il modello del problema qui affrontato come segue:

Per ogni macchina k



3.2 Obiettivo del problema

L'obiettivo del problema qui affrontato è quello di trovare degli algoritmi esatti tali da minimizzare il tempo di produzione totale rispettando anche il vincolo di un costo massimo di produzione dato. Un altro caso potrebbe essere quello di minimizzare il costo totale di produzione fermo restando i dati di cui al cap. 2.

Con il modello adottato l'obiettivo del problema si può dunque riassumere come segue:

MINIMIZZARE

$\sum_k \{ \text{tempi totali di set-up} + \text{tempi totali di produzione} + \text{ritardo d'accensione} \}$

k

con costo totale di produzione \leq costumax.

CAPITOLO 4

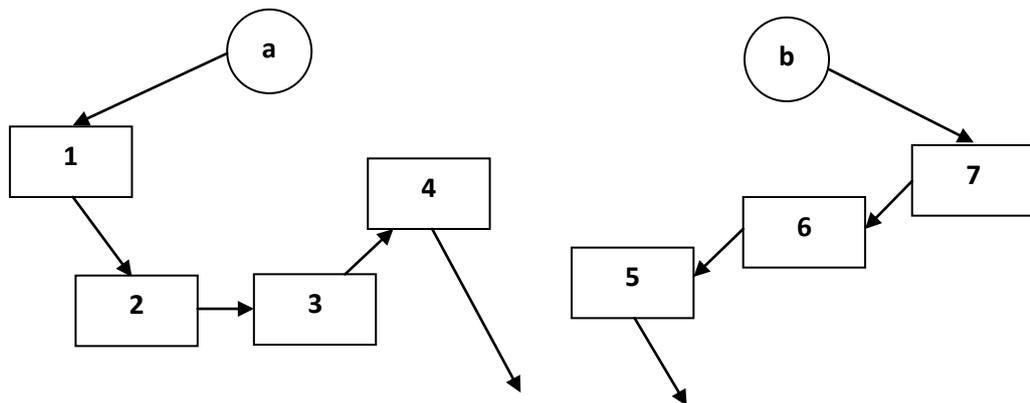
Variabili del problema

4.1 Variabili binarie

Nella soluzione del modello presentato, adattato da quello pubblicato da Dondo e Cerdà nell' European Journal of Operational Research (EJOR 2007, pp. 4-7), ripreso da Giorgio Romanin-Jacur e Carlo Filippi (Fresh Bovine Skin Transportation from Slaughters to Tannery with special time windows and capacity constraints, Euro 2012, Vilnius, p.3) in riferimento al trasporto di pellame, ho considerato le seguenti variabili binarie:

- $y_m(k)$, $y(i,k) = 1$ se, rispettivamente, la macchina k viene accesa e produce l'articolo i ;
- $y_m(k)$, $y(i,k) = 0$ altrimenti;
- $x(i,j) = 1$ se l'articolo i precede l'articolo j nella produzione, con $i < j$;
- $x(i,j) = 0$ se l'articolo j precede l'articolo i nella produzione, con $i < j$;
- $x(i,j)$ senza significato altrimenti;

In riferimento ad x e ad y , per esempio:



$$y(a) = y(b) = 1;$$

$$y(1,a) = y(2,a) = y(3,a) = y(4,a) = 1;$$

$$y(5,a) = y(6,a) = y(7,a) = 0;$$

$$y(5,b) = y(6,b) = y(7,b) = 1;$$

$$y(1,b) = y(2,b) = y(3,b) = y(4,b) = 0;$$

$$x(1,2) = x(1,3) = x(1,4) = x(2,3) = x(2,4) = x(3,4) = 1;$$

$$x(5,6) = x(5,7) = x(6,7) = 0;$$

In alternativa, come citato anche da Dondo e Cerdà, si potrebbero usare le seguenti variabili binarie:

- $x_m(i,k)$, $x(i,j,k)$, $x_l(j,k)$, $x_{ml}(k) = 1$ se, rispettivamente, la macchina k viene accesa e produce l'articolo i , se dall'articolo i passa all'articolo j , se dopo la produzione dell'articolo j viene spenta o se non viene accesa;
- $x_m(i,k)$, $x(i,j,k)$, $x_l(j,k)$, $x_{ml}(k) = 0$ altrimenti;

Si sconsiglia però l'uso di quest'ultima possibilità perché, oltre che a comportare un numero maggiore di variabili, opera correttamente solamente con piccole dimensioni (nel caso di Dondo e Cerdà con 8 macelli e 2 camion, contro i 13 macelli e 3 camion della prima possibilità).

4.2 Variabili non negative

Il modello utilizzato considera, inoltre, le seguenti variabili non negative:

- $z_m(k)$ e $z_l(k)$ rispettivamente tempo d'avvio della macchina k e fine della produzione (spegnimento di k);
- $z(i)$ tempo fine produzione articolo i ;
- $cost(i)$ costo di produzione totale alla fine della lavorazione dell'articolo i ;
- $cost_l(k)$ costo totale di produzione della macchina k ;

CAPITOLO 5

Equazioni del problema

Per risolvere il problema si sono usate delle equazioni tali da riuscire a descrivere i vincoli in maniera corretta e tali da far “capire” al calcolatore il significato delle variabili x ed y .

Qui di seguito sono elencate e spiegate tutte le equazioni scritte nel programma Gams usato per la risoluzione del problema.

- $\text{MIN } \sum (z_l(k) \mid k = 1, m)$ con costo totale di produzione $\leq \text{costomax}$
questa equazione è l'obiettivo del problema, descritto anche nel cap. 3.
- $\sum (((f_m(k) - s_m(k) - t_m(i, k) - t_l(i, k)) / t_p(i, k)) * y(i, k) \mid k = 1, m) \geq p(i)$
per ogni i
in quest'equazione dico che la quantità di articoli i prodotti non deve essere maggiore della quantità di articoli i che la macchina k riuscirebbe a produrre se nel tempo a sua disposizione producesse solo quell'articolo
- $\sum (y(i, k) \mid k = 1, m) \leq 1$ per ogni i
quest'equazione esprime il fatto che ciascun articolo i deve essere prodotto da un'unica macchina k
- $\sum (p(i) * t_p(i, k) * y(i, k) \mid i = 1, n) \leq (f_m(k) - s_m(k)) * y_m(k)$ per ogni k
in questa equazione dico, invece, che il tempo totale di lavorazione della macchina k non deve superare il tempo che ha a disposizione
- $z(i) \geq z_m(k) + (t_m(i, k) + t_p(i, k) * p(i)) * (y_m(k) + y(i, k) - 1)$ per ogni i
- $z(j) \geq z(i) + t_p(j, k) * p(j) + t(i, j, k) - M * (1 - x(i, j)) - M * (2 - y(i, k) - y(j, k))$ per ogni $i < j$
- $z(i) \geq z(j) + t_p(i, k) * p(i) + t(j, i, k) - M * x(i, j) - M * (2 - y(i, k) - y(j, k))$ per ogni $i < j$
queste ultime tre equazioni sono, in pratica, la definizione di $z(i)$ e $z(j)$
- $z_l(k) \geq z(i) + t_l(i, k) - M * (1 - y(i, k))$ per ogni k
questa è la definizione di z_l
- $z_m(k) \geq s_m(k)$ per ogni k
- $z_m(k) \leq f_m(k)$ per ogni k
queste ultime due equazioni dicono che la macchina k deve essere accesa all'interno dell'intervallo di tempo a sua disposizione
- $z(i) \geq s(i) + t_p(i, k) * p(i) - M * (1 - y(i, k))$ per ogni i, k
- $z(i) \leq f(i) + M * (1 - y(i, k))$ per ogni i, k

queste due equazioni dicono che il tempo di fine lavorazione di i deve essere compreso tra il momento in cui si può iniziarne la lavorazione più il suo tempo di produzione e il momento entro il quale deve essere ultimata la lavorazione dell'articolo

- $z_l(k) \geq sm(k)$ per ogni k
- $z_l(k) \leq fm(k)$ per ogni k

queste due equazioni, invece, dicono che il tempo di spegnimento della macchina k deve essere all'interno della sua finestra di spegnimento

- $cost(i) \geq (c(k)+dm(i,k)+dp(i,k)*p(i))*(ym(k)+y(i,k)-1)$ per ogni i,k
- $cost(j) \geq cost(i)+d(i,j,k)+dp(j,k)*p(j)-M*(1-x(i,j))-M*(2-y(i,k)-y(j,k))$ per ogni $i < j$, per ogni k
- $cost(i) \geq cost(j)+d(j,i,k)+dp(i,k)*p(i)-M*x(i,j)-M*(2-y(i,k)-y(j,k))$ per ogni $i < j$, per ogni k

queste tre ultime equazioni sono, in pratica, la definizione di cost(i) e cost(j)

- $cost_l(k) \geq cost(i)+dl(i,k)+ct(k)*(z_l(k)-zm(k))+cr(k)*(zm(k)-sm(k))-M*(2-y(i,k)-ym(k))$ per ogni i,k

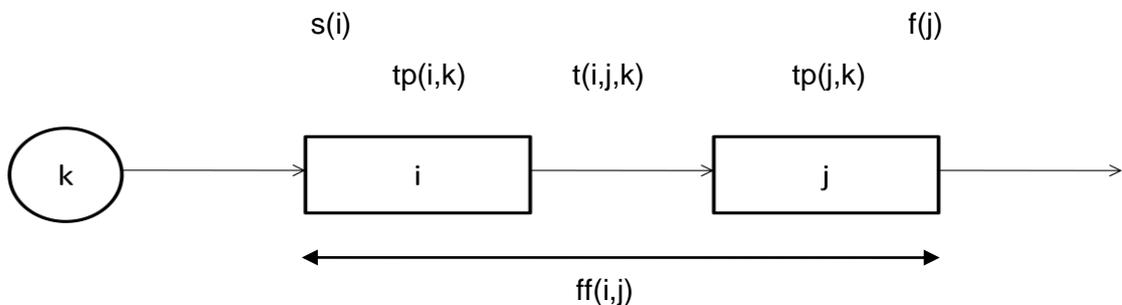
questa è la definizione di cost_l(k)

- $\sum (cost_l(k) \mid k = 1, m) \leq cost_{max}$

il costo totale di produzione deve essere minore di un costo massimo fissato

- $ff(i,j) \geq f(j)-s(i)$ per ogni i,j
- $y(i,k)+y(j,k)+x(i,j) \leq 2+(ff(i,j))/(tp(i,k)*p(i)+tp(j,k)*p(j)+t(i,j,k))$ per ogni $i < j$, per ogni k
- $y(i,k)+y(j,k)-x(i,j) \leq 1+(ff(j,i))/(tp(i,k)*p(i)+tp(j,k)*p(j)+t(j,i,k))$ per ogni $i < j$, per ogni k

queste ultime tre equazioni, in pratica, affermano che la produzione degli articoli i e j (con j prodotto subito dopo i) deve avvenire all'interno della finestra di tempo $[s(i), f(j)]$. Si possono rappresentare come segue:



M nelle equazioni è un numero sufficientemente grande, tale da rendere negative alcune equazioni nel caso in cui x e y siano = 0.

CAPITOLO 6

Programma gams

In questo capitolo viene riportato il programma scritto nel linguaggio gams usato per la risoluzione del problema:

*prodotti, macchine

SETS $i/i1\ i11/,k/k1\ k3/;$ ALIAS (i,j);

*finestra scarico in magazzino,customax, big M

SCALAR maxcost/3000/,M/5000/;

PARAMETERS

*finestra (start,finish) accensione,spengimento macchinari

sm(k)/k1 10,k2 30,k3 20/,fm(k)/k1 1000,k2 1130,k3 1020/,

*finestra (start) possibile inizio produzione per prodotto

s(i)/i1 120,i2 380,i3 180,i4 450,i5 210,i6 500,i7 880,i8 590,i9 110,i10 720,i11 700/,

*finestra (finish) max fine lavorazione prodotto

f(i)/i1 540,i2 960,i3 490,i4 840,i5 900,i6 1500,i7 1400,i8 1000,i9 710,i10 1060,i11 930/,

*quantita' prodotto

p(i)/i1 25,i2 53,i3 80,i4 30,i5 39,i6 34,i7 42,i8 39,i9 48,i10 62,i11 44/,

*costo di accensione,

c(k)/k1 200,k2 220,k3 180/,

*costo del tempo impiegato e del ritardo per macchina

ct(k)/k1 0.1,k2 0.1,k3 0.1/,cr(k)/k1 0.05,k2 0.05,k3 0.05/;

*tempo di produzione per ogni macch. min/pz

TABLE tp(i,k)

	k1	k2	k3
i1	1	0.8	1.1
i2	0.9	1	1
i3	1.3	1.1	0.9

...

*costo di lavorazione per ogni macch. euro/pz

TABLE dp(i,k)

	k1	k2	k3
i1	2	2	2
i2	3	3	3
i3	3	4	4

...

*tempo "primo" set-up per ogni prodotto su ogni macchina

TABLE tm(i,k)

	k1	k2	k3
i1	125	130	132
i2	137	140	143
i3	151	157	160

...

*costo "primo" set-up per ogni prodotto su ogni macchina

TABLE dm(i,k)

	k1	k2	k3
i1	25	30	27
i2	37	40	38
i3	51	57	53

...

*tempo per togliere set-up di ogni prodotto da ogni macchina

TABLE tl(i,k)

	k1	k2	k3
i1	128	131	133
i2	139	142	144
i3	153	157	160

...

*costo per togliere set-up di ogni prodotto da ogni macchina

TABLE dl(i,k)

	k1	k2	k3
i1	28	31	29
i2	39	42	40
i3	53	57	55

...

*tempo di set-up da ogni prodotto ad ogni altro prodotto per ogni macchina

TABLE t(i,j,k)

	k1	k2	k3
i1.i2	145	147	146
i1.i3	161	166	163
i1.i4	156	159	157

...

*costo di set-up da ogni prodotto ad ogni altro prodotto per ogni macchina

TABLE d(i,j,k)

	k1	k2	k3
i1.i2	45	47	46
i1.i3	61	66	63
i1.i4	56	59	57

...

VARIABLES y(i,k),ym(k),x(i,j); BINARY VARIABLES y,ym,x;

VARIABLES z(i),zm(k),zl(k),costot,cost(i),costl(k),ff(i,j),temptot;

POSITIVE VARIABLES z,zm,zl,cost,costl,ff;

EQUATIONS tempo,vmac1(i),vmac2(i),port(k),

temini(i,k),tem1(i,j,k),tem2(i,j,k),temfin(i,k),

finini1(k),finini2(k),fin1(i,k),fin2(i,k),finl1(k),finl2(k),

cini(i,k),c1(i,j,k),c2(i,j,k),cfin(i,k),costmax,

diff(i,j),imp1(i,j,k),imp2(i,j,k);

tempo..temptot =e=

sum(k,zl(k));

vmac1(i)..sum(k,((fm(k)-sm(k)-tm(i,k)-tl(i,k))/tp(i,k))*y(i,k)) =g= p(i);

vmac2(i)..sum(k,y(i,k)) =l= 1;

port(k)..sum(i,p(i)*tp(i,k)*y(i,k)) =l= (fm(k)-sm(k))*ym(k);

temini(i,k)..z(i) =g= zm(k)+(tm(i,k)+tp(i,k)*p(i))*(ym(k)+y(i,k)-1);

tem1(i,j,k)\$ (ord(i)<ord(j))..z(j) =g= z(i)+tp(j,k)*p(j)+t(i,j,k)-M*(1-x(i,j))-
M*(2-y(i,k)-y(j,k));

tem2(i,j,k)\$ (ord(i)<ord(j))..z(i) =g= z(j)+tp(i,k)*p(i)+t(j,i,k)-M*x(i,j)-
M*(2-y(i,k)-y(j,k));

temfin(i,k)..zl(k) =g= z(i)+tl(i,k)-M*(1-y(i,k));

finini1(k)..zm(k) =g= sm(k);

finini2(k)..zm(k) =l= fm(k);

fin1(i,k)..z(i) =g= s(i)+tp(i,k)*p(i)-M*(1-y(i,k));

```

fin2(i,k)..z(i) =l= f(i)+M*(1-y(i,k));
finl1(k)..zl(k) =g= sm(k);
finl2(k)..zl(k) =l= fm(k);
cini(i,k)..cost(i) =g= (c(k)+dm(i,k)+dp(i,k)*p(i))*(ym(k)+y(i,k)-1);
c1(i,j,k)$ (ord(i)<ord(j))..cost(j) =g= cost(i)+
    d(i,j,k)+dp(j,k)*p(j)-M*(1-x(i,j))-M*(2-y(i,k)-y(j,k));
c2(i,j,k)$ (ord(i)<ord(j))..cost(i) =g= cost(j)+d(j,i,k)+
    dp(i,k)*p(i)-M*x(i,j)-M*(2-y(i,k)-y(j,k));
cfin(i,k)..costl(k) =g= cost(i)+dl(i,k)+ct(k)*(zl(k)-zm(k))+
    cr(k)*(zm(k)-sm(k))-M*(2-y(i,k)-ym(k));
costmax..sum(k,costl(k))=l=maxcost;
diff(i,j)..ff(i,j) =g= f(j)-s(i);
imp1(i,j,k)$ (ord(i)<ord(j))..
    y(i,k)+y(j,k)+x(i,j) =l= 2+(ff(i,j))/(tp(i,k)*p(i)+tp(j,k)*p(j)+t(i,j,k));
imp2(i,j,k)$ (ord(i)<ord(j))..
    y(i,k)+y(j,k)-x(i,j) =l= 1+(ff(j,i))/(tp(i,k)*p(i)+tp(j,k)*p(j)+t(j,i,k));
MODEL prodottitempo/all;/OPTIONS mip=cplex,optcr=0.0;
SOLVE prodottitempo USING mip MINIMIZING temptot;
DISPLAY y.l,ym.l,x.l,z.l,zm.l,zl.l,temptot.l,cost.l,costl.l;

```

CAPITOLO 7

Risultati

Dopo l'implementazione del programma gams sono state effettuate varie prove variando il numero di articoli, variando M, variando i dati ed infine aumentando e diminuendo il vincolo di costo massimo di produzione.

Il modello utilizzato opera correttamente con tre macchine e fino ad un massimo di dodici articoli. Il numero di articoli massimo dipende molto sia dai dati che dal valore di M, infatti con dati molto ravvicinati tra loro e con M grande si riesce a lavorare fino ad undici articoli. Con dati più differenti si riesce a lavorare correttamente anche con dodici articoli e con qualsiasi valore di M, senza sfiorare il limite massimo di risorse predefinito di gams.

Sono state fatte delle prove con M uguale a cinque mila e a cento mila.

Con dati ravvicinati tra loro si sono ottenuti i seguenti risultati:

Numero di iterazioni del calcolatore

Numero articoli	M = 5000	M = 100000
10 art.	18000	51000
11 art.	6400000	500000
12 art.	11900000	11700000

Con dati differenti tra loro si sono ottenuti i seguenti risultati:

Numero di iterazioni del calcolatore

Numero articoli	M = 5000	M = 100000
10 art.	130000	550000
11 art.	42000	350000
12 art.	200000	1800000

Per quanto riguarda i dati ravvicinati tra loro si può notare che, all'aumentare del numero di articoli, aumenta il numero di iterazioni sia nel caso di M uguale a cinque mila che nel caso di M uguale a cento mila. Con i dati usati, nel caso di dodici articoli ed M uguale a cento mila, si supera però il limite di risorse predefinito di gams (aumentando le risorse il calcolatore effettua più di trenta milioni di iterazioni per risolvere il problema).

Per quanto riguarda i dati differenti tra loro, invece, risulta evidente che con M piccolo il calcolatore risolve il problema più velocemente che con M grande. Stranamente con undici articoli il numero di iterazioni è il minore in assoluto.

Un'ulteriore prova è stata quella di aumentare o diminuire il costo massimo di produzione per vedere come cambiava il piano di produzione (utilizzando i dati più differenti tra loro).

Aumentando il costo massimo di produzione si ottiene un vincolo meno restrittivo, perciò gli articoli vengono prodotti dalle macchine che riescono a completarli nel minor tempo possibile, rispettando sempre i vincoli dovuti alle finestre.

Per quanto riguarda il variare del numero di iterazioni al variare di M, si sono ottenuti i seguenti risultati:

Numero di iterazioni del calcolatore

Numero articoli	M = 5000	M = 100000
10 art.	70000	500000
11 art.	14000	200000
12 art.	500000	1000000

Diminuendo il costo massimo, invece, il vincolo diventa più restrittivo perciò il calcolatore deve scegliere delle coppie articolo-macchina che, oltre ad essere abbastanza veloci, siano anche economiche. Ciò lo si può notare leggendo i risultati nel Capitolo 10 "Allegati".

Per quanto riguarda il variare del numero di iterazioni al variare di M, si sono ottenuti i seguenti risultati:

Numero di iterazioni del calcolatore

Numero articoli	M = 5000	M = 100000
10 art.	300000	500000
11 art.	970000	1000000
12 art.	400000	1000000

Con le opzioni reslim e iterlim si potrebbero modificare a proprio piacere i limiti delle risorse di gams, aumentando così il numero di articoli con cui è possibile lavorare. Così facendo, però, aumenta di molto anche il tempo di risoluzione: con tredici articoli, per esempio, il calcolatore impiega più di un'ora per risolvere il problema.

CAPITOLO 8

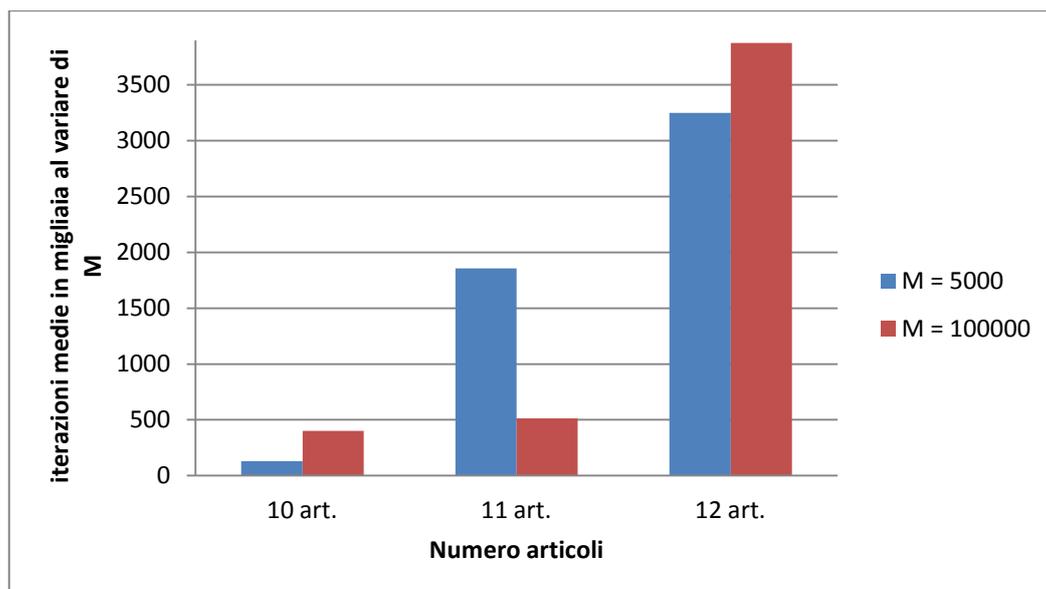
Conclusioni

I test effettuati, ricapitolando, hanno permesso di concludere che l'algoritmo sviluppato è in grado di ottenere soddisfacenti risultati sia per quanto riguarda la minimizzazione dei tempi che per la minimizzazione dei costi.

Con i dati utilizzati, curiosamente, passando da 11 a 12 articoli, il tempo totale di produzione minimizzato non cambia, anche se cambia il piano di produzione.

Per quanto riguarda il variare del numero di iterazioni al variare di M , si è notato che il tempo di elaborazione dei dati non ha un andamento fisso, ma dipende molto dal numero di articoli e dai dati stessi.

Il numero medio di iterazioni (in migliaia) che effettua il calcolatore al variare di M si può notare dal grafico sottostante:



Il numero medio di iterazioni con M uguale a 5000 e con undici articoli è così elevato a causa dell'alto numero di iterazioni effettuate con dati ravvicinati tra loro (6400000). In tutti gli altri casi, però, l'utilizzo di un M piccolo, risulta essere la soluzione più veloce. Nella maggior parte delle prove effettuate, infatti, l'utilizzo di un M piccolo comporta un minor numero di iterazioni e quindi un minor tempo di risoluzione del problema.

CAPITOLO 9

Bibliografia

[1] Dondo e Cerdà, EJOR 2007, pp. 4-7

[2] Giorgio Romanin-Jacur, Carlo Filippi, “Fresh Bovine Skin Transportation from Slaughters to Tannery with special time windows and capacity constraints”, Euro 2012 Vilnius, p.3

[3] Anthony Brook et al., GAMS- A USER' S GUIDE, 1998.

[4] Gams Development Corporation, GAMS-The Solver Manuals, 1999

CAPITOLO 10

Allegati

In questo capitolo sono allegati le informazioni più importanti riportate nei file .lst di gams, ossia le soluzioni dei problemi ed il numero di iterazioni effettuate dal calcolatore.

10.1 Esempio di SOLVE SUMMARY

```
S O L V E           S U M M A R Y

      MODEL   prodottitempo      OBJECTIVE temptot
      TYPE    MIP                DIRECTION MINIMIZE
      SOLVER   CPLEX              FROM LINE  332

**** SOLVER STATUS      1 NORMAL COMPLETION
**** MODEL STATUS      1 OPTIMAL
**** OBJECTIVE VALUE          2125.3000

RESOURCE USAGE, LIMIT      1.440      1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT    18076      10000

GAMS/Cplex   Jun 14, 2002 LNX.CP.CL 20.7 022.024.040.LNX For Cplex 7.5
Using environment variable ILOG_LICENSE_FILE to look for a Cplex license.
Cplex 7.5.0, GAMS Link 22

Proven optimal solution.

MIP Solution:          2125.300000      (18051 iterations, 2907 nodes)
Final LP:              2125.300000      (25 iterations)

Best integer solution possible:          2125.300000
Absolute gap:          0.000000
Relative gap:          0.000000
```

10.2 Risultati con 10 articoli e dati ravvicinati

```
----- 333 VARIABLE y.L

           k1           k2
i1         1.000
i2         1.000         1.000
i3         1.000         1.000
i4         1.000
i5         1.000
i6         1.000         1.000
i7         1.000         1.000
i8         1.000
i9         1.000         1.000
i10        1.000

----- 333 VARIABLE ym.L

k1 1.000,   k2 1.000,   k3 1.000
```

```

---- 333 VARIABLE x.L
      i2      i4      i5      i6      i7      i8      i10
i1    1.000    1.000    1.000    1.000          1.000    1.000
i2          1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i3          1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i4          1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i5          1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i6          1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i7          1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i8          1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i9          1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000

```

```

---- 333 VARIABLE z.L
i1 160.000, i2 753.800, i3 417.200, i4 477.900, i5 324.900, i6
591.800, i7 961.800, i8 630.900
i9 182.200, i10 857.500

```

```

---- 333 VARIABLE zm.L
k1 10.000, k2 30.000, k3 20.000

```

```

---- 333 VARIABLE z1.L
k1 981.500, k2 1123.800, k3 20.000

```

```

333 VARIABLE temptot.L = 2125.300

```

```

---- 333 VARIABLE cost.L
i1 275.000, i2 1141.000, i3 760.000, i4 559.000, i5 441.000, i6
912.000, i7 1279.000, i8 776.000
i9 399.000, i10 1088.000

```

```

---- 333 VARIABLE cost1.L
k1 1211.150, k2 1431.380

```

10.3 Risultati con 10 articoli e dati distanti

```

---- 331 VARIABLE y.L
      k1      k2      k3
i1          1.000
i2          1.000
i3          1.000
i4          1.000
i5          1.000
i6          1.000
i7          1.000
i8          1.000
i9    1.000
i10          1.000

```

```

---- 331 VARIABLE ym.L
k1 1.000, k2 1.000, k3 1.000

```

```

---- 331 VARIABLE x.L
      i4      i5      i6      i7      i8      i10
i1
i2      1.000      1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
i3      1.000      1.000
i4
i5
i6
i7
i8
i9
i10

```

```

---- 331 VARIABLE z.L
i1 205.000, i2 508.000, i3 252.000, i4 705.000, i5 386.500, i6
537.100, i7 926.200, i8 690.900
i9 145.600, i10 877.800

```

```

---- 331 VARIABLE zm.L
k1 10.000, k2 30.000, k3 20.000

```

```

---- 331 VARIABLE z1.L
k1 281.600, k2 1088.200, k3 1003.800
331 VARIABLE temptot.L = 2373.600

```

```

---- 331 VARIABLE cost.L
i1 286.000, i2 829.000, i3 673.000, i4 950.000, i5 571.000, i6
737.000, i7 1136.000, i8 993.000
i9 229.000, i10 1054.000

```

```

---- 331 VARIABLE cost1.L
k1 292.160, k2 1327.730, k3 1258.084

```

10.4 Risultati con 10 articoli e costo max aumentato

```

---- 331 VARIABLE y.L
      k1      k2      k3
i1
i2      1.000
i3      1.000
i4
i5      1.000
i6      1.000
i7      1.000
i8      1.000
i9      1.000
i10

```

```

---- 331 VARIABLE ym.L
k1 1.000, k2 1.000, k3 1.000

```

```

---- 331 VARIABLE x.L
      i2      i4      i5      i6      i7      i8      i9      i10
i1    1.000          1.000    1.000    1.000
i2          1.000          1.000
i3    1.000          1.000          1.000    1.000
i4          1.000          1.000          1.000    1.000
i5          1.000    1.000
i6          1.000          1.000
i7          1.000
i8          1.000

```

```

---- 331 VARIABLE z.L
i1 205.000, i2 715.000, i3 252.000, i4 486.000, i5 386.500, i6
537.100, i7 927.200, i8 628.300
i9 145.600, i10 862.100

```

```

---- 331 VARIABLE zm.L
k1 10.000, k2 30.000, k3 20.000

```

```

---- 331 VARIABLE z1.L
k1 281.600, k2 1089.200, k3 988.100

```

```

331 VARIABLE temptot.L = 2358.900

```

```

---- 331 VARIABLE cost.L
i1 286.000, i2 966.000, i3 673.000, i4 802.000, i5 571.000, i6
737.000, i7 1104.000, i8 1097.000
i9 229.000, i10 1221.000

```

```

---- 331 VARIABLE cost1.L
k1 292.160, k2 1295.880, k3 1422.258

```

10.5 Risultati con 10 articoli e costo max diminuito

```

---- 331 VARIABLE y.L
      k1      k2      k3
i1          1.000
i2          1.000
i3          1.000
i4          1.000
i5    1.000
i6          1.000
i7          1.000
i8          1.000
i9          1.000
i10         1.000

```

```

---- 331 VARIABLE ym.L
k1 1.000, k2 1.000, k3 1.000

```

```

---- 331 VARIABLE x.L
      i4      i6      i7      i8      i10
i1
i2      1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
i3      1.000
i4
i5      1.000      1.000      1.000
i6      1.000      1.000      1.000

```

```

---- 331 VARIABLE z.L
i1 372.250, i2 508.000, i3 252.000, i4 705.000, i5 252.900, i6
530.600, i7 926.200, i8 684.400
i9 222.250, i10 877.800

```

```

---- 331 VARIABLE zm.L
k1 10.000, k2 70.050, k3 20.000

```

```

---- 331 VARIABLE z1.L
k1 393.900, k2 1088.200, k3 1003.800
331 VARIABLE temptot.L = 2485.900

```

```

---- 331 VARIABLE cost.L
i1 463.000, i2 829.000, i3 673.000, i4 950.000, i5 264.000, i6
615.000, i7 1014.000, i8 871.000
i9 379.000, i10 1054.000

```

```

---- 331 VARIABLE cost1.L
k1 339.390, k2 1202.526, k3 1258.084

```

10.6 Risultati con 11 articoli e dati ravvicinati

```

---- 378 VARIABLE y.L
      k1      k2      k3
i1
i2
i3      1.000
i4      1.000
i5
i6      1.000
i7      1.000
i8      1.000
i9      1.000
i10
i11      1.000

```

```

---- 378 VARIABLE ym.L
k1 1.000, k2 1.000, k3 1.000

```

```

---- 378 VARIABLE x.L
      i2      i3      i4      i5      i6      i7      i8      i10      i11
i1    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i2                    1.000
i3                                1.000    1.000    1.000
i4                                1.000    1.000
i5                                    1.000    1.000    1.000
i6                                        1.000
i8                                            1.000
i9                                                1.000
i10                                               1.000

```

```

---- 378 VARIABLE z.L
i1 179.500, i2 695.000, i3 275.000, i4 477.000, i5 332.700, i6
534.000, i7 965.900, i8 635.900
i9 149.600, i10 892.800, i11 811.900

```

```

---- 378 VARIABLE zm.L
k1 10.000, k2 30.000, k3 20.000

```

```

---- 378 VARIABLE z1.L
k1 285.600, k2 1127.900, k3 1018.800
378 VARIABLE temptot.L = 2432.300

```

```

---- 378 VARIABLE cost.L
i1 257.000, i2 856.000, i3 597.000, i4 728.000, i5 463.000, i6
627.000, i7 1208.000, i8 946.000
i9 329.000, i10 1088.000, i11 1085.000

```

```

---- 378 VARIABLE cost1.L
k1 392.560, k2 1360.790, k3 1214.880

```

10.7 Risultati con 11 articoli e dati distanti

```

---- 377 VARIABLE y.L
      k1      k2      k3
i1                    1.000
i2      1.000
i3      1.000
i4                                1.000
i5                                1.000
i6                    1.000
i7                    1.000
i8                                1.000
i9                    1.000
i10                               1.000
i11                    1.000

```

```

---- 377 VARIABLE ym.L
k1 1.000, k2 1.000, k3 1.000

```

```

---- 377 VARIABLE x.L
      i2      i3      i4      i5      i6      i7      i8      i9      i10     i11
i1  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000
i2                1.000                1.000                1.000
i3                      1.000                1.000  1.000  1.000
i4                            1.000  1.000                1.000  1.000
i5                                  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000
i6                                        1.000                1.000  1.000
i8                                              1.000                1.000  1.000
i9                                                  1.000  1.000
i10                                                         1.000

```

```

---- 377 VARIABLE z.L
i1 205.000, i2 480.700, i3 284.000, i4 486.000, i5 241.200, i6
544.800, i7 926.200, i8 628.300
i9 359.200, i10 862.100, i11 744.000

```

```

---- 377 VARIABLE zm.L
k1 10.000, k2 30.000, k3 20.000

```

```

---- 377 VARIABLE z1.L
k1 619.700, k2 1088.200, k3 988.100

```

377 VARIABLE temptot.L = 2696.000

```

---- 377 VARIABLE cost.L
i1 286.000, i2 501.000, i3 399.000, i4 613.000, i5 496.000, i6
619.000, i7 895.000, i8 908.000
i9 465.000, i10 1032.000, i11 772.000

```

```

---- 377 VARIABLE cost1.L
k1 600.970, k2 1086.730, k3 1233.258

```

10.8 Risultati con 11 articoli e costo max aumentato

```

---- 377 VARIABLE y.L
      k1      k2      k3
i1                1.000
i2      1.000
i3                1.000
i4                1.000
i5                1.000
i6                1.000
i7                1.000
i8                1.000
i9      1.000
i10               1.000
i11              1.000

```

```

---- 377 VARIABLE ym.L
k1 1.000, k2 1.000, k3 1.000

```

```

---- 377 VARIABLE x.L
      i2      i3      i4      i5      i6      i7      i8      i9      i10     i11
i1    1.000
i2      1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i3          1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i4              1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i5                  1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i6                      1.000    1.000    1.000    1.000
i7                          1.000
i8                              1.000    1.000    1.000
i9                                  1.000
i10                                      1.000
i11                                          1.000

```

```

---- 377 VARIABLE z.L
i1 205.000, i2 427.700, i3 252.000, i4 486.000, i5 386.500, i6
537.100, i7 926.200, i8 628.300
i9 145.600, i10 862.100, i11 744.000

```

```

---- 377 VARIABLE zm.L
k1 10.000, k2 30.000, k3 20.000

```

```

---- 377 VARIABLE z1.L
k1 566.700, k2 1088.200, k3 988.100
      377 VARIABLE temptot.L = 2643.000

```

```

---- 377 VARIABLE cost.L
i1 286.000, i2 347.000, i3 673.000, i4 802.000, i5 571.000, i6
737.000, i7 1013.000, i8 1097.000
i9 229.000, i10 1221.000, i11 890.000

```

```

---- 377 VARIABLE cost1.L
k1 441.670, k2 1204.730, k3 1422.258

```

10.9 Risultati con 11 articoli e costo max diminuito

```

---- 377 VARIABLE y.L
      k1      k2      k3
i1          1.000
i2      1.000
i3      1.000
i4          1.000
i5          1.000
i6          1.000
i7          1.000
i8      1.000
i9          1.000
i10         1.000
i11         1.000

```

```

---- 377 VARIABLE ym.L
k1 1.000, k2 1.000, k3 1.000

```

```

---- 377 VARIABLE x.L
      i3      i4      i5      i6      i7      i8      i9      i10     i11
i1    1.000    1.000
i2    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i3    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i4    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i5    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i6    1.000    1.000
i7
i8
i9    1.000
i10   1.000
i11   1.000

```

```

---- 377 VARIABLE z.L
i1 414.800, i2 480.700, i3 284.000, i4 603.000, i5 434.000, i6
572.400, i7 926.200, i8 642.700
i9 264.800, i10 775.800, i11 761.400

```

```

---- 377 VARIABLE zm.L
k1 10.000, k2 91.250, k3 264.800

```

```

---- 377 VARIABLE zl.L
k1 802.700, k2 1088.200, k3 901.800

```

377 VARIABLE temptot.L = 2792.700

```

---- 377 VARIABLE cost.L
i1 463.000, i2 501.000, i3 399.000, i4 613.000, i5 496.000, i6
615.000, i7 891.000, i8 714.000
i9 379.000, i10 717.000, i11 768.000

```

```

---- 377 VARIABLE costl.L
k1 851.270, k2 1077.830, k3 870.900

```

10.10 Risultati con 12 articoli e dati ravvicinati

```

---- 430 VARIABLE y.L
      k1      k2      k3
i1
i2
i3
i4    1.000
i5
i6    1.000
i7
i8
i9
i10   1.000
i11   1.000
i12   1.000

```

```

---- 430 VARIABLE ym.L
k1 1.000, k2 1.000, k3 1.000

```

```

---- 430 VARIABLE x.L
      i2      i3      i4      i5      i6      i7      i8      i9      i10     i12
i1  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000
i2  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000
i3  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000
i4  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000
i5  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000
i6  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000
i8  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000
i9  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000
i11 1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000

```

```

---- 430 VARIABLE z.L
i1 314.500, i2 479.000, i3 275.000, i4 702.800, i5 814.700, i6
544.800, i7 957.700, i8 646.900
i9 183.000, i10 868.400, i11 178.000, i12 368.000

```

```

---- 430 VARIABLE zm.L
k1 10.000, k2 30.000, k3 20.000

```

```

---- 430 VARIABLE z1.L
k1 992.400, k2 1119.700, k3 447.500

```

430 VARIABLE temptot.L = 2559.600

```

---- 430 VARIABLE cost.L
i1 490.000, i2 807.000, i3 597.000, i4 884.000, i5 1202.000, i6
763.000, i7 1349.000, i8 1019.000
i9 406.000, i10 1175.000, i11 360.000, i12 632.000

```

```

---- 430 VARIABLE cost1.L
k1 1299.240, k2 1500.970, k3 561.750

```

10.11 Risultati con 12 articoli e dati distanti

```

---- 432 VARIABLE y.L
      k1      k2      k3
i1  1.000
i2  1.000
i3  1.000
i4  1.000
i5  1.000
i6  1.000
i7  1.000
i8  1.000
i9  1.000
i10 1.000
i11 1.000
i12 1.000

```

```

---- 432 VARIABLE ym.L
k1 1.000, k2 1.000, k3 1.000

```

```

---- 432 VARIABLE x.L
      i5      i6      i7      i8      i9      i10     i11     i12
i1    1.000    1.000    1.000                1.000        1.000    1.000
i2                1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i3    1.000                1.000    1.000    1.000    1.000
i4                1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i5                1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i6                1.000                1.000    1.000    1.000
i7                1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
i8                1.000    1.000    1.000    1.000
i9                1.000                1.000    1.000
i10                1.000    1.000    1.000
i11                1.000    1.000

```

```

---- 432 VARIABLE z.L
i1 205.000, i2 480.700, i3 284.000, i4 486.000, i5 386.500, i6
537.100, i7 926.200, i8 628.300
i9 192.600, i10 862.100, i11 744.000, i12 322.100

```

```

---- 432 VARIABLE zm.L
k1 10.000, k2 30.000, k3 20.000

```

```

---- 432 VARIABLE z1.L
k1 619.700, k2 1088.200, k3 988.100

```

432 VARIABLE temptot.L = 2696.000

```

---- 432 VARIABLE cost.L
i1 286.000, i2 501.000, i3 399.000, i4 783.000, i5 571.000, i6
737.000, i7 1013.000, i8 1078.000
i9 526.000, i10 1202.000, i11 890.000, i12 692.000

```

```

---- 432 VARIABLE cost1.L
k1 600.970, k2 1204.730, k3 1403.258

```

10.12 Risultati con 12 articoli e costo max aumentato

```

---- 431 VARIABLE y.L
      k1      k2      k3
i1                1.000
i2    1.000
i3    1.000
i4                1.000
i5                1.000
i6                1.000
i7                1.000
i8                1.000
i9                1.000
i10               1.000
i11               1.000
i12               1.000

```

```

---- 431 VARIABLE ym.L
k1 1.000, k2 1.000, k3 1.000

```

```

---- 431 VARIABLE x.L
      i2      i5      i6      i7      i8      i9      i10     i11     i12
i1    1.000    1.000    1.000    1.000                1.000    1.000
i2                1.000                1.000
i3                1.000                1.000    1.000
i4                1.000                1.000    1.000
i5                1.000    1.000                1.000
i6                1.000                1.000    1.000
i7                1.000                1.000
i8                1.000                1.000
i9                1.000                1.000
i10               1.000                1.000

```

```

---- 431 VARIABLE z.L
i1 205.000, i2 480.700, i3 284.000, i4 486.000, i5 386.500, i6
537.100, i7 926.200, i8 628.300
i9 192.600, i10 862.100, i11 744.000, i12 322.100

```

```

---- 431 VARIABLE zm.L
k1 10.000, k2 30.000, k3 20.000

```

```

---- 431 VARIABLE z1.L
k1 619.700, k2 1088.200, k3 988.100

```

431 VARIABLE temptot.L = 2696.000

```

---- 431 VARIABLE cost.L
i1 286.000, i2 501.000, i3 399.000, i4 783.000, i5 571.000, i6
737.000, i7 1013.000, i8 1078.000
i9 526.000, i10 1202.000, i11 890.000, i12 692.000

```

```

---- 431 VARIABLE cost1.L
k1 600.970, k2 1204.730, k3 1403.258

```

10.13 Risultati con 12 articoli e costo max diminuito

```

---- 431 VARIABLE y.L
      k1      k2      k3
i1                1.000
i2      1.000
i3      1.000
i4                1.000
i5                1.000
i6                1.000
i7                1.000
i8                1.000
i9                1.000
i10               1.000
i11               1.000
i12               1.000

```

```

---- 431 VARIABLE ym.L
k1 1.000, k2 1.000, k3 1.000

```

```

---- 431 VARIABLE x.L
      i2      i5      i6      i7      i8      i9      i10     i11     i12
i1    1.000    1.000    1.000    1.000                1.000    1.000
i2                1.000                1.000
i3                1.000                1.000
i4                1.000                1.000
i5                1.000    1.000                1.000
i6                1.000                1.000    1.000
i7                1.000                1.000
i8                1.000                1.000
i9                1.000                1.000
i10               1.000                1.000
i11               1.000                1.000

```

```

---- 431 VARIABLE z.L
i1 205.000, i2 480.700, i3 284.000, i4 486.000, i5 386.500, i6
537.100, i7 926.200, i8 628.300
i9 192.600, i10 862.100, i11 744.000, i12 322.100

```

```

---- 431 VARIABLE zm.L
k1 10.000, k2 30.000, k3 20.000

```

```

---- 431 VARIABLE z1.L
k1 619.700, k2 1088.200, k3 988.100

```

```

431 VARIABLE temptot.L = 2696.000

```

```

---- 431 VARIABLE cost.L
i1 286.000, i2 501.000, i3 399.000, i4 783.000, i5 571.000, i6
737.000, i7 1013.000, i8 1078.000
i9 526.000, i10 1202.000, i11 890.000, i12 692.000

```

```

---- 431 VARIABLE cost1.L
k1 600.970, k2 1204.730, k3 1403.258

```