

# Pianificazione Automatica e sistemi di Supporto delle Decisioni

Matteo Aprile

Professore: Giampaolo Ghiani, Enamuele Manni

## INDICE

## I. DEFINIZIONI

Ci occuperemo di 2 tipi di scenari:

- usare **algoritmi a supporto delle decisioni**
- usare algoritmi che **sostituiscono completamente l'uomo**

### A. Business Analytics

Disciplina che utilizza dati, statistiche, modelli matematici per **aiutare a prendere delle decisioni in base a dei dati**.

Possiamo racchiudere i suoi **passaggi** in:

- 1) **descriptive analytics**: capire **cosa sia successo nel passato** tramite i dati disponibili
- 2) **predictive analytics**: cercare di **fare delle previsioni** in base ai dati già disponibili
- 3) **prescriptive analytics**: **creare un piano di azione** per poter massimizzare il KPI (Key Performance Indicator)

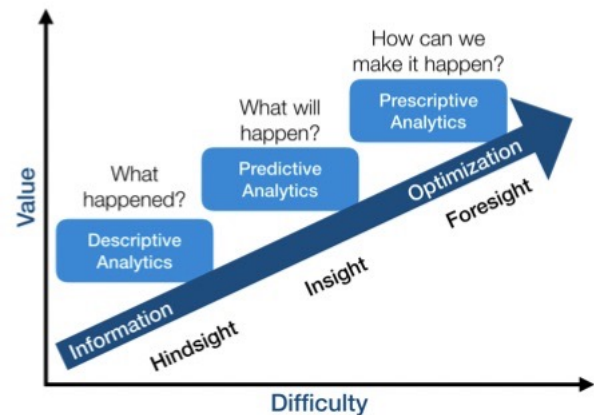


Figura 1. Fasi della business analytics

### B. Decisioni

Rappresenta la **scelta di un elemento tra più soluzioni** dopo aver ponderato le opzioni.

Possiamo avere più casi d'uso:

- **simplest case**: abbiamo **poche alternative** quindi una semplice scelta
- **multiple criteria**: abbiamo **più metri di paragone** delle performance, quindi si dovranno tenere in conto:
  - **soluzioni migliori** di altre (dette di Pareto)
  - **vincoli** dovuti dai clienti o da casi logistici da gestire (es: spedizioni)

- ottimizzazioni matematiche
- conflitti tra i vincoli
- **incertezze e rischi:**
  - **decisioni operative:** di breve periodo reversibili e limitate a "n" persone del team
  - **decisioni tattiche:** coinvolge una parte dell'organizzazione per un medio periodo
  - **decisioni strategiche:** di lungo periodo non reversibili e coinvolgono denaro
  - **decisioni strutturate:** hanno una procedura di risoluzione specifica
  - **decisioni non strutturate:** richiedono creatività ed esperienza in un dato settore

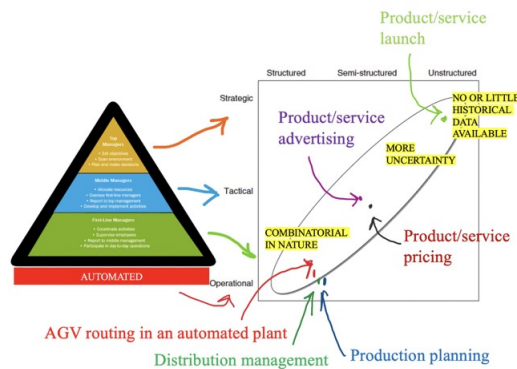


Figura 2. Diagonale decisionale

### C. Business Intelligence (BI)

Usato per indicare un sistema dedicato alla raccolta di dati e alla loro elaborazione al fine di un reporting, infatti per "Intelligence" si intende investigazione. Venivano usati su dati atomici per avere delle conoscenze approfondite in un determinato business.

### D. Data visualization

Consiste nel prendere dati e plottare un grafico, ma in realtà ora si ha una trattazione più metodologica, cioè se visualizzare in modo statico o meno i dati.

### E. Decision Support Systems (DSS)

Si indicava un sistema computerizzato dotato di un sistema di "data management" per creare un modello di ottimizzazione, fornendo un feedback tramite un'interfaccia. Ora indica una varietà di sistemi per visualizzare i dati in larga misura o meno.

### F. Operations Research (OR)

Attività organizzative per portare avanti un sistema logistico. Per "research" si indica la ricerca delle operation per conseguire dei risultati, avremo come sottocategorie:

- **ottimizzazione matematica**
- **queueing theory:** studio matematico delle linee in attesa il limite è che funzionano solo con sistemi semplici e con richieste di servizio in ordine stocastico

- **simulazione:** per usarle è necessario generare dei numeri randomici quindi inconvenienti (bisogna fare un'analisi statistica dei risultati dalle quali si farà una stima)
- **game theory:** decisioni con più players

### G. Agents

È un sistema che si muove in un environment (ambiente), ha dei sensori tramite i quali percepisce alcuni aspetti del mondo che lo circonda quindi si crea una rappresentazione del mondo circostante che può vedere. È capace di influenzare l'ambiente tramite degli attuatori come ruote o braccia (intendiamo anche agenti software).

Possiamo classificarli come:

- **agenti autonomi:** se è concepito in modo tale che tramite un'istruzione sintetica raggiunge un goal sviluppando le azioni per raggiungerlo. In realtà può anche non essere una sequenza di azioni dato che potrebbero esserci degli imprevisti
- **agenti intelligenti:** se
- **impara dall'esperienza**
- crea una rappresentazione dell'ambiente che lo circonda e ci ragiona sopra per un possibile risultato delle proprie azioni
- **si adatta ad un ambiente mutevole**

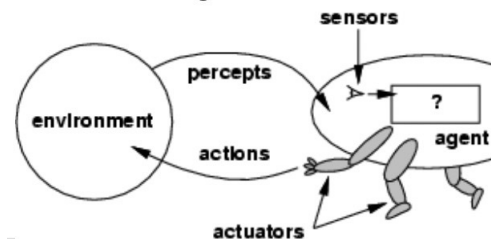


Figura 3. Schematizzazione di un agente e sue caratteristiche

### H. Artificial Intelligence (AI)

Comprende tante sottodiscipline:

- **automated reasoning:** legato alla rappresentazione del mondo e come ragionare su di essa ma anche calcolandone le probabilità
- **automated planning:** usato in ambienti industriali
- **automated learning**
- **natural language processing:** sviluppare agenti software per fare sintesi di testi, scrivere automaticamente articoli, chat bot, ecc
- **perception:** visione artificiale
- **manipulation:** avere un agente che può modificare l'agente circostante

### I. Machine Learning (ML)

Consiste nell'apprendimento automatico e quindi lo sviluppo degli agenti che apprendo tramite la loro esperienza pregressa. Ci sarà allora una fase di training. Una delle possibili architetture che permette di farlo sono le Neural Networks prima avevano solo 2/3 neuroni, ora ne hanno vari strati il che fornisce delle prestazioni impressionanti

### J. Deep Learning

Si basa sull'**apprendimento automatico** con reti neurali tramite un gran numero di strati di neuroni.

### K. Data Mining (DM)

Usare metodi di Machine Learning per **estrarre manualmente dei pattern dai dati**, cioè una **regolarità** o un **trend**. È quindi la parte nobile del knowledge discovery in db, dato che i dati sono in genere disponibili su db o da altre piattaforme.

La **sequenza** nella quale interviene è:

- 1) **prendere** i dati
- 2) trovare i vari **target**
- 3) **preprocessare** i dati
- 4) trasformare i dati tramite il **data mining**
- 5) trovare dei **patterns** (dopo il data mining)

## II. SOFTWARE SOLUTIONS AND LANGUAGES FOR AP AND DSS

### A. Decisioni operative/strutturate

Sono una classe importante, **si possono prendere tramite una procedura standard** che può seguire un manuale o delle normative, automatizzata o no. Queste decisioni di breve periodo si collocano in basso a destra in figura ??.

Non essendo decisioni dove possiamo solo supportare, allora si possono andare a **codificare in un linguaggio di programmazione procedurale** come C++, Java, ecc...

Potremo avere un **approccio**:

- **procedurale**: dove devo far **generare delle azioni** in seguito di un obiettivo
- **dichiarativo**: si divide in:
  - 1) **modellazione** del problema
  - 2) **descrivere tramite un linguaggio di modellazione** (modelling language) che è un linguaggio di programmazione matematico come AMPL, oppure in linguaggi come python con Amply e Pulp
  - 3) **solver of the shelf**, che ci darà delle istruzioni per il nostro contesto

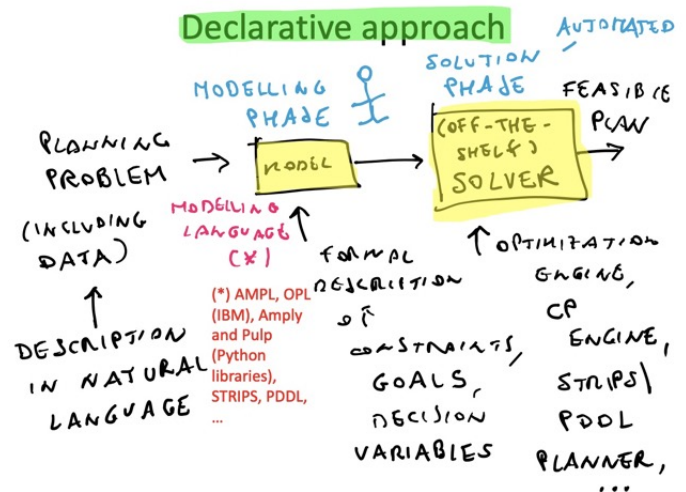


Figura 4. procedura implementata

Il che è utile dato che **per agire su un problema basterà cambiare il modello** senza cambiare solver, dovrò solo cambiare il modello. È la soluzione più **economica e flessibile** ma è **meno performante** se in ambienti realtime devo prendere soluzioni in tempi molto stretti. Quindi in questi casi servono approcci procedurali.

Per sistemi che devono prendere soluzioni nel breve, si usa C, C++, C#.

### B. Decisioni non strutturate o destrutturate

In questo caso **non possiamo automatizzare**, quindi:

- 1) tiro fuori i **dati aggregati**
- 2) si creano statistiche con **modelli di ottimizzazione**

Si usano degli **spreadsheet** che però non riescono a gestire big data e tendono a generare errori.

Il linguaggio più usato è **Python** ma non è la soluzione più efficiente per tutte quelle applicazioni dove il tempo di calcolo è importante.

### C. Decisioni semistrutturate

Vogliamo solo **valutare le prestazioni di un sistema**. Un esempio sono i sistemi che **presentano un comportamento random** per motivi:

- 1) i **server hanno un tempo di risposta** che possiamo modellare
- 2) le richieste del sistema **arrivano in maniera stocastica**

Si usano, in questo caso, **metodi simulativi** tramite dei Visual Interactive Modelling System, **per simulare la rete** per la quale passano le informazioni e i server ognuno con diverse proprietà di ciascun linker.

## III. INTRODUZIONE ALL'OTTIMIZZAZIONE MATEMATICA

### A. Introduzione

Partiamo da un **insieme di formule ed equazioni che modeleranno il problema**. Con questo modello proviamo a trovare una **soluzione** al nostro problema **attraverso algoritmi o risolutori**. L'output è una soluzione per il nostro modello da implementare nel mondo reale.

### B. Ingredienti principali

Gli ingredienti principali sanno:

- **dati** del problema
- variabili: dette anche var decisionali: scelte da fare in merito al problema. rappresentano quindi le scelte, quello su cui il decisore può intervenire
- vincoli: equazioni che definiscono i valori che le variabili possono assumere
- funzione obiettivo: sarà una formula che rappresenta una misura di tipo quantitativo per capire quando è buona la soluzione che abbiamo ottenuto. quindi dovremo ottimizzare questo valore in base al contesto

Parleremo di **programmazione lineare con modelli matematici** o relazioni lineari, dato che **molti problemi reali si rifanno a modelli lineari**, per quanto essi possano essere complessi.

### C. Descrizione del problema

Proviamo a risolvere un problema di mix di produzione, cioè un sistema con un impianto con 2 stabilimenti in cui:

- 1) nel primo: diamo le materie prime e vengono realizzati i componenti in uscita
- 2) nel secondo: diamo i componenti realizzati che vengono assemblati per creare il prodotto finito

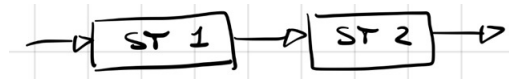


Figura 5. Catena tra i due stabilimenti

Supponendo di voler realizzare 2 prodotti A, B con un differente profitto. Determinare il **mix di produzione**, cioè quante unità di A e B produrre la prossima settimana. Saranno presenti dei **vincoli** creati dalle risorse come i macchinari o gli addetti che potranno lavorare un numero di ore finito.

### D. Dati del problema

- ore di lavoro:

Stab	A	B	Addetti
1	4 ore	2 ore	10
2	2 ore	4 ore	10

Tabella I

TABELLA DELLE ORE DI LAVORO

- ogni addetto lavora 40 ore/settimana
- profitto €/pallet:
- richiesta del prodotto nella prossima settimana:

A	B
15k	10k

Tabella II

TABELLA DEL PROFITTO €/PALLET

A	B
40	120

Tabella III

TABELLA DEL PROFITTO EURO/PALLET

### E. Descrizione del problema con un modello matematico

Per effettuare una modellazione faremo:

- 1) **identificare le variabili decisionali:**
  - $x_A$ : # di pallet di prodotto A da realizzare
  - $x_B$ : # di pallet di prodotto B da realizzare
- 2) **definire la funzione obiettivo (FO)**, per massimizzare il profitto
- 3) **definire i vincoli espressi come uguaglianza o disuguaglianza**

- vincolo 1: capacità produttiva dello stab 1  $4x_A + 2x_B$  che non può superare  $40 \cdot 10$  cioè ore disponibili ogni settimana per un addetto \* numero di addetti:

$$4x_A + 2x_B \leq 400$$

- vincolo 2: capacità produttiva dello stabilimento 2  $2x_A + 4x_B$  che non può superare  $40 \cdot 10$  cioè ore disponibili ogni settimana per un addetto \* numero di addetti:

$$2x_A + 4x_B \leq 400$$

- vincolo 3: vincolo sulla richiesta di A:

$$x_A \leq 40$$

- vincolo 4: vincolo sulla richiesta di B:

$$x_B \leq 120$$

- vincolo 5: vincolo di non-negatività:

$$x_A, x_B \geq 0$$

Nella forma completa il **modello complessivo** è:

$$MAX = z = 15x_A + 10x_B$$

sottoposto ai vincoli (sv):

- $4x_A + 2x_B \leq 400$
- $2x_A + 4x_B \leq 400$
- $x_A \leq 40$
- $x_B \leq 120$
- $x_A, x_B \geq 0$

### F. Risolvere il modello matematico

Rappresentiamo sul piano cartesiano tutte le soluzioni ammissibili cercando quella che massimizza il nostro risultato

Impostiamo delle rette per ogni vincolo:

- presa  $4x_A + 2x_B \leq 400$  poniamo = 0, a turno,  $x_A$  e  $x_B$ : (200, 100)
- presa  $2x_A + 4x_B \leq 400$  poniamo = 0, a turno,  $x_A$  e  $x_B$ : (100, 200)
- presa  $x_A \leq 40$ : (40, 0)
- presa  $x_B \leq 120$ : (0, 120)

Avremo allora una **regione ammissibile** dove valgono tutti i vincoli e nella quale dovrebbe essere presente la nostra soluzione ammissibile. Per trovare il punto che rende massima la funzione  $z$  usiamo il **metodo del gradiente**:

$$\nabla z = \begin{bmatrix} \frac{dz}{dx_A} \\ \frac{dz}{dx_B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 15 \\ 10 \end{bmatrix}$$

dove  $\nabla z$  sarà la massima crescita che viene rappresentata tramite (15, 10).

Tracciando una **retta perpendicolare (curve di livello)** alla retta del gradiente avremo valori sempre buoni ma più bassi di quelli sul gradiente, a patto che siano validi. Troveremo in fine il punto massimo che consente di massimizzare, cioè il più estremo alla regione ammissibile sarà il nostro punto.

Seguendo la retta del gradiente troviamo che la **soluzione ottimale** si trova nell'intersezione tra le rette del vincolo 2 con il 3:  $x_A = 40$   $2 \cdot 40 + 4x_B = 400$  quindi  $x_B = 80$ .

La soluzione ottimale sarà:

$$\begin{cases} x_A = 40 \\ 2x_A + 4x_B = 400 \end{cases} \quad \begin{cases} x_A = 40 \\ x_B = 80 \end{cases}$$

Si nota che lo stabilimento 2 viene saturato e quello 1 no, dal fatto che la soluzione giace sulla retta del vincolo per il quale si satura.

### G. Terminologia

Possiamo avere altre forme di modelli di PL:

- fo da minimizzare
- vincoli di uguaglianza
- vincoli  $\geq$
- variabili negative
- variabili non vincolate

Terminologie da sapere:

- **soluzione**: quella di output
- **soluzione ammissibile**: soluzione, se esiste, che **soddisfa tutti i vincoli**
- **soluzione inammissibile**: se **viola almeno un vincolo**
- **regione ammissibile**: tutti i punti che rispettano i vincoli
- **prob inammissibile**: **regione ammissibile vuota**
- **prob ammissibile**:
  - soluzione ottima singola
  - soluzioni multiple
  - fo illimitata

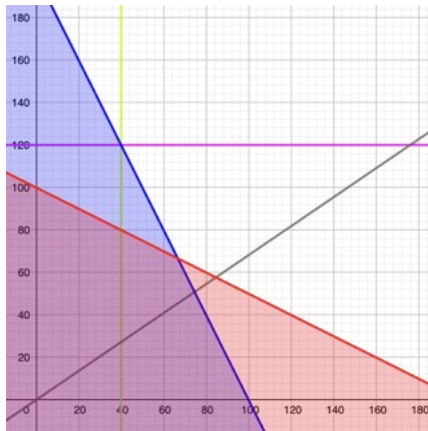


Figura 6. Rappresentazione grafica esempio

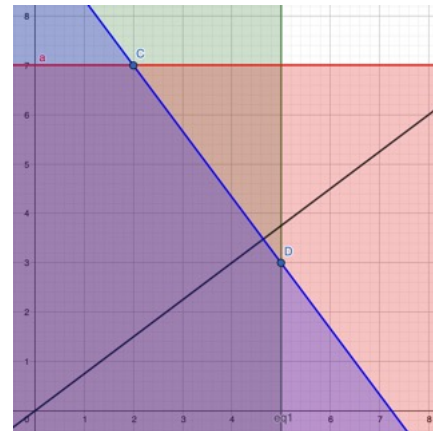


Figura 7. Rappresentazione grafica esempio 1

## H. Implementazione in Python

```
1 import pulp as p
2
3 # 1. creazione del modello
4 model = p.LpProblem("ProductMix", p.LpMaximize)
5
6 # 2. definisco le variabili decisionali
7 x_A = p.LpVariable("x_A", cat="Continuous", lowBound=0)
8 x_B = p.LpVariable("x_B", cat="LpContinuous", lowBound=0)
9
10 # 3. definisco la funzione obiettivo in funzione
    delle variabili decisionali
11 model += 15 * x_A + 10 * x_B
12
13 # 4. definire i vincoli
14 model += 4 * x_A + 2 * x_B \leq 400
15 model += 2 * x_A + 4 * x_B \leq 400
16 model += x_A \leq 40
17 model += x_B \leq 120
18
19 # 5. risolvere il problema
20 model.solve()
21
22 # print della soluzione
23 print("next week produce {} pallets of A".format(x_A
    .varValue))
24 print("next week produce {} pallets of B".format(x_B
    .varValue))
```

## I. Esercitazione

1) Massimizzare la f.o.  $z = 8x_1 + 6x_2$ , con i vincoli:

- $x_1 \leq 5$
- $x_2 \leq 7$
- $4x_1 + 3x_2 \leq 29$
- $x_1, x_2 \geq 0$

$$\nabla z = \begin{bmatrix} \frac{dz}{dx_A} \\ \frac{dz}{dx_B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8 \\ 6 \end{bmatrix}$$

Abbiamo che esiste una curva di livello coincidente con lo spigolo CD, quindi abbiamo delle soluzioni ottime multiple:

- vertice C, prendiamo allora vincolo 2 e 3:

$$x_2 = 7 \rightarrow x_1 = 2$$

- vertice D, prendiamo allora vincolo 1 e 3:

$$x_1 = 5 \rightarrow x_2 = 3$$

- punti del segmento CD

Quindi  $z = 58$

2) Minimizziamo la f.o.  $z = 25x_1 + 22x_2$ , con i vincoli:

- $x_1 + x_2 \geq 5$
- $3x_1 + 2x_2 \geq 12$
- $3x_1 + 6x_2 \geq 18$
- $x_1, x_2 \geq 0$

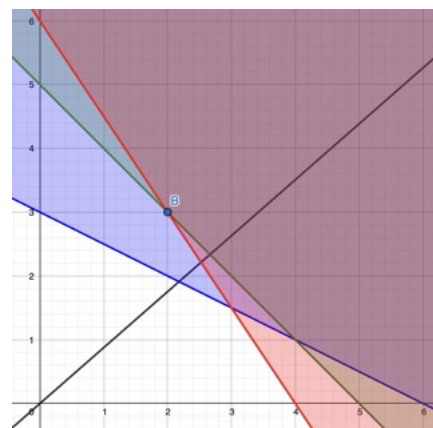


Figura 8. Rappresentazione grafica esempio 2



$$\nabla z = \begin{bmatrix} \frac{dz}{dx_A} \\ \frac{dz}{dx_B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 25 \\ 22 \end{bmatrix}$$

Per poter minimizzare, tracciando la curva di livello, trovando che la soluzione ottima si troverà dal punto B dato dall'intersezione dei vincoli 1 e 2:

$$x_1 = 2, x_2 = 3$$

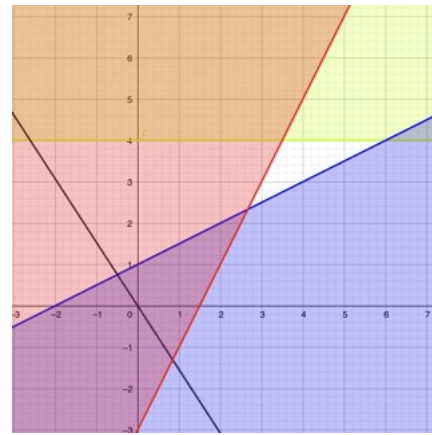


Figura 10. Rappresentazione grafica esempio 4

Quindi  $z = 116$

3) Massimizziamo la f.o.  $z = 2x_1 + x_2$ , con i vincoli:

- $x_1 - x_2 \leq 1$
- $2x_1 + x_2 \geq 6$
- $x_2 \geq 6$
- $x_1, x_2 \geq 0$

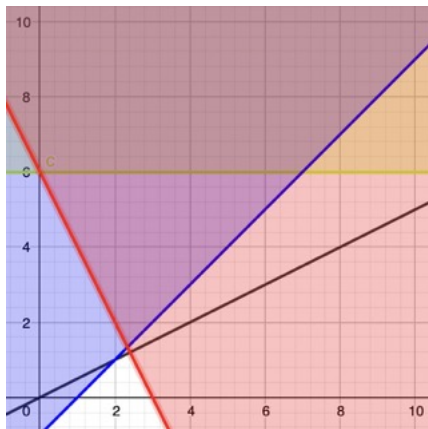


Figura 9. Rappresentazione grafica esempio 3

$$\nabla z = \begin{bmatrix} \frac{dz}{dx_A} \\ \frac{dz}{dx_B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Non raggiungeremo la regione ammissibile, quindi il problema non ammette una soluzione ottima.

4) Minimizziamo la f.o.  $z = -2x_1 + 3x_2$ , con i vincoli:

- $x_1 - 2x_2 \geq -2$
- $2x_1 - x_2 \leq 3$
- $x_2 \geq 4$
- $x_1, x_2 \geq 0$

$$\nabla z = \begin{bmatrix} \frac{dz}{dx_A} \\ \frac{dz}{dx_B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \\ 3 \end{bmatrix}$$

La regione ammissibile e' vuota e per tanto il problema e' inammissibile, quindi non esiste un punto che soddisfa contemporaneamente tutti i vincoli.

5) L'azienda vuole decidere oltre al piano di produzione anche la giusta riallocazione degli addetti (10-10) tra i due reparti. Le variabili decisionali sono:

- $x_A, x_B$ : i prodotti
- $n_p$ : # addetti allocati al reparto produzione
- $n_a$ : #addetti allocati al reparto assemblaggio

Quindi andremo ad aggiungere il vincolo per cui  $n_p + n_a = 20$ .

Perciò avremo:  $z = 15x_A + 10x_B$ , con vincoli:

- $4x_A + 2x_B \leq 40n_p$
- $2x_A + 4x_B \leq 40n_a$
- $x_A \leq 40$
- $x_B \leq 120$
- $n_a + n_p = 20$
- $x_A, x_B, n_a, n_p \geq 0$

IV. FORMULAZIONI EQUIVALENTI DI UN PROBLEMA DI  
PROGRAMMAZIONE LINEARE

## A. Problema in FORMA GENERALE

In generale nella **zona ammissibile** diciamo:

$$X = x \in R^n : A_x \geq b, D_x = l, x_j \geq 0 \quad (*)$$

$$\forall j \in J \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$$

dove **definiamo la possibilità di vincoli di  $\geq$ , = e variabili  $\geq 0$ .**

La funzione obiettivo è definita da:

$$z = c_x \quad t.c. \quad z = \min z, x \in X$$

che rappresenta il **problema espresso in forma generale.**

## B. Problema in FORMA CANONICA

Se in (\*) abbiamo:

- $D = 0$
- $J = \{1, 2, \dots, n\}$

allora il **problema si dice in forma canonica:**

$$\min_x \{z = c_x : A_x \geq b, x \geq 0\}$$

## C. Problema in FORMA STANDARD

Se in (\*) abbiamo:

- $A = 0$
- $J = 1, 2, \dots, n$

allora il problema è:

$$\min_x \{z = c_x : D_x = l, x \geq 0\}$$

Possiamo sempre **ricorrendo tramite trasformazioni alla forma standard.**

## D. Terminologia

Nella forma standard abbiamo che:

- **z:** la **funzione obiettivo** per la quale trovare il valore minimo
- **A:** **matrice dei vincoli**
- **D:** **matrice dei coefficienti**, matrice di dimensione  $m \times n$
- **l:** **vettore dei termini noti** vettore colonna
- **c:** **detto vettore dei coefficienti di costo**, vettore di riga

## E. Trasformazioni per ricondursi alla forma standard

- 1) **variabili non vincolate di segno:**

$$x_j t.c. j \notin J$$

per trasformarla possiamo **sostituire a  $x_j$  la somma algebrica di 2 variabili non negative:**

$$x_j = x_j^+ - x_j^-$$

$$\forall x_j^+ \geq 0, x_j^- \geq 0$$

Se abbiamo  $k (\leq n)$  variabili non vincolate in segno, possiamo evitare di introdurre  $k$  coppie di variabili non negative. È possibile considerare una variabile  $x_0 \geq 0$  e sostituire la generica variabile non vincolata di segno con  $x_j = x_j^+ - x_0$ . **Così introduciamo "solo"  $k + 1$  variabili.**

- 2) **vincoli non espressi in forma di uguaglianza ( $\leq$ )**

$$\sum_{j=i}^n a_{ij} x_j \leq b_i$$

presa la **variabile di Slack:**  $S_i \geq 0$ , avremo:

$$\sum_{j=i}^n a_{ij} x_j + S_i = b_i$$

questa variabile misura lo Slack che esiste per far sì che **il vincolo sia rispettato per uguaglianza** o no (vincolo  $> 0$ )

- 3) **vincoli non espressi in forma di uguaglianza ( $\geq$ )**

$$\sum_{j=i}^n a_{ij} x_j \geq b_i$$

presa una **variabile di Surplus:**  $S_i \geq 0$ , avremo:

$$\sum_{j=i}^n a_{ij} x_j - S_i = b_i$$

- 4) **trasformazione di vincoli da uguaglianza in disuguaglianza sostituendo:**

$$\sum_{j=i}^n a_{ij} x_j = b_i$$

**sostituendolo a:**

$$\sum_{j=i}^n a_{ij} x_j \geq b_i$$

$$\sum_{j=i}^n a_{ij} x_j \leq b_i$$

- 5) **funzione obiettivo:**

Se la f.o. è  $\max z = c_x$ , si può trasformare:

$$\max z = - \min -z$$

## F. Esempio 1

- 1) DATI

$$\text{f.o.: } \min z = x_1 + 2x_2$$

vincoli:

- $6x_1 + 4x_2 \leq 24$
- $4x_1 + 8x_2 \leq 32$
- $x_2 \geq 3$
- $x_1, x_2 \geq 0$

- 2) TRASFORMAZIONE IN FORMA STANDARD



Per il primo vincolo del tipo  $\leq$ , aggiungiamo una variabile non negativa (slack):

$$6x_1 + 4x_2 + x_3 = 24$$

per il secondo vincolo operiamo in maniera analoga :

$$4x_1 + 8x_2 + x_4 = 32$$

per il terzo vincolo del tipo  $\geq$ , aggiungiamo una variabile ausiliaria negativa:

$$x_2 - x_5 = 3$$

vincolo sulle variabili:

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \geq 0$$

quindi nella formulazione standard avremo  $j = 1, 2, 3, 4, 5$  quando in precedenza avevamo:  $j = 1, 2$

### G. Esempio 2

#### 1) DATI

f.o.:  $\max z = z_1 + z_2$

vincoli:

- $8x_1 + 6x_2 \geq 48$
- $5x_1 + 10x_2 \geq 50$
- $13x_1 + 10x_2 \leq 130$
- $x_1 \geq 0$

#### 2) TRASFORMAZIONE IN FORMA STANDARD

Dato che non abbiamo vincoli su  $x_2$  poniamo:

$$x_2 = x_2^+ - x_2^-$$

la f.o. sarà:

$$\max z = -\min -z = -x_1 - x_2 = -x_1 - x_2^+ + x_2^-$$

invece i vincoli:

- $8x_1 + 6x_2^+ - 6x_2^- - x_3 = 48$
- $5x_1 + 10x_2^+ - 10x_2^- - x_4 = 50$
- $13x_1 + 10x_2^+ - 10x_2^- + x_5 = 130$
- $x_1, x_2^+, x_2^-, x_3, x_4, x_5 \geq 0$

## V. OPTIMIZATION MODELS REVIEW

### A. Scheduling

Nell'ambito dei problemi dello scheduling abbiamo degli elementi ben specificati:

- **task/job** già assegnati
- **n macchine/processori**
- potremmo attrezzare le macchine con dei **tools**

Intendiamo **allocare i tasks alla macchine in "overtime"** quindi capire anche la **fascia temporale nella quale eseguire il task**. Potrebbe esserci un unico tempo di esecuzione oppure un task può avere dei tempi di esecuzione differenti su macchine differenti.

L'output sarà un diagramma di Ganth.

**I task possono avere degli istanti di rilascio** dove non potrebbe essere rilasciato dopo un certo istante di tempo (**ready time**).

Possono esserci delle **relazioni di precedenza tra i tasks**. Quindi non posso effettuare un task se prima non ho concluso l'altro.

Il diagramma mi dice nel tempo a che macchina è associato quale task ed in quali intervalli di tempo e con quale tool.

### B. Project scheduling

Per progetto intendiamo un **insieme di tasks che sono realizzati al fine di raggiungere un goal**. La caratteristica di un progetto è che nel complesso le attività non sono mai state eseguite in precedenza.

Le **caratteristiche di un progetto** sono:

- **durata delle attività** che nota
- **ha a capo un Project Manager**: responsabile del progetto e dei tempi di realizzazione, costi di produzione, ecc...

Un progetto è **rappresentato da diverse attività** in una tabella fornita dal Project Manager:

Attività	Durata stimata $d_i$	Predecessori
1	10	-
2	10	-
3	10	1
4	10	1, 2

Tabella IV

TABELLA DI ORE DI LAVORO E PREDECESSIONI DELLE ATTIVITÀ

e in un diagramma aciclico (Activity On Node (AoN)):

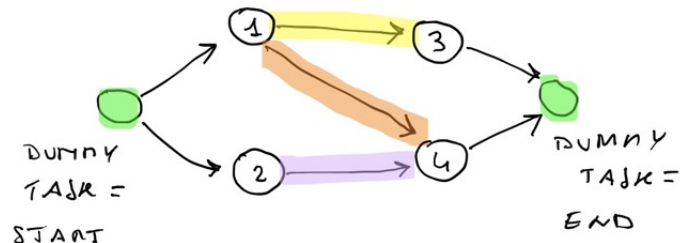


Figura 11. Diagramma Activity On Node

dove abbiamo degli "archi" che rappresentano le predecessioni. Avremo anche dei **vertici fittizi**:

- start: lo colleghiamo tutte le attività che non hanno predecessori
- end: ci colleghiamo tutte le attività finali

Una funzione fondamentale del Project Manager è la possibilità di accelerare alcune attività agendo su:

- **Variabili decisionali**: nel nostro caso, è lo **start time**  $s_i$ . Ipotizziamo che il progetto inizi al tempo  $t = 0$ , quindi per ogni task abbiamo che:

$$s_i \geq 0 \quad \forall \quad i \in TASKS$$

In più possiamo definire  **$T \geq 0$  tempo di completamento del progetto (completion time)**.

Minimizziamo il completion time:

$$\min z = T$$

con  $z = 1T + 0s_1 + 0s_2 + \dots + 0s_n$

- **relazioni di precedenza**: relazioni che portano alcuni nodi a dipendere da altri:

$$p_{ij} = \begin{cases} 1 & \Leftrightarrow i \in j \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

con  **$p_{ij}$  matrice** costate e binaria:

$$p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- **vincoli di precedenza**: Sia  **$T$  maggiorante del tempo di completamento delle task**:

$$s_i + d_i \leq T$$

allora:

$$p_{ij}(s_i + d_i) \leq s_j \quad \forall \quad i, j \in TASKS$$

Possiamo avere che:

- **$p_{ij} = 1$** : allora  $i$  è **predecessore di**  $j$  quindi il tempo di inizio del task  $j$  deve essere successivo o uguale al task  $i$  cioè  $s_i + d_i$
- **$p_{ij} = 0$** :  $i$  non è predecessore quindi avremo  $0 \leq s_j$  allora il vincolo è ridondante

scriviamo allora:

$$s_i + d_i \leq s_j \quad \forall \quad i, j \in TASKS, p_{ij} \geq 0$$

### C. Esempio

Un modello espanso per problemi di istanza:

1) funzione obiettivo:  $\min z = T$

2) vincoli:

- $s_1 + 10 \leq T$
- $s_2 + 10 \leq T$
- $s_3 + 10 \leq T$
- $s_4 + 10 \leq T$
- $s_1 + 10 \leq s_3 (p_{13} = 1)$
- $s_1 + 10 \leq s_4 (p_{14} = 1)$
- $s_2 + 10 \leq s_4 (p_{24} = 1)$
- $s_1, s_2, s_3, s_4 \geq 0$
- $T \geq 0$

### D. Velocizzazione del progetto

Il Project Manager ha un **budget** per poter velocizzare il progetto.

Se considero un **task  $i$  con durata non costante ( $d_i^N$ )**, avremo un valore nominale che dipende da un budget extra.

Il più semplice è l'**andamento lineare** dove all'aumentare delle risorse la durata si riduce in modo lineare. Il che è vero finché non si incontra un **vincolo inferiore  $d_i^m$** .

Le **3 risorse** alle quali si possono far riferimento sono le **3M**:

- Man
  - Machine
  - Money
- quindi  $d_i = d_i^N$ .

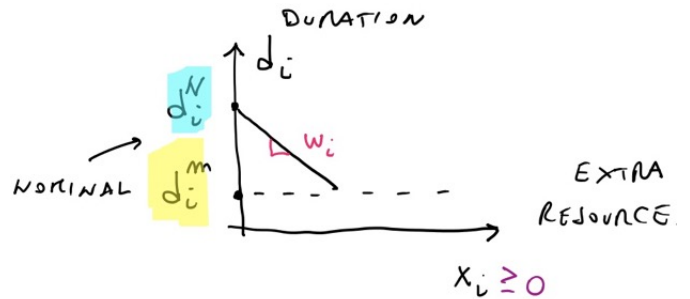


Figura 12. Diagramma budget

con:

- **pendenza  $w$** : riduzione della durata del task  $i$  per unità di extra risorse (mesi di lavoro / k euro)
- $d_i = d_i^N - w_i x_i \geq d_i^m$  vincolo del valore minimo per task
- $x_i$ : denaro usato per il task  $i$
- $B$ : budget totale

### E. Esempio velocizzazione progetto

Avremo un modello con:

1) funzione obiettivo:  $\min z = T$

2) vincoli:

- $s_i + d_i^N - w_i x_i \leq T \quad \forall i \in TASKS$
- $s_i + d_i^N - w_i x_i \leq s_j \quad \forall i, j \in TASKS, p_{ij} = 1$
- $d_i^N - w_i x_i \geq d_i^m \quad \forall i \in TASKS$
- $\sum_{i \in TASKS} x_i \leq B$
- $T \geq 0$
- $s_i \geq 0 \quad \forall i \in TASKS$
- $x_i \geq 0 \quad \forall i \in TASKS$

#### F. Low sizing models

Sono in genere usati da aziende manifatturiere.



Figura 13. Processo produttivo

Supponendo di avere un **tasso di domanda  $d$**  costante in base al tipo di prodotto. Ogni tipo di prodotto si differenzia dagli altri con una piccola modifica come può essere un differente gusto per una produzione di yogurt.

Questa differenziazione porta ad un **costo di setup** delle macchine che andranno pulite, generando un costo fisso  $k$ .

Il livello di scorte sarà rappresentato con dei picchi con ampiezza  $q$ :

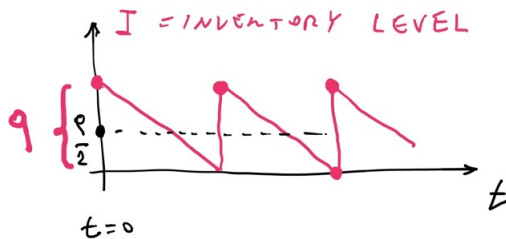


Figura 14. Livello di inventario

avendo una domanda costante, avremo una diminuzione lineare nello scorte di magazzino.

Ovviamente avremo dei **costi medi di stockaggio  $h$**  dato che le scorte si "muoveranno" scambiandosi con altre scorte che entrano nel magazzino. Quindi andremo a calcolare il costo in base alla giacenza del **numero di scorte medie  $\frac{q}{2}$** .

In base alla strategia avremo:

1) **caso estermo:**

gestione di tipo **just in time** dove **produco solo sotto commissione del cliente**.

Avremo quindi:

- **livello di scorte molto basso** con un livello medio delle scorte molto basso e dei **costi di stockaggio bassi**
- **maggioramento dei costi del setup**
- **pago  $k$  più volte durante l'anno**

2) **caso produzione annua:**

si produce un **quantitativo pari alla domanda annua**.

Avremo quindi:

- **grandi costi di stockaggio**
- **pago  $k$  solo una volta all'anno**

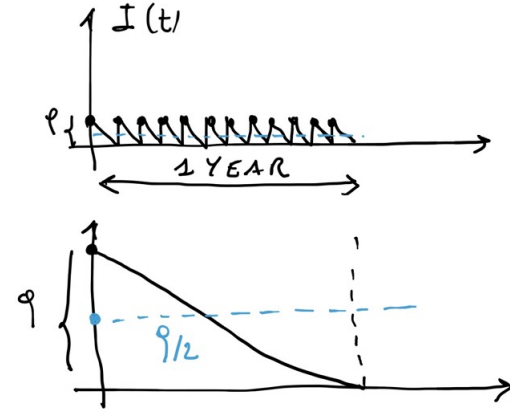


Figura 15. Casi particolari

#### G. Scrivere il modello di ottimizzazione

Le fasi da seguire prevedono la scrittura di:

- 1) **variabili decisionali:** variabile matematica per descrivere la mia decisione
- 2) **funzione obiettivo:** costo totale annuale composto dal **costo di scorta e quello di setup**

Avremo allora:

$$z = k \frac{d}{q} + h \frac{q}{2}$$

Per la **soluzione ottima**, faccio il gradiente:

$$\frac{dz}{dq} = 0 \Leftrightarrow -k \frac{d}{q^2} + \frac{h}{2} = 0$$

Concludiamo che il **lotto economico**, per minimizzare i costi, sarà raggiunto da:

$$q^* = \sqrt{\frac{2kd}{h}}$$

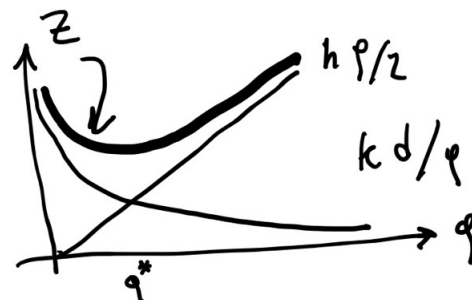


Figura 16. Caso di lotto economico

Questo modello **nella pratica ha dei limiti** dati i possibili vincoli come:

- spazio limite di un magazzino
- produzione di più prodotti contemporaneamente
- vincolo di immobilizzo
- vincolo sul capitale
- ecc ...

Associati al vincolo di immobilizzo possiamo avere anche un **limite nei prodotti che posso fare di A e di B**. Se si ipotizza una domanda costante, ho che il **costo totale annuale  $z$**  sarà data dal costo annuale di A e di B:

$$z = (k_A \frac{d_A}{q_A} + h_A \frac{q_A}{2}) + (k_B \frac{d_B}{q_B} + h_B \frac{q_B}{2})$$

Avremo che  $z$  è dato da 2 termini uno che dipende da A ed uno da B. Per noi supponiamo che  $k_A = k_B = k$ .

Di conseguenza anche i lotti di approvvigionamento possono essere diversi. Quindi, quando è necessario, avremo che dovremo **decidere quante confezioni produrre di A e quante di B**.

Nel **caso peggiore ipotizzo che la produzione contemporanea di 2 lotti**, quindi non dovrà superare la capacità di magazzino  $Q$ :

$$q_A + q_B \leq Q \quad \forall \quad q_A, q_B \geq 0$$

dove la produzione contemporanea indica la **sovrapposizione dei denti di sega**.

Se la **capacità del magazzino è minore del lotto economico**, la soluzione ottima sarà la nostra capacità e non più  $q^*$ .

Per il **vincolo del capitale**, indiciamo con  $c_A$  e  $c_B$  il valore di un singolo prodotto di A e B allora:

$$c_A q_A + c_B q_B \leq C$$

con  $C$  capitale massimo.

Dal **punto di vista grafico** avremo 2 variabili  $q_A$  e  $q_B$  con dei vincoli sono di tipo lineare:

$$q_A + q_B \leq Q \quad c_A q_A + c_B q_B \leq C$$

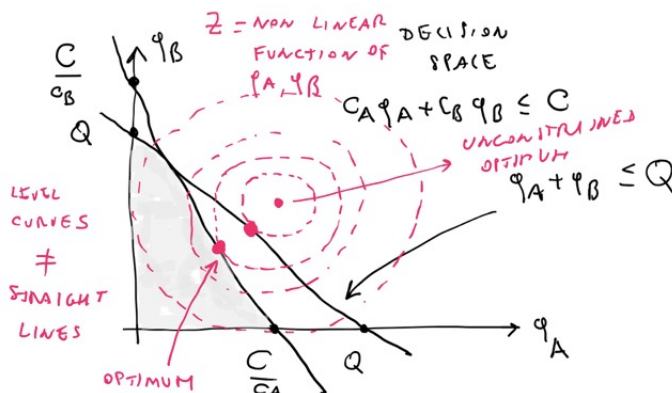


Figura 17. Grafico con linee di livello non lineari

La **funzione obiettivo non è lineare** dato che  $q_A$  e  $q_B$  sono al denominatore. Le **curve di livello non sono delle rette** ma saranno concentriche (su ognuna il costo è sempre costante).

Avremo una **soluzione ottima dalla curva di livello tangente all'insieme di ammissibilità**. Si vado allora a prendere le curve peggiori fino ad arrivare a quella che interseca la regione ottima.

#### H. Algoritmo del simplesso

Ogni problema di ottimizzazione lineare si può **trasformare in forma standard**. Prendiamo un f.o.:

$$\min z = \underline{c}^T \underline{x}$$

e dei vincoli:

- $\underline{A} \underline{x} = \underline{b}$
- $\underline{x} \geq 0$
- $n > m$

con  $n$  righe e  $m$  colonne delle matrice  $\underline{A}$ .

Utilizziamo l'**operazione di Pivot**, quindi il vincolo:

$$\underline{A} \underline{x} = \underline{b}$$

sarà:

$$\begin{bmatrix} 4 & 1 & 5 & 7 \\ 2 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 10 \end{bmatrix}$$

Il Pivot che ci viene assegnato è:

$$(r, s) = (1, 3)$$

alla quale coordinata corrisponde il valore della prima riga e terza colonna: 5.

Dai dati **creiamo un sistema di eq lineari**:

$$\begin{cases} 4x_1 + x_2 + 5x_3 + 7x_4 = 10 \\ 2x_1 + 3x_2 + 2x_3 + 1x_4 = 10 \end{cases}$$

Per eseguire l'operazione di Pivot andremo a far sì che **in corrispondenza della colonna di Pivot ( $s$ ) ci sia solo un vettore unitario**:

$$\begin{bmatrix} ? & ? & 1 & ? \\ ? & ? & 0 & ? \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ? \\ ? \end{bmatrix}$$

Gli steps da seguire sono:

1) facciamo  $\frac{r}{a_{rs}}$ , con:

- $r$ : riga Pivot
- $a_{rs} \neq 0$ : valore che si trova dal Pivot, nel nostro caso 5

Diremo quindi che:

$$a_{rj} = \frac{a_{rj}}{a_{rs}} \quad \forall \quad j = 1, \dots, n+1$$

$$\begin{bmatrix} \frac{4}{5} & \frac{1}{4} & 1 & \frac{7}{5} \\ ? & ? & 0 & ? \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ ? \end{bmatrix}$$

2) per ogni riga non Pivot  $i \neq r$  applichiamo il principio di equivalenza per eq non lineari:

$$\text{riga } i = \text{riga } i + (-a_{is}) * \text{nuova riga } r$$

in questo caso andiamo a sommare  $-2$  in modo da avere la configurazione  $(1, 3) = 1$  e  $(2, 3) = 0$ .

Diremo quindi che:

$$a_{ij} = a_{ij} + (-a_{is})a_{rj} \quad \forall \quad i = 1, \dots, m; \quad i \neq r$$

col 1	col 2	col 3	col 4	ris
2	3	2	1	10 +
$-\frac{8}{5}$	$-\frac{2}{5}$	-2	$-\frac{14}{5}$	-4 =
$\frac{2}{5}$	$\frac{13}{5}$	0	$-\frac{9}{5}$	6

quindi abbiamo:

$$\begin{bmatrix} \frac{4}{5} & \frac{1}{4} & 1 & \frac{7}{5} \\ \frac{2}{5} & \frac{13}{5} & 0 & -\frac{9}{5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 6 \end{bmatrix}$$

### I. Tableau

Possiamo quindi riscrivere la forma standard con il Tableau con una **forma tabellare** del tipo:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \frac{A}{c^T} \\ 0 \end{bmatrix}$$

dove  $m$  righe e  $n$  colonne.

I nostri problemi hanno variabili continue dove usando l'algoritmo del simplesso avremo come **forma generale**:

$$\min c_1 x_1 + \dots + c_n x_n$$

per i vincoli invece:

- $a_{11}x_1 + \dots + a_{an}x_n = b_1$
- ...
- $a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n = b_m$
- $x_1, \dots, x_n \geq 0$

**Assumiamo che:**

1)  $n > m$

2)  $\text{rank}(\bar{A}) = n$

così **non avremo vincoli ridondanti**.

Applichiamo poi la definizione di **insieme di base  $B$**  (con  $\underline{x}_B \in R^m$ ) ed **insieme non di base  $N$**  (con  $\underline{x}_N \in R^{n-m}$ ).  
quindi avrò che:

$$\underline{x} = (\underline{x}_B, \underline{x}_N)$$

allora:

$$\underline{A} = [\underline{B} | \underline{N}]$$

Se la matrice  **$B$  non è singolare** posso ricavare una **soluzione** imponendo

$$\underline{x}_N := 0$$

Per le **variabili  $B$**  avremo:

$$\underline{B} \underline{x}_B = \underline{b} \rightarrow \underline{x}_B = \underline{B}^{-1} \underline{b}$$

sarà anche **ammissibile se  $\geq 0$**

Tutto questo grazie al **teorema fondamentale** che dice:

- 1) se un problema ha **soluzione ammissibile**, allora almeno una è **di base**.
- 2) se **ammette soluzioni ottime**, c'è n'è almeno **una di base**

Le soluzioni di base sono quindi più comode dato che sono più piccole in un insieme  $R^n$  di soluzioni non ammissibili, ammissibili e ottime.

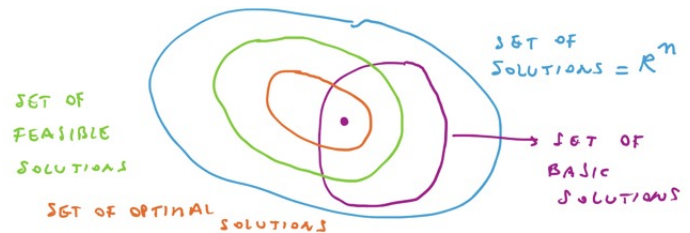


Figura 18. Insiemi delle soluzioni

Capiamo allora che i **modi per poter scegliere  $\underline{x}_B$**  saranno dati dal numero di combinazioni di  $n$  elementi di classe  $m$ :

$$\binom{n}{m} = \frac{n!}{m!(n-m)!}$$

### J. Esempio Tableau

Funzione obiettivo:

$$\min z = 2x_1 + 3x_2 + 4x_3 - 5x_4$$

vincoli:

- $x_1 - x_2 + x_3 + 2x_4 = 3$
- $2x_2 + x_4 = 7$
- $x_1 + 2x_3 = 10$
- $x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$

Supponiamo:  $m = 3$  e  $n = 4$ .

e scegliamo sull'insieme di tutte le variabili, combinazioni lineari di tanti numeri quante sono le equazioni. Prendiamo per esempio:

- $\underline{x}_B = (x_1, x_3, x_4)$
- $\underline{x}_N = (x_2)$

Andiamo allora a prendere i termini delle variabili e a inserirli in  $A$ :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

Dalla f.o. troviamo:

$$c^T = (2, 3, 4, -5)$$

Andremo poi a distribuire a ogni matrice i suoi dati:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$c_B = (2, 4, -5)$$

$$N = \begin{bmatrix} -1 \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

nel nostro caso c sarà:

$$c_N = (3)$$

possiamo allora riscrivere come:

$$\min c_B^T x_B + c_N^T x_N$$

#### K. Forma canonica

Con le operazioni Pivot poniamo il problema in forma canonica rispetto a una base:

$$\begin{bmatrix} 2 & 1 & 4 & -2 & 10 \\ 1 & 2 & 4 & 2 & 10 \\ 10 & 10 & -2 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

dove:

- **vincoli** (prime righe):

$$2x_1 + x_2 + 4x_3 - 2x_4 = 10$$

$$x_1 + 2x_2 + 4x_3 - 2x_4 = 10$$

- **funzione obiettivo** (ultima riga):

$$10x_1 + 10x_2 - 2x_3 + 2x_4 + (-z) = 0$$

quindi la **funzione obiettivo** è:

$$\min z = 10x_1 + 10x_2 - 2x_3 + 2x_4 + 0$$

e avrà ovviamente tutte le variabili  $\geq 0$ .

Se effettuiamo un'operazione di Pivot su  $(0, 3)$ :

$$\begin{bmatrix} -1 & -0.5 & -2 & 1 & -5 \\ 3 & 3 & 8 & 0 & 20 \\ 12 & 11 & 2 & 0 & 10 \end{bmatrix}$$

ed un'altra operazione di Pivot su  $(1, 1)$ :

$$\begin{bmatrix} -0.5 & 0 & -0.6 & 1 & -1.6 \\ 1 & 1 & 2.6 & 0 & 6.6 \\ 1 & 0 & -27.6 & 0 & -63.3 \end{bmatrix}$$

Il sistema vincolare è risolto per  $x_2$  e  $x_4$  dato che sono quelle scelte dal Pivot. Poniamo poi  $x_1, x_3 := 0$  ed avremo:

$$x_4 = -1.6, x_2 = 6.6$$

quindi avremo una **soluzione base**:

$$\underline{x} = (0, 6.6, 0, -1.6)$$

Questa soluzione è **inammissibile** perché  $x_4 \leq 0$  quindi non è Basic Feasible Solution (BFS).

Per esprimere la forma canonica diciamo che gli **indici di colonna delle variabili di B e N** sono:

$$I_B = \langle 1, 3 \rangle$$

$$I_N = \langle 0, 2 \rangle$$

possiamo dire la **posizione delle variabili in base alle equazioni** con:

$$\beta(0) = 3$$

$$\beta(1) = 1$$

Una forma canonica mi dà una **soluzione base** andando a porre le **variabili non di base = 0** e trovando quelle di base.

Il **valore in basso a destra del Tableau** rappresenta il valore:

$$z = x_1 - 27.3x_3 + 63.3$$

dove essendo  $x_1$  e  $x_3$  non di base:

$$\bar{z} = 63.3$$

quindi rappresenta il **valore della soluzione di base associato a questa forma canonica**.

#### L. Generalizzazione forma canonica

Generalizzando avrò come **funzione obiettivo**:

$$\min z = \sum_{j \in I_N} \bar{c}_j x_j + \bar{z}$$

e con **vincoli**:

$$x_{\beta(i)} + \sum_{j \in I_N} \bar{a}_{ij} x_j = \bar{b}_i \quad \forall \quad i = 0, \dots, m-1$$

con ovviamente  $x_j \geq 0, j \in J_N \cup J_B$

L'**equazione di base associata** sarà:

$$x_j := 0 \quad \forall \quad j \in J_N$$

$$x_{\beta(i)} = \bar{b}_i \leq 0 \quad \forall \quad i = 0, \dots, m-1$$

Avremo la **forma generale** quando è  $\leq$  e  $\bar{b} \geq 0$ .

Per il **test di ottimalità in forma canonica**:

$$\min z = \sum_{j \in I_N} \bar{c}_j x_j + \bar{z}$$

il che significa che per  $\underline{x}$  la soluzione ammissibile sarà:



$$z(\underline{x}) = \sum_{j \in I_N} \bar{c}_j x_j + \bar{z}$$

allora se  $\bar{c}_j \geq 0$  avremo una forma ottimale, dato che  $z(\underline{x}) \geq \bar{z}$

Se parto dalla soluzione di base ammissibile e prendo una variabile fuori base rendendola positiva, la funzione obiettivo varia in base alla relazione:

$$z = \sum_{j \in J_N} \bar{c}_j \dots (\text{slide})$$

cioè  $x_j = 0 \rightarrow 1$

Avremo quindi che la variazione della funzione obiettivo è uguale al coefficiente di posto ridotto  $\bar{c}_j$ :  $\Delta z = \bar{c}_j$ .

Riusciamo così a diminuire  $z$  il che ci piace perché stiamo minimizzando.

Se il test di ottimalità fallisce perché esiste una variabile di base con coefficiente di costo ridotto negativo potremo avere 2 situazioni:

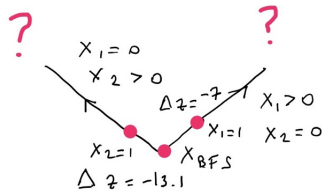


Figura 19. Soluzioni per ottimalità

Se ho più variabili di base negative allora devo capire quale delle due devo perturbare, cioè rendere  $> 0$ , e la scegliamo con un "euristica" che è una scelta algoritmica basata sull'intuizione e info pregresse.

Sceghieremo come variabile, detta variabile entrante, quella con coefficiente di costo più negativo:

$$x_s = \min_{j \in I_N} \bar{c}_j$$

quindi se  $\Delta z = \bar{c}_s x_s$

Se dobbiamo minimizzare avremo l'interesse e far raggiungere a  $x_s$  il valore più elevato possibile dato che ci sarà un miglioramento.

Applichiamo un vincolo sul massimo valore che  $x_s$  può raggiungere:

$$x_s = 0 \rightarrow > 0$$

$$x_j = 0 \quad \forall \quad j \in I_N, \quad j \neq s$$

allora avremo:

$$\min z = \bar{c}_s x_s + \bar{z}$$

con vincoli:

- $x_{\beta(i)} + \bar{a}_{is} x_s = \bar{b}_i \quad \forall \quad i = 1, \dots, m$
- $x_j \geq 0 \quad \forall \quad j = 1, \dots, m$

avremo quindi che  $x_s$  cresce fino al non superamento dei vincoli:

$$x_{\beta(i)} = \bar{b}_i - \bar{a}_{is} x_s \geq 0$$

A questo punto avremo 2 casi possibili:

1) avremo:

$$\bar{a}_{is} \leq 0 \quad \forall \quad i = 1, \dots, m$$

allora:

$$x_{\beta(i)} \geq 0 \quad \forall \quad x_s \rightarrow +\infty$$

con:  $z \rightarrow -\infty$

2) avremo:

$$\exists i : \bar{a}_{is} > 0$$

per calcolare il massimo valore che  $x_s$  può assumere è dato da:

$$\begin{aligned} -\bar{a}_{is} x_s &\geq -\bar{b}_i \\ \Rightarrow x_s &\leq \frac{\bar{b}_i}{\bar{a}_{is}} \quad \forall \quad i = 1, \dots, m; \quad \bar{a}_{is} > 0 \end{aligned}$$

di conseguenza i valori con  $\bar{a}_{is}$  negativo non ci danno problemi dato che  $x_{\beta(i)}$  sarà positivo lo stesso e poi avremo che che:

$$x_s = \min \frac{\bar{b}_i}{\bar{a}_{is}} \quad \forall \quad i = 1, \dots, m; \quad \bar{a}_{is} > 0$$

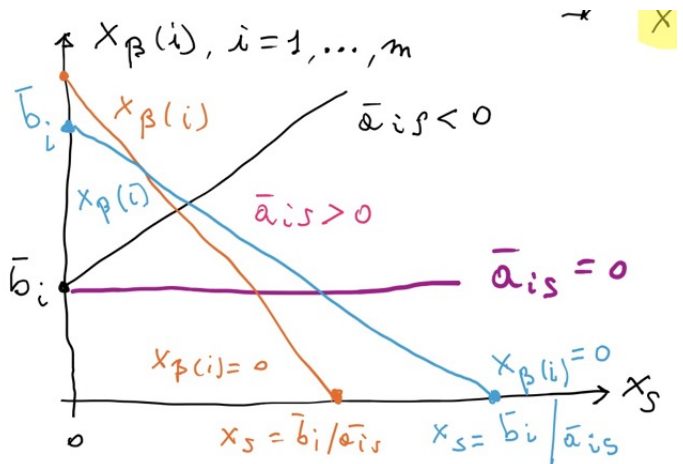


Figura 20. Possibilità con i valori di  $\bar{a}_{is}$

Per  $\bar{a}_{is} > 0$  avremo che ad un certo punto  $x_s$  arriverà a 0. Ma potrebbe capitare che ci sia un'altra variabile che diventi 0 prima, per un valore inferiore di  $x_s$ .

Per esempio se abbiamo una f.o.:

$$\min z = -10x_1 - 10x_2 + 0$$

vincoli:

- $2x_1 + x_2 + x_3 = 10$
- $x_1 + 2x_2 + x_4 = 10$
- $x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$

BFS:

- $x_1 = x_2 = 0$
- $x_3 = 10$
- $x_4 = 10$
- $\hat{z} = 0$

allora:

$$x_s = \operatorname{argmin}(-10, -10) = x_1$$

annullando  $x_2, x_3, x_4$ :

$$x_2 \leq \min\left(\frac{10}{2}, \frac{10}{1}\right) = 5$$

il che significa che  $x_s = x_1$ , ed abbiamo:

$$x_3 = 10 - 2x_1 \geq 0$$

$$x_4 = 10 - x_1 \geq 0$$

allora abbiamo:

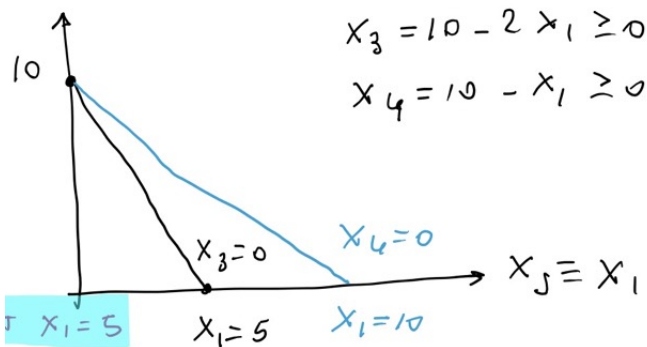


Figura 21. Permutazione di  $x_1$

Dopo la nostra perturbazione  $x_1 = 0 \rightarrow 5$  e  $x_3 = 10 \rightarrow 0$ , per determinare quale sia la **variabile, detta variabile uscente, che si annulla per prima**:

$$x_r = \operatorname{argmin}\left(\frac{10}{2}, \frac{10}{1}\right) = x_3$$

**Pseudocodice** dell'algoritmo del simplesso:

trovo la prima **BFS**

while  $\exists \bar{c}_j < 0 \quad \forall j \in I_N$ :

trovo **argmin per "c" del Pivot**:  $x_s = \operatorname{argmin}_{j \in I_N} \bar{c}_j$

if  $\bar{a}_{is} \leq 0$ :

abbiamo un problema unbounded

trovo **argmin per "r" del Pivot**:  $x_s =$

$$\operatorname{argmin}_{i=1, \dots, m} \frac{\bar{b}_i}{\bar{a}_{is}}$$

eseguo il **Pivot**

se trovo una soluzione di base ammissibile ottima faccio

un **analisi per capire se e' unica** o meno

M. Esercizio forma canonica

Funzione obiettivo:

$$\max z = 10x_1 + 10x_2$$

vincoli:

- $2x_1 + x_2 \leq 10$
- $x_1 + 2x_2 \leq 10$
- $x_1, x_2 \geq 0$

gradiente:

$$\nabla z = \begin{bmatrix} 10 \\ 10 \end{bmatrix}$$

grafico:

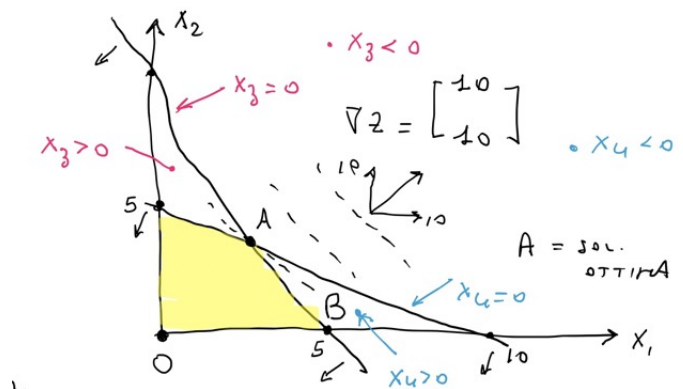


Figura 22. Graficazione dei vincoli

Forma standard:

$$\min z = -10x_1 - 10x_2$$

vincoli:

- $2x_1 + x_2 + x_3 = 10$
- $x_1 + 2x_2 + x_4 = 10$
- $x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$

avremo che:

- $A = (3.\bar{3}, 3.\bar{3}, 0, 0)$
- $B = (5, 0, 0, > 0)$
- $O = (0, 0, > 0, > 0)$

dove nei vertici abbiamo **2 variabili > 0**. Quindi ad ogni vertice abbiamo una BFS con **cardinalita' 1 : M**.

Tableau:

$$\begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 0 & 10 \\ 1 & 2 & 0 & 1 & 10 \\ -10 & -10 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

con **variabili** in base  $B$  e non in base  $N$ :

- $J_B = \{x_3, x_4\}$
- $J_N = \{x_1, x_2\}$

BFS:

- $x_1 = x_2 = 0$

- $x_3 = 10$
- $x_4 = 10$
- $\bar{z} = 0$

Il **test di ottimalità** fallisce e quindi possiamo avere una soluzione migliore. Applico l'**euristica del valore di costo ridotto**. Sceglio a caso  $x_s = x_1$ .

Prendiamo la **colonna  $x_1$**  e in base al **valore unitario** presente in  $x_3$  e  $x_4$  allora avremo:

$$\min\left(\frac{10}{2}, \frac{10}{1}\right) = 5$$

**non posso avere che  $x_3 > 5$**  dato che si deve fermare per non diventare negativo, cioè non ammissibile, dato che superiamo in punto  $B$ .

Allora dato che  **$x_3 = 0$  e  $x_1$  prende il suo posto** avremo che le **variabili di base cambiano** in:

$$J_B = \langle x_1, x_4 \rangle$$

Dobbiamo allora effettuare un'**operazione di Pivot**:

- divido per 2 la riga 1:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 & 0 & 5 \\ 1 & 2 & 0 & 1 & 10 \\ -10 & -10 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- multiplico per  $-1$  la prima riga e poi sommo alla seconda:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 & 0 & 5 \\ 0 & 1.5 & -0.5 & 1 & 5 \\ -10 & -10 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- multiplico per  $-10$  la prima riga e poi sommo alla terza:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 & 0 & 5 \\ 0 & 1.5 & -0.5 & 1 & 5 \\ 0 & -5 & 5 & 0 & 50 \end{bmatrix}$$

allora abbiamo che la **soluzione di base ammissibile** (BFS) è:

- $x_2 = x_3 = 0$
- $x_1 = 5$
- $x_4 = 5$
- $\bar{z} = -50$

Nuovamente il test di **ottimalità** fallisce per la presenza di  $-5$ , quindi la variabile entrante è  $x_s = x_2$  quindi:

$$x_r = \operatorname{argmin}\left(\frac{5}{0.5}, \frac{5}{1.5}\right) = x_4$$

il che corrisponde a stare in  $B$  dove  $x_2 = 0$ , quindi ci spostiamo in direzione di  $A = (> 0, > 0, 0, 0)$ . Avremo allora:

$$J_B = \langle x_1, x_2 \rangle$$

dato che abbiamo  **$x_2$  entrante e  $x_4$  uscente**.

Il perno del nuovo **Pivot** sarà 1.5:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.6 & -0.3 & 3.3 \\ 0 & 1 & -0.3 & 0.6 & 3.3 \\ 0 & 0 & 3.3 & 3.3 & 66.6 \end{bmatrix}$$

avremo allora:

- $x_3 = x_4 = 0$

- $x_1 = 3.\bar{3}$
- $x_2 = 3.\bar{3}$
- $\bar{z} = -66.\bar{6}$

dove abbiamo ottenuto una **soluzione ottima**.

#### N. Soluzioni ottime multiple

Per individuarle ricordiamo che esiste una soluzione ottima se:

$$\bar{c}_j \geq 0$$

**esistono soluzioni multiple** se esiste  $j^* \in J_N$  e quindi se ha:

- **coefficienti di costo** ridotti  $> 0$
- coefficienti delle **variabili non di base** sono  $> 0$

allora **almeno uno sarà  $= 0$** . Facendo il solito ragionamento prendo una variabile  $x_{j^*} = 0 \rightarrow > 0$ , allora avrò che:

$$\Delta z = \bar{c}_{j^*} x_{j^*} = 0$$

#### O. Esempio soluzioni ottime multiple

Funzione obiettivo:

$$\max z = 20x_1 + 10x_2$$

vincoli:

- $2x_1 + x_2 \leq 10$
- $x_1 + 2x_2 \leq 10$
- $x_1, x_2 \geq 0$

gradiente:

$$\nabla z = \begin{bmatrix} 20 \\ 10 \end{bmatrix}$$

grafico:

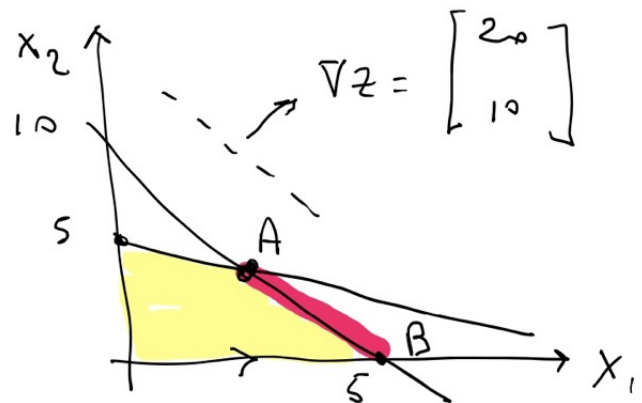


Figura 23. Graficazione dei vincoli

tableau:

$$\begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 0 & 10 \\ 1 & 2 & 0 & 1 & 10 \\ -20 & -10 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

BFS:

- $x_1 = x_2 = 0$
- $x_3 = 10$
- $x_4 = 10$
- $\bar{z} = 0$

Usiamo le operazioni di Pivot:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 & 0 & 5 \\ 0 & 1.5 & -0.5 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 100 \end{bmatrix}$$

BFS:

$$B = \begin{cases} x_2 = x_3 = 0 \\ x_1 = 5 \\ x_4 = 5 \\ \bar{z} = -100 \end{cases}$$

Il test di ottimalità sulle variabili non di base  $J_N = \{x_2, x_3\}$  è OK, ma non è una soluzione unica dato che abbiamo 0 per  $x_2$  che andrà perturbata assegnandole un valore  $> 0$ . Allora la variazione della funzione obiettivo per una perturbazione è:

$$\bar{c}_{j*} x_{j*} \quad \forall \quad \bar{c}_{j*} = 0, x_{j*} > 0$$

allora lungo lo spigolo  $\overline{AB}$  avremo un costo minimo. Forziamo il Pivot in  $x_2$  facendo uscire  $x_4$ :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.6 & -0.3 & 3.3 \\ 0 & 1 & -0.3 & -0.6 & 3.3 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 100 \end{bmatrix}$$

BFS:

$$A = \begin{cases} x_3 = x_4 = 0 \\ x_1 = 3.3 \\ x_2 = 3.3 \\ \bar{z} = -100 \end{cases}$$

Abbiamo generato i due punti estremi A e B riuscendo ad avere infinite soluzioni ottime dato che ci muoveremo nel segmento  $\overline{AB}$ . Al massimo potremmo essere:

$$\begin{pmatrix} n \\ m \end{pmatrix}$$

#### P. Algoritmo della convergenza

Abbiamo che se  $c_s$  è la variabile entrante allora il costo è dato dalla relazione:

$$\Delta z = \bar{c}_s \min_{i=1, \dots, m} \frac{\bar{b}_i}{\bar{a}_{is}} \quad \forall \quad \bar{a}_{is} > 0$$

$$\text{con } \bar{c}_s < 0 \text{ e } \min_{i=1, \dots, m} \frac{\bar{b}_i}{\bar{a}_{is}} \geq 0$$

L'algoritmo del simplesso si comporta in modo decrescente e ad ogni iterazione genera una nuova BFS. Se ad ogni iterazione  $\Delta z < 0$  vuol dire che avremo come casi sfavorevoli:

- $\min < 0$ : l'algoritmo visita tutte le BFS
- $\min = 0$ : uno dei numeratori è nullo

Se abbiamo che  $x_s = 0$  esisterà un termine noto  $\bar{b}_i = 0$  per  $\bar{a}_{is} > 0$ .

Avremo allora che se non abbiamo variazioni di  $z$  allora non ci sarà un miglioramento, dato che l'algoritmo è deterministico genererà la stessa sequenza all'infinito. Questo fenomeno è detto cycling e avremo che l'algoritmo non converge.

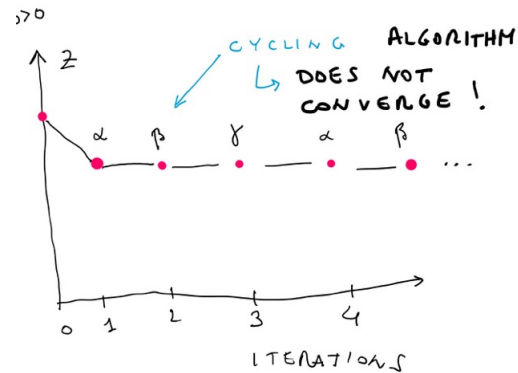


Figura 24. Cycling algorithm result

Potrebbe anche capitare di avere un miglioramento dopo  $n$  iterazioni.

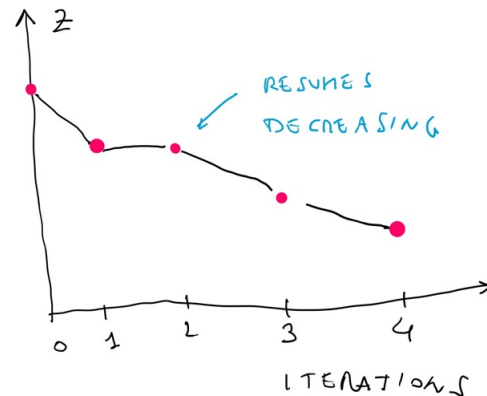


Figura 25. Not cycling algorithm result

#### Q. Esempio BFS degenera

Funzione obiettivo:

$$\max z = 10x_1 + 10x_2$$

vincoli:

- $x_1 - x_2 \leq 0$
- $x_2 \leq 1$
- $x_1, x_2 \geq 0$

grafico:

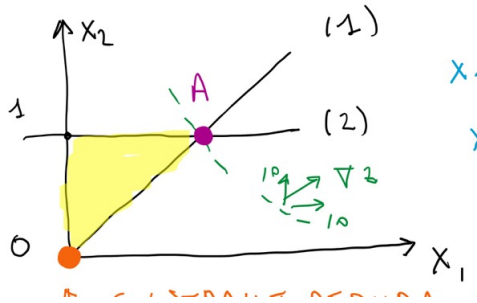


Figura 26. Grafico di un sistema inizialmente degenere

tabelau:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ -10 & -10 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

dove  $\Delta z = 0 * x_1 = 0 * 0 = 0$

Notiamo di avere una variabile in base = 0 che sarà detta **variabile degenera**. Dato che abbiamo dei termini negativi, nell'ultima riga, allora **prendiamo quello con numero più' negativo**, in questo caso anche con l'**indice più' negativo**  $x_s = x_1$ , allora:

$$x_r = \operatorname{argmin}\left(\frac{0}{1}\right) = x_3$$

con  $x_1 \leq \min\left(\frac{0}{1}\right) = 0$

Notiamo che abbiamo preso  $x_3$  dato che **in corrispondenza del numero più' grande** abbiamo il valore unitario della colonna di  $x_3$ .

Abbiamo un'altra soluzione degenera quindi ci troviamo su un **plateau**. Graficamente abbiamo che  $x_1$  rimane 0 nel punto (0,0), avremo allora che nel segmento  $\overline{OA}$  ci sarà un **numero ridondante e superfluo di vincoli**.

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & -20 & 10 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Dove seguendo i motivi detti prima avremo  $x_s = x_2$ , allora:

$$x_r = \operatorname{argmin}\left(\frac{1}{1}\right) = x_4$$

con  $x_2 \leq \min\left(\frac{1}{1}\right) = 1$

Abbiamo quindi che:

$$\Delta z = -20 * x_2 = -20 * 1 = -20$$

prendendo come perno il valore più alto della colonna  $x_2$  avremo un miglioramento:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 10 & 20 & 20 \end{bmatrix}$$

quindi con  $\Delta z = -20$ .

### R. Regola dell'anticycling: Bland rule

Possiamo **evitare di avere variabili degeneri** usando la Bland Rule. Andremo semplicemente, **a parità' di valore**, a prendere quello con **indice più' negativo**. Quindi in:

### S. Variabili artificiali

Iniziamo aggiungendo **ad ogni vicolo** una variabile artificiale:

$$\sum_j a_{ij}x_j + \alpha_i = b_i \quad \forall \quad i = 1, \dots, m$$

con  $\alpha_i \geq 0 \quad \forall \quad i = 1, \dots, m$ .

Indicato con  **$P_a$  il problema artificiale**, la sua **regione ammissibile sarà**:

$$\Omega(P_a) = \{x \in R^m : \underline{A}x + \underline{\alpha} = \underline{b}, x \geq 0, \underline{\alpha} \geq 0, \underline{\alpha} \in R^m\}$$

Invece per il **problema di partenza  $P$** , la regione ammissibile è:

$$\Omega(P) = \{x \in R^m : \underline{A}x = \underline{b}, x \geq 0\}$$

Avremo allora che:

$$\Omega(P_a) \geq \Omega(P) \Leftrightarrow x \in \Omega(P) \Rightarrow x \in \Omega(P_a)$$

La soluzione **potrebbe comunque non essere ammissibile** per  $P$ . Allora cerchiamo una soluzione equivalente ma che sia valida sia per  $P_a$  che per  $P$ .

Il problema artificiale (teorema 1) avrebbe come **funzione obiettivo**:

$$\min \rho = e^T \underline{\alpha} \quad \forall \quad e = [1, \dots, 1]$$

vincoli:

- $\underline{A}x + \underline{\alpha} = \underline{b}$
- $x, \alpha \geq 0$

Notare che **ammette sempre soluzioni ottime**.

Per il teorema 2 avremo che  $P$  è **ammissibile  $\Leftrightarrow P_a$  ha  $\rho^* = 0$** .

Dati questi 2 problemi avremo che per:

- 1)  **$\rho^* > 0$ : il problema  $P$  è inammissibile**
- 2)  **$\rho^* = 0$ : alla soluzione ottima  $P_a$  corrisponde una BFS per  $P$**

### T. Metodo del simplesso in 2 fasi

Per prima cosa risolviamo il  $P_a$  con il metodo del simplesso. Se  **$\rho^* = 0$  usiamo la soluzione ottima di  $P_a$  senza le variabili artificiali**. Prenderemo poi la **f.o.  $z$  come BFS per  $P$**  e da questa applicare il metodo del simplesso.

### U. Costruzione del problema artificiale

Funzione obiettivo:

$$\min z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

vincoli:

- $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq b_i \quad \forall \quad i = 1, \dots, m_1$
- $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \geq b_i \quad \forall \quad i = m_1 + 1, \dots, m_2$

- $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = b_i \quad \forall \quad i = m_2 + 1, \dots, m$   
con  $x_j \geq 0 \quad \forall \quad j = 1, \dots, m$ .

Forma standard abbiamo che la funzione obiettivo:

$$\min z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

vincoli:

- $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + x_{n+i} = b_i \quad \forall \quad i = 1, \dots, m_1$
- $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j - x_{n+i} = b_i \quad \forall \quad i = m_1 + 1, \dots, m_2$
- $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = b_i \quad \forall \quad i = m_2 + 1, \dots, m$

con

- $x_j \geq 0 \quad \forall \quad j = 1, \dots, n$
- $x_{n+i} \geq 0 \quad \forall \quad i = 1, \dots, m_2$

Per fare in modo di avere un problema artificiale con il minor numero di variabili artificiali dovremo:

- 1) per  $i = 1, \dots, m_1$  NON aggiungiamo variabili artificiali, dato che abbiamo quelle di slack
- 2) per  $i = m_2 + 1, \dots, m$  aggiungo una variabile artificiale per ogni vincolo
- 3) per  $i = m_1 + 1, \dots, m_2$  aggiungo una  $\alpha_0$  in ogni vincolo

Indichiamo un l'indice  $h(m_1 + 1 \leq h \leq m_2)$  t.c.:

$$h = \operatorname{argmax}_i \{b_i, \quad i = m_1 + 1, \dots, m_2\}$$

Rimpiazziamo ogni vincolo  $i \neq h$  con un vincolo equivalente:

$$\sum (a_{hj} - a_{ij})x_j - x_{n+h} + x_{n+i} = b_n - b_i \quad \forall \quad i = m_1 + 1, \dots, m_2, \quad i \neq h$$

avremo allora:

$$\sum a_{hj}x_j - x_{n+h} + \alpha_0 = b_n$$

$$\sum a_{ij}x_j - x_{n+i} + \alpha_0 = b_i$$

## V. Esempio problema artificiale

Funzione obiettivo:

$$\min z = 4x_1 + 5x_2$$

vincoli:

- $x_1 - x_3 = 6$
- $x_2 - x_4 = 4$
- $x_1 + 3x_2 = 21$
- $x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$

Il problema artificiale è dato dalla funzione obiettivo:

$$\min \rho = \alpha_1 + \alpha_2$$

con vincoli:

- $x_1 - x_3 + \alpha_1 = 6$
- $x_2 - x_4 + \alpha_1 = 4$
- $x_1 + 3x_2 + \alpha_2 = 21$
- $x_1, x_2, x_3, x_4, \alpha_1, \alpha_2 \geq 0$

Vado ora a sostituire al vincolo 2 la differenza tra il vincolo 1 e il 2:

$$x_1 - x_2 - x_3 + x_4 = 2$$

Avremo allora che  $P_a$  e' data da una funzione obiettivo:

$$\min \rho = \alpha_1 + \alpha_2$$

e dai vincoli:

- $x_1 - x_3 + \alpha_1 = 6$
- $x_1 - x_2 - x_3 + x_4 = 2$
- $x_1 + 3x_2 + \alpha_2 = 21$
- $x_1, x_2, x_3, x_4, \alpha_1, \alpha_2 \geq 0$

Applichiamo al prima fase del metodo a 2 fasi:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 6 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 1 & 3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 21 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Per poter ripristinare la forma canonica dovremo avere i coefficienti di  $\alpha_1, \alpha_2 = 0$ . Tramite vari operazioni di Pivot arriviamo a non avere più in base  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  facendo:

$$\text{f.o.} - \text{vincolo di } \alpha_1 - \text{vincolo di } \alpha_2$$

In fine avremo:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 6 \\ 0 & 0 & 0.3 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0.3 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 2.3 & 0 & -49 \end{bmatrix}$$

Avremo allora verificato il criterio di arresto, perciò avremo una soluzione ottima:

$$x^* = (6, 5, 0, 1), \quad z^* = 49$$

## W. Esercitazione variabili artificiali

Usando il metodo delle variabili artificiali, risolvere il seguente problema con funzione obiettivo:

$$\min z = 3x_1 - 7x_2 + 2x_3$$

con vincoli:

- $2x_1 + 3x_2 + 5x_3 \leq 15$
- $x_1 + x_2 + x_3 \geq 1$
- $-x_1 + x_2 = 5$
- $x_1, x_2, x_3 \geq 0$

il problema in forma standard avrà come funzione obiettivo:

$$\min z = 3x_1 - 7x_2 + 2x_3$$

con vincoli:

- $2x_1 + 3x_2 + 5x_3 + x_4 = 15$
- $x_1 + x_2 + x_3 - x_5 = 1$
- $-x_1 + x_2 = 5$
- $x_1, x_2, x_3 \geq 0$

Il problema artificiale è dato dalla funzione obiettivo:

$$\min \rho = \alpha_1 + \alpha_2$$

con vincoli:

- $2x_1 + 3x_2 + 5x_3 + x_4 = 15$
- $x_1 + x_2 + x_3 - x_5 + \alpha_1 = 1$
- $-x_1 + x_2 + \alpha_2 = 5$



- $x_1, x_2, x_3, \alpha_1, \alpha_2 \geq 0$

Avremo allora:

$$\begin{bmatrix} 2 & 3 & 5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 15 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Per ripristinare la forma canonica  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  devono essere 0 facendo:

f.o. – vincolo 2

al risultato:

risultato – vincolo 3

$$\begin{bmatrix} 2 & 3 & 5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 15 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 5 \\ 0 & -2 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -6 \end{bmatrix}$$

Ora dobbiamo andare a far uscire le due variabili  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ .

Non essendo una soluzione ottima entriamo in base  $x_2$  ( $s =$

2):

$$\min\left(\frac{15}{3}, \frac{1}{1}, \frac{5}{1}\right) = 1$$

quindi abbiamo  $r = 2$  facendo uscire  $\alpha_1$ . Facendo il Pivot abbiamo:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 2 & 1 & 3 & -3 & 0 & 12 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & 1 & 4 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & -1 & -2 & 0 & -4 \end{bmatrix}$$

che non è ottima. Entra in base  $x_5$ :

$$\min\left(\frac{12}{3}, \frac{4}{1}\right) = 4$$

Notiamo che, avendo valori uguali, ci conviene prendere  $r = 3$  in modo che se ne vada  $\alpha_1$ :

$$\begin{bmatrix} 5 & 0 & 5 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \\ -2 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

che è soluzione ottima per il problema artificiale.

Dato che  $\rho = 0$ , la soluzione ottima di  $(P_a)$  è ammissibile per  $(P)$ . Eliminiamo la colonna di  $\alpha_1$  e riscriviamo la f.o. originale:

$$\begin{bmatrix} 5 & 0 & 5 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 5 \\ -2 & 0 & -1 & 0 & 1 & 4 \\ 3 & -7 & 2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

si porta in forma canonica f.o. portando a 0 il valore di  $x_2$  della f.o., dato che abbiamo solo 2 variabili in base e 3 vincoli, mentre serve avere tante variabili in base quanti sono i vincoli. Allora avremo:

$$(\text{riga } 2 * 7) + \text{f.o.}$$

$$\begin{bmatrix} 5 & 0 & 5 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 5 \\ -2 & 0 & -1 & 0 & 1 & 4 \\ -4 & 0 & 2 & 0 & 0 & 35 \end{bmatrix}$$

dove quindi eseguiamo il Pivot in  $a_{11}$  ed avremo:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0.2 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & -1 & 0.4 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 6 & 0.8 & 0 & 35 \end{bmatrix}$$

## VI. BRANCH-AND-BOUND TECHNIQUE FOR SOLVING INTEGER PROGRAMS

### A. Principi dell'argoritmo Branch-and-Bound

I problemi che cerchiamo di risolvere sono **lineari con variabili decisionali**, il problema è che **alcune variabili possono essere intere**, o anche binarie, al posto di essere continue. Per questi casi abbiamo alcuni **approcci naive** da usare:

- 1) **brute force**: se abbiamo  $n$  variabili binarie le soluzioni ammissibili sono  $2^n$ . Andremo quindi a **generare tutte le soluzioni e verificarne i vincoli** sono soddisfatti (non computazionalmente possibile)
- 2) **rounding**: sostituisco le variabili intere con un "rilassamento" del vincolo di integrità. Quindi il problema  $P$ :

$$\max z = 3x_1 + 4x_2 - 2x_3 + 3x_4 - 2x_5$$

con vincoli:

- $2x_1 + 2x_2 + 2x_3 + 2x_4 + 2x_5 \leq 4$
- $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 = 0/1$

diventa  $R(P)$ :

$$\max z = 3x_1 + 4x_2 - 2x_3 + 3x_4 - 2x_5$$

con vincoli:

- $2x_1 + 2x_2 + 2x_3 + 2x_4 + 2x_5 \leq 4$
- $0 \leq x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \leq 1$

Avremo un **caso fortunato** se la soluzione di  $R(P)$  è anche quella di  $P$ .

### B. Approccio Branch-and-Bound

È detta tecnica di enumerazione parziale dove **ci si procura una stima del valore della soluzione ottima rilassando il vincolo di integrità** sulle variabili intere.

Nella sua risoluzione tramite blackbox potremo avere **4 casi**:

- 1)  **$R(P)$  inammissibile**  $\rightarrow P$  inammissibile:

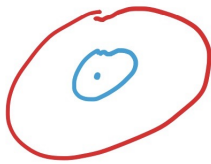


Figura 27.  $R(P)$  che contiene  $P$

- 2)  **$R(P)$  unbounded**  $\rightarrow P$  **puo' essere unbounded** (dove abbiamo variabili intere):

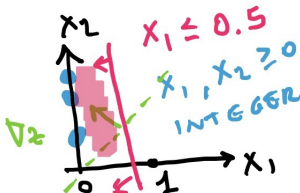


Figura 28. In caso di  $P$  unbounded

- 3)  **$R(P)$  unbounded**  $\rightarrow P$  **puo' essere inammissibile** (dove non abbiamo variabili intere):

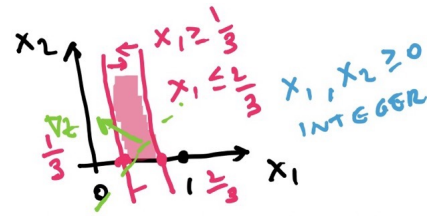


Figura 29. In caso di  $P$  inammissibile

(p.s: non posso saperlo dato che la blackbox mi sa solo  $R(P)$ )

- 4)  **$R(P)$  ha soluzione ottima**  $\rightarrow P$  inammissibile

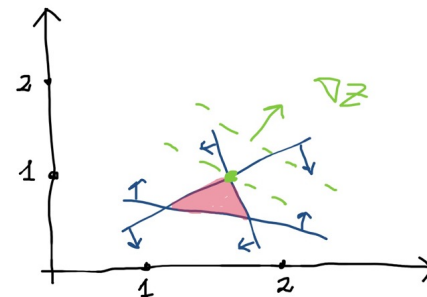


Figura 30.  $R(P)$  ottima ma  $P$  inammissibile

(p.s: non posso saperlo dato che la blackbox mi sa solo  $R(P)$ )

- 5)  **$R(P)$  ha soluzione ottima**  $\rightarrow P$  ammissibile

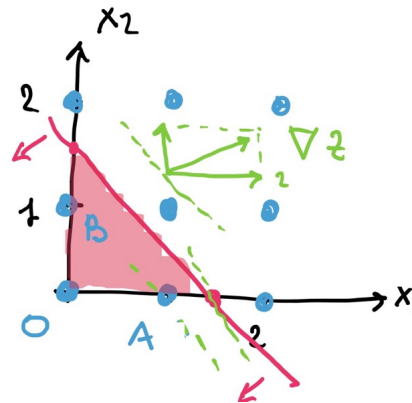


Figura 31.  $R(P)$  ottima ma  $P$  ammissibile

dove avremo come **soluzioni intere**:

$$O(0,0), A(1,0), B(0,1)$$

Andrò allora a **traslare al curva di livello** fino a trovare la **soluzione  $R(P)$ : primo numero ammissibile** nella regione ammissibile, neceve **per  $P$ : primo numero intero ammissibile**

La **soluzione ottima di ottimizzazione** sara' quella di  $R(P)$  di rilassamento continuo, perché **ha meno vincoli** fornendo

una soluzione migliore o uguale della nostra stima. Allora se massimizziamo:

$$Z_{R(P)}^* \geq Z_P^*$$

se sto minimizzando:

$$Z_{R(P)}^* \leq Z_P^*$$

dove avrò rispettivamente **upper-bound** e **lower-bound**.

### C. Branching

Oltre ad upper-bound e lower-bound su effettua un **branch** cioè una **suddivisione del problema in sottoproblemi**, dove per le soluzioni ammissibili (s.a.):

- $P$  s.a. =  $P_1$  s.a.  $\cup$   $P_2$  s.a.
- $P_1$  s.a.  $\cap$   $P_2$  s.a. = insieme vuoto
- $\underline{x}^* \notin P_1$  s.a.,  $P_2$  s.a.

con  $\underline{x}^*$  possibile vincolo applicabile a  $x_1$  o  $x_2$ . Infatti per un problema a 2 variabili abbiamo:

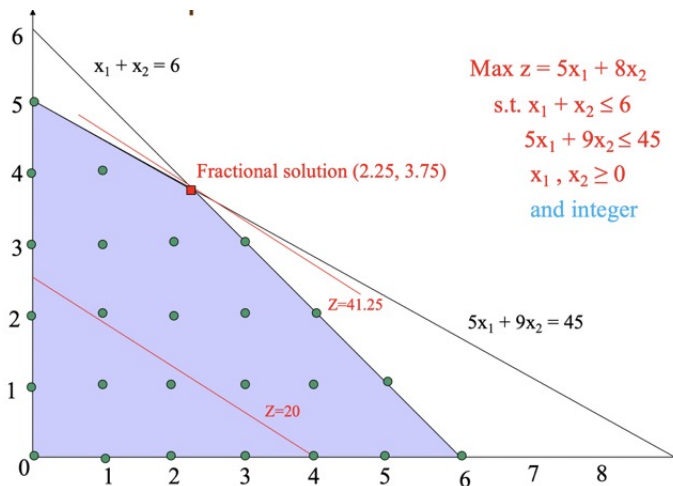


Figura 32. Problema di branching

con soluzione ottima in (2.25, 3.75) con upper:  $z = 41.25$ .

Avendo dei valori frazionari effettuo un **branch** per creare dei sottoproblemi. Avendo la soluzione in (2.25, 3.75) allora effettuo il "troncamento" in:

$$x_2 \leq 3, x_2 \geq 4$$

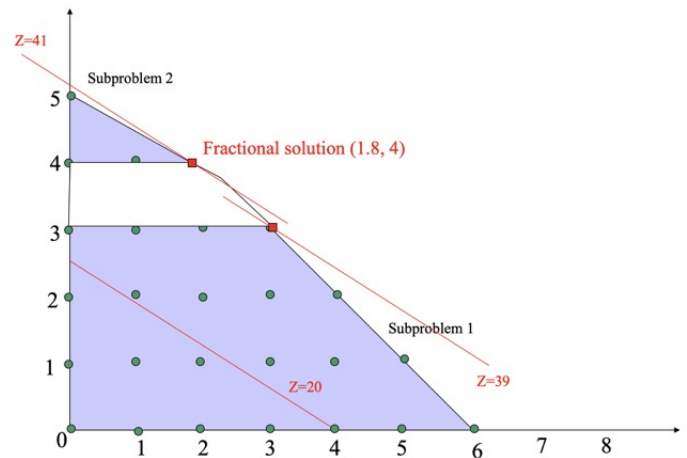


Figura 33. Primo child

Quindi per il **sottoproblema  $P_1$**  con f.o:

$$\max z = 5x_1 + 8x_2$$

e vincoli:

- $x_1 + x_2 \leq 6$
- $5x_1 + 9x_2 \leq 45$
- $x_2 \leq 3$
- $x_1, x_2 \geq 0$

che avrà come **soluzione** (3, 3) con upperbound  $z = 39$ . invece per il **sottoproblema  $P_2$**  con f.o:

$$\max z = 5x_1 + 8x_2$$

e vincoli:

- $x_1 + x_2 \leq 6$
- $5x_1 + 9x_2 \leq 45$
- $x_2 \geq 4$
- $x_1, x_2 \geq 0$

che avrà come **soluzione** (1.8, 4) con upperbound  $z = 41$ .

Avendo **numeri interi in  $P_1$**  ho una soluzione ottima e non dovrò fare branch su  $P_1$  e dato il suo valore di  $z$  che è **cercato in  $P_2$**  con f.o: risolveremo allora risolvendo il sottoproblema 1 con soluzione 3, 3 con  $z = 39$  allora non ho bisogno di esplorare ancora dato che ho già la soluzione ottima **minore di quello di  $P_2$**  allora: **scarto  $P_1$  e continuo i branch su  $P_2$** .

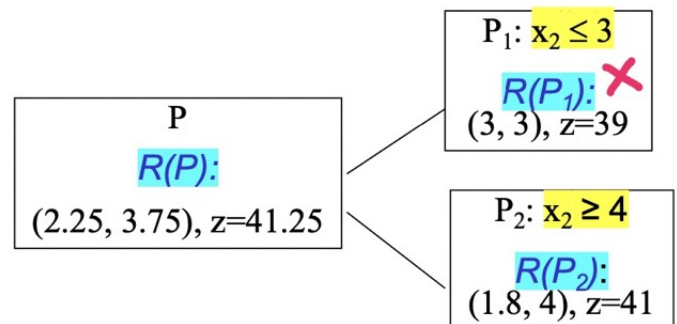


Figura 34. Scarto del primo child

Effettuando il branch avremo:

- $P_3$ : con vincolo  $x_1 \leq 1$
- $P_4$ : con vincolo  $x_1 \geq 2$

tenendo in conto che i child ereditano i vincoli del parent, risolviamo i loro rilassamenti:

- $P_4$ :  $R(P_4)$  inammissibile, dato che non ha intersezioni, allora anche  $P$  lo sarà
- $P_3$ :  $R(P_3)$  avrà  $(1, 4.44)$  con  $z = 40.55$

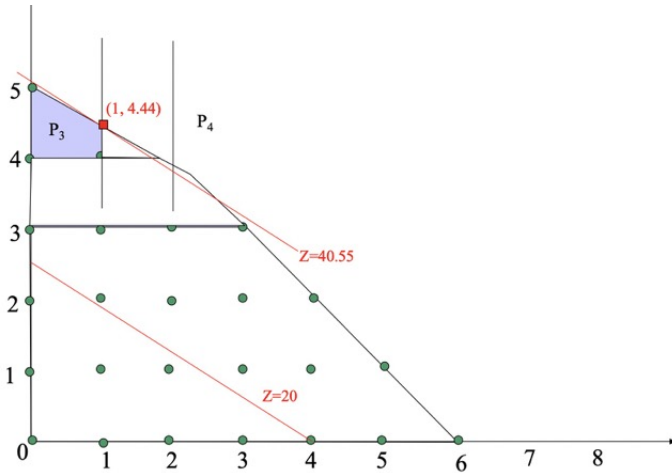


Figura 35. Secondo child

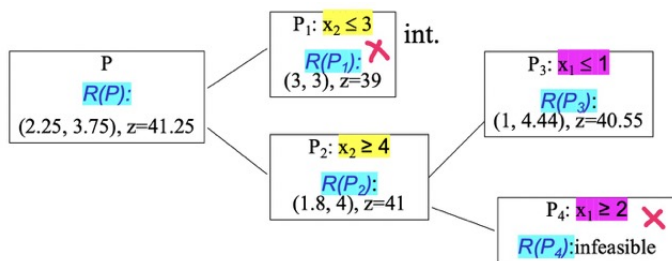


Figura 36. Scarto del secondo child

continuando con il branch avremo:

- $P_5$ : con  $x_2 \leq 4$  con  $(1, 4)$  con  $z = 37$
- $P_6$ : con  $x_2 \geq 5$  con  $(0, 5)$  con  $z = 40$

scartiamo allora  $P_5$  che ci fa arrivare ad un massimo di  $37 < 40$  di  $P_6$ :

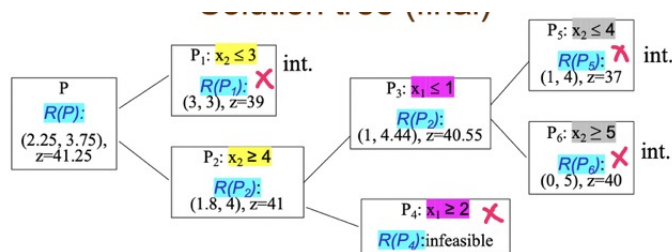


Figura 37. Scarto del terzo child

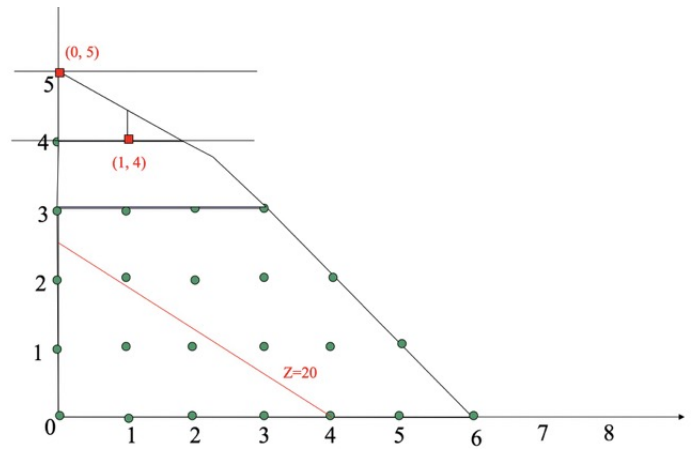


Figura 38. Terzo child

siamo quindi arrivati nella situazione in cui non ci sono più branch da creare.

#### D. Fathoming

Completa l'analisi dei sottoproblemi dicendo che posso eliminare un sottoproblema se:

- il rilassamento è inammissibile
- il rilassamento di  $P$  ( $R(P)$ ) ha soluzione ottima intera, allora è anche soluzione di  $P$
- è verificato il fenomeno di dominanza, quindi una  $z$  è più grande delle altre

Lo pseudocodice è:

$L := \{P\}$  // lista dei sottoproblemi da analizzare

$z^{\text{best}} := -\infty$

$x^{\text{best}} := \text{NULL}$

while  $L$  è vuoto:

estrarre un sottoproblema  $k$  da  $L$

branching da  $1 \rightarrow n_k$

risolvo  $R(P)$  e trovo i limiti e l'upperbound  $UB$

for  $i = 1$  to  $n_k$ :

if  $UB_i \leq z^{\text{best}}$  then:

kill child<sub>i</sub>

elif  $R(P)$  è una soluzione intera:

$z^{\text{best}} := UB_i$

$x^{\text{best}} := \text{child}_i$

elif  $R(P)$  è una soluzione frazionaria:

add child<sub>i</sub> to  $L$

end for

end while

#### E. Esercizio Branch-and-Bound

Funzione obiettivo:

$$\max z = x_1 + x_2$$

v.o:

- $-6x_1 + 12x_2 \leq 9$

- $6x_1 - 4x_2 \leq 9$
- $x_1, x_2 \geq 0$

gradiente:

$$\nabla z = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

grafico:

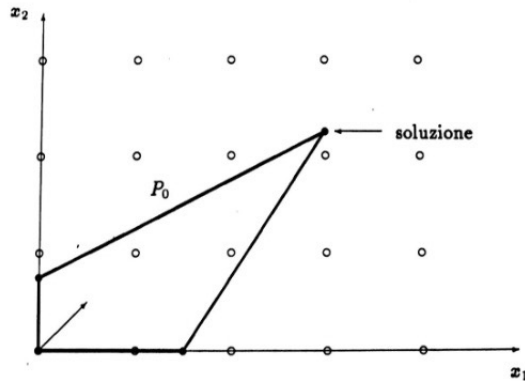


Figura 39. Regione ammissibile

abbiamo che la soluzione ottima (l'intersezione) del risultato continuo è:

$$x_1 = 3, x_2 = 2.25, z = 5.25$$

allora prenderemo come upper-bound 5.

La variabile  $x_2$  ha valore frazionario compreso tra 2 e 3. Effettuiamo un branch con vincoli  $x_2 \leq 2$  e  $x_2 \geq 3$ :

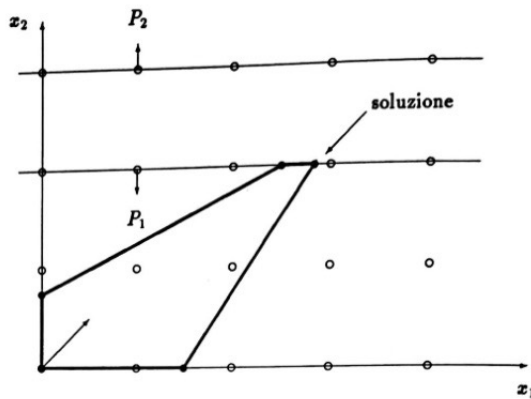


Figura 40. Regione ammissibile

dove:

- $P_2$  non abbiamo intersezioni quindi è inammissibile
- $P_1$  con soluzione ottima in:

$$x_1 = 2.83, x_2 = 2, z = 4.83$$

quindi abbiamo upper-bound 4

La variabile  $x_1$  ha valore frazionario compreso tra 2 e 3. Effettuiamo un branch con vincoli  $x_1 \leq 2$  e  $x_1 \geq 3$ :

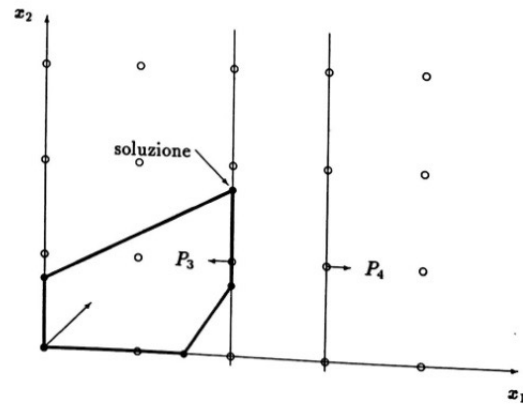


Figura 41. Regione ammissibile

dove:

- $P_4$  non ha intersezione quindi sarà soluzione inammissibile
- $P_3$  con soluzione ottima in:

$$x_1 = 2, x_2 = 1.75, z = 3.75$$

quindi abbiamo upper-bound 3

La variabile  $x_2$  ha valore frazionario compreso tra 1 e 2. Effettuiamo un branch con vincoli  $x_2 \leq 1$  e  $x_2 \geq 2$ :

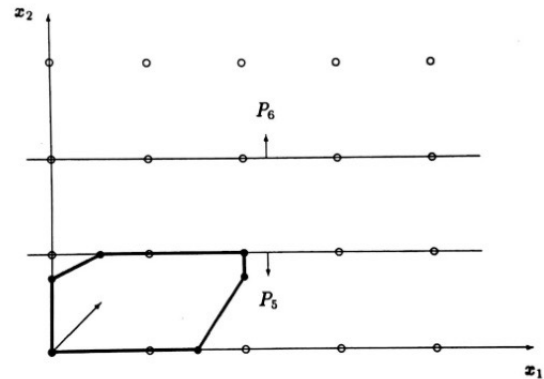


Figura 42. Regione ammissibile

dove:

- $P_6$  sarà inammissibile
- $P_5$  con soluzione ottima in:

$$x_1 = 1, x_2 = 2, z = 3$$

La soluzione ottima è intera e quindi il branch and bound si interrompe.

nel caso peggiore di variabili binarie il livello computazionale sarà dato da  $O(2^n)$  quindi il tempo di calcolo cresce esponenzialmente con il numero di

se il numero delle variabili intere  $n$  cresce, nel caso peggiore in tempo di calcolo cresce  $2^n$

in molte applicazioni quindi avremo un tempo di calcolo spaziale di alcune ore o giorni per risolvere il problema all'ottimo cioè per certificare se un problema non ha soluzioni

quindi ammissibile, ci sono soluzioni ammissibili e la f.o. va da  $-\infty$  a  $+\infty$  unbounded o solo ottima. noi vogliamo una soluzione ottima e certificare che avvenga

il problema e il tempo di calcolo che ci mette tipo negli agenti che devono scegliere di fare alcune azioni al posto di altre in molte applicazioni si fa affidamento a degli algoritmi detti inesatti che CERCANO di generare delle soluzioni ammissibili. ma possono fallire per loro natura

cercano soluzioni ammissibili di buona qualità in un tempo dato

riesplorano gli algoritmi euristici dove è incorporata una conoscenza che ha il progettista e la infonde nell'algoritmo che quindi è customizzato

gli algoritmi euristici sono - costruttivi che cercano di generare una prima soluzione e la cercano di migliorare e quindi trovare una nuova soluzione con f.o. maggiore se massimizziamo

per alcuni problemi è difficile (time consuming) e quindi richiedono un tempo non noto a priori, per questi è difficile trovare una soluzione ottima e risolvere il problema, e per alcuni problemi è anche difficile capire se esiste una soluzione ammissibile o no

slide 5

es: problema del traveling salesman problem data una matrice  $C$  di transizione dove ho che er andare dal punto 1 al 2 pago  $c_{12}$  ecc. dev'essere un circuito che tocchi tutti i punti una sola volta e che abbia il costo minimo = somma dei costi di transizione.

tempo di ciclo determina la produttività della macchina in questo caso immaginiamo un robot che fa  $n$  fori e conclusi gli  $n$  fori finisce il ciclo

i costi di transizione quindi sono i tempi che il braccio impiega a spostare il braccio da un punto all'altro

troveremo una soluzione ammissibile tramite una qualsiasi permutazione in questo caso ma non tutte hanno lo stesso costo

le matrici potranno ovviamente essere simmetriche in alcuni casi

cambiando problema prendiamo un veicolo che deve toccare  $n$  punti per esempio le consegne di amazon con un solo veicolo e ci potrebbero essere una combinazione come delle finestre temporali di servizio dov'è quindi il veicolo parte da un certo punto a  $t=0$  dal deposito e deve visitare  $n$  punti in finestre temporali prestabiliti come per esempio il punto  $i$  nella finestra temporale  $a_i, b_i$ , queste finestre temporali rendono computazionalmente più difficile trovare una soluzione ammissibile il problema è quindi un modello di tipo Miller-Zucker o zemlin: avremo delle variabili

quindi nel caso peggiore il tempo cresce esponenzialmente ad un numero  $n$  di clienti sia per trovare la soluzione ottima sia per potersi procurare una soluzione ammissibile. la complessità dipende dai dati e quindi potrebbe esserci una instabilità e quindi cambiando anche solo un dato potremmo avere una soluzione ammissibile o una crescita esponenziale dell'infittibilità. da questo è dovuta l'instabilità

il primo approccio inesatto consiste nell'usare un algoritmo o branch and bound di tipo troncato

un altro approccio possibile è generare una maniera casuale numeri interi quindi il nostro problema

ad  $n$  variabili, generiamo i valori random interi  $\bar{x}, \dots$  una soluzione sarà ammissibile o non ottima

approccio di tipo greedy: ingordo

cerca di massimizzare nel breve periodo. procedura sequenziale che costruisce la soluzione un passo alla volta e l euristica di tipo costruttivo costruendo la soluzione con un tipo sequenziale ad ogni passo fa una scelta e massimizza solo l'utilizzo immediato ma così può capire che - ho soluzione inammissibile - non garantisce una soluzione ottima

es:

pseudocodice greedy o anche detto nearest neighbour: adattamento dell'algoritmo greedy al commesso viaggiatore partito dal punto 1 e lo identifico come l'ultimo punto toccato  $S = \dots$  e poi una lista di punti da visitare

while non ho toccato tutti i punti  $S \neq$  insieme vuoto estraggo un punto da  $S$  cerco il punto a costo minimo rispetto al last storico il valore del last successivo imposto il last al nuovo punto end while riporto il succ last = 1 per poterlo riportare all'inizio

il vantaggio è che possiamo prevedere le iterazioni del loop

es:  $n = 4$   $C = 0 \ 10 \ 5 \ 8 \ 10 \ 0 \ 2 \ 1 \ 5 \ 2 \ 0 \ 4 \ 8 \ 1 \ 4 \ 0$

last = 1  $\rho = \{2, 3, 4\}$ ; last = 3;  $\rho = \{2, 4\}$ ;  $\text{succ}_1 = \text{last} = 2$ ;  $\rho = \{4\}$ ;  $\text{succ}_3 = \text{last} = 4$ ;  $\rho = \{\}$ ;  $\text{succ}_2 = 4$ ;  $\text{succ}_4 = 1$

ovviamente se abbiamo delle time window l'algoritmo deve essere adattato. questo greedy infatti serve per poter essere

customizzato per i problemi di classwork

tramite TSP

usiamo libreria pulp

modello a variabili binarie

$x_{ij}$  per ogni coppia di punti  $i$  e  $j$  da 1 a  $n$

1 se l'arco  $ij$  è visitato - 0 se non è visitato

quindi prendiamo le  $x_{ij}$  che ci interessano e le importiamo da 1 alle altre

img

vogliamo usare la sommatoria della f.o. dei costi dove voglio minimizzarli quindi sostituiamo le  $x$  con quelle sopra e le  $c$  in base alla tabella dei costi data

seconda sommatoria quindi ogni punto ha un predecessore

questi vincoli non basta non per poter risolvere il modello infatti non possiamo escludere che la soluzione sia disconnessa (sub-tour)

img

dato che mancano dei vincoli di connessione della soluzione siamo quindi in un modello di tipo Miller-Zucker o zemlin: avremo delle variabili

addizionali  $u_i$  per ogni punto  $i$  e con  $i$  rappresentando l'ordine di visita dei punti

importiamo partendo dal punto 1  $u_1 = 1$

abbiamo allora  $u_1 = 1$  -  $x_{13} = 1$  -  $u_3 = 2$  -  $x_{34} = 1$  -  $u_4 = 3$  -  $x_{42} = 1$  -  $u_2 = 4$  -  $x_{21} = 1$

allora aggiungo queste variabili  $u_i$  per rappresentare l'ordine di visita e non avere discontinuità della soluzione

altri vincoli saranno allora:  $2 \leq u_i \leq n$

dato che le  $u_i$  con  $i \neq 1$  saranno comprese tra 2 a  $n$  dato che dobbiamo assegnare la 2 posizione finio alla  $n$ -esima

poi un altro vincolo:  $u_i - u_j + 1 \leq n(1 - x_{ij})$



lega le variabili u con xij che dicono cihi viene dopo chi e u l'ordine. questa relaione e1 corretta dato che abbiamo 2 casi:” - se xij = 0 allora ui - uj +1 j= n ovvio dato che tutte le variabili u son ocomprese in n - se xij = 1 allora ui - uj + 1 j= 0 dato che uj i= ui + 1 allora i e1 predecessore di j alora l'ordine di visita di j e1 almeno successivo a i

altro paradigma che si adatta bene ad altre classi di problemi:  
relax and fix algorithm

sono problemi multiperiodali dato che voglio poter avere un approccio ora per ora. uso un idea algoritmo dove suppongo di voler risolvere il prob di ottimizzazione:  $\min z = \dots$  s.a.  $Ax = b$   $x_i = 0$  e intera

allora vado a partizionare le variabili in  $n$  gruppi. quindi un problema multi periodale di pianificazione da  $t_0$  a un tempo  $t$ , le variabili si dividono in gruppi, decisionali che mi dicano cosa fare qui alle 12, quelle dalle 12 alle 13 ecc.

abbiamo allora delle applicazioni in dove le variabili naturalmente si dividono in gruppi dato un sviluppo temporale, il problema allora diventa:

$$\min z = \text{sum}.. \text{s.a. sum}...$$

il problema nel complesso è complicato, allora mi rendo conto che la difficoltà sta nelle molte variabili in gioco, allora definisco un problema ausiliario dove le variabili  $x_1$  del primo gruppo, sono intere mentre le restanti faccio un

risolto questo problema, se è inammissibile, anche quello di partenza lo è, se però ammette soluzione ottima, allora avrò che  $x_1$  è l'intera e faccio un fixing quindi inelliterazione successiva  $\overline{x}_1$

allitterazione successiva il vincolo  
di x fa parte del problema e quindi  
 $x_1$  è fissato al valore ottenuto prima,  $ax_2$  richiede di essere in  
 $\overline{x_2}$

tengo quindi conto anche delle variabili "future" ma non richiede un grande sforzo computazionale dato che lavora sul singolo gruppo.

la generica iterazione e1: ....

pseudocodice: .....

approcci orolling horizon: dyrante il primo periodo considero un sottoproblema con alcune variabili da  $x_1$  a  $x_k$  e trascuro quelle dei periodi successivi, considero alal

un porblem acon k varaibiali riwco a resolverlo.

quidn risolvo dedei sottoporbemi con variavili legate con  
tempi consecutivi ma non quelli troppo successivi

(notare che e1 meno accurato del relax and fix dato che considero certe varaibili e non tutte assieme)

**MULTIPLE CRITERIA DECISION MAKING:** dato che spesso abbiamo piu obbiettivi non riusciamo a scegliere in anticipo quale ha rpiorita allora spesso vanno in conflitto, allora per capire come fare.

usiamo la materemati multecreatirea dove abbmiamo da trovare una soluzione con le migliore soluzioni che devon orispettare alcuni vincoli, pero abbiamo un numero  $p$  cioel il creiterio. quidni dobbiamo massimizzazare o min non una solo af.o. ma da  $z_1 a z_p$ .

es: problema si scheduling: abia-  
mo n attivita e come parametri:  
 $S_i$  starting time dell' attivita  $i$  durata dell' attivita  $i$   $p_{ij} = 1$  se l' attivita  $j$  e prerequisite di  $i$ ,  $= 0$  altrimenti

obiettivo: minimizzare il tempo di completamento =  $T$

avremo allora che:  $\min T$  s.t.  $T_i = S_i + d_i \dots$

formulare un attività in modo fattiibile:

$$D; \max durata \text{ dell' attivita } i; \min durata \text{ dell' attivita } i; durata \text{ dell' atti}$$

allora:  $d_i = D_i - a_i X_i$  coefficienti.....

allora abbiamo da minimizzare 2 obiettivi:  $\min \sum_{i=1}^n \dots \min T s.t. \dots$

considerato un orobkem acon piu obietvti allor aposimo  
 consederaene uno con obiettivo singolo. quindi le soluzioni  
 ottimali dei singoli porblemi per rappresentarle scrivo nello  
 spazio ammissibile, lo spazio dei criteri rappresentando i  
 singoli obiettivi. a volte puo succedere che presi i du epunto  
 la loro unione non fa parte della zona ammissibile (utopia)



ma noi allora adiamo a prendere il punto migliore nella zona ammissibile come in questo caso C dato che e' il migliore di A per certe cose e per altre rispetto a B

potremo prendere per o un punto D che sarà per lo re rispetto  
ad entrambi i giu di ben il dato a che sono o giu di al l'origine de ma solo le x  
dareo che  $f_1(D) \neq f_1(C)$ , e  $f_2(D) \neq f_2(C)$

a noi interesse di trovare le soluzioni non inferiori e quindi efficienti e dobbiamo trovare tra tutte la migliore. per capire qual è quella migliore dipende dall'risoluzione del problema  $\max_1 =$

si usa allora un trade off ratio dove prendiamo le soluzioni A e B e calcoliamo il rapporto di trade off facendo: ....

che rappresenta il miglioramento dell'obiettivo iesimo in base al miglioramento di un altro obiettivo. *Corollarilassateseilpromebari.*

noi allora ci interessiamo delle soluzioni sulle frontiere dato che quelle interne sono dominate da altre più vicine alla frontiera

se abbiamo una zona convessa avremo che si collegherà in modo immaginario i punti togliendo la convessità e quindi prendiamo i punti sulla frontiera tranne sulla parte immaginaria

per trovare le soluzioni efficienti abbiamo 2 metodi: - metodo  
dei vincoli - il metodo dei pesi variabili  $x_1$  fino a  $x_k$  e facciamo  $x_1$  e facciamo

1. prendiamo un singolo obiettivo e per gli altri imponiamo una soglia dove per ogni obiettivo diverso da quello scelto la funzione obiettivo si a al massimo:  $f_k(x) \leq u_k$  (dato che minimizziamo) .....

es: nel caso di multischeduling: vogli ominimizzare il costo  
come obiettivo, impongo poi un valore soglia al tempo di  
compeltamento:  $T_j = T^*$

con  $T^*traTmineTmaxinbaseal$  fatto che se vogliamo minimizzare

altro metodo: dei pesi: abbimao una sola f.o. come somma pesate degli altri obiettv:  $\sum w_i f_i$

com wi obiettivo:  $\sum w_i = 1$

a seconda del valore che diamo ai pesi andiamo a sposare la retta tangente alla zona ammissibile



questo non funziona se è il convesso dato che non possiamo trovare tutte le possibili soluzioni dato che la frontiera non è connessa.

es: con multiobiettivo; min.....

per scegliere tra le diverse soluzioni e trovare quella migliore, dipende dalle preferenze che possono essere espresse tramite una funzione che a seconda del valore dei diversi obiettivi assume un valore di verso allora trovando la soluzione che massimizza il valore della funzione troviamo la soluzione migliore per il decisore, il problema è che in genere non c'è una soluzione matematica per questa cosa ma possiamo:  $\max U \dots$  s.t.  $g(x) \leq 0 \quad x \in X$

metodo a priori se disponiamo di questa funzione in forma chiusa possiamo risolvere il problema monoobiettivo massimizzando la funzione (detto metodo a priori)

in genere non si trova questa soluzione

es: settiamo una soglia e approssimiamo la distanza di f.o. e la soglia adeguata. al variare di  $r$  avremo 3 tipi di metriche:  $r=1$  ....  $r=2$  metrica euclidea ....  $r=\infty$  .....

sarà difficile dire per ogni obiettivo quale può essere una soglia adeguata dato che spesso trovare singoli ottimi è complicato.

altro approccio: a posteriori andiamo a generare tutte le soluzioni efficienti e dire quale tra le soluzioni è la migliore. è difficile applicare al metodo perché potrebbe crescere in maniera esponenziale con la dimensione del problema

allora usiamo un approccio interattivo: approccio di mezzo presi 2 obiettivi troviamo il punto ottimo per entrambi e poi troviamo la prima soluzione efficiente che si trova tra A e B e poi si sceglie a su quale parte della frontiera vogliamo posizionarsi. es parte AB e troviamo una soluzione efficiente tra le 2 ecc ecc

img

mi fermo quando il segmento che mi rimane è così piccolo che i due punti non incidono

mi è posto in base a cosa mi serve