

Ricerca Operativa e Pianificazione delle Risorse

Fabio Ferrario

2022/2023

Indice

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduzione | 3 |
| 1.1 | Il corso | 3 |
| 1.2 | Il programma | 3 |
| 1.3 | Modalità d'esame | 4 |
| 2 | Prerequisiti | 5 |
| 2.1 | Introduzione | 5 |
| 3 | Modelli nella Ricerca Operativa | 6 |
| 3.1 | Problemi di Ottimizzazione | 6 |
| 3.2 | Programmazione Matematica | 7 |
| 4 | Metodo del Simplexso | 9 |
| 4.1 | La Procedura Algebrica | 10 |
| 4.1.1 | Variabili di Base e Non | 11 |
| 4.2 | I Tableau: un Cheatsheet | 12 |
| 4.3 | Il Metodo delle Due Fasi | 13 |
| 5 | Dualità | 14 |
| 5.1 | Da Primale a Duale | 14 |
| 6 | Branch and Bound | 16 |
| 6.1 | Come funziona | 16 |
| 6.1.1 | Le tecniche | 16 |
| 7 | Assignments | 18 |
| 7.1 | Assignment 1 | 18 |
| 7.1.1 | Risoluzione grafica | 18 |
| 7.1.2 | Metodo del tableau | 19 |

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Il corso

Il corso di ROPR verrà svolto da:

- Fabio Antonio Stella
- Guglielmo Lulli

Il testo di riferimento è *Frederick S. Hiller and Gerald J. Lieberman, Ricerca Operativa, McGraw-Hill, nona edizione, 2010.*

1.2 Il programma

- Introduzione: storia-motivazione-esempi
- Ottimizzazione non lineare.
 1. Ottimizzazione di funzioni non lineari ad una variabile: ricerca dicotomia-metodo Bisezione- metodo Newton.
 2. Ottimizzazione di funzioni non lineari multivariate: metodo Gradiente - metodo Newton
 3. Ottimizzazione non lineare vincolate: Condizioni di Karush-Kuhn-Tucker.
- Ottimizzazione lineare e intera.
 1. Introduzione alla programmazione lineare (PL): Proprietà dei problemi di PL, strategie di modellizzazione.
- Soft Computing per l'ottimizzazione.

1.3 Modalità d'esame

Due Modalità:

- Modalità con Parziali
- Modalità con Scritto unico

Parziali

Primo parziale sarà durante la settimana di sospensione didattica, il secondo a fine del corso a ridosso del primo appello completo. Entrambe le prove hanno voto massimo 14 e soglia di superamento 6.

É possibile *recuperare solo una delle due prove parziali*, a ridosso degli appelli completi.

Primo Parziale Il primo parziale del 17 novembre prevede:

- 1 Esercizio Numerico su *Simplesso* (6 Punti)
- 1 esercizio Numerico su *Dualità* e/o *Sensitività* (4 Punti)
- 1 Domanda a risposta *Aperta* (3 Punti)
- 1 Domanda a risposta *Chiusa* (1 Punto)

La prova avrà una durata di 90 minuti.

Assignments Durante l'insegnamento verranno assegnati 4 Assignments da risolvere a casa e consegnare entro date stabilite, Ad ogni assignment può andare un voto minimo di 0 a un massimo di 1.

Orale non obbligatorio, consiste in 3 domande (aperte/esercizi) su tutto il programma. Si accede all'orale se si hanno già raggiunti i 18 punti. L'orale ha un voto di ± 3 .

Scritto unico

Scritto (voto max 28) con domande/esercizi su tutto il programma. Orale faoltativo si accede con un voto minimo di 15.

Capitolo 2

Prerequisiti

2.1 Introduzione

Per il corso di ROPR sono necessari alcuni prerequisiti, che verranno ripassati a lezione ma è bene conoscere già.

I prerequisiti indicati a lezione sono:

- Familiarità con le **Funzioni**.
 - Definizione di Funzione, dominio, codominio
 - Definizione di F Suriettiva, iniettiva e biiettiva
 - Definizione di F lineare/non lineare
 - Definizione di F concava/convessa
- Familiarità con gli **Spazi Vettoriali**.
 - Definizione di Vettore, Spazio Vettoriale, Base di uno S. Vettoriale
 - Definizione di vettori linearmente dipendenti/indipendenti
- Familiarità con le **Matrici e Sistemi Lineari**.
 - Definizione di matrice, rango e determinante
 - Calcolo di una matrice inversa
 - Definizione e risoluzione di un sistema lineare
- Basi di **Topologia**.
- Basi di **Teoria dei Grafi**.
- Familiarità con il **Calcolo Differenziale**.

Un ripasso sui principali requisiti può essere trovato su E-Learning

Capitolo 3

Modelli nella Ricerca Operativa

3.1 Problemi di Ottimizzazione

La Ricerca Operativa si occupa di Problemi di Ottimizzazione:

DEFINIZIONE

Data la funzione $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, un **problema di ottimizzazione** è formulabile come segue:

$$\text{opt } f(x) \text{ s.a. } x \in X, X \subseteq \mathbb{R}^n$$

Dove $\text{opt} \in \{\min, \max\}$ e $\text{s.a.} = \text{"soggetto a"}$.

I problemi di ottimizzazione possono essere:

- Minimizzazione $\min f(x)$
- Massimizzazione $\max f(x)$

DEFINIZIONE

In un problema di ottimizzazione la *funzione* $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ è detta **funzione obiettivo**, X è la **regione ammissibile** e $x \in X$ sono le **variabili decisionali**.

Quindi un problema di ottimizzazione consiste nel determinare (se esistono) uno o più punti di \min/\max x^* (x^* è una particolare assegnazione che gode di una certa proprietà).

Ottimizzazione Vincolata/non Vincolata Esistono due tipi principali di Ottimizzazione, determinate dall'esistenza o meno di delle *regioni di vincolo*:

- **Non Vincolata** $X = \mathbb{R}^n$: la ricerca dell'ottimo viene effettuata in tutto \mathbb{R}^n .
- **Vincolata** $X \subset \mathbb{R}^n$: La ricerca dell'ottimo è soggetta al muoversi all'interno di una certa regione ($x \in [a, +\infty)$ per esempio).

Nel caso dell'ottimizzazione vincolata semplicemente si considera la regione dello spazio definita da un determinato intervallo, quindi le soluzioni valide di solito cambiano.

Ottimizzazione Intera e Binaria Non esiste solo l'ottimizzazione in cui le variabili assumono valori nello spazio reale, ma esistono anche ottimizzazioni con delle caratteristiche particolari.

Il vincolo $X \in \mathbb{Z}^n$ richiede che le mie soluzioni *siano valori interi*, quindi **ottimizzazione intera**.

Un altro vincolo molto "reale" è $x \in \{0, 1\}^n$, in questo caso si chiama **ottimizzazione binaria** (vero falso, spento acceso,...). Entrambe queste ottimizzazioni formano le ottimizzazioni a numeri interi. Esiste anche l'ottimizzazione mista, in cui alcune variabili sono intere e altre binarie.

3.2 Programmazione Matematica

DEFINIZIONE

Quando l'insieme delle soluzioni ammissibili di un problema di ottimizzazione viene espresso attraverso un sistema di equazioni e disequazioni, esso prende il nome di *Programmazione Matematica*.

Ovvero, se i vincoli di un problema di ottimizzazione vengono espressi tramite delle equazioni/disequazioni, allora questo problema diventa un problema di programmazione matematica.

Come si definiscono i vincoli

I vincoli vengono espressi con delle espressioni del tipo $g_i(x) \begin{cases} \geq \\ = \\ \leq \end{cases} 0$ in cui $g_i : X \rightarrow \mathbb{R}$ è una funzione generica che lega tra loro le variabili decisionali.

Nota che i vincoli dipendono dalle *stesse variabili da cui dipende la funzione obiettivo*.

L'insieme (somma) di tutti i vincoli definisce la *regione ammissibile*, se $x \in X$ allora è una soluzione ammissibile.

In un problema di ottimizzazione abbiamo quindi m vincoli e n variabili.

Le possibilità Quando risolviamo un problema di PM abbiamo quindi le seguenti possibilità:

- Problema non ammissibile, $X = \emptyset$ (problema mal posto con regione ammissibile vuota)
- Problema illimitato, ovvero per ogni soluzione che trovo ne posso trovare un'altra che è MIGLIORE di quella che ho trovato, (può essere illim superiormente o infer)
- Problema con soluzione ottima unica
- Problema con più soluzioni ottime (anche infinite), tutte le ottime hanno lo stesso valore della funzione obiettivo.

Ottimi Globali e Locali I punti di ottimo possono essere Locali o Globali (se la funzione è convessa Locale=Globale). NB un minimo globale è anche locale, un minimo locale non necessariamente è globale. Ad oggi *non* sappiamo dire se una soluzione sia Globale, sappiamo solo con certezza che sia locale (a meno di usare brute force).

La risoluzione di un problema di programmazione matematica consiste nel trovare una soluzione ammissibile che sia ottimo GLOBALE. Alla fine della fiera la definizione di globale e locale corrisponde a quella di Analisi Matematica. I punti di ottimo globali possono essere multipli.

Capitolo 4

Metodo del Simpleso

Il metodo del simpleso è una procedura algebrica che si basa su dei *concetti geometrici*.

Alcuni Termini Questo metodo si basa su alcune terminologie che ci servono per capire come funziona. Definiamo quindi:

- **Frontiera del vincolo:** è la "linea" di demarcazione di un vincolo.
- **Vertice:** un vertice è un punto di intersezione di coppie di frontiere di vincoli.
 - **Vertici Adiacenti:** Due vertici si dicono adiacenti se condividono $n - 1$ frontiere di vincoli.
 - **Spigolo:** segmento che collega due vertici adiacenti
- **Vertice Ammissibile:** Un vertice è detto ammissibile se *fa parte* della regione ammissibile
- **Vertice *non* ammissibile:** Un vertice è detto *non* ammissibile se *non* fa parte della regione ammissibile.

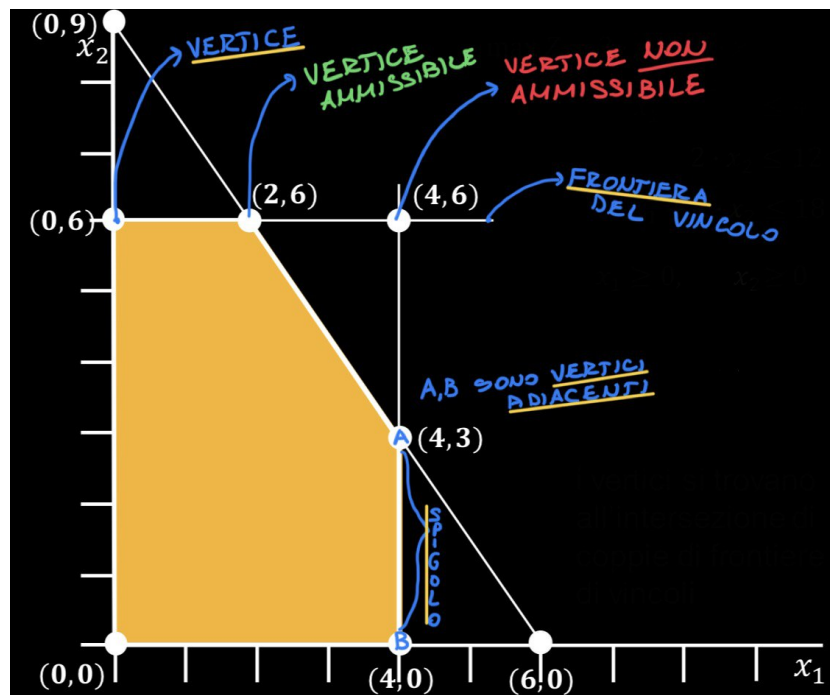
Test di Ottimalità L'interesse per i *vertici adiacenti* sta nella seguente proprietà di cui godono:

DEFINIZIONE

Si consideri ogni problema di PL tale da ammettere almeno una soluzione ottimale:

Se una soluzione vertice non ammette soluzioni vertice a egli adiacen-

ti con valore della funzione obiettivo migliore, allora la **soluzione** in questione è **ottimale**.



4.1 La Procedura Algebrica

Il metodo del simplesso è utilizzabile sia in forma algebrica che geometrica. Siccome questo algoritmo è usualmente eseguito su un calcolatore, che è in grado di interpretare solo istruzioni algebriche, è necessario tradurre la procedura geometrica in una procedura algebrica, che si basa sulla risoluzione di un sistema di equazioni lineari.

Forma Aumentata Per usare il metodo del simplesso bisogna trasformare il modello dalla *forma standard* alla *forma aumentata*:

Per fare ciò bisogna fare le seguenti operazioni:

1. Trasformo tutti i vincoli (tranne quelli di non negatività) in vincoli di *eguaglianza*: $x_1 + x_2 \leq 5 \rightarrow x_1 + x_2 = 5$

2. Per ogni vincolo aggiungo una **Variabile di Slack**

Ogni vincolo riceve una variabile di slack unica, quindi se abbiamo:

$$\begin{cases} x_1 \leq 3 \\ x_2 \leq 2 \\ x_1 + x_2 \leq 5 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x_1 + x_3 = 3 \\ x_2 + x_4 = 2 \\ x_1 + x_2 + x_5 = 5 \end{cases}$$

x_3, x_4, x_5 sono le *variabili di slack*. Assumendo che $x_1 = 0$, la variabile di slack x_3 è la *quantità che manca al termine sinistro della disuguaglianza, affinché questa sia verificata con il segno di uguaglianza*.

Le variabili di slack hanno alcune proprietà che sono utili da tenere a mente: Per un qualunque valore delle variabili decisionali:

- Se $slack = 0 \implies$ La soluzione corrispondente giace sulla frontiera del vincolo della forma originale.
- Se $slack > 0 \implies$ La soluzione corrispondente giace sul lato ammissibile della frontiera del vincolo della forma originale.
- Se $slack < 0 \implies$ La soluzione corrispondente giace sul lato NON ammissibile della frontiera del vincolo.

Si definisce **Soluzione Aumentata** una soluzione del modello in forma originale che viene *aumentata* tramite i corrispondenti valori delle variabili di slack.

Soluzione di Base Si definisce soluzione di base, un vertice del modello in forma aumentata.

Se abbiamo come variabili di base $x_1 = 4, x_2 = 6$ e come variabili di slack $x_3 = 0, x_4 = 0, x_5 = -6$ allora la soluzione di base (non ammissibile) associata sarà $(4, 6, 0, 0, -6)$.

4.1.1 Variabili di Base e Non

Un modello in forma aumentata consiste di d variabili decisionali e s variabili di slack. Abbiamo quindi a disposizione d gradi di libertà per risolvere il sistema lineare. In altre parole, quando risolviamo un sistema lineare (ponendo a zero il valore di x variabili scelte arbitrariamente) abbiamo tante variabili azzerabili quante sono le variabili decisionali.

Proprietà delle Soluzioni di Base Una **soluzione di base** gode delle seguenti proprietà:

1. Una variabile può essere *Di base* o *NON di base*
2. Il numero delle variabili di base *eguaglia il numero dei vincoli funzionali*, Di conseguenza il numero delle variabili non di base eguaglia il numero totale delle variabili, meno il numero dei vincoli funzionali
3. Le variabili NON di base *vengono poste a zero*
4. I valori delle variabili di base sono ottenuti come risoluzione simultanea del sistema di equazioni lineari (in forma aumentata).
5. Se le variabili di base soddisfano i vincoli di non negatività, la soluzione di base è una soluzione ammissibile di base.

Soluzioni di Base Adiacenti Due soluzioni di base ammissibili sono *adiacenti* se sono caratterizzate dal **condividere le stesse variabili non di base eccetto una**.

Di conseguenza, muoversi da una soluzione di base ammissibile ad una soluzione ad essa adiacente *Implica che una variabile non di base divenga di base e che una variabile di base divenga non di base*. Il che richiede di aggiustare i valori delle variabili di base per garantire che il sistema di equazioni sia ancora soddisfatto.

4.2 I Tableau: un Cheatsheet

Ricordiamo il problema in forma standard:

$$\begin{array}{ll} \max & \underline{c}^T \underline{x} \\ \underline{A} \underline{x} & \leq \underline{b} \\ \underline{x} & \geq 0 \end{array}$$

Tableau Il metodo del simpleso è facilmente risolvibile tramite la *Forma Tabellare*.

1 - La forma aumentata Per portare il problema in Forma Aumentata:

- Vincoli
 - **MinoreUguale** $\leq \rightarrow = \wedge + \text{SLACK}$

- **Uguale** \Rightarrow INVARIATO
- **MaggioreUguale** $\geq \Rightarrow = \wedge$ - SURPLUS
- Se ho una variabile non positiva: $x_i \leq 0 \rightarrow x'_i = -x_i$, con $x'_i \geq 0$

2 - Porto in forma Tabellare Il problema in forma aumentata viene riscritto in forma tabellare.

ATTENZIONE PERÒ: La funzione obiettivo passa da $z = \underline{c}^T \underline{x}$ diventa $z - (\underline{c}^T \underline{x}) = 0$ (Quindi la funzione obiettivo diventa Z meno i coefficienti delle variabili).

| V. BASE | Eq | Z | x_1 | x_2 | ... | x_n | T. Noto |
|---------|-------|---|----------|----------|-----|----------|---------|
| Z | R_0 | 1 | c_1 | c_2 | ... | c_n | 0 |
| x_1 | R_1 | 0 | a_{11} | a_{12} | ... | a_{1n} | b_1 |
| x_m | R_n | 0 | a_{m1} | a_{m2} | ... | a_{mn} | b_m |

4.3 Il Metodo dele Due Fasi

In alcuni problemi di PL il punto $(0, 0)$, ovvero l'origine, non è una soluzione ammissibile, quindi non può essere usata come *Soluzione Ammissibile di Base* per il Metodo Del Simplexso.

Quando ci troviamo di fronte a questa situazione abbiamo due possibilità: Usare il meotodo Big M (che non vedremo) oppure usare il *Metodo delle due Fasi*.

Come funziona? Con questo metodo si risolve il problema di PL aggiungendo alla forma aumentata una variabile *artificiale* che va ad "annullare" la variabile di slack (prima fase). La seconda fase consiste nel prendere la soluzione di base generata dalla prima fase e eseguire il metodo del simplexso partendo da li.

Capitolo 5

Dualità

Ad ogni problema di programmazione lineare, che d'ora in poi chiameremo problema **Primale**, è associato un problema chiamato **Duale**. La soluzione ottimale del problema Duale fornisce i *prezzi ombra* del problema Primale.

Analisi di Sensitività La teoria della Dualità permette l'implementazione e interpretazione dell'analisi di sensitività.

L'Analisi di Sensitività è una tecnica che permette di decidere i valori di alcuni parametri di un problema di PL.

5.1 Da Primale a Duale

Un problema duale è strettamente legato al suo primale, infatti per passare da un problema al suo duale:

| <u>PRIMALE</u> | <u>DUALE</u> |
|--------------------|--------------------------|
| $\max \quad c^T x$ | $\min \quad b^T \lambda$ |
| $Ax \leq b$ | $A^T \lambda \geq c$ |
| $x \geq 0$ | $\lambda \geq 0$ |

Più in specifico, le regole per Primale→Duale sono:

| Funzione Obiettivo: | $\max c_i^T x$ | $\min b^T \lambda$ |
|--------------------------|--------------------|--------------------|
| Vincoli \leq (primale) | $a_i^T x \leq b_i$ | $\lambda_i \geq 0$ |
| Vincoli $=$ (primale) | $a_i^T x = b_i$ | λ_i Libera |
| Vincoli \geq (primale) | $a_i^T x \geq b_i$ | $\lambda_i \leq 0$ |
| Vincoli Non negatività | $x_j \geq 0$ | $A_j^T \geq c_j$ |
| Variabile Libera | x_j Libera | $A_j^T = c_j$ |
| Vincoli Non positività | $x_j \leq 0$ | $A_j^T \leq c_j$ |

Quindi dato un qualunque problema di PL:

- un problema di MAX diventa un problema di MIN.
- i coefficienti del primale diventano i termini noti del duale
- i termini noti del primale diventano coefficienti del duale.
- i coefficienti di variabile rimangono invariati

Si può notare che il Duale di un Duale è il suo Primale, quindi un problema di minimizzazione diventa un problema di massimizzazione.

Teorema della dualità

Riassumendo le relazioni tra primale e duale, il teorema di dualità dice:

1. Se un problema ha soluzioni ammissibili e funzione obiettivo limitata (quindi ha soluzione ottimale), allora la stessa cosa vale per l'altro problema, per cui le proprietà di dualità debole e forte sono entrambe applicabili.
2. Se un problema ha soluzioni ammissibili e funzione obiettivo Illimitata (non ha ottimo), allora l'altro problema non ha soluzioni ammissibili.
3. Se un problema ha soluzioni ammissibili, allora l'altro problema o non ha soluzioni ammissibili o ha una funzione obiettivo Illimitata

O, in parole povere: Se un problema ha:

- Sol. Ammissibili, e Ottimo \implies Idem per l'altro (Dualità forte e debole applicabili)
- Sol. Ammissibili, e NON Ottimo (obb. illimitata) \implies L'altro NON ha soluzioni ammissibili
- No Sol. Ammissibili \implies L'altro o non ha sol. amm. o ha f.obb Illimitata

Capitolo 6

Branch and Bound

Il Branch and Bound è una tecnica per la risoluzione di problemi di ottimizzazione intera. Questa è una tecnica di *enumerazione implicita*, ovvero:

- "valuta" le soluzioni possibili fino a trovare quella ottima
- scarta alcune di queste soluzioni a priori dimostrando la loro non ottimalità
- si basa sul concetto di Dividi et Impera

6.1 Come funziona

Supponiamo di avere un problema di PLI che chiamiamo *problema completo*. Un problema di PLI rappresenta un **sotto-problema** del problema completo se presenta la medesima funzione obiettivo ma ha un sottoinsieme proprio di X come regione ammissibile.

Sia $z^* = f(x^*)$ la soluzione del problema completo e $\tilde{z} = f(\tilde{x})$ la soluzione ottima di un sotto-problema. allora si ha che $f(\tilde{x}) \leq f(x^*)$

Basta solo notare che tra le soluzioni ammissibili del problema completo vi è anche x e che per definizione di ottimo $f(\tilde{x}) \leq f(x^*)$

6.1.1 Le tecniche

Il Branch and Bound fa uso delle tre seguenti tecniche per risolvere un generico problema PLI:

- La partizione rispetto al valore delle variabili, o **Branching**

- La determinazione di un limite superiore, o **Bounding**
- L'eliminazione di sottoproblemi, o **Fathoming**

Branching

Bounding

Fathoming

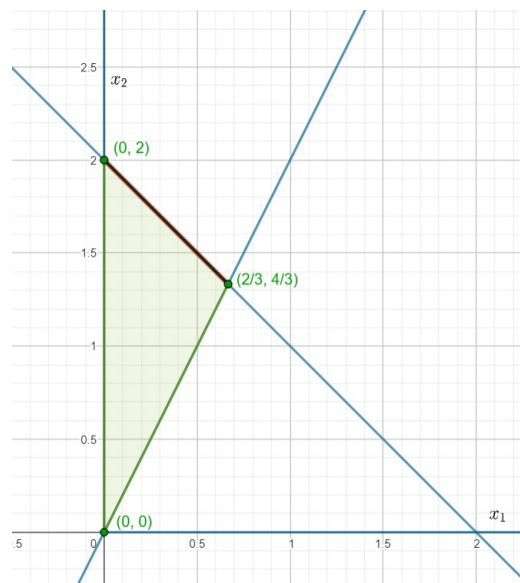
Capitolo 7

Assignments

7.1 Assignment 1

7.1.1 Risoluzione grafica

$$\begin{aligned} \text{Max } & x_1 + x_2 \\ & x_1 + x_2 \leq 2 \\ & 2x_1 - x_2 \leq 0 \\ & x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \end{aligned}$$



7.1.2 Metodo del tableau

$$\begin{aligned}
& \text{Max } x_1 + x_2 \\
& x_1 + x_2 - x_3 = 2 \\
& 2x_1 - x_2 \leq 0 \\
& x_1 \geq 0; x_2 \geq 0; x_3 \leq 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z &= x_1 + x_2 \\
x_1 + x_2 - x_3 &= 2 \\
2x_1 - x_2 &\leq 0
\end{aligned}$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \leq 0$$

$$\begin{aligned}
Z - x_1 - x_2 &= 0 \\
x_1 + x_2 + \mathbf{x'_3} &= 2 \\
2x_1 - x_2 &\leq 0
\end{aligned}$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \mathbf{x'_3} \geq 0$$

$$\begin{aligned}
Z - x_1 - x_2 &= 0 \\
x_1 + x_2 + x'_3 &= 2 \\
2x_1 - x_2 + \mathbf{x_4} &= 0
\end{aligned}$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x'_3 \geq 0, \mathbf{x_4} \geq 0$$

Se l'origine del problema (0, 0) è ammissibile, seleziono x_1 e x_2 (cioè le variabili della funzione obiettivo) come **variabili di base**.

Provo il problema originario usando l'**origine del problema**, ovvero azzero x_1 e x_2 .

Iterazione 0:

| Var di Base | Eq | Z | x_1 | x_2 | x'_3 | x_4 | t. n. |
|-------------|----------------|---|-------|-------|--------|-------|-------|
| Z | R ₀ | 1 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| x'_3 | R ₁ | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 |
| x_4 | R ₂ | 0 | 2 | -1 | 0 | 1 | 0 |

I vincoli sono rispettati. Ottengo dunque la **soluzione di base ammissibile** $(0, 0, 2, 0)$.

La soluzione di base che ho ottenuto è **ottimale**? Lo è se nella riga R_0 corrispondente alla funzione obiettivo ho solo coefficienti **non negativi**.

Ho -1 e -1 , quindi **non** è ottimale. Allora procedo.

Ora scelgo la *variabile non di base* **entrante**. Di solito è quella con coefficiente con *valore assoluto maggiore*. Ma qui ho -1 e -1 quindi scelgo in maniera arbitraria.

Scelgo x_1 , la cui colonna diventa **colonna pivot**. La **riga pivot** viene identificata tramite la **regola del rapporto minimo**. Questa mi dà un numero che corrisponde al rapporto fra il **termine noto** e il coefficiente della **variabile entrante** che ho già individuato.

Nel nostro caso x'_3 mi dà $\frac{2}{1}$ e x_4 mi dà $(\frac{0}{2})$, perciò x_4 vince la regola del rapporto minimo diventando la *variabile uscente*. Ricapitolando, x_1 è la *variabile entrante* e x_4 è la *variabile uscente*, mentre il **numero pivot** è 2.

Ricorda la regola:

Prima divido la riga pivot R_p per il numero pivot.

Poi tutte le altre righe con la formula:

$$R_i = R_i - |c| \cdot R_p \quad \text{se } c > 0$$

$$R_i = R_i + |c| \cdot R_p \quad \text{se } c < 0$$

Procedo con la prossima iterazione.

Iterazione 1:

| Var di Base | Eq | Z | x_1 | x_2 | x'_3 | x_4 | t. n. |
|-------------|-------|---|-------|----------------|--------|----------------|-------|
| Z | R_0 | 1 | 0 | $-\frac{3}{2}$ | 0 | $\frac{1}{2}$ | 0 |
| x'_3 | R_1 | 0 | 0 | $\frac{3}{2}$ | 1 | $-\frac{1}{2}$ | 2 |
| x_1 | R_2 | 0 | 1 | $-\frac{1}{2}$ | 0 | $\frac{1}{2}$ | 0 |

La soluzione di base ammissibile che ottengo è $(0, 0, 2, 0)$, la stessa di prima. Procedo dunque con il prossimo passo.

Questa volta la *variabile entrante* è x_2 perché è l'unica con coefficiente **negativo** nella riga della funzione obiettivo.

Invece la *variabile uscente* è x'_3 perché è l'unica con coefficiente **positivo** nella colonna della *variabile entrante*. Il nuovo **numero pivot** è $\frac{3}{2}$.

Iterazione 2:

| Var di Base | Eq | Z | x_1 | x_2 | x'_3 | x_4 | t. n. |
|-------------|-------|-----|-------|-------|---------------|----------------|---------------|
| Z | R_0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| x'_3 | R_1 | 0 | 0 | 1 | $\frac{2}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | $\frac{4}{3}$ |
| x_1 | R_2 | 0 | 1 | 0 | $\frac{1}{3}$ | $\frac{1}{3}$ | $\frac{2}{3}$ |

La soluzione di base ammissibile che ottengo è $(\frac{2}{3}, \frac{4}{3}, 0, 0)$ e Z ha valore $Z = 2$. Procedo controllando se è una soluzione ottimale.

Ho tutti coefficienti non negativi nella riga della funzione obiettivo, quindi **la mia soluzione è ottimale**. Esercizio finito.

Però nota bene: all'inizio ho fatto una scelta arbitraria, scegliendo x_1 come variabile non di base entrante. Cosa succederebbe se scegliessi invece x_2 ?

Ricomincio l'esercizio scegliendo x_2 come variabile non di base entrante.

Iterazione 0:

| Var di Base | Eq | Z | x_1 | x_2 | x'_3 | x_4 | t. n. |
|-------------|-------|-----|-------|-------|--------|-------|-------|
| Z | R_0 | 1 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| x'_3 | R_1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 |
| x_4 | R_2 | 0 | 2 | -1 | 0 | 1 | 0 |

Variabile entrante: x_2 .

Variabile uscente: x'_3 , ovvero l'unica con coefficiente positivo nella colonna della variabile entrante.

Numero pivot: 1.

Iterazione 0:

| Var di Base | Eq | Z | x_1 | x_2 | x'_3 | x_4 | t. n. |
|-------------|-------|-----|-------|-------|--------|-------|-------|
| Z | R_0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| x'_3 | R_1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 |
| x_4 | R_2 | 0 | 3 | 0 | 1 | 1 | 2 |

La soluzione di base ammissibile che ottengo è $(0, 2, 0, 2)$ e Z ha valore $Z = 2$. Procedo controllando se è una soluzione ottimale.

Ho solo coefficienti non negativi nella riga della funzione obiettivo, perciò **la mia soluzione è ottimale**.

Però con x_1 avevo ottenuto una soluzione ottimale diversa, ovvero $(\frac{2}{3}, \frac{4}{3}, 0, 0)$. Va bene? Sì se questi due vertici sono *adiacenti*.

Ma quando due vertici sono adiacenti? Quando condividono $n - 1$ frontiere di vincoli.

Contando di non aver fatto errori nei tableau, posso assumere che lo siano. In tal caso *la mia soluzione ottimale sarà il **segmento** che unisce i due vertici $(0, 2, 0, 2)$ e $(\frac{2}{3}, \frac{4}{3}, 0, 0)$ e che avrà come valore della funzione obiettivo $Z = 2$.*

Però potrei avere una domanda per Fabio: ho letto nel tuo file che due vertici sono adiacenti se condividono tutte le variabili non di base tranne una. Io qua ho $(0, 2, 0, 2)$ che ha come variabili non in base x'_3 e x_4 mentre $(\frac{2}{3}, \frac{4}{3}, 0, 0)$ ha come variabili in base x_2 e x_4 . La mia domanda è: condividono x_2 , basta per dire che sono adiacenti o devono condividere il valore?