

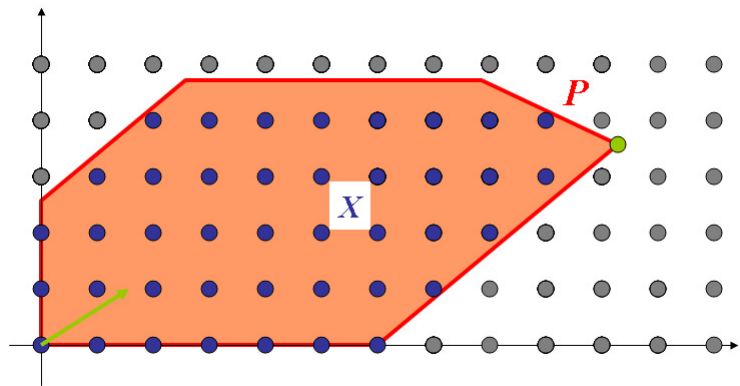
Branch-and-bound per problemi di programmazione lineare intera

Luigi De Giovanni

Dipartimento di Matematica, Università di Padova

Programmazione Lineare Intera

$$\begin{array}{ll} \min / \max & c^T x \\ \text{s.t.} & Ax = b \\ & x \in \mathbb{Z}_+^n \end{array}$$



Algoritmo universale per ottimizzazione combinatoria

- 1 generare tutte le possibili soluzioni x ;
- 2 verificare l'ammissibilità della soluzione $x \in X$;
- 3 valutare $f(x)$
- 4 scegliere la x ammissibile cui corrisponde la migliore $f(x)$.

- Come *generare lo spazio* delle soluzioni (ammissibili)?
- Come *esplorare efficientemente* lo spazio delle soluzioni?

Generazione delle soluzioni: **Branch**

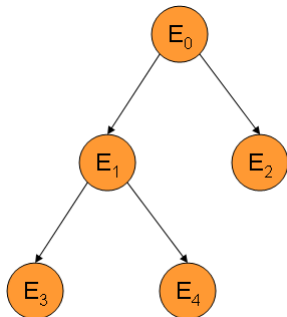
$$z = \text{opt}\{f(x) : x \in X\} \quad X = \bigcup_{i=1}^n X_i = X$$

$$z^{(k)} = \text{opt}\{f(x) : x \in X_k\}$$

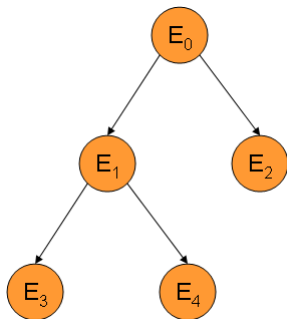
$$z = \text{opt} \{ z^{(k)}, k = 1, \dots, n \}$$

- *divide et impera*
- divisione (e soluzione) ricorsiva
- albero delle soluzioni (ammissibili)

- operazione di **branch**



Branching: regole base



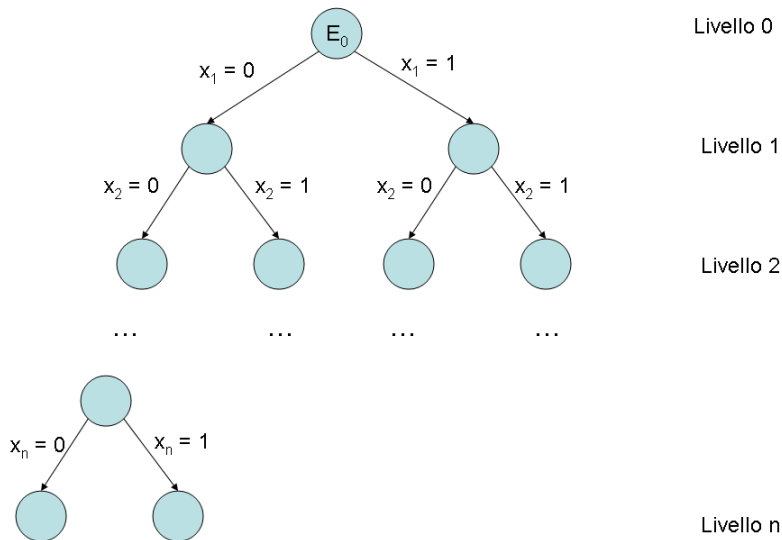
- $E_0 = X$

- $E_i = \bigcup_{j \text{ figlio di } i} E_j$

- $E_j \cap E_k = \emptyset, \forall j, k \text{ figli di } i$

Esempio: branching binario

$$x_i \in \{0, 1\}, i = 1..n$$



Esempio: branching “naturale” per path-finding

Ad ogni passo, esplora le diverse direzioni ammesse:

- posso sfruttare parallelismo?
- esiste un criterio per scartare cammini parziali?

Esplorazione efficiente: **bound** + fathom (o prune)

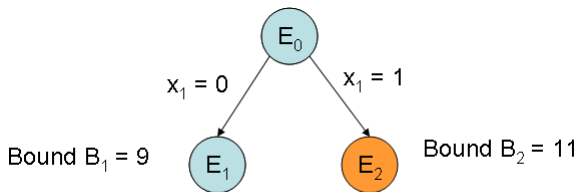
Esempio: $\min z = 11x_1 + 9x_2 + 10x_3 + y$

s.t. $x_1 + x_2 + x_3 \geq 1$

...molti altri vincoli su x_i e y (non formulabili)...

$x_i \in \{0, 1\}$, $y \geq 0$

È noto che $x_3 = 1, x_1 = x_2 = 0$ è ammissibile (con $z = 10$)



- $z = \min\{z^{(1)}, z^{(2)}\}$, e anche $z \leq 10$
- $z^{(1)} \geq 9$
- $z^{(2)} \geq 11 (\geq 10) \implies$ Possiamo **potare** $E_2!!!$

Branch-and-bound: idea base

- **Branch:** costruzione dell'albero delle soluzioni (enumerazione ricorsiva)
- **Soluzione ammissibile** (incumbent solution): valore possibile, ma non dimostrabilmente ottimo
- **Bound:** valutazione ottimistica della funzione obiettivo per le soluzioni associate ad un nodo (sottoalbero)
- **Fathom:** se il bound di un nodo non è migliore dell'incumbent, il relativo sottoalbero si può potare

Enumerazione **implicita** dello spazio delle soluzioni

Metodo del Branch-and-Bound (B&B)

Inizializzazione: Esegui una stima ottimistica B_0 della funzione obiettivo e poni $L = \{(P_0, B_0)\}$, $\bar{x} = \emptyset$, $\bar{z} = +\infty(\min)[-\infty(\max)]$

Repeat:

Criterio di Stop: Se $L = \emptyset$, allora **stop**: \bar{x} è la soluzione ottima.

Selezione nodo: Seleziona $(P_i, B_i) \in L$ per effettuare il branch

Branching: Dividi P_i in t sotto-problemi $P_j, j = 1..t$ ($\cup_j P_j = P_i$)

For each sottoproblema $j = 1..t$

Bounding: Valuta una stima ottimistica B_j ottenendo informazioni (soluzione "rilassata" x_j^R o inammissibilità)

Fathoming: Se P_j non è ammissibile, **continue**

Se B_j non è migliore di \bar{z} ammissibile, **continue**

Se x_j^R ammissibile:

se x_j^R anche migliore di \bar{z} :

aggiorna $\bar{z} \leftarrow B_j$, $\bar{x} \leftarrow x_{ij}^R$

elimina da L nodi k con L_k non migliore di \bar{z} ;

continue

Ricorsione: Atrimenti, aggiungi (P_j, B_j) a L

Esempio (dummy): scelta ottima di appalti

Una grossa azienda di costruzioni edili deve decidere la combinazione ottimale degli appalti da accettare per la costruzione degli edifici A , B e C .

I profitti attesi per i tre edifici sono di 3, 5 e 7 milioni di euro rispettivamente.

L'azienda dispone di 4 ruspe speciali e gli edifici richiedono risp. 3, 2 e 3 ruspe.

È possibile inoltre affittare fino a due altre ruspe speciali per la durata dei lavori, al costo di un milione di euro a ruspa.

Decisioni:

- accettare appalto i , $i \in \{A, B, C\}$. Possibili decisioni: sì/no.
- numero di ruspe da affittare. Possibili decisioni: 0, 1 o 2.

Possibili combinazioni: $2 \times 2 \times 2 \times 3 = 24$

Branch: scegliere una decisione e creare un sottoproblema per ogni valore

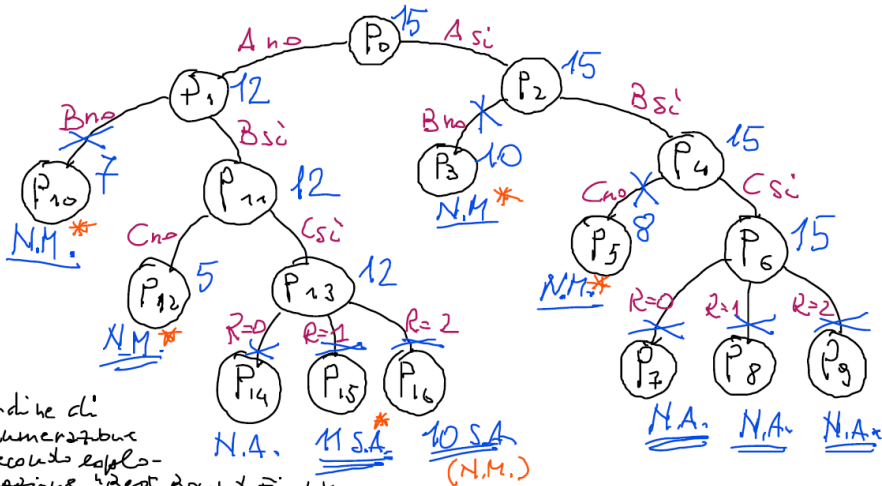
Bound: somma profitti di tutti gli appalti possibili meno costo ruspe “fissate”
(valutazione imprecisa ma ottimistica e veloce,
senza ragionamenti su ruspe “necessarie”)

Esempio: albero di branch-and-bound

A: 3 M\$, 3 ruspe

B: 5 M\$, 2 ruspe

C: 7 M\$, 3 ruspe



Sol. ottimale in P15!

Progettazione

- **Regole di branching:** strategia per costituire sottoproblemi sempre più semplici (al limite una soluzione!)
 - $E_i : \cup_j E_j = E$ (must!) [e $E_i \cap E_j = \emptyset$ opzionale]
- **Bound:** *lower bound* (min, LB) o *upper bound* (max, UB).
 - Valutazione **ottimistica**...: $LB \leq f(E_i)$ $UB \geq f(E_i)$
 - ...ma non troppo! **efficienza** computazionale .vs. **qualità** bound*
- **Regole di fathoming:** evito di esplorare nodo se
 - **[N.M.]** Assenza di soluzione migliorante (B_i non migliora $f(\bar{x})$)
 - **[S.A.]** Valutazione ottimistica è anche di soluzione ammissibile
 - **[N.A.]** Sottoproblema non ammissibile ($E_i = \emptyset$)
- **Strategie di esplorazione:** *Depth First, Best Bound First, Mista*
- **Valutazione di soluzioni ammissibili:** opzionale!
 - sforzo computazionale .vs. possibilità di potare nodi
- **Criteri di arresto:** tutti i nodi *fathomed* (metodo esatto). Oppure...

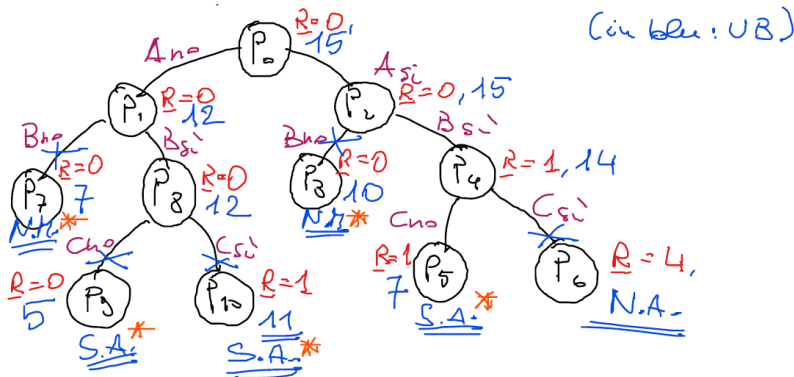
*Esempio: regola alternativa per il calcolo dei bound

Bound: sommare i profitti di tutti gli appalti possibili *e valutare una stima per difetto R delle ruspe necessarie (sulla base degli appalti fissati)*

(A: 3 M\$, 3 ruspe

B: 5 M\$, 2 ruspe

C: 7 M\$, 3 ruspe)



↳ la stima di R porta non solo a un U.B., ma anche a una soluzione ammissibile.

B&B per PLI

Problema di PLI(M) (fissiamo le idee: max)

$$\begin{aligned} z_I &= \max c^T x \\ Ax &\leq b \\ x &\geq 0 \\ x_i &\in \mathbb{Z}, \quad i \in I. \end{aligned} \tag{1}$$

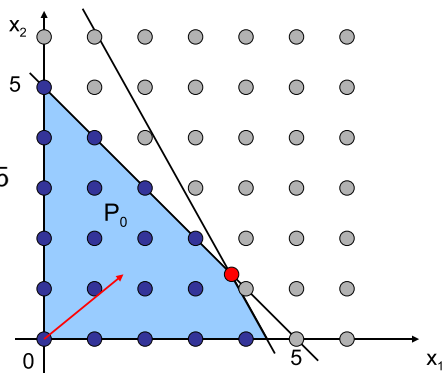
Rilassamento continuo

$$\begin{aligned} z_L &= \max c^T x \\ Ax &\leq b \\ x &\geq 0 \end{aligned} \tag{2}$$

$$z_L \geq z_I \quad z_L \text{ è un UB!}$$

Problema P_0

$$\begin{aligned} z_l^0 = \max \quad & 5x_1 + \frac{17}{4}x_2 \\ (P_0) \quad & x_1 + x_2 \leq 5 \\ & 10x_1 + 6x_2 \leq 45 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \\ & x_1, x_2 \in \mathbb{Z} \end{aligned}$$



Rilassamento lineare: $x_1 = 3.75$, $x_2 = 1.75$, con valore $z_L^0 = 24.06$

Branch da P_0 su variabile frazionaria $x_1 = 3.75$

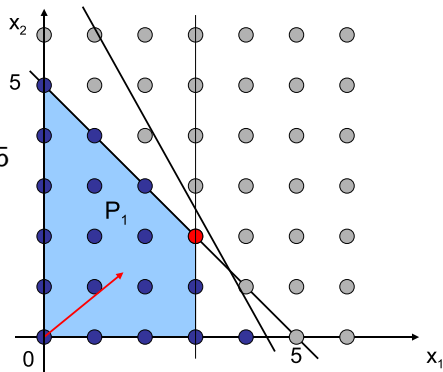
$$\begin{aligned} z_I^1 = \max \quad & 5x_1 + \frac{17}{4}x_2 \\ & x_1 + x_2 \leq 5 \\ & 10x_1 + 6x_2 \leq 45 \\ & x_1 \leq 3 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \\ & x_1, x_2 \in \mathbb{Z} \\ & (P_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_I^2 = \max \quad & 5x_1 + \frac{17}{4}x_2 \\ & x_1 + x_2 \leq 5 \\ & 10x_1 + 6x_2 \leq 45 \\ & x_1 \geq 4 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \\ & x_1, x_2 \in \mathbb{Z} \\ & (P_2) \end{aligned}$$

- Non perdo soluzioni intere: $E_1 \cup E_2 = E_0$, $z_I = \max\{z_I^1, z_I^2\}$
- z_L^0 esclusa!

Problema P_1

$$(P_1) \quad \begin{aligned} z_l^1 = \max \quad & 5x_1 + \frac{17}{4}x_2 \\ & x_1 + x_2 \leq 5 \\ & 10x_1 + 6x_2 \leq 45 \\ & x_1 \leq 3 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \\ & x_1, x_2 \in \mathbb{Z} \end{aligned}$$

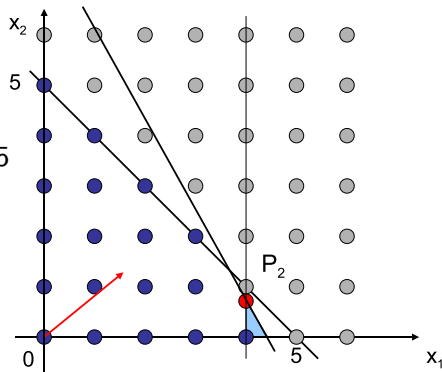


Rilassamento lineare: $x_1 = 3$, $x_2 = 2$, con valore $z_l^1 = 23.5$

Soluzione intera (rilassamento ammissibile): nodo potato per **S.A.**
aggiornamento incumbent, $\bar{z} = 23.5$

Problema P_2

$$\begin{aligned} z_l^1 = \max \quad & 5x_1 + \frac{17}{4}x_2 \\ (P_2) \quad & x_1 + x_2 \leq 5 \\ & 10x_1 + 6x_2 \leq 45 \\ & x_1 \geq 4 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \\ & x_1, x_2 \in \mathbb{Z} \end{aligned}$$



Rilassamento lineare: $x_1 = 4$, $x_2 = 0.83$, con valore $z_L^2 = 23.54$

Branch da P_2 su variabile frazionaria $x_2 = 0.83$

$$\begin{aligned} z_1^1 = \max \quad & 5x_1 + \frac{17}{4}x_2 \\ & x_1 + x_2 \leq 5 \\ & 10x_1 + 6x_2 \leq 45 \\ & x_1 \geq 4 \\ & x_2 \leq 0 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \\ & x_1, x_2 \in \mathbb{Z} \\ & (P_3) \end{aligned}$$

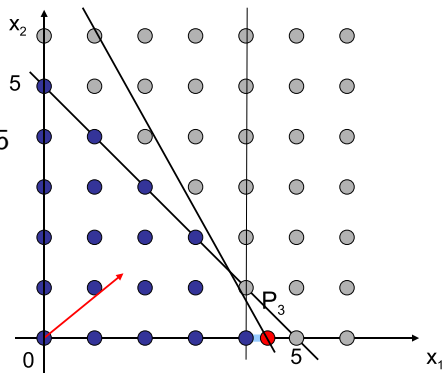
$$\begin{aligned} z_1^2 = \max \quad & 5x_1 + \frac{17}{4}x_2 \\ & x_1 + x_2 \leq 5 \\ & 10x_1 + 6x_2 \leq 45 \\ & x_1 \geq 4 \\ & x_2 \geq 1 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \\ & x_1, x_2 \in \mathbb{Z} \\ & (P_4) \end{aligned}$$

$$E_3 \cup E_4 = E_2$$

Problema P_3

$$\begin{aligned} z_l^1 = \max \quad & 5x_1 + \frac{17}{4}x_2 \\ & x_1 + x_2 \leq 5 \\ & 10x_1 + 6x_2 \leq 45 \\ & x_1 \geq 4 \\ & x_2 \leq 0 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \\ & x_1, x_2 \in \mathbb{Z} \end{aligned}$$

(P_2)

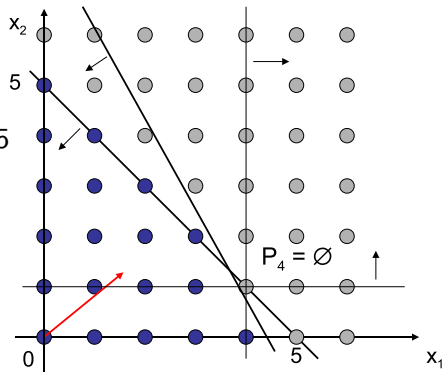


Rilassamento lineare: $x_1 = 4.5$, $x_2 = 0$, con valore $z_L^3 = 22.5$

$z_L^3 \leq \bar{z}$: nodo potato per **N.M.**

Problema P_4

$$(P_2) \quad \begin{aligned} z_j^1 &= \max && 5x_1 + \frac{17}{4}x_2 \\ &&& x_1 + x_2 \leq 5 \\ &&& 10x_1 + 6x_2 \leq 45 \\ &&& x_1 \geq 4 \\ &&& x_2 \geq 1 \\ &&& x_1, x_2 \geq 0 \\ &&& x_1, x_2 \in \mathbb{Z} \end{aligned}$$

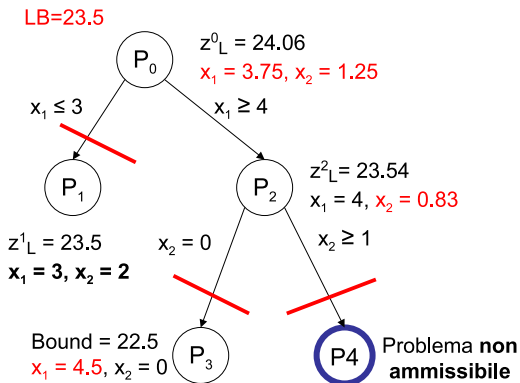


Rilassamento lineare: non ammissibile.

Anche (P_4) non è ammissibile: nodo potato per **N.A.**

Tutti i nodi fathomed: $\bar{x} = (2, 3)$ con $\bar{z} = 23.5$ ottima!

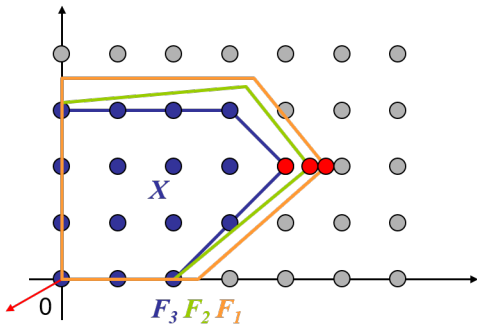
Albero di branch-and-bound



B&B per PLI: scelte progettuali

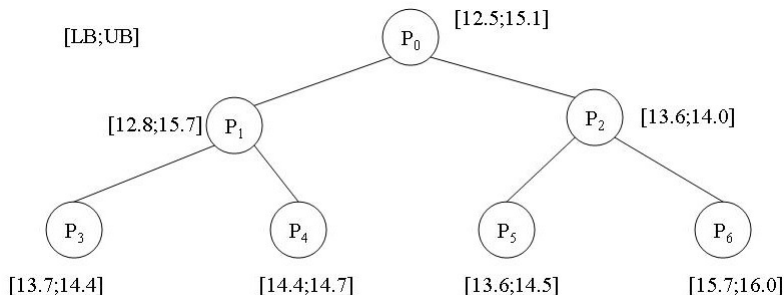
- **Bound** con rilassamento continuo
 - ▶ formulazioni alternative per bound più stringenti*
- **Branch** binario su una variabile frazionaria
 - ▶ come scelgo la variabile frazionaria? (e.g. “più” frazionaria, “più” intera, *diving* etc.)
 - ▶ possibile branching t -ario se pochi valori alternativi
- Fathoming standard
- Strategie di esplorazione: mista, *diving* etc.
- Soluzione ammissibile
 - ▶ euristiche (o meta-euristiche) ad-hoc prima del branch-and-bound
 - ▶ *rounding heuristic* sulla soluzione frazionaria ad ogni nodo (o sotto particolari condizioni)
 - ▶ etc.
- Arresto standard + max time, optimality gap etc.

*Esempio: bound e formulazioni alternative per PLIM



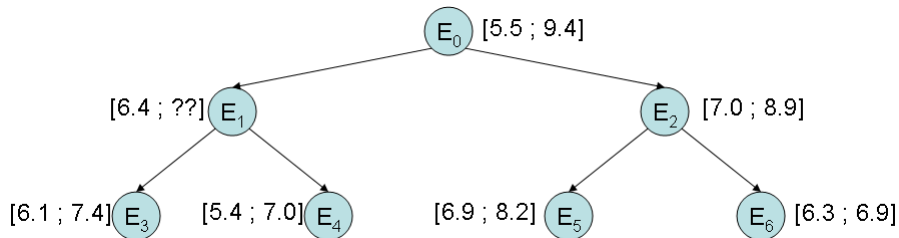
- F_2 è *migliore* di F_1 : fornisce bound più stringenti (più vicini all'ottimo): UB più bassi (per problemi di max) o LB più alti (per problemi di min)
- F_3 è la *formulazione ideale*: permette di risolvere il problema al nodo radice (senza branching)

Esercizio



- min o max?
- nodi da chiudere?
- intervallo ottimo?
- best bound first?
- LB e UB per chiudere...

Esercizio



- min o max? valore '??'?
- intervallo ottimo?
- nodi da chiudere?
- best bound first?
- LB e UB per chiudere...

