Ottimizzazione

Ottimizzazione

- Esistono tre ambiti distinti per "*fare*" ottimizzazione
  - **Management**
    - Valutazione dei progetti
    - Selezione del prodotto ottimale
    - Decisione se investire in ricerca o in produzione
    - Realizzazione di nuovi impianti
    - Supervisione tra più realtà produttive
  - **Progettazione**
    - Progettazione di processi o di apparecchiature specifiche
    - Specifiche delle apparecchiature
    - Condizioni operative nominali
  - **Conduzione**
    - Conduzione di impianto
    - Controllo di processo
    - Utilizzo delle materie prime
    - Minimizzazione del dispendio energetico
    - Logistica (stoccaggio, spedizione, trasporto)

Posizione del problema

- Un problema di ottimizzazione è caratterizzato da:
  - Funzione obiettivo
  - Vincoli di uguaglianza (opzionali)
  - Vincoli di disuguaglianza (opzionali)

- I vincoli possono essere:
  - Lineari
  - Non lineari

  - Violabili
  - Inviolabili

  - Veri e propri
  - Estremi inferiori e superiori sui gradi di libertà

- Le variabili di ottimizzazione vengono anche dette: *gradi di libertà* (gdl)

- Matematicamente si scrive:

$$\begin{cases} Min & f(\mathbf{x}) \\ s.t. & h(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ & g(\mathbf{x}) \geq \mathbf{0} \end{cases}$$

Vincoli

- I vincoli di uguaglianza e disuguaglianza possono comprendere il modello del processo da ottimizzare nonché i limiti di legge e processistici ed i limiti sui gradi di libertà
- I vincoli individuano la regione di *"fattibilità"* all'interno della quale muovere i gradi di libertà nella ricerca dell'ottimo
- Occorre che i vincoli siano consistenti al fine di definire una regione *"fattibile"* di ricerca
- Non c'è limite teorico al numero di vincoli di disuguaglianza
- Se il numero di vincoli di uguaglianza è uguale al numero di *gdl* allora l'unica soluzione coincide anche con il punto di ottimo. In realtà se esistono il sistema di eq. non lineari ha più soluzioni, per ottenere il punto di ottimo assoluto occorre identificare tutte le soluzioni e quindi valutare la funzione obiettivo in ogni punto, selezionando alla fine il punto che produce il valore migliore.
- Se si hanno più variabili che vincoli di uguaglianza allora il problema è SOTTODETERMINATO ed occorre procedere alla ricerca effettiva dell'ottimo della funzione obiettivo
- Se si hanno più vincoli di uguaglianza che gdl il problema è SOVRADETERMINATO e NON esiste una soluzione che soddisfi in modo preciso tutti i vincoli. Questo è un tipico esempio di Riconciliazione in senso classico

Caratteristiche dei problemi di Ottimizzazione

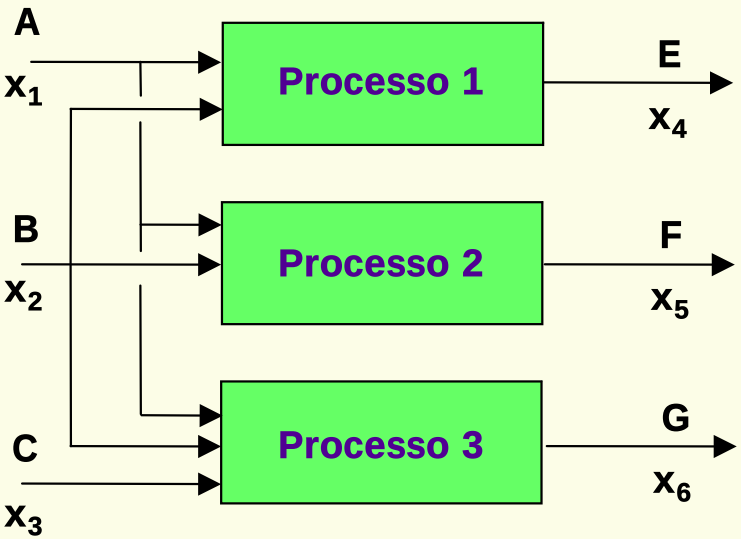
- Se la funzione obiettivo ed i vincoli sono lineari il problema è detto LINEARE
- Se la funzione obiettivo e/o i vincoli sono NON lineari rispetto ai gradi di libertà il problema è detto NON lineare
- Un problema di ottimizzazione NON lineare è più complicato di uno lineare
- Un problema lineare ha una sola soluzione se fattibile
- Un problema NON lineare può avere più punti di ottimo locale
- La ricerca dell'ottimo assoluto può essere molto complicata. Spesso non ha successo
- Raramente si è interessati all'ottimo assoluto soprattutto qualora si stia operando un'ottimizzazione di processo in linea
- La ricerca del punto di ottimo è condizionata pesantemente dalle eventuali discontinuità della funzione obiettivo e/o dei vincoli
- Se esiste interazione tra i gdl la ricerca dell'ottimo è fortemente condizionata. Per esempio:

$$f_{obj}\left(x_1, x_2\right) = 3x_1^3\sqrt{x_2}$$

Struttura della funzione obiettivo

- Tipicamente la funzione obiettivo è di tipo economica: $\sum$(ricavi – costi), ma può basarsi anche su criteri di minimizzazione degli inquinanti o sulla massimizzazione di conversioni, rendimenti, produzioni energetiche
- Se nell'ambito del processo ci si riferisce soltanto a costi operativi e si tralasciano i costi di investimento allora si parla di problemi di SUPERVISIONE, CONTROLLO in SUPERVISIONE
- È anche possibile dovere considerare contemporaneamente costi di esercizio e di investimento. È questo il campo del *"Conceptual Design"*. Occorre individuare una base comune di riferimento rispetto cui effettuare il confronto. Infatti i costi di investimento vengono misurati in [€] mentre quelli di esercizio in [€/y].

Esempio 1: Profitti di esercizio



DATI DI PROCESSO

1) $A + B \rightarrow E$
2) $A + B \rightarrow F$
3) $3A + 2B + C \rightarrow G$

MATERIE PRIME		
Componente	Disponibilità kg/d	Costo €/kg
A	40,000	1.5
B	30,000	2.0
C	25,000	2.5

PRODOTTI				
Processo	Prodotto	Reagenti richiesti per [kg] di prodotto	Costi di processamento	Prezzo di vendita
1	E	2/3 A, 1/3 B	1.5 €/kg E	4.0 €/kg E
2	F	2/3 A, 1/3 B	0.5 €/kg F	3.3 €/kg F
3	G	1/2 A, 1/6 B, 1/3 C	1.0 €/kg G	3.8 €/kg G

Esempio 1: Profitti di esercizio (continua)

Tesi: Si desidera determinare il massimo profitto giornaliero.
I gradi di libertà sono le portate dei singoli componenti [kg/d]

- Profitto dalla vendita dei prodotti [€/d]

  $4x_4 + 3.3x_5 + 3.8x_6$

- Costo materie prime [€/d]

  $1.5x_1 + 2.0x_2 + 2.5x_3$

- Costo di esercizio [€/d]

  $1.5x_4 + 0.5x_5 + 1.0x_6$

- Funzione obiettivo risultante

  $$f(\mathbf{x}) = 4x_4 + 3.3x_5 + 3.8x_6 - 1.5x_1 - 2.0x_2 - 2.5x_3 - 1.5x_4 - 0.5x_5 + - 1.0x_6 = 2.5x_4 - 2.8\,x_5 + 2.8\,x_6 - 1.5\,x_1 - 2x_2 - 2.5x_3$$

- Vincoli sui bilanci materiali

  $x_1 = 2/3\,x_4 + 2/3\,x_5 + 1/2\,x_6$

  $x_2 = 1/3\,x_4 + 1/3\,x_5 + 1/6\,x_6$

  $x_3 = 1/3\,x_6$

Esempio 1: Profitti di esercizio (continua)

- Upper & lower limits sui gdl

  $0 \leq x_1 \leq 40{,}000$

  $0 \leq x_2 \leq 30{,}000$

  $0 \leq x_3 \leq 25{,}000$

- Il problema è LINEARE nella funzione obiettivo e nei vincoli. Si utilizzano delle tecniche di PROGRAMMAZIONE LINEARE (ad esempio: metodo del simplesso) per la risoluzione del problema di ottimo. Dato che la funzione obiettivo è un iperpiano con un'area di ricerca delimitata da iperrette (vincoli di uguaglianza e disuguaglianza) la soluzione ottimale giace sui vincoli e più precisamente su un'intersezione dei vincoli di uguaglianza.

Esempio 2: Costi di investimento

Tesi:

Si desidera conoscere il rapporto: *L/D* ottimale per un recipiente in pressione di volume assegnato: *V*.

Ipotesi:

Le estremità sono chiuse e piatte

Pareti di spessore *t* costante.

Lo spessore *t* non dipende dalla pressione

Densità ρ del metallo è indipendente dalla pressione

Costi di fabbricazione *M* [€/kg] uguali per le pareti laterali ed i fondelli

Non ci sono scarti di produzione

Svolgimento: $$S_{tot} = 2\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) + \pi DL = \frac{\pi D^2}{2} + \pi DL$$

Posso scrivere tre funzioni obiettivo equivalenti:

$$\begin{cases} f_1 = \dfrac{\pi D^2}{2} + \pi DL \\ f_2 = \rho\left(\dfrac{\pi D^2}{2} + \pi DL\right)t \\ f_3 = M\rho\left(\dfrac{\pi D^2}{2} + \pi DL\right)t \end{cases}$$

Esempio 2: Costi di investimento (continua)

Sfruttando la conoscenza di V ottengo: $f_1 = \frac{\pi D^2}{2} + \pi D \frac{4V}{\pi D^2} = \frac{\pi D^2}{2} + \frac{4V}{D}$

Derivando si ottiene: $\frac{df_1}{dD} = \pi D - \frac{4V}{D^2} = 0 \Rightarrow D_{opt} = \sqrt[3]{\frac{4V}{\pi}} \qquad L_{opt} = \sqrt[3]{\frac{4V}{\pi}}$

Quindi: $\left(\frac{L}{D}\right)_{opt} = 1$

N.B.: Modificando le ipotesi di partenza e considerando i fondelli di forma ellissoidale con costo di fabbricazione maggiore per i fondelli, lo spessore funzione del diametro D, della pressione e della corrosività del liquido, si ottiene un diverso L/D ottimale: $\left(\frac{L}{D}\right)_{opt} \cong 2 \div 4$

Esempio 3: Costi di investimento + Costi di conduzione

Tesi: Si desidera determinare lo spessore ottimale *s* di isolante per un tubo di grande diametro ed elevato coefficiente di scambio termico interno. Occorre trovare un compromesso tra risparmio energetico conseguito e costo di investimento da effettuare per la posa del refrattario.

- Calore scambiato con l'esterno in presenza di refrattario:

  $Q = U\,A\,\Delta T = A\,\Delta T \,/\, (1/h_e + s/k)$
- Costo di installazione del refrattario [€/m²]

  $F_0 + F_1\,s$
- L'isolante ha una vita di 5 anni. Il capitale per l'acquisto e la posa in opera viene preso in prestito. Si indica con *r* la percentuale del capitale + interessi da restituire ogni anno → $r > 0.2$
- H_t è il costo dell'energia dispersa [€/kcal]
- Y sono le ore di esercizio in un anno [h/y]
- Ogni anno occorre restituire alla banca che ha erogato il prestito:

  $(F_0 + F_1\,s)\,A\,r$ [€/y]

Esempio 3: Costi di investimento + Costi di conduzione (continua)

- Calore scambiato con l'esterno senza refrattario:

  $Q = U\ A\ \Delta T = h_e\ A\ \Delta T$

- Risparmio energetico annuo dovuto al refrattario:

  $[h_e\ A\ \Delta T - A\ \Delta T\ /\ (1/h_e + s/k)]\ H_t\ Y \qquad [€/y]$

- Ne consegue che la funzione obiettivo nel gdl *s* diviene:

  $f_{obj} = [h_e\ A\ \Delta T - A\ \Delta T\ /\ (1/h_e + s/k)]\ H_t\ Y - (F_0 + F_1\ s)\ A\ r$

- Il problema è risolubile analiticamente calcolando:

  $d\ f_{obj}\ /\ ds = 0$

- Si ottiene:

  $s_{opt} = k\ [((\Delta T\ H_t\ Y)/(k\ F_1\ r))^{½} - 1/h_e]$

- Si noti che s_{opt} non dipende né da A né da F_0

Metodi risolutivi

- Il problema: $Max\ f(\mathbf{x})$ è sempre riconducibile a: $Min\ f(\mathbf{x})$ cambiando di segno alla funzione obiettivo
- Il problema di ottimizzazione può essere posto secondo due approcci distinti:
  - Equation oriented: cioè basato su un approccio globale che descrive il modello del processo tramite un unico sistema di equazioni (in generale algebrico-differenziali) che viene risolto insieme al problema considerandolo come una serie di vincoli
  - Black-box o Sequenziale modulare: il modello del processo viene interrogato dalla routine di ottimizzazione e fornisce i dati necessari alla valutazione della funzione obiettivo
    - Il modello di simulazione può poi lavorare in termini di FEASIBLE PATH o INFEASIBLE PATH a seconda che le equazioni relative alle correnti di riciclo siano risolte ad ogni chiamata o che la consistenza dei ricicli sia introdotta come vincolo lineare nella struttura del problema di ottimizzazione

Programmazione Lineare (LP)

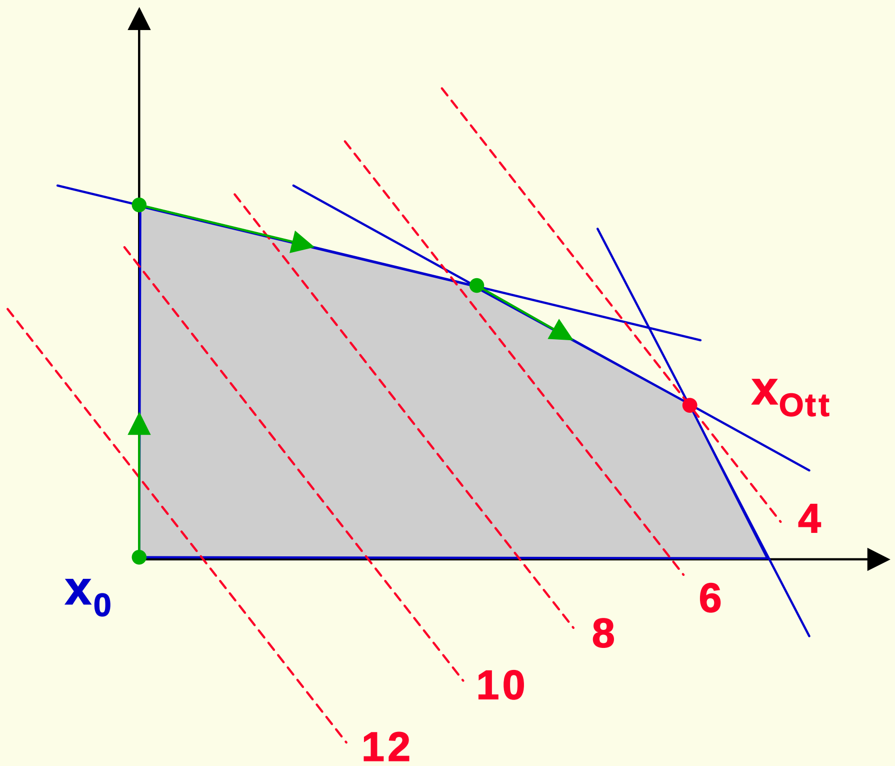
- La funzione obiettivo ed i vincoli di uguaglianza e disuguaglianza sono tutti LINEARI. Quindi la funzione obiettivo non è concava e non è convessa. È un piano (in 2D) o meglio un iperpiano (con *n* gdl).
  Qualora la regione individuata dai vincoli sia consistente abbiamo da risolvere un problema (“feasible”) che ci condurrà a *sbattere* contro i vincoli e più precisamente contro una loro intersezione.

- **Metodo del Simplesso LP**

  Occorre dapprima individuare un punto di partenza che appartenga alla regione “feasible”.

  Ci si muove quindi lungo i vincoli fino al raggiungimento del punto di ottimo.

  Il problema può anche NON presentare una regione “feasible” di ricerca.

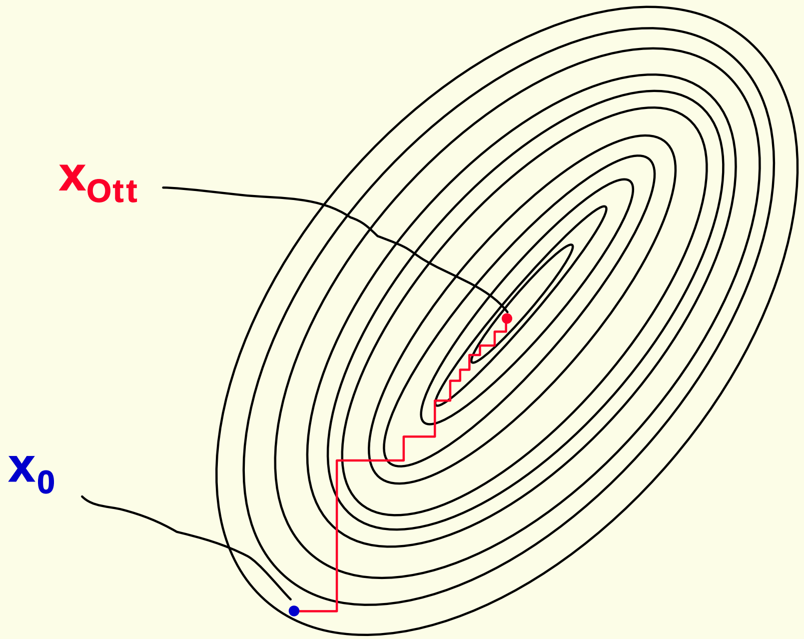


Ottimizzazione multidimensionale non vincolata

- Esiste una condizione necessaria da soddisfare per il punto di ottimo: $\nabla f(\mathbf{x}^*) = 0$ cioè il gradiente di f(**x**) deve essere nullo
- Condizione sufficiente per il minimo è che: $\nabla^2 f(\mathbf{x}^*) > 0$ cioè la matrice Hessiana di f(**x**) deve essere definita positiva
- Esistono tre classi distinte di metodi che si differenziano per l'uso delle derivate della funzione obiettivo lungo la ricerca
  1) Metodi EURISTICI: non usano informazioni sulle derivate di f(**x**). Sono anche i più robusti perché risentono poco di eventuali discontinuità presenti nel problema da risolvere.
  2) Metodi del PRIMO ORDINE: utilizzano informazioni sulle derivate parziali prime di f(**x**) ovvero il GRADIENTE
  3) Metodi del SECONDO ORDINE: utilizzano informazioni anche sulle derivate parziali seconde di f(**x**) ovvero l'HESSIANO

Ottimizzazione multidimensionale non vincolata (continua)

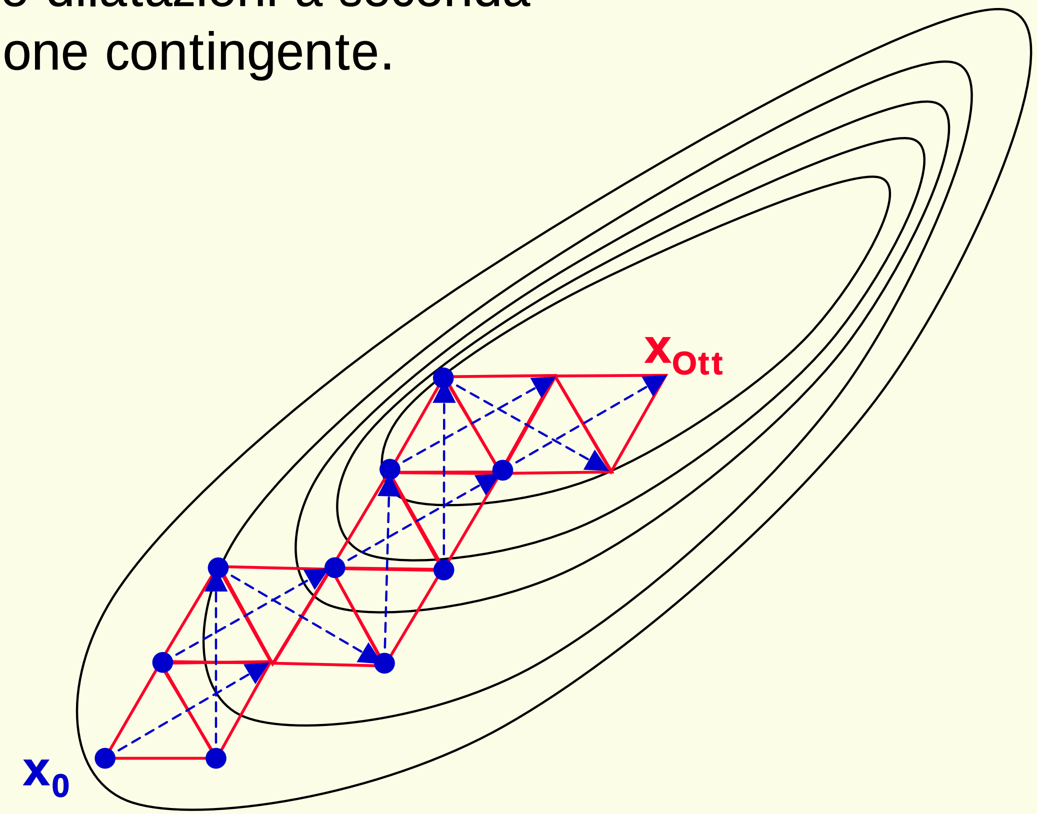
- In genere gli algoritmi numerici, che sono di natura iterativa, effettuano la ricerca *k*-esima lungo una direzione s_k e minimizzano la f(**x**) lungo s_k.
- Metodi DIRETTI o EURISTICI
  - **Ricerca random (Montecarlo)**
  - **Ricerca secondo una griglia** (pesante o proibitivo ma esaustivo)
  - **Ricerca univariata** si identificano *n* direzioni (con *n* il numero dei gdl) rispetto cui iterativamente effettuare la ricerca dell'ottimo.



Ottimizzazione multidimensionale non vincolata (continua)

- **Metodo del simplesso (Nelder & Mead, 1965)**

  Il simplesso è una figura geometrica avente n+1 vertici per n gdl. Si identifica il vertice peggiore (avente massima f(**x**)) e lo si ribalta simmetricamente rispetto al baricentro dei restanti n-1 vertici. Si identifica così un nuovo simplesso rispetto al quale proseguire la ricerca. Il ribaltamento può subire contrazioni o dilatazioni a seconda della situazione contingente.



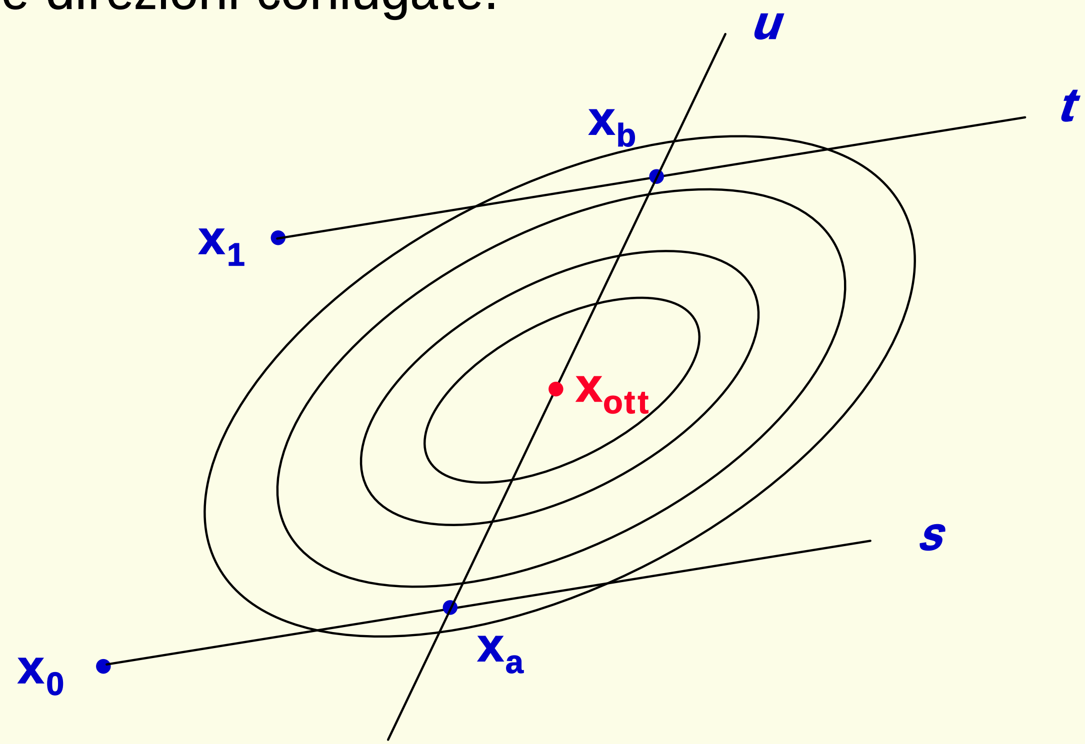
Ottimizzazione multidimensionale non vincolata (continua)

Metodo delle direzioni coniugate

Considerando un'approssimazione quadratica della funzione obiettivo è possibile individuare le sue direzioni coniugate.

Hp.: f(**x**) è quadratica

1. x_0 generico
2. *s* generica
3. x_a minimo su *s*
4. x_1 generico
5. *t* parallelo a *s*
6. x_b mimino su *s*
7. *u* congiungente x_a e x_b

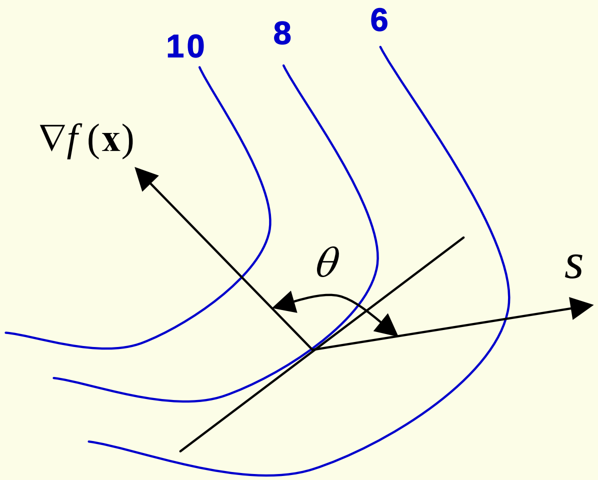


u è la direzione coniugata rispetto a *s* e *t* e su di essa minimizzando si identifica il punto di ottimo x_{ott} di f(**x**).

Ottimizzazione multidimensionale non vincolata (continua)

- **Metodi indiretti del primo ordine**

  Una possibile direzione di ricerca s deve fare diminuire la funzione f(**x**).
  Deve cioè soddisfare la condizione: $\nabla^T f(\mathbf{x})s < 0$



Infatti:

$$\nabla^T f(\mathbf{x})s = \left|\nabla^T f(\mathbf{x})\right| |s| \cos\theta < 0$$

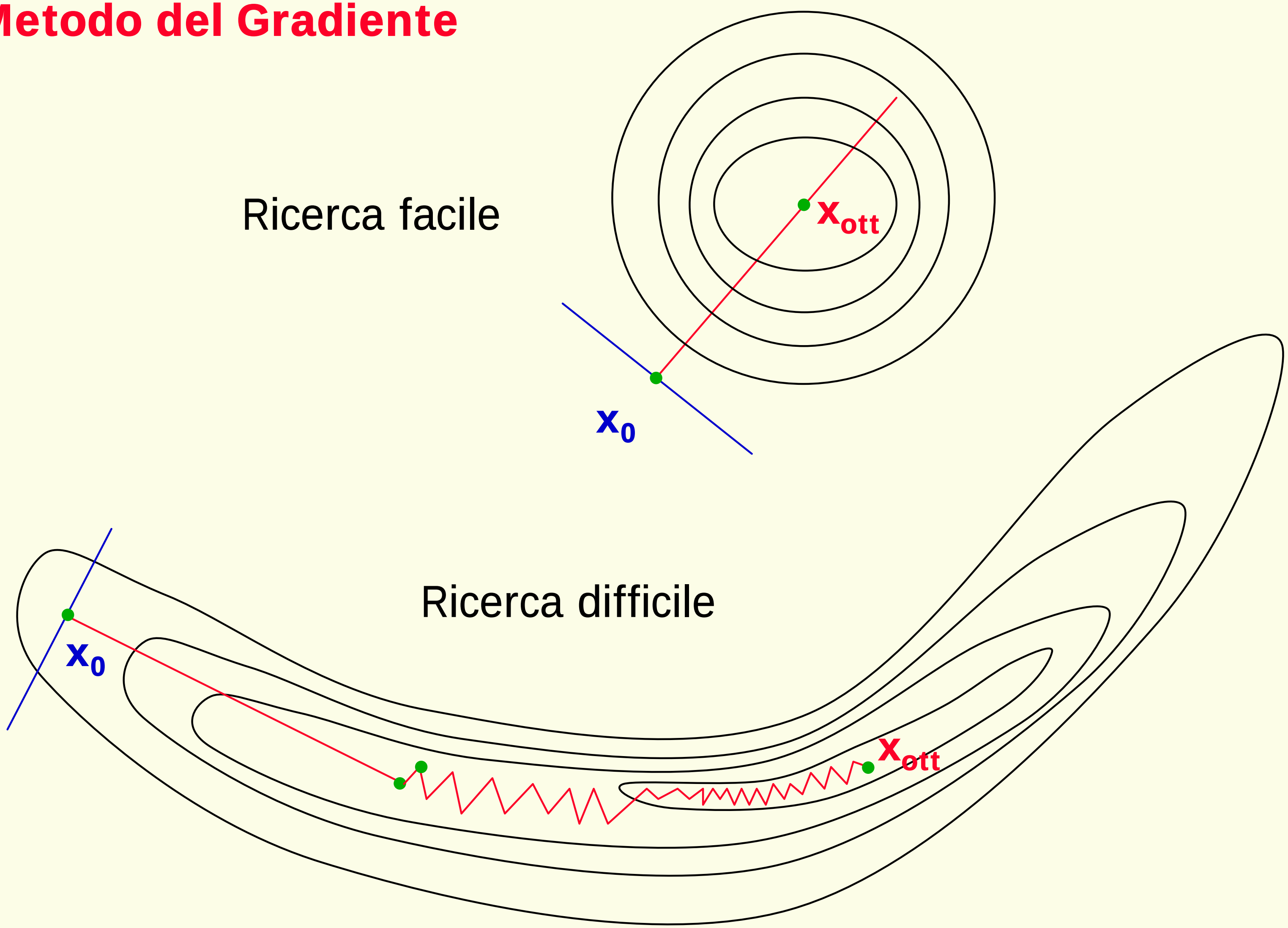
solo se: $\cos\theta < 0$ cioè $\theta > 90^\circ$

Il metodo del gradiente seleziona esattamente come direzione di ricerca il gradiente della funzione obiettivo (con verso opposto).

L'idea di muoversi nella direzione della massima pendenza (*"Steepest Descent"*) può rivelarsi non *ottimale*.

Ottimizzazione multidimensionale non vincolata (continua)

- **Metodo del Gradiente**



Ottimizzazione multidimensionale non vincolata (continua)

- **Metodi indiretti del secondo ordine**

Fanno uso delle derivate parziali di second'ordine della funzione obiettivo.

Sviluppando in serie di Taylor troncata al second'ordine ed uguagliando a zero il gradiente abbiamo che: $\nabla f(\mathbf{x}_k) + \mathbf{H}(\mathbf{x}_k)\Delta\mathbf{x}_k = 0$

e quindi deve essere: $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{x}_k)\nabla f(\mathbf{x}_k)$

N.B.: La matrice Hessiana in realtà non viene invertita ma si risolve il sistema lineare risultante tramite fattorizzazione della stessa.

Inoltre la matrice Hessiana NON viene calcolata direttamente in quanto sarebbe molto costoso in termini di tempo macchina. Al contrario esistono delle formule BFGS (Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno) che a partire da una stima iniziale di **H** (spesso la matrice identità **I**) e tramite il gradiente di f(**x**) valutano iterativamente **H**(**x**).

I metodi numerici risolutivi sono:
Newton, Newton modificato: Levemberg-Marquardt, Gill-Murray.

Ottimizzazione multidimensionale vincolata

- **Metodo dei moltiplicatori di Lagrange**

  I vincoli di disuguaglianza, qualora violati, vengono riscritti come vincoli di uguaglianza tramite l'introduzione di *slack variables*: $g(\mathbf{x})-\sigma^2=0$

  La funzione obiettivo viene riformulata per contenere sia i vincoli di uguaglianza che quelli di disuguaglianza:

$$L(\mathbf{x},\boldsymbol{\omega},\boldsymbol{\sigma}) = f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^{NVU} \omega_i h_i(\mathbf{x}) + \sum_{i=NVU+1}^{NVTOT} \omega_i \left[g_i(\mathbf{x}) - \sigma_i^2 \right]$$

  vengono definite delle condizioni necessarie e sufficienti per individuare il punto di ottimo che soddisfi contemporaneamente i vincoli imposti.

  È facile vedere come la dimensionalità del problema aumenti.

- **Metodo della Funzione di Penalizzazione**

  Si modifica la funzione obiettivo sommandole dei termini di penalizzazione che quantificano la violazione dei vincoli di uguaglianza o disuguaglianza:

$$Min\ \left(f(\mathbf{x}) + \mu h^2(\mathbf{x}) + \eta \left| \min\left\{0, g(\mathbf{x})\right\} \right| \right)$$

  Più in generale: $Min\left(f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^{NVU} \phi\left(h_i(\mathbf{x})\right) + \sum_{i=NVU+1}^{NVTOT} \varphi\left(g_i(\mathbf{x})\right) \right)$

$$\phi(y) = y^{2n} \qquad \varphi(y) = \left(\min(0,y)\right)^{2n}$$

Ottimizzazione multidimensionale vincolata (continua)

- **Metodo SQP (<u>S</u>uccessive <u>Q</u>uadratic <u>P</u>rogramming)**

  La funzione obiettivo f(**x**) viene approssimata iterativamente tramite una quadrica, mentre i vincoli vengono linearizzati ed introdotti in una funzione obiettivo risultante. In formule abbiamo:

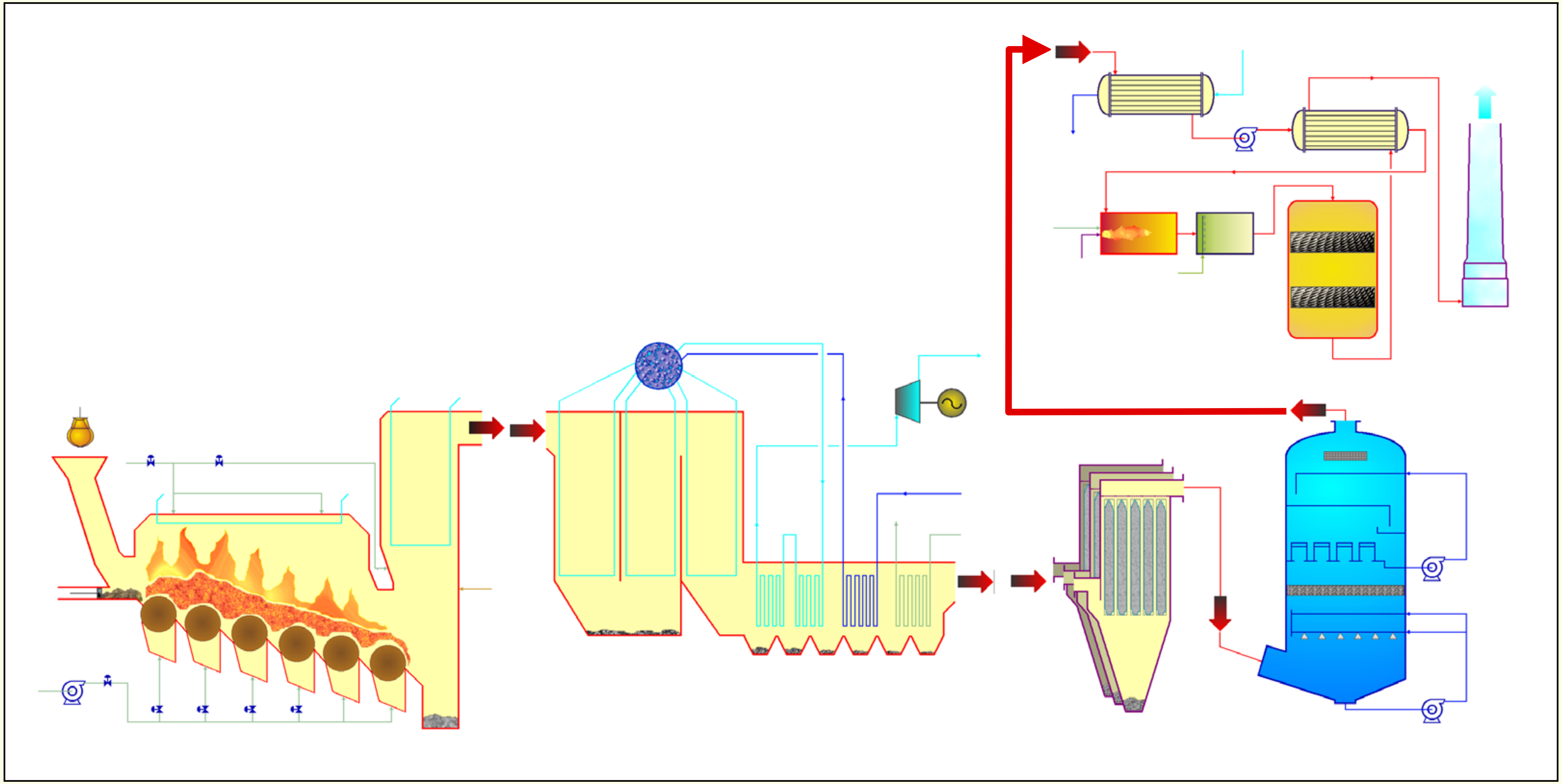
$$\begin{cases} Min \quad f(\mathbf{x}) = Min \quad \mathbf{c}^T\mathbf{x} + \frac{1}{2}\mathbf{x}^T\mathbf{B}\mathbf{x} \\ s.t. \qquad\qquad \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \end{cases}$$

  la ricerca del punto di ottimo viene effettuata in una direzione *s* (individuata dal vettore **x**) rispetto cui la funzione obiettivo ed i vincoli sono stati riformulati.

  La matrice **B** indicata nelle formule è un’approssimazione della matrice Hessiana **H** e viene calcolata tramite le formule BFGS (Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno).

Ottimizzazione di processo – Case study

Impianto di termoutilizzazione con sezione DeNOx catalitico



Ottimizzazione – Case study (continua)

- **Esigenze della procedura di Ottimizzazione**
  - Ottimizzazione economica di processo: massimizzazione della produzione di vapore e quindi di energia elettrica. Minimizzazione dei costi di esercizio
  - Rispetto dei vincoli processistici per una buona conduzione dell'impianto
  - Rispetto dei vincoli di legge
  - *In alternativa:*
    - Minimizzazione della produzione di microinquinanti
    - Riduzione dell'impatto ambientale
    - Miscelazione ottimale di rifiuti aventi tipologia differente

Ottimizzazione – Case study (continua)

Funzione obiettivo da massimizzare

$$F_{obj} = W_{rif}c_{rif} + W_{vap}c_{vap} - \left(W_{CH4,PC} + W_{CH4,DeNOx}\right)c_{CH4} - W_{NH3}c_{NH3}$$

Gradi di libertà

Portata di rifiuto
Portata aria secondo rullo
Port. aria secondaria forno
Velocità primo rullo
Velocità quarto rullo
Portata NH3 DeNOx

Portata totale aria al forno
Portata aria terzo rullo
Portata aria postcombustione
Velocità secondo rullo
Portata NaOH lavaggio

Portata aria primo rullo
Portata aria quarto rullo
Portata CH4 postcombustione
Velocità terzo rullo
Portata CH4 DeNOx

Vincoli di legge

% vol. min. O2 postcombustione
T out min. postcombustione
HCl massimo al camino
SO2 massimo al camino
NOx massimo al camino
NH3 massimo al camino

Vincoli processistici

Delta P massimo su ogni rullo
T ingresso max. e min. reattore DeNOx
% max. incombusti nelle ceneri
Portata max. e min. vapore prodotto
% vol. max. O2 postcombustione
Delta max. combustione tra i primi 3 rulli
T out max. e min. camera primaria

Vincoli inferiori e superiori sui gradi di libertà

Ottimizzazione – Case study (continua)

- **Risoluzione del problema**

  - Occorre disporre di una routine di ottimizzazione vincolata multivariabile non lineare che sia efficiente (tempi di CPU) e robusta (capace di individuare la soluzione)

  - Occorre disporre di un modello dettagliato del processo in grado di simulare la risposta del sistema ogniqualvolta la routine di ottimizzazione propone un nuovo vettore di gradi di libertà.

  - L’ottimizzatore di processo ha come compito principale quello di ricondurre il sistema ad operare nella regione di fattibilità dove i vincoli sono rispettati. In certi casi quindi può succedere che la funzione obiettivo peggiori rispetto alle condizioni iniziali, in quanto dapprima il processo è ricondotto ad operare nella regione di fattibilità. All’interno di tale regione l’ottimizzatore si muove poi massimizzando la funzione obiettivo.

  - Si noti come il calcolo esplicito della funzione obiettivo sia pressoché istantaneo. Non altrettanto invece avviene per la valutazione dei singoli termini che la compongono dato che questi provengono dalla procedura di simulazione del processo.

Ottimizzazione – Case study (continua)

- **I risultati...**

Results.opt - Blocco note

File Modifica Cerca ?

```
-----------------------------------------------------------------
 DEMO CYCOM Plus   :  PROCEDURA  DI  OTTIMIZZAZIONE  -  RIEPILOGO
-----------------------------------------------------------------
 Impianto Rifiuti Solidi Urbani          18-May-01
-----------------------------------------------------------------

 VALORE INIZIALE DEI GRADI DI LIBERTA':

 Portata di rifiuto (kg/h)..............................    5307.524000
 Velocità di rotazione 1° rullo (rpm)...................   5.465818E-02
 Velocità di rotazione 2° rullo (rpm)...................   7.363241E-02
 Velocità di rotazione 3° rullo (rpm)...................   7.366168E-02
 Velocità di rotazione 4° rullo (rpm)...................   6.911036E-02
 Portata di CH4 al bruciatore DENOX (kg/h)..............     164.789700

 VINCOLI OPERATIVI:

 Massimo delta P primo rullo (mmH2O)....................  75.000
 Minimo delta P primo rullo (mmH2O).....................  55.000
 Massimo delta P secondo rullo (mmH2O)..................  65.000
 Minimo delta P secondo rullo (mmH2O)...................  45.000
 Massimo delta P terzo rullo (mmH2O)....................  45.000
 Minimo delta P terzo rullo (mmH2O).....................  25.000
 Massimo delta P quarto rullo (mmH2O)...................  25.000
 Minimo delta P quarto rullo (mmH2O)....................  10.000
 Ossigeno massimo in uscita dalla postcomb. (% vol)......  10.000
 Ossigeno minimo in uscita dalla postcombust. (%vol).....  7.0000
 Temperatura minima ingresso DENOX (^C)..................  295.00
 Temperatura massima ingresso DENOX (^C).................  310.00
 Massima Portata Vapore (ton/h)..........................  21.000
 Minima Portata Vapore (ton/h)...........................  15.000
 Massimo contenuto di incomb. nelle ceneri (% mas).......  15.000
 Massimo HCl al camino (mg/Nm3)..........................  10.000
 Massimo SO2 al camino (mg/Nm3)..........................  50.000
 Massimo NOx al camino (mg/Nm3)..........................  25.000
```

Ottimizzazione – Case study (continua)

- **I risultati…**

Results.opt - Blocco note

File Modifica Cerca ?

```
VALORE INIZIALE VARIABILI VINCOLATE:
Massimo delta P primo rullo (mmH2O).....................  78.102
Massimo delta P secondo rullo (mmH2O)...................  50.640
Massimo delta P terzo rullo (mmH2O).....................  30.424
Massimo delta P quarto rullo (mmH2O)....................  15.295
Ossigeno massimo in uscita dalla postcomb. (% vol)......  10.765
Temperatura minima ingresso DENOX (^C)..................  291.64
Massima Portata Vapore (ton/h)..........................  18.150
Massimo contenuto di incomb. nelle ceneri (% mas).......  1.4154
Massimo HCl al camino (mg/Nm3)..........................  .95055
Massimo SO2 al camino (mg/Nm3)..........................  4.7685
Massimo NOx al camino (mg/Nm3)..........................  24.756

VALORE FINALE GRADI DI LIBERTA':
Portata di rifiuto (kg/h)...............................    6031.404000
Velocità di rotazione 1° rullo (rpm)....................   7.811134E-02
Velocità di rotazione 2° rullo (rpm)....................   7.541323E-02
Velocità di rotazione 3° rullo (rpm)....................   7.092959E-02
Velocità di rotazione 4° rullo (rpm)....................   6.601541E-02
Portata di CH4 al bruciatore DENOX (kg/h)...............     168.642900

VALORE FINALE VARIABILI VINCOLATE:
Massimo delta P primo rullo (mmH2O).....................  61.455
Massimo delta P secondo rullo (mmH2O)...................  56.641
Massimo delta P terzo rullo (mmH2O).....................  36.934
Massimo delta P quarto rullo (mmH2O)....................  18.612
Ossigeno massimo in uscita dalla postcom. (% vol).......  9.5163
Temperatura minima ingresso DENOX (^C)..................  294.90
Massimo diff. di rif. bruciato 1-3 rulli (kg/h).........  294.90
Temperatura massima postcombustione (^C)................  20.989
Massimo HCl al camino (mg/Nm3)..........................  2.2035
Massimo SO2 al camino (mg/Nm3)..........................  1.0763
Massimo NOx in ingresso al DENOX (mg/Nm3)...............  5.3944
Massimo NH3 al camino (mg/Nm3)..........................  24.901

VALORE INIZIALE FUNZIONE OBIETTIVO:    1,207,303  Lit/h
VALORE FINALE FUNZIONE OBIETTIVO:      1,319,730  Lit/h
FUNZIONE OBIETTIVO INCREMENTATA DEL    9.31 %
```