

Controllo di una colonna

Gli obiettivi del controllo di una colonna di distillazione sono:

1. Garantire un determinato grado di purezza dei prodotti
2. Ottenere la massima produzione
3. Minimizzare il consumo di energia

Le perturbazioni che agiscono su una colonna di distillazione sono:

1. Variazione di portata, composizione ed entalpia dell'alimentazione
2. Variazione della pressione di vapore
3. Variazione della temperatura dell'acqua di raffreddamento
4. Condizioni metereologiche
5. Etc.

I vincoli fisici a cui è soggetta una colonna di distillazione sono:

1. Portate di liquido e di vapore
2. Capacità di scambio del condensatore e del reboiler
3. Quantità di liquido accumulate in testa e in coda
4. Etc.

Rapporti 1

In una colonna di distillazione si possono definire due rapporti che ne descrivono le condizioni operative:

1. Rapporto distillato/residuo (D/B) *rapporto di estrazione*
2. Rapporto vapore/alimentazione (V/F)

Osservazioni:

- Un aumento di D/B comporta una diminuzione della concentrazione del componente più leggero nel residuo (x_D cala, BENE) e nel distillato (x_R cala, MALE).

Banda di operabilità: range in cui può variare il rapporto di estrazione

- Una diminuzione di V/F comporta una diminuzione del salto di concentrazione fra un piatto e il successivo, una diminuzione delle purezze ottenibili, la restrizione della banda di operabilità, una diminuzione della temperatura nella colonna.

Rapporti 2

Osservazioni:

- Un aumento dei fluidi nella colonna migliora la qualità di entrambi i prodotti in quanto aumenta l'iterazione tra liquido e vapore su ogni piatto

Questo aumento si ottiene incrementando la quantità di calore fornita al reboiler e quella sottratta al condensatore (aumento del consumo di energia)

- La procedura che guida alla scelta dei due rapporti è la seguente:
 1. si agisce su D/B in modo da bilanciare la qualità dei prodotti
 2. si agisce sul rapporto V/F fino ad ottenere le specifiche di concentrazione desiderate

Disturbi 1

Principali disturbi e loro effetti

- Variazione portata di vapore
un suo aumento implica
 - (a) un aumento della concentrazione del componente più pesante verso l'alto,
 - (b) un aumento delle temperature,
 - (c) un aumento della portata di distillato ma a scapito della sua purezza (azione del regolatore di livello di testa)
- Variazione portata di riflusso
una sua diminuzione implica
 - (a) Una diminuzione dell'effetto di *lavaggio* dei vapori (il componente pesante risale lungo la colonna),
 - (b) Un aumento delle temperature su tutti i piatti,
 - (c) Il regolatore di livello di testa apre di più il distillato mentre quello di fondo chiude un po' il residuo (D/B aumenta),

Disturbi 2

Principali disturbi e loro effetti

- Aumento della temperatura TF di alimentazione a flusso F costante
equivale ad un aumento della portata di vapore
- Diminuzione del flusso F di alimentazione a temperatura TF costante
equivale ad un aumento della portata di vapore
- Variazione della composizione di alimentazione zF
una sua diminuzione implica un aumento delle concentrazioni dei componenti altobollenti con conseguente aumento della temperatura (più vistoso nel tronco superiore, zona di arricchimento)

Perturbazioni 1

Velocità di propagazione delle perturbazioni:

1. una variazione di portata di vapore in coda si propaga fino alla testa in tempi inferiori di circa 50 volte rispetto ad una variazione di portata del liquido in testa.
2. La velocità di variazione della composizione sul piatto è tanto più grande quanto
 - a) più grande è la variazione di portata del residuo R,
 - b) più piccola è la capacità del piatto,
 - c) più grande è la differenza di concentrazione con il piatto superiore.
3. Le variazioni di R e VB si propagano molto più velocemente delle variazioni di composizione nell'alimentazione: i regimi di composizione sui piatti reagiscono pressoché simultaneamente a perturbazioni di R e VB e con maggior intensità al centro della colonna, lontano cioè dalle grosse capacità di testa e di fondo.

Perturbazioni 2

Ogni perturbazione è riconducibile a uno sbilanciamento del rapporto di estrazione D/B

Una banda di operabilità ampia fornisce il tempo agli anelli di controllo per “rimediare” (riserve di distillato e residuo da reinserire in colonna)

Variabili di controllo

Variabili di controllo

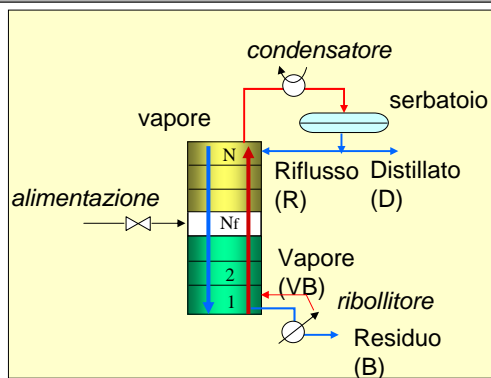
- Portata di vapore VB
- Portata del liquido R
- Estrazione del distillato D
- Estrazione del residuo B

Solo una misura di temperatura

Schemi di controllo

LC=controllo di livello;

TC=termocoppia



schema	costante	LC-testa	LC-coda	TC [composizione]
1. (BMI)	VB	D	B	R (zona di arricchimento)
2. (BMI)	R	D	B	VB (zona di esaurimento)
3. (BMD)	VB	R	B	D (zona di arricchimento)
4. (BMD)	R	D	VB	B (zona di esaurimento)

Schemi di controllo 1

- BMD: controllo diretto del bilancio di materia
la composizione (temperatura) è controllata agendo
sulla portata di un prodotto (residuo B o distillato D)
- BMI: controllo indiretto del bilancio di materia
la composizione (temperatura) è controllata agendo
sulla portata di vapore VB o di riflusso R

Criteri di scelta:

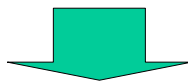
- prontezza della risposta a un disturbo
- stabilità fluidodinamica della colonna (piccole fluttuazioni degli hold-up)
- assenza di risposta inversa (sistema a fase non minima)
- minimizzare l'interferenze tra il bilancio di materia e quello di energia
- massimizzare la quantità di prodotto (distillato)
- purezza del prodotto
- minimizzare l'energia impiegata

Schemi di controllo 2

Per controllare le composizioni del distillato e del residuo congiuntamente è necessario utilizzare più sensori di temperatura (cioè più anelli di controllo)



Problemi di interferenza tra i due anelli di controllo.



Pericolo di instabilità della colonna (il controllore di una delle due composizioni deve essere sintonizzato blandamente)

Sensore di temperatura

Problema: su quale piatto inserire il sensore di temperatura?

Criteri generali:

1. Nel piatto la temperatura deve poter variare in modo ampio (elevata sensitività)
2. I piatti alle estremità hanno un gradiente di temperatura molto piccolo (soprattutto in testa alla colonna)
3. I piatti nella zona di esaurimento sono poco correlati con la concentrazione del distillato
4. Visto che le variazioni di composizione si propagano lentamente tra i vari piatti, è utile inserire la misura sul piatto vicino alla possibile origine del disturbo per poter agire prontamente (Ex. vicino all'alimentazione ma non sul piatto dell'alimentazione: il cambio di temperatura dell'alimentazione non deve essere interpretato come una variazione della composizione)
5. Per evidenziare subito variazioni nelle portate di riflusso R e di vapore VB occorre inserire delle termocopie vicino alla testa e alla coda, rispettivamente

Controllori PID

Principi generali per la scelta dei parametri di un controllore P.I.D. in un anello di controllo della colonna di distillazione

- L'azione proporzionale deve essere *energica*.
- L'azione integrativa deve avere una costante di tempo abbastanza grande (compromesso tra la prontezza del controllo e la necessità di aspettare il raggiungimento dell'equilibrio fluidodinamico).
- L'azione derivativa non viene solitamente utilizzata perché temporanee variazioni di pressione o temperatura possono provocare energici interventi con conseguenze allontanamento dal regime di funzionamento.

Controllo

Disturbo: variazione del 10% sulla concentrazione dell'alimentazione

Controlli impiegati:

Utilizzo dei soli controllori P di livello (serbatoio del distillato e del residuo)

Utilizzo dei controllori P di livello (serbatoio del distillato e del residuo) e del controllore PI sulla concentrazione del distillato x_D

Utilizzo dei controllori P di livello (serbatoio del distillato e del residuo) e del controllore PI sulla concentrazione del residuo x_B

Utilizzo dei controllori P di livello (serbatoio del distillato e del residuo) e di entrambi i controllori PI sulle concentrazioni (distillato x_D e residuo x_B)

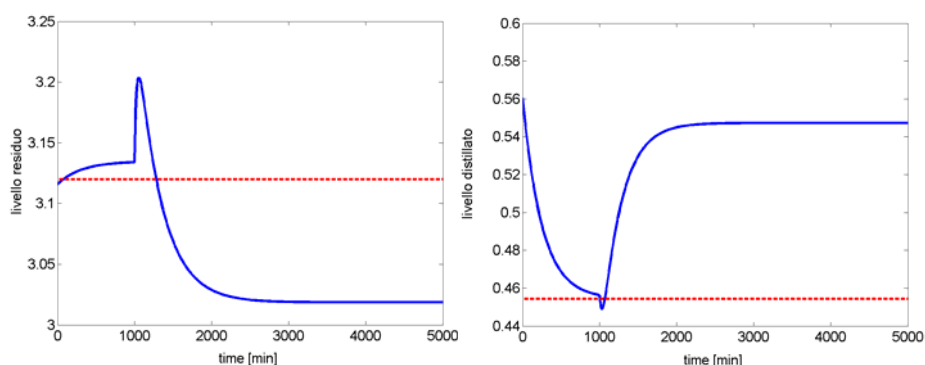
Specifiche:

- x_B nominale = 0.0002
- x_D nominale = 0.7698 (con l'etanolo non si riescono a ottenere purezze superiori)

Controllo 1a

Utilizzo dei soli controllori P di livello (serbatoio del distillato e del residuo)

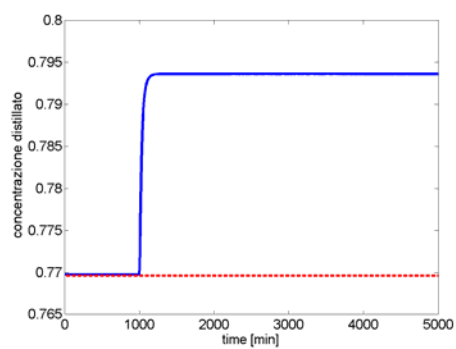
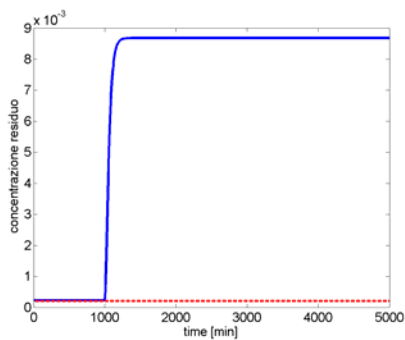
livelli



Controllo 1b

Utilizzo dei soli controllori P di livello (serbatoio del distillato e del residuo)

concentrazioni

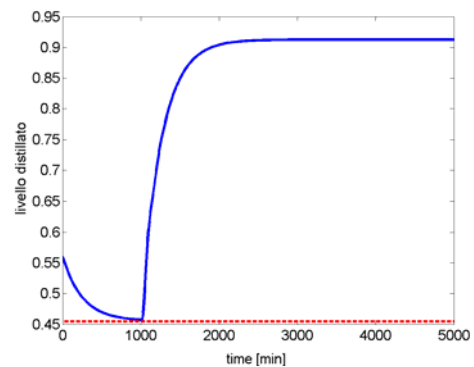
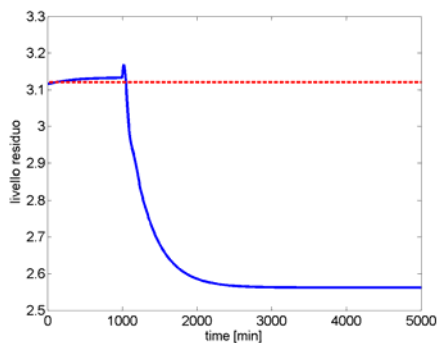


Controllo 2a

Utilizzo dei controllori P di livello (serbatoio del distillato e del residuo) e del controllore PI sulla concentrazione del distillato xD

Retroazione con il valore "vero" di xD

livelli

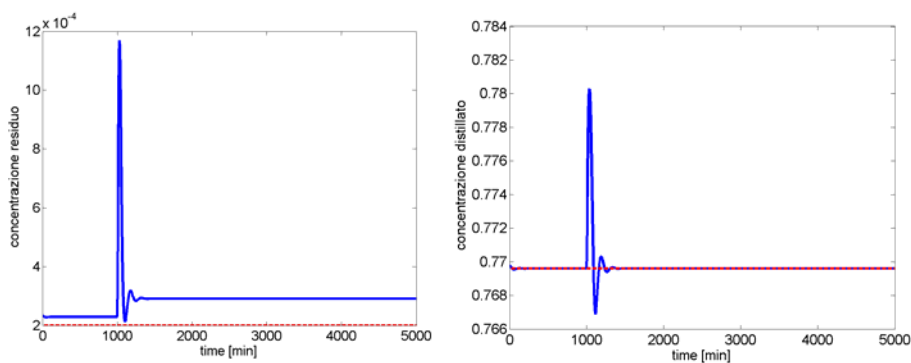


Controllo 2b

Utilizzo dei controllori P di livello (serbatoio del distillato e del residuo) e del controllore PI sulla concentrazione del distillato xD

Retroazione con il valore “vero” di xD

concentrazioni

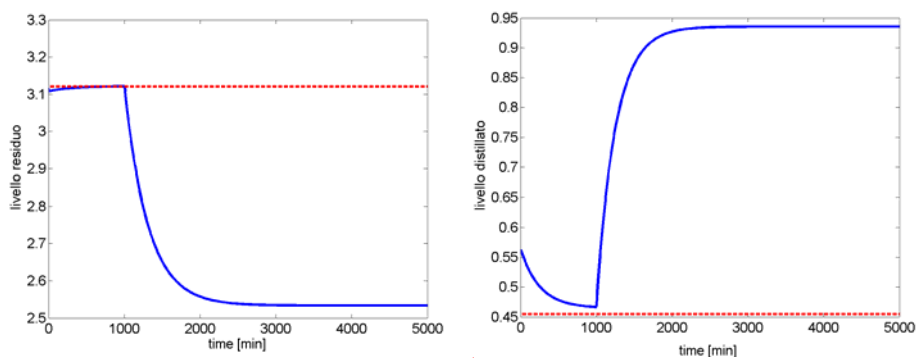


Controllo 3a

Utilizzo dei controllori P di livello (serbatoio del distillato e del residuo) e del controllore PI sulla concentrazione del residuo xB

Retroazione con il valore “vero” di xB

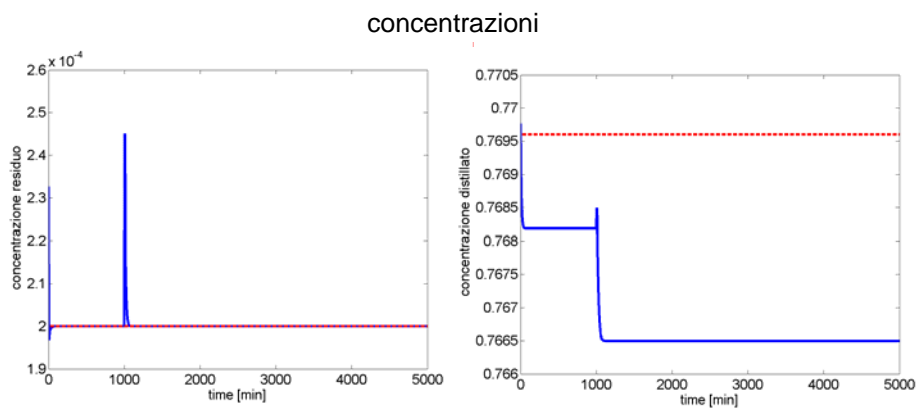
livelli



Controllo 3b

Utilizzo dei controllori P di livello (serbatoio del distillato e del residuo) e del controllore PI sulla concentrazione del residuo xB

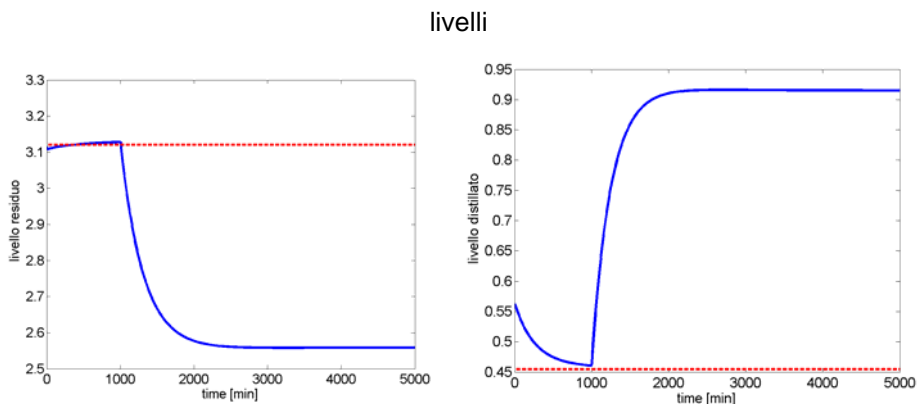
Retroazione con il valore “vero” di xB



Controllo 4a

Utilizzo dei controllori P di livello (serbatoio del distillato e del residuo) e di entrambi i controllori PI sulle concentrazioni (distillato xD e residuo xB)

Retroazione con i valori “veri” di xD e xB

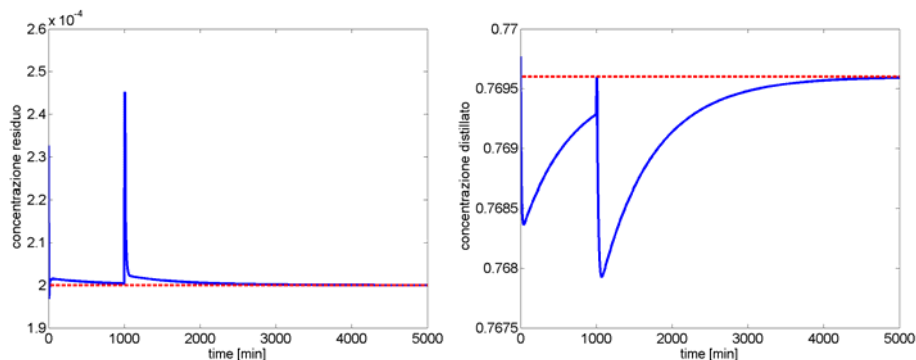


Controllo 4b

Utilizzo dei controllori P di livello (serbatoio del distillato e del residuo) e di entrambi i controllori PI sulle concentrazioni (distillato x_D e residuo x_B)

Retroazione con i valori “veri” di x_D e x_B

concentrazioni



N.B.

Le simulazioni sono state fatte considerando tutto il sistema (colonna, controllore, attuatori, sensori) come un unico sistema *continuo*.

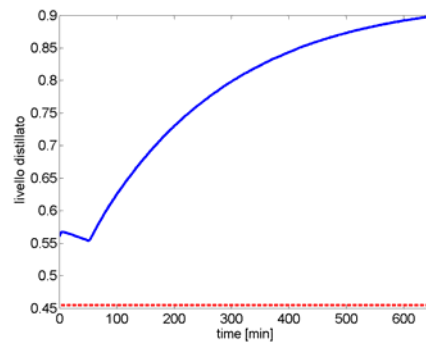
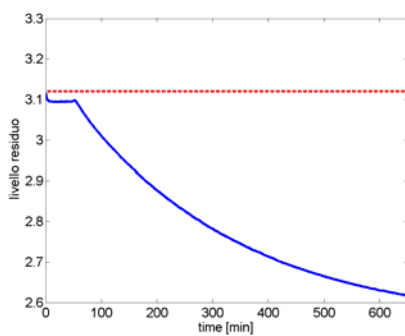
In realtà il controllore, gli attuatori e i sensori sono sistemi discreti con diverse frequenze di campionamento.

[simili semplificazioni saranno fatte anche nel seguito...]

Utilizzo del E.K.F. 1

Disturbo: variazione del 10% sulla concentrazione dell'alimentazione

Utilizzo dei controllori P di livello (serbatoio del distillato e del residuo) e di entrambi i controllori PI sulle concentrazioni (distillato xD e residuo xB) *stimate* dal filtro di Kalman

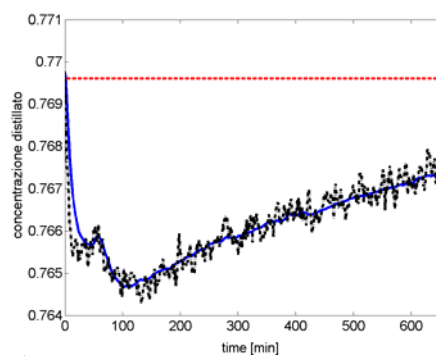
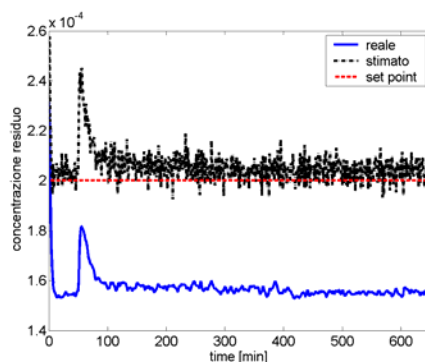


(la variazione avviene a $t=50\text{min}$, nelle simulazioni precedenti a $t=1000\text{min}$)

Utilizzo del E.K.F. 2

Disturbo: variazione del 10% sulla concentrazione dell'alimentazione

Utilizzo dei controllori P di livello (serbatoio del distillato e del residuo) e di entrambi i controllori PI sulle concentrazioni (distillato xD e residuo xB) *stimate* dal filtro di Kalman



Stimatore ai minimi quadrati 1

E' possibile ottenere buoni risultati utilizzando uno stimatore più semplice basato solo sui dati e non su un modello?

Approssimazione lineare statica del legame tra temperature e concentrazioni

$$\begin{bmatrix} x_D \\ x_B \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} T_{i_1} \\ \vdots \\ T_{i_n} \end{bmatrix} + b$$

Modello

$$\mathbf{y}(t) = A\mathbf{x}(t) + b$$

Stimatore ai minimi quadrati

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{y}}(t) &= \mathbf{E}[\mathbf{y}(t)|\mathbf{x}(t)] \\ &= \hat{A}\mathbf{x}(t) + \hat{b} \\ &= \Sigma_{\mathbf{y}\mathbf{x}}\Sigma_{\mathbf{x}}^{-1}\mathbf{x}(t) + \bar{\mathbf{y}} - \Sigma_{\mathbf{y}\mathbf{x}}\Sigma_{\mathbf{x}}^{-1}\bar{\mathbf{x}} \end{aligned}$$

Stimatore ai minimi quadrati 2

Dati di calibrazione

$$Y = AX + b \quad Y \in R^{2 \times N} \quad X \in R^{i \times N}$$

Varianze campionarie

$$\hat{\Sigma}_{YX} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Y(k, :) - m_Y)(X(k, :) - m_X)^T$$

$$\hat{\Sigma}_X = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (X(k, :) - m_X)(X(k, :) - m_X)^T$$

Medie campionarie

$$m_X = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k, :)$$

$$m_Y = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Y(k, :)$$

Stimatore ai minimi quadrati 3

Stimatore lineare ai minimi quadrati

$$\hat{\mathbf{y}}(t) = \hat{\Sigma}_{YX} \hat{\Sigma}_X^{-1} \mathbf{x}(t) + m_Y - \hat{\Sigma}_{YX} \hat{\Sigma}_X^{-1} m_X$$

$$\hat{\mathbf{y}}(t) = \hat{A} \mathbf{x}(t) + \hat{b}$$

Problema: $\hat{\Sigma}_X$ è non singolare?

Soluzioni:

1. Usare meno sensori (quali?)
2. Tecnica PCA (*Principal component analysis*) per invertire la matrice varianza

PCA

$$\hat{\Sigma}_X = \sum_{i=1}^n \lambda_i u_i u_i^T = U \Lambda U^T$$

Dove

- U è una matrice ortogonale (l'inversa è la trasposta)
- Lambda è una matrice diagonale (i suoi elementi sono gli valori singolari della matrice varianza di X)

$$\Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$$

Si approssima la matrice di partenza considerando solo i valori singolari "più grandi"

$$\hat{\Sigma}_X \simeq \sum_{i=1}^a \lambda_i u_i u_i^T = U \Lambda_a U^T$$

dove

$$\Lambda_a = \text{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_a, 0, \dots, 0\}$$

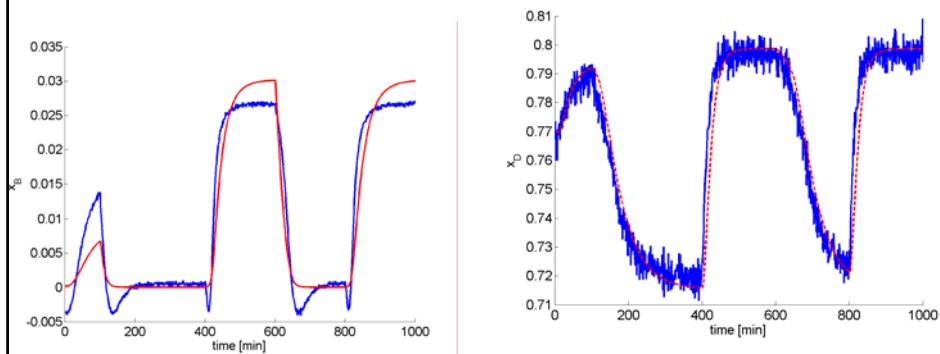
Alla fine

$$\hat{\Sigma}_X^{-1} \simeq U \Lambda_a^{-1} U^T$$

Simulazioni (stimatore statico) 1

Utilizzando le stesse posizioni di misura del filtro di Kalman ([2 6 12])

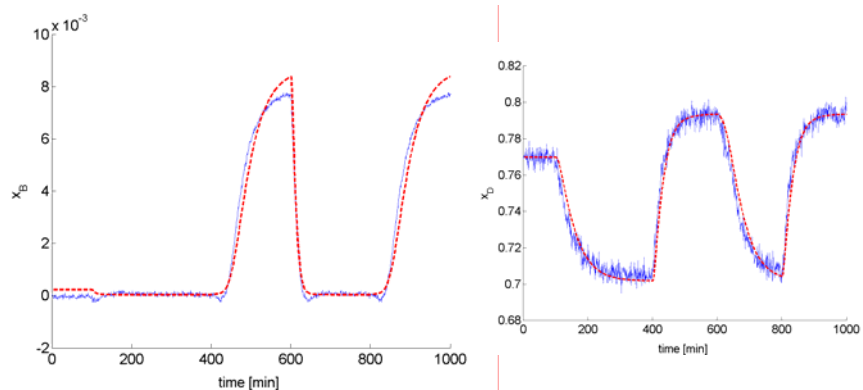
[variazione del 10% del flusso di alimentazione]



Simulazioni (stimatore statico) 2

Utilizzando le stesse posizioni di misura del filtro di Kalman

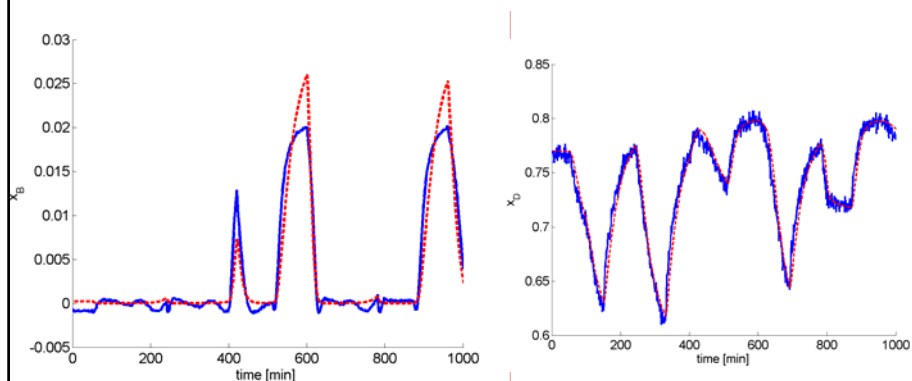
[variazione del 10% della concentrazione dell'alimentazione]



Simulazioni (stimatore statico) 3

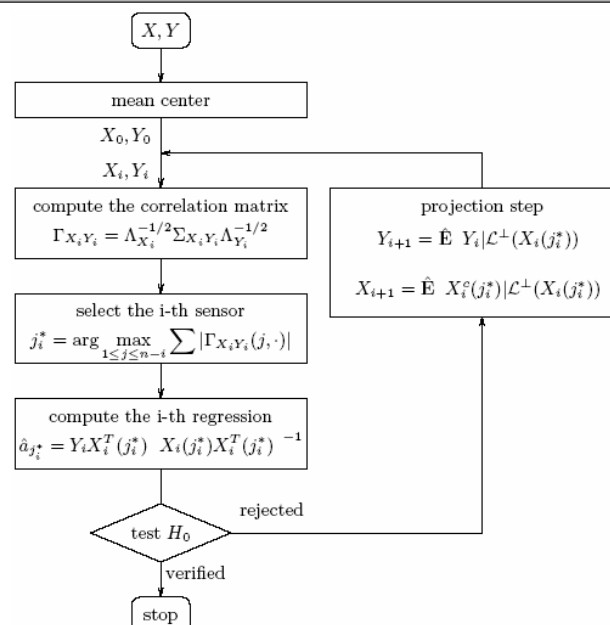
Utilizzando le stesse posizioni di misura del filtro di Kalman

[variazione del 10% del flusso di alimentazione e della concentrazione]



Selezione dei sensori 1

Si vuole utilizzare la teoria degli stimatori lineari per selezionare le allocazioni ottime dei sensori di temperatura.



Selezione dei sensori 2

Calcolo correlazione

$$\Gamma_{X_i Y_i} = \Lambda_{X_i}^{-1/2} \Sigma_{X_i Y_i} \Lambda_{Y_i}^{-1/2}$$

Regressione

$$\hat{a}_{j_i^*} = Y_i X_i^T(j_i^*) \left(X_i(j_i^*) X_i^T(j_i^*) \right)^{-1} \quad \hat{Y}_i = \hat{a}_{j_i^*} X_i(j_i^*)$$

Aggiornamento

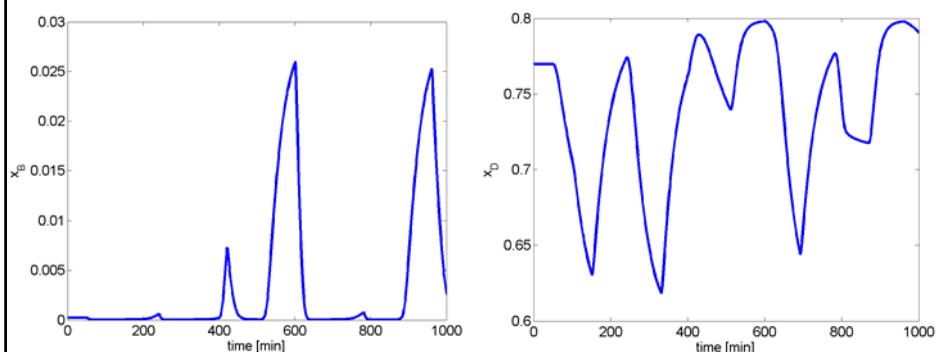
$$Y_{i+1} := Y_i - \hat{Y}_i$$

$$X_{i+1} := X_i - \hat{X}_i^c$$

dove \hat{X}_i^c è la stima degli ingressi (meno quelli selezionati fino al passo i-esimo) ottenibile da $X_i(j_i^*)$

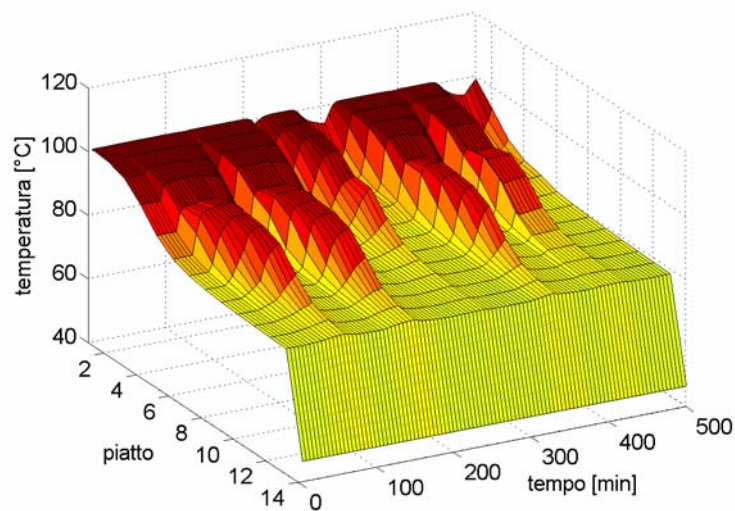
Selezione dei sensori 3

Date le concentrazioni di distillato e residuo.....



Selezione dei sensori 4

.....trovare le temperature più correlate

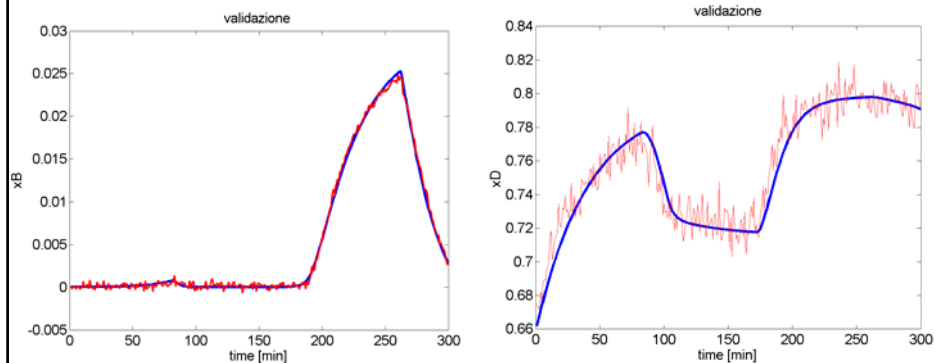


Stima PCA con i sensori ottimi

Implementando l'algoritmo si ottengono le misure di temperatura sui piatti:

2, 3, 1, 12

Con le seguenti stime



Conclusioni

La distribuzione ottima dei sensori non è una distribuzione uniforme lungo tutta la colonna né tanto meno l'utilizzo delle misure di temperatura su ogni piatto. Infatti con variazioni del flusso e della concentrazione dell'alimentazione, le posizioni ottime per uno stimatore statico a minima varianza sono in testa e in coda alla colonna.

Questioni aperte:

1. Cosa succede se si tengono in considerazione anche i disturbi sul flusso di vapore e sul flusso di liquido (variabili di controllo nei loop PI)?
2. L'allocazione ottima relativa al filtro di Kalman è la stessa dello stimatore statico?