

Riconciliazione



Approccio gerarchico alla ottimizzazione di processo

Supervisione

Ottimizzazione

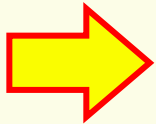
Controllo di processo

Riconciliazione dati

Simulazione di processo

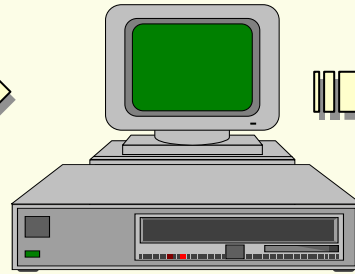
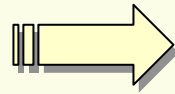
Analisi statistica

Acquisizione dati in linea

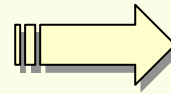




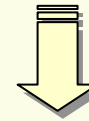
Processo



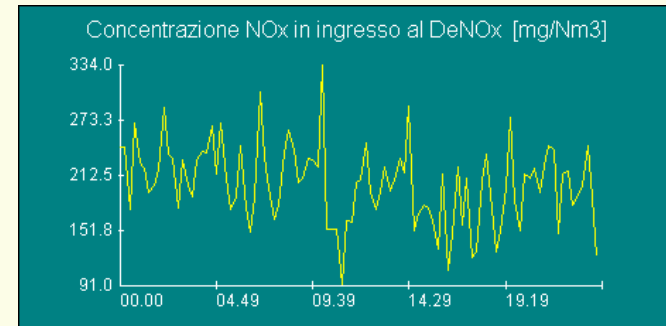
DCS



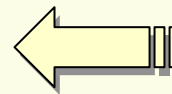
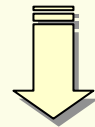
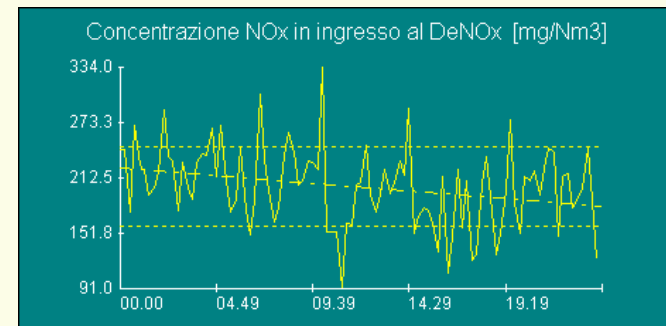
Sistema di supervisione



Acquisizione dati

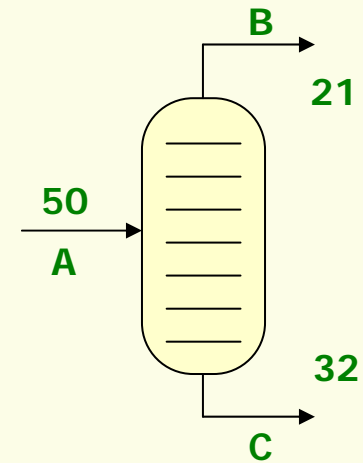


Analisi statistica



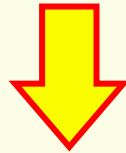
Cos'è la Riconciliazione...

- **Riconciliazione classica delle misure**

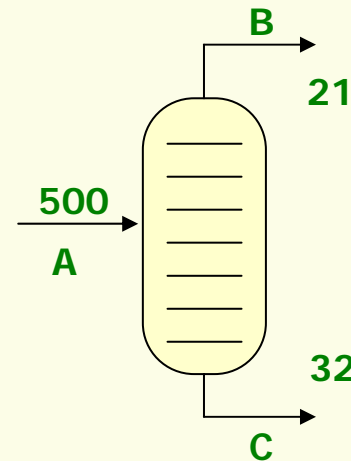
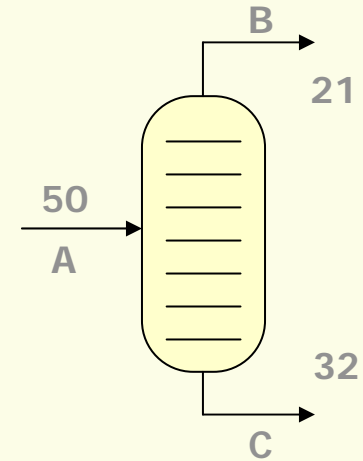


Cos'è la Riconciliazione...

- ❑ Riconciliazione classica delle misure

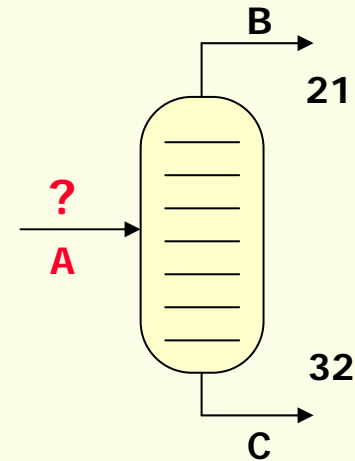


- ❑ **Gross error detection:**



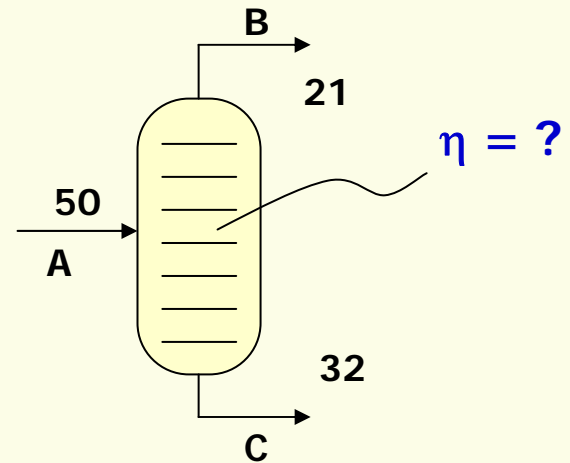
Cos'è la Riconciliazione...

□ Coaptation



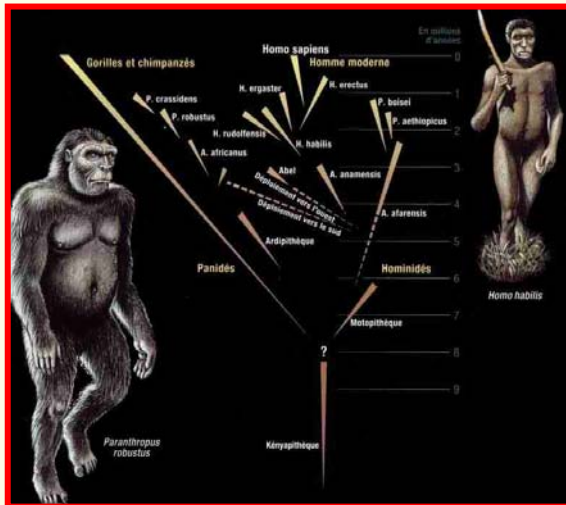
Cos'è la Riconciliazione...

□ Model identification



Introduzione

- ❑ La metodologia adottata per la **Riconciliazione dati** può essere divisa in **tre fasi distinte** (Romagnoli e Sanchez, 2000)
 - **Classificazione** delle variabili di processo e decomposizione del problema;
 - **Detezione, identificazione** e **stima** degli errori grossolani;
 - **Stima** delle **variabili** di processo **non misurate** o non misurabili.



Classificazione delle misure

- ❑ Per ragioni di costo, convenienza, o per motivi tecnici, **non tutte le variabili di processo sono misurate**.
- ❑ Sotto le ipotesi di stazionarietà del processo, alcune variabili non misurate possono essere **stimate** utilizzando altre variabili misurate e calcoli basati sui bilanci di materia ed energia.
- ❑ La stima delle **variabili non misurate** dipende dalla **struttura del processo** e dal **posizionamento della strumentazione** in campo.
- ❑ In genere la strumentazione di processo è incompleta (non esaurisce tutte le variabili di processo). Quindi le variabili **non misurate** possono essere divise in:
 - **variabili stimabili** (determinabili)
 - **variabili non stimabili** (indeterminabili)

Classificazione delle misure

- ❑ A loro volta **le misure** sono classificabili in:
 - **ridondanti**
 - **non ridondanti**
- ❑ Una misura è **ridondante** se rimane **determinabile** quando l'osservazione viene cancellata.
- ❑ La classificazione delle variabili è uno strumento essenziale per la progettazione ed il revamping di sistemi di monitoraggio.
- ❑ Una **classificazione robusta** delle variabili conduce a **significativi risparmi** legati alla selezione della strumentazione da installare in campo.
- ❑ Una classificazione non corretta delle variabili conduce all'introduzione di strumentazione non necessaria implicante costi di investimento maggiori.

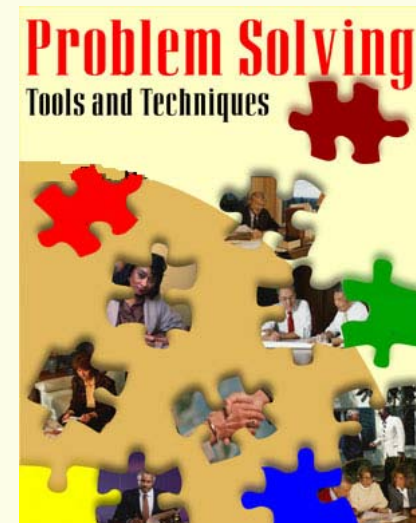
Classificazione delle misure

- ❑ Una variabile **non misurata** è **determinabile** se può essere calcolata utilizzando le misure disponibili e le equazioni di bilancio.
- ❑ Una variabile **non misurata** è **indeterminabile** se non può essere calcolata utilizzando le misure disponibili e le equazioni di bilancio.
- ❑ Una **variabile** di processo **misurata** è **ridondante** (sovradeterminata) se può essere ugualmente calcolata utilizzando le restanti misure e le equazioni di bilancio.
- ❑ Una **variabile** di processo **misurata non è ridondante** se non può essere calcolata utilizzando le restanti misure e le equazioni di bilancio.



Classificazione delle misure

- ❑ Una volta classificate le variabili si ha a disposizione una significativa quantità di informazioni circa la topologia del processo.
- ❑ È quindi possibile risolvere i seguenti problemi:
 - **Selezionare l'insieme di variabili misurate** che debbono essere corrette (riconciliate) al fine di incrementare l'accuratezza delle variabili misurate e non misurate di processo.
 - **Selezionare il minimo numero di misure** tali che tutte le variabili non misurate possano essere determinate.



Modello del processo

- ❖ Il **modello** del processo è una scrittura matematica descrivente il comportamento dello stesso in condizioni **STAZIONARIE** o **DINAMICHE**.
- ❖ Il modello del processo viene utilizzato su più livelli:
 - Per **inferenziare** grandezze altrimenti NON misurabili
 - Per **riconciliare** misure
 - Per **identificare** misure affette da **errori grossolani**
 - Per determinare l'azione di **controllo ottimale**
 - Model based control (ad esempio: Model Predictive control)
 - Feedforward control
 - Per **ottimizzazione di processo**
 - Per **supervisione di processo**
- ❖ Il processo può essere descritto tramite **modelli lineari o non lineari**: ARX, NARX, ARMAX, NARMAX, Trasformate di Laplace, Regressioni, Reti neurali artificiali (ANN), Modelli deterministici e fenomenologici (First Principles), ...

Modello del processo

- ❑ Il dettaglio del modello di processo deve essere commisurato alla necessità descrittiva richiesta. Occorre innanzitutto discriminare tra:
 - Modello stazionario e dinamico
 - Modello lineare o non lineare
 - Modello robusto o efficiente
 - Modello semplificato o dettagliato
- ❑ Nel caso più complesso di modello dettagliato dinamico non lineare occorre scrivere, per le apparecchiature e le correnti presenti nel processo, dei bilanci materiali, energetici e di quantità di moto. Il sistema risultante conterrà equazioni algebrico differenziali eventualmente alle derivate parziali. Esistono delle routine numeriche preposte ad integrare tali sistemi.
Anche utilizzando computer moderni con CPU estremamente veloci il tempo fisico richiesto per una simulazione od una serie di simulazioni (controllo predittivo, ottimizzazione) può essere superiore al tempo massimo accettabile (orizzonte di controllo). In questo caso è necessario passare a modelli più semplificati che riducono il tempo di CPU di ordini di grandezza (ad esempio modelli ARX o ANN).

Approccio risolutivo

□ Equation oriented

Quest'approccio si basa su equazioni di bilancio materiale ed energetico, ai nodi dell'impianto, utilizzate come vincoli di uguaglianza da soddisfare nella ricerca del minimo. Le variabili di output della procedura corrispondono a quelle di input. La differenza tra valore calcolato e misurato è imputabile ad un errore di misura. Per stimare i gradi di libertà (gdl) dell'impianto occorre avere a disposizione nuove e diverse misure distribuite nel processo ed il più precise possibile.

□ Black box

È dato un programma di simulazione di processo che ad assegnate variabili di input stima le variabili di output da riconciliare. Le variabili di output sono: correnti e/o composizioni incognite e parametri del processo non misurabili. Il programma di simulazione viene chiamato iterativamente da una routine di regressione non lineare che valuta i gradi di libertà in modo da minimizzare lo scarto tra dati misurati e dati calcolati.



Ridondanza

- ❑ Romagnoli e Sanchez (2000) definiscono un **sistema ridondante** quando l'insieme di dati/informazioni a disposizione è superiore all'ammontare minimo richiesto per una determinazione univoca delle variabili indipendenti che determinano il modello selezionato.
- ❑ Dato che i dati sono ottenuti da misure di processo che sono affette da fluttuazioni probabilistiche, **i dati ridondanti sono di solito inconsistenti** nel senso che ogni sottoinsieme di dati fornisce dei risultati differenti da altri sottoinsiemi.
- ❑ Per ottenere una **soluzione univoca** al problema della determinazione delle misure è quindi necessario introdurre un **criterio aggiuntivo**.

Ridondanza

□ Ridondanza del sistema

Nel caso di approccio **Black box** si definisce con il termine Ridondanza la differenza tra variabili misurate e gradi di libertà:

Ridondanza = variabili misurate – gradi di libertà = NY – NPAR

Il **sistema** descrivente numericamente il problema di Riconciliazione è **SOVRADIMENSIONATO**. È cioè costituito da più equazioni che incognite.

$$\begin{cases} y_{sper}(1) - y_{calc}^1(x_1, x_2, \dots, x_{NPAR}) = 0 \\ y_{sper}(2) - y_{calc}^2(x_1, x_2, \dots, x_{NPAR}) = 0 \\ \dots \\ y_{sper}(NY) - y_{calc}^{NY}(x_1, x_2, \dots, x_{NPAR}) = 0 \end{cases}$$

Il fatto che il sistema sia **ipervincolato** conduce all'impossibilità di soddisfarlo perfettamente. È viceversa possibile minimizzare la somma degli scarti quadratici delle varie equazioni risolvendo un problema di minimizzazione tramite una regressione non lineare nei parametri: \mathbf{x} .

Funzione obiettivo della Riconciliazione

- Obiettivo della procedura di Riconciliazione è la **minimizzazione** della

funzione:
$$\text{Min}_{\mathbf{x}} f = \sum_{i=1}^{NY} \frac{[y_{sper}(i) - y_i^{calc}(\mathbf{x})]^2}{s^2(i)}$$

Introducendo la matrice di incidenza \mathbf{M}_I è possibile controllare se un gdl NON influenza alcuna misura (muovendosi per colonne) o se una misura NON è influenzata da alcun gdl (muovendosi per righe). Se poi due colonne sono linearmente dipendenti allora i due gdl corrispondenti sono altamente correlati tra di loro.

$$\mathbf{M}_I = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_{calc}^1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_{calc}^1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial y_{calc}^1}{\partial x_{NPAR}} \\ \frac{\partial y_{calc}^2}{\partial x_1} & \frac{\partial y_{calc}^2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial y_{calc}^2}{\partial x_{NPAR}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial y_{calc}^{NY}}{\partial x_1} & \frac{\partial y_{calc}^{NY}}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial y_{calc}^{NY}}{\partial x_{NPAR}} \end{bmatrix}$$

Risoluzione del problema di Riconciliazione

- ❖ Affinché il **problema** di Riconciliazione sia **risolubile** occorre avere:
 - **Ridondanza positiva**
 - **Gradi di libertà indipendenti**
 - Un **algoritmo numerico robusto** soprattutto se si opera on-line



Risoluzione del problema di Riconciliazione

- ❖ Le **ipotesi di base** su cui si lavora sono le seguenti:
 1. Il **modello** del processo è in grado di **rappresentare correttamente** il sistema in esame (convalida del modello);
 2. Le **misure** sono **soggette ad errore** ε distribuito in **maniera normale** con **media** nulla e **varianza** σ nota o calcolabile;
 3. Le misure provengono da un **processo stazionario**.
- ❖ L'insuccesso della Riconciliazione (una volta verificata l'ipotesi 1) è dovuto ai punti 2 e 3. Possono esistere delle misure affette da errore grossolano che hanno valore atteso non nullo dell'errore ε :

$$E(\varepsilon) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon p(\varepsilon) d\varepsilon = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\varepsilon}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}\right) d\varepsilon \neq 0$$

- ❖ Possibili cause di errore grossolano sono: strumenti di misura non affidabili, disomogeneità attorno allo strumento, instabilità di processo, incidenti, errori di trascrizione, interruzione di comunicazione, non stazionarietà.

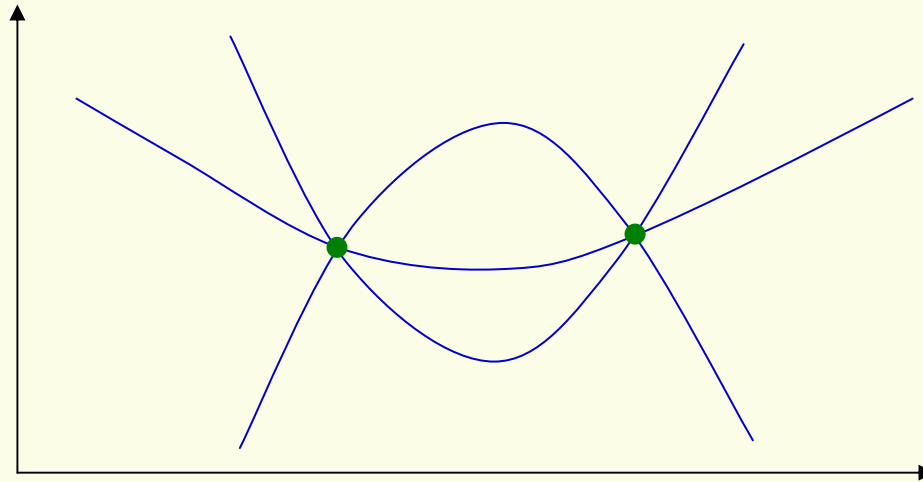
Analisi statistica delle misure disponibili

- ❑ Per effettuare una Riconciliazione dati occorre partire da valori medi delle misure acquisite in campo in un certo intervallo temporale rispetto al quale il processo è *mediamente* stazionario.
- ❑ A tal fine si parla di valore atteso della misura $\mu(i)$ e di varianza $\sigma(i)$ della stessa.
- ❑ È possibile distinguere tra stimatori robusti e stimatori efficienti
 - ❑ **Stimatori ROBUSTI**
 - ❑ Per $\mu(i)$ si usa la **Mediana**: è il valore centrale della popolazione ordinata in senso crescente. Nel caso di un numero pari di termini si fa la media aritmetica dei due valori centrali
 - ❑ Per $\sigma(i)$ si usa **MAD** (Median Absolute Deviation)
$$\text{MAD}(i) = 1.4826 * \text{Mediana}(|y_{\text{exp}}(i,k) - \text{Mediana}(y_{\text{exp}}(i,k))|)$$
 - ❑ **Stimatori EFFICIENTI**
 - ❑ **Media aritmetica**: $y_s(i) = \sum_{k=1}^{NS} y_{\text{exp}}(i,k) / NS$
 - ❑ **Deviazione standard** o scostamento quadratico medio:

$$s(i) = \sqrt{\sum_{k=1}^{NS} \frac{[y_{\text{exp}}(i,k) - y_s(i)]^2}{NS - 1}}$$

Identificazione del modello

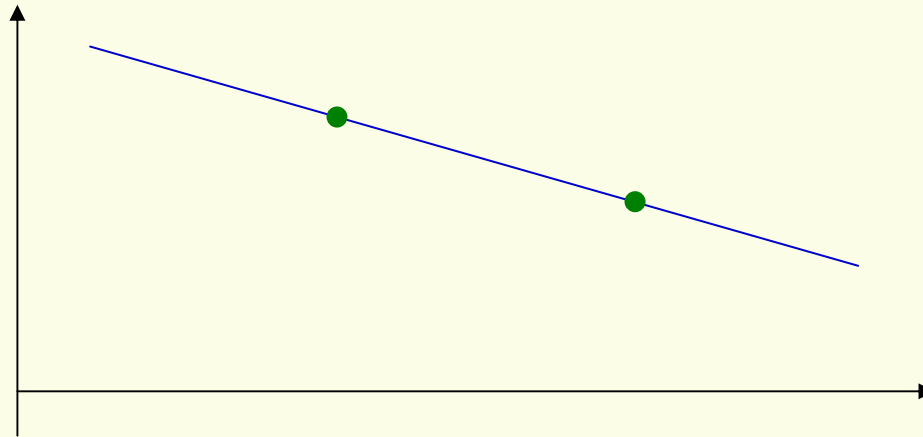
- Definiti **NY = numero misure** ed **NPAR = numero di gradi di libertà (parametri)** da identificare sono dati i seguenti casi:
- **NPAR > NY (Ridondanza NEGATIVA)**



Il modello proposto $y = ax^2 + bx + c$ è costituito da tre parametri (NPAR=3) mentre i punti sperimentali sono due. Si ha un'infinità di curve che soddisfano esattamente i dati sperimentali. Non è possibile individuare eventuali Gross Error.

Identificazione del modello

- **NPAR = NY (Ridondanza NULLA)**

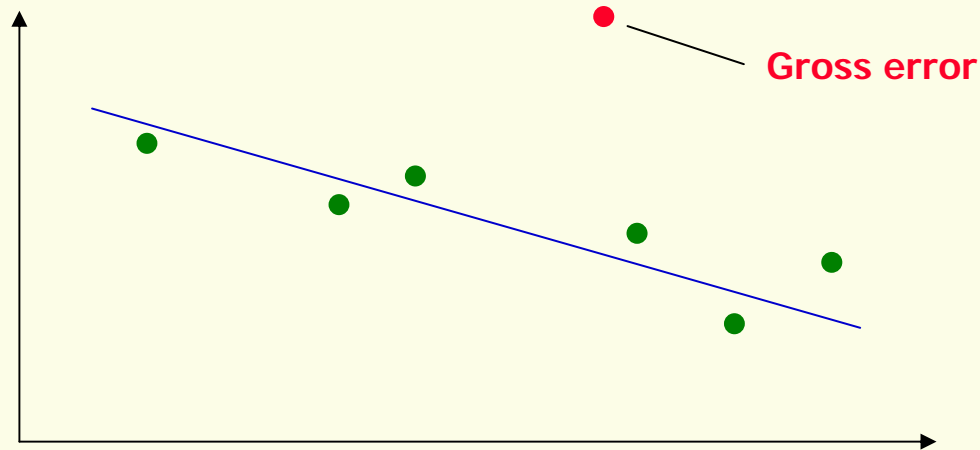


In questo caso esiste una sola curva passante per gli NY punti. Si noti che il modello proposto essendo una retta è costituito da due parametri.

Quindi $NPAR = 2$ ed $NY = 2$. L'identificazione ha ancora errore nullo e NON è possibile individuare eventuali Gross Error.

Identificazione del modello

□ NPAR < NY (Ridondanza POSITIVA)



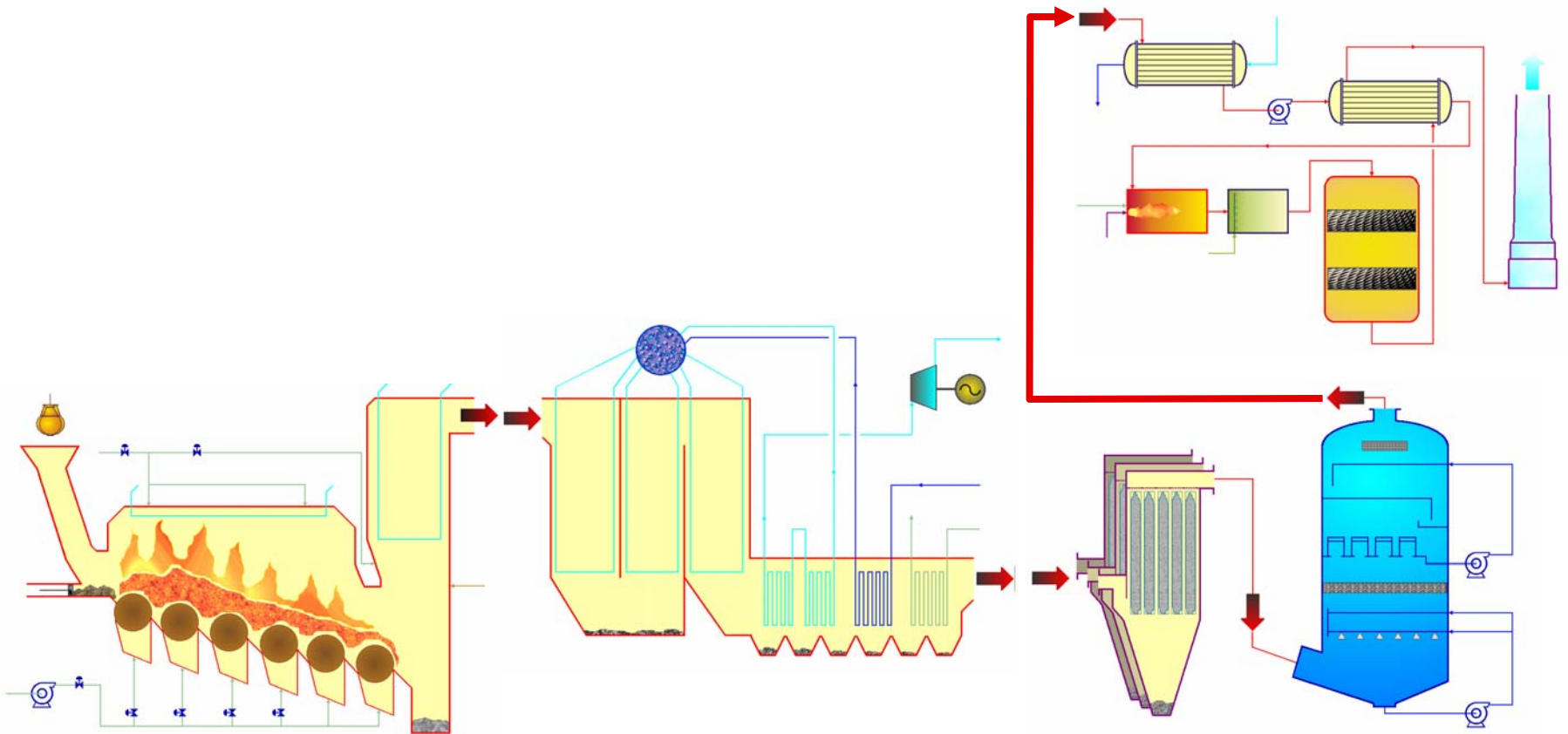
In questo caso il modello proposto è ancora una retta (NPAR = 2) mentre il numero di punti sperimentali è sette: NY = 7. Evidentemente NON esiste un modello che soddisfi contemporaneamente tutti i dati sperimentali. Si cercherà quindi di minimizzare l'errore commesso cioè minimizzare la distanza tra modello e dati acquisiti. In questo caso è possibile anche individuare possibili gross error in numero massimo:

$$NGE = NY - NPAR = R = \text{Ridondanza}$$

Qualora si trovi un gross error è possibile o eliminarlo o compensarlo con il valore appena riconciliato. In questo caso non si diminuisce la ridondanza.

Riconciliazione dati – Case study

Impianto di termovalorizzazione con sezione DeNOx catalitico



Riconciliazione dati – Case study (continua)

□ Esigenza di conoscenze specifiche

- Valutazione esatto valore delle misure rilevate in campo
- Individuazione eventuale misura affetta da gross error
- Conoscenza in tempo reale della caratteristica del rifiuto entrante in termini di composizione elementare e potere calorifico
- Stima di correnti entranti non misurabili o non disponibili:
 - Arie dalle tenute
 - Portata metano in postcombustione
- Valutazione di parametri operativi e grandezze adattive quali:
 - Efficienze filtro a maniche
 - Efficienza catalizzatore
 - Fattore sporcamento scambiatori di calore

Riconciliazione dati – Case study (continua)

□ Posizione del problema

Funzione obiettivo da minimizzare:

$$\underset{\mathbf{x}}{\text{Min}} f = \sum_{i=1}^{NY} \frac{[y_{sper}(i) - y_i^{calc}(\mathbf{x})]^2}{s^2(i)}$$

Misure da riconciliare: 24

T fumi postcombustione
T out fumi zona radiante
T out fumi preriscaldatore
Fumi uscita colonna lav.
T fumi camino
NOx ingresso DeNOx
HCl al camino
Polveri al camino

CO out postcombustione
T out fumi surriscaldatore
T aria combustione
T out gas heater
T in fumi DeNOx
NOx uscita DeNOx
SO2 al camino
O2 al camino

O2 out postcombustione
T out fumi economizzatore
Fumi ingresso colonna lavaggio
Tout fumi scambiatore gas-gas
T out fumi DeNOx
Portata ammoniacca
CO al camino
Portata vapore prodotta

Gradi di libertà (parametri di riconciliazione): 23

Portata di rifiuto
Frazione S nel rifiuto
Portata aria tenute forno
Dispersioni caldaia
Fatt. corr. economiz.
Efficienza lavaggio acido
Fatt. corr. scamb. gas-gas
Efficienza catalizz. DeNOx

Frazione Ceneri nel rifiuto
Frazione N nel rifiuto
Frazione bypass fumi forno
Fatt. corr. scamb. zona radiante
Fatt. corr. preriscaldatore
Efficienza lavaggio basico
Portata aria preriscaldatore
Arie tenute dopo postcombustione

Frazione Cl nel rifiuto
Frazione C nel rifiuto
Portata metano postcombustione
Fatt. corr. scamb. Surriscaldatore
Efficienza filtro a maniche
Fatt. corr. riscaldatore vapore
Portata metano bruciatore DeNOx



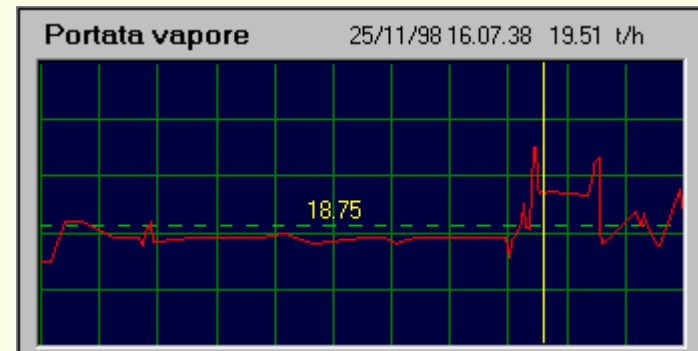
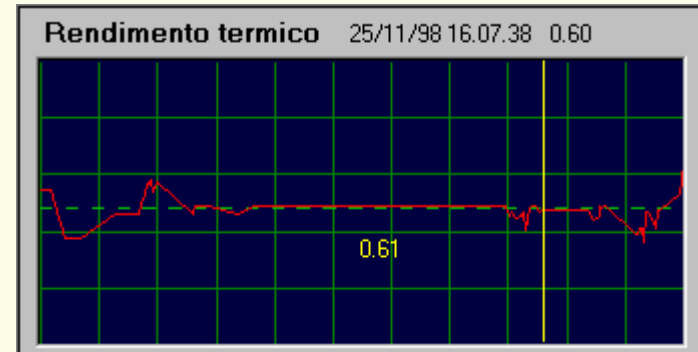
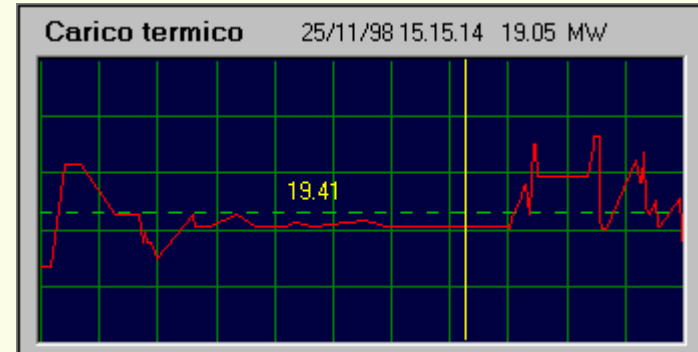
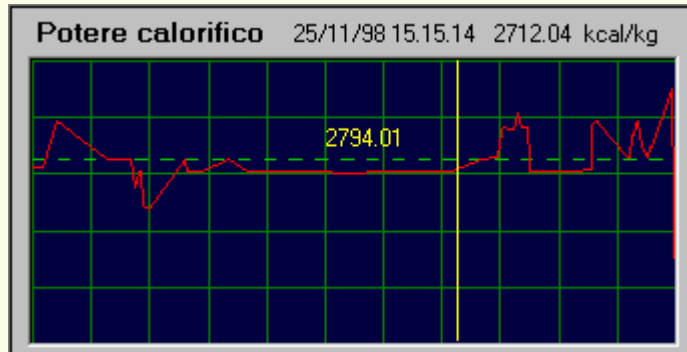
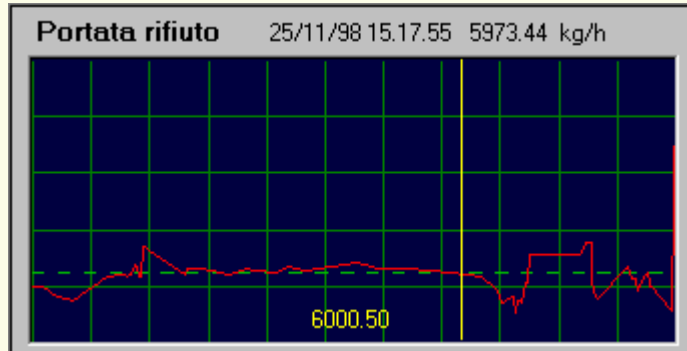
Riconciliazione dati – Case study (continua)

□ Risoluzione del problema

- Occorre disporre di una routine di regressioni non lineari in grado di minimizzare la funzione obiettivo precedentemente posta.
- Occorre disporre di un modello dettagliato del processo in grado di simulare le misure (cioè calcolare i valori riconciliati delle misure acquisite) ogniqualvolta la routine di regressione propone un nuovo vettore di gradi di libertà.
- Se la procedura di riconciliazione NON riesce a minimizzare la funzione obiettivo, raggiungendo la precisione desiderata, significa che i bilanci materiali, energetici e di quantità di moto descriventi il processo “non chiudono”. Si può in questo caso ipotizzare la presenza di un errore grossolano eliminando la misura rispetto alla quale esiste maggiore scostamento o meglio sostituendone il valore misurato con quello appena stimato. La procedura continua fintantoché non si raggiunge la precisione desiderata. Se la misura ipotizzata di errore grossolano e sostituita NON porta la procedura a successo la si reintegra e si elimina quella successiva maggiormente “incriminata”. Dato che nel caso d’esempio la ridondanza è unitaria sarà possibile individuare un solo gross error.

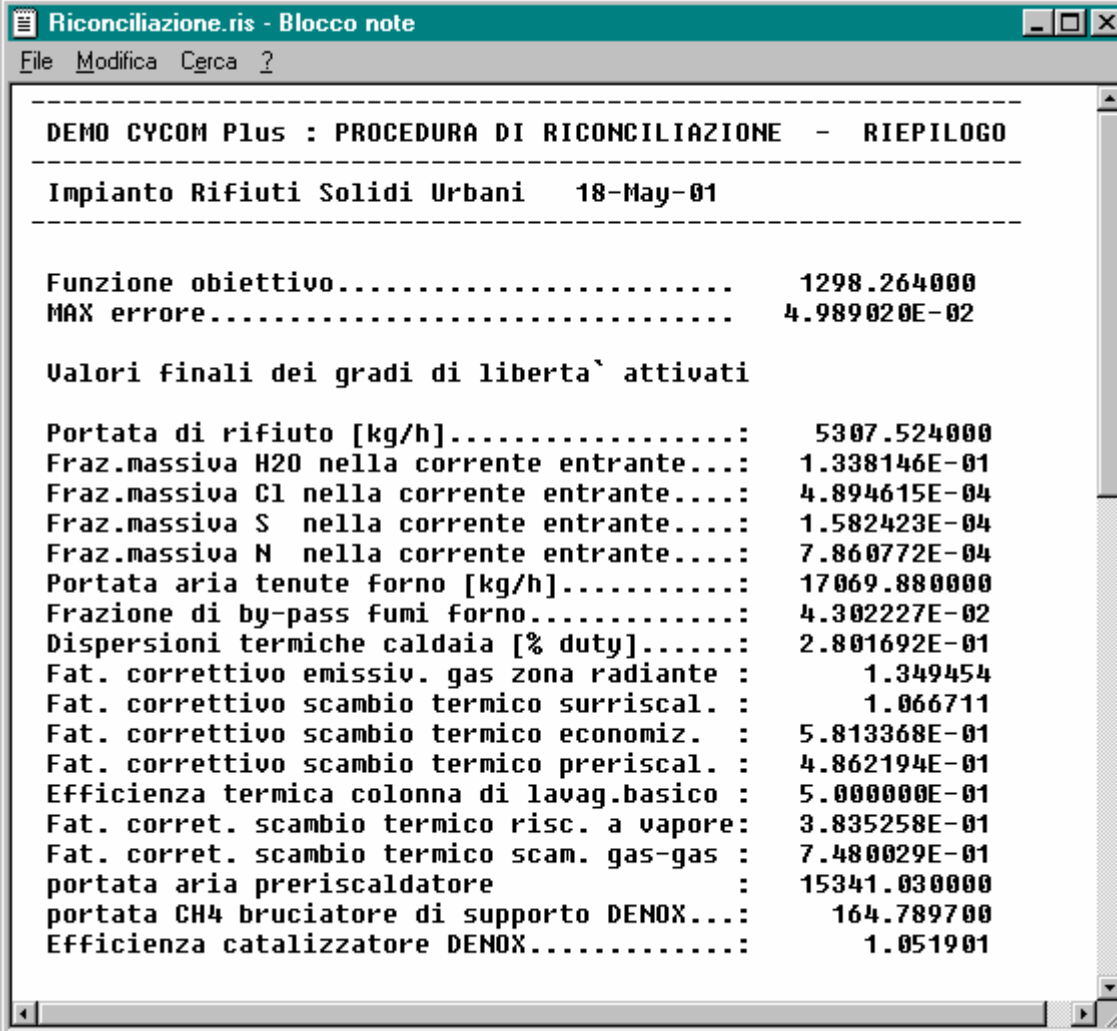
Riconciliazione dati – Case study (continua)

□ I risultati...



Riconciliazione dati – Case study (continua)

□ I risultati...



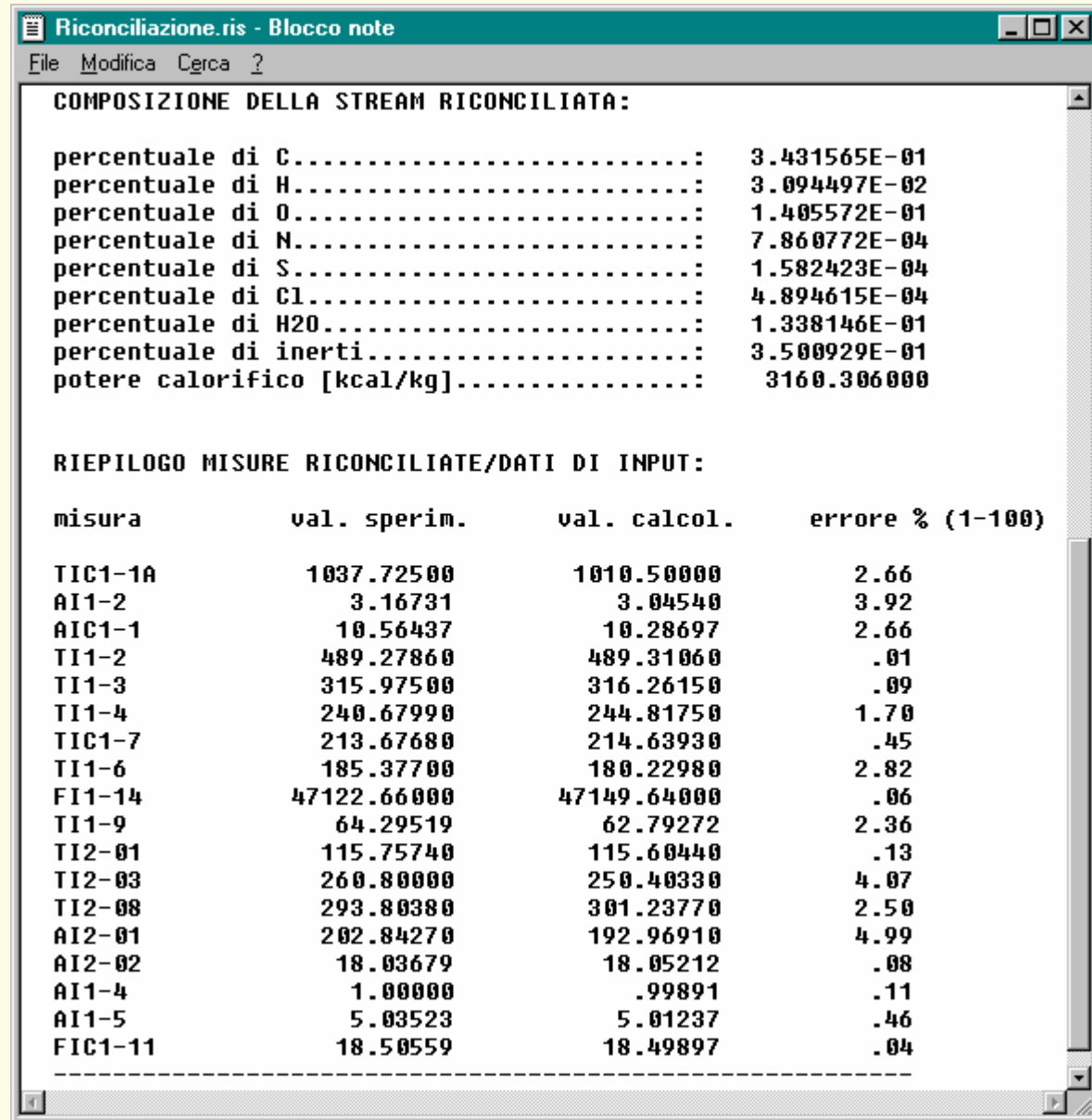
DEMO CYCOM Plus : PROCEDURA DI RICONCILIAZIONE - RIEPILOGO

Impianto Rifiuti Solidi Urbani 18-May-01

Funzione obiettivo.....	1298.264000
MAX errore.....	4.989020E-02
Valori finali dei gradi di liberta` attivati	
Portata di rifiuto [kg/h].....:	5307.524000
Fraz.massiva H2O nella corrente entrante....:	1.338146E-01
Fraz.massiva Cl nella corrente entrante.....:	4.894615E-04
Fraz.massiva S nella corrente entrante.....:	1.582423E-04
Fraz.massiva N nella corrente entrante.....:	7.860772E-04
Portata aria tenute forno [kg/h].....:	17069.880000
Frazione di by-pass fumi forno.....:	4.302227E-02
Dispersioni termiche caldaia [% duty].....:	2.801692E-01
Fat. correttivo emissiv. gas zona radiante :	1.349454
Fat. correttivo scambio termico surriscal. :	1.066711
Fat. correttivo scambio termico economiz. :	5.813368E-01
Fat. correttivo scambio termico preriscal. :	4.862194E-01
Efficienza termica colonna di lavag.basico :	5.000000E-01
Fat. corret. scambio termico risc. a vapore:	3.835258E-01
Fat. corret. scambio termico scam. gas-gas :	7.480029E-01
portata aria preriscaldatore :	15341.030000
portata CH4 bruciatore di supporto DENOX....:	164.789700
Efficienza catalizzatore DENOX.....:	1.051901

Riconciliazione dati – Case study (continua)

I risultati...



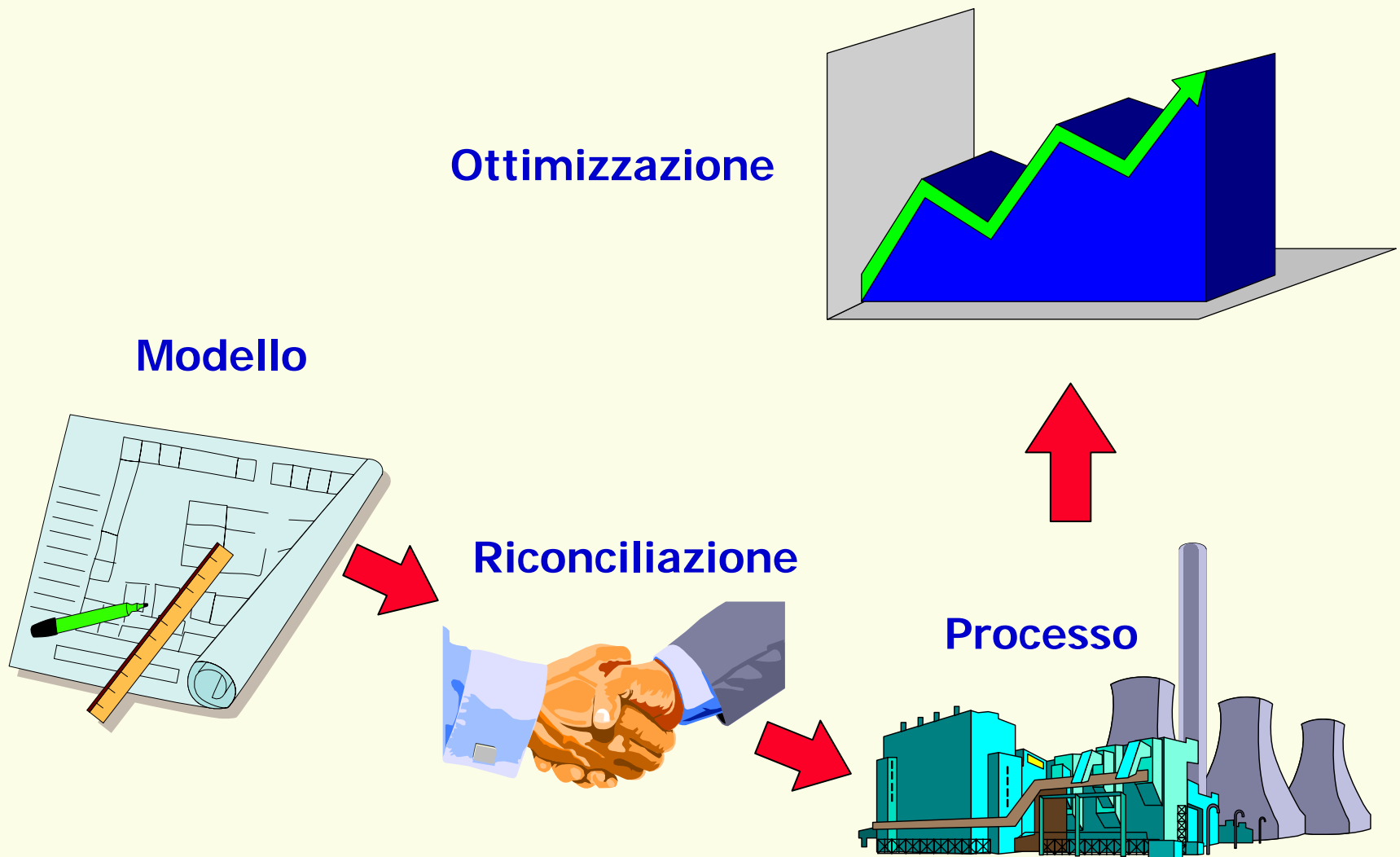
COMPOSIZIONE DELLA STREAM RICONCILIATA:

percentuale di C.....	3.431565E-01
percentuale di H.....	3.094497E-02
percentuale di O.....	1.405572E-01
percentuale di N.....	7.860772E-04
percentuale di S.....	1.582423E-04
percentuale di Cl.....	4.894615E-04
percentuale di H2O.....	1.338146E-01
percentuale di inerti.....	3.500929E-01
potere calorifico [kcal/kg].....	3160.306000

RIEPILOGO MISURE RICONCILIATE/DATI DI INPUT:

misura	val. sperim.	val. calcul.	errore % (1-100)
TIC1-1A	1037.72500	1010.50000	2.66
AI1-2	3.16731	3.04540	3.92
AIC1-1	10.56437	10.28697	2.66
TI1-2	489.27860	489.31060	.01
TI1-3	315.97500	316.26150	.09
TI1-4	240.67990	244.81750	1.70
TIC1-7	213.67680	214.63930	.45
TI1-6	185.37700	180.22980	2.82
FI1-14	47122.66000	47149.64000	.06
TI1-9	64.29519	62.79272	2.36
TI2-01	115.75740	115.60440	.13
TI2-03	260.80000	250.40330	4.07
TI2-08	293.80380	301.23770	2.50
AI2-01	202.84270	192.96910	4.99
AI2-02	18.03679	18.05212	.08
AI1-4	1.00000	.99891	.11
AI1-5	5.03523	5.01237	.46
FIC1-11	18.50559	18.49897	.04

Riconciliazione ed Ottimizzazione



Riconciliazione ed Ottimizzazione

Reliable process data are the key to the efficient operation of chemical plants.

... it must be noted that errors in process data or inaccurate and unreliable methods of resolving these errors, can easily exceed or mask actual changes in process performance.

Romagnoli and Sanchez, 2000

- ❑ La **non corretta conoscenza** delle condizioni operative del processo analizzato conduce ad un'**errata** rappresentazione e **stima dei margini di miglioramento** dello stesso.



Riconciliazione ed Ottimizzazione

- Si pensi ad una Ferrari che corra in rettilineo a 320 km/h:
 - se l'incertezza nel cronometraggio sul giro è di 1 millesimo di secondo allora si ha un'incertezza spaziale di 9 cm;
 - se l'incertezza sul giro è di 1 secondo allora si ha un'incertezza spaziale di 90 m.



Riconciliazione ed Ottimizzazione

2006 Monaco Grand Prix

Migliori tempi sul giro

#	Nome	Cognome	Team	Tempo	Velocità media [km/h]	differenza %
1	Michael	Schumacher	Ferrari	01:15.1	160.014	
2	Kimi	Räikkönen	McLaren-Mercedes	01:15.3	159.628	0.241229
3	Fernando	Alonso	Renault	01:15.7	158.898	0.697439
4	Mark	Webber	Williams-Cosworth	01:15.7	158.879	0.709313
5	Giancarlo	Fisichella	Renault	01:15.9	158.379	1.021786
6	Juan Pablo	Montoya	McLaren-Mercedes	01:16.0	158.193	1.138025
7	Felipe	Massa	Ferrari	01:16.6	156.946	1.917332
8	Jarno	Trulli	Toyota	01:17.2	155.791	2.639144
9	Nico	Rosberg	Williams-Cosworth	01:17.2	155.696	2.698514
10	Jenson	Button	Honda	01:17.3	155.549	2.790381
11	Nick	Heidfeld	Sauber-BMW	01:17.3	155.511	2.814129
12	Rubens	Barrichello	Honda	01:17.3	155.509	2.815379
13	Tiago	Monteiro	MF1-Toyota	01:17.3	155.491	2.826628
14	Scott	Speed	STR-Cosworth	01:17.5	155.186	3.017236
15	Ralf	Schumacher	Toyota	01:17.5	155.068	3.090980
16	Christijan	Albers	MF1-Toyota	01:17.6	154.942	3.169723
17	Vitantonio	Liuzzi	STR-Cosworth	01:17.7	154.828	3.240966
18	Jacques	Villeneuve	Sauber-BMW	01:17.8	154.615	3.374080
19	David	Coulthard	Red Bull Racing	01:17.8	154.452	3.475946
20	Christian	Klien	Red Bull Racing	01:17.9	154.292	3.575937
21	Takuma	Sato	Super Aguri-Honda	01:18.8	152.602	4.632095
22	Franck	Montagny	Super Aguri-Honda	01:19.1	152.002	5.007062

5%



Bibliografia

- Biegler L.T., J.J. Damiano, G.E. Blau, "Non linear parameter estimation: a Case-study comparison", *AIChE J.*, 32, 29-43, (1986)
- Crowe C.M., "Reconciliation of process flow rates by matrix projection. Part II: the non linear case", *AIChE J.*, 44, 2909-2917, (1986)
- Crowe C.M., "Data reconciliation – Progress and challenges", *J. Proc. Control*, 6, 89-98, (1996)
- Kretsovalis A., R.S.H. Mah, "Observability and redundancy classification in generalized process networks. I: Theorems", *Comput. Chem. Eng.*, 12, 671-687, (1988a)
- Kretsovalis A., R.S.H. Mah, "Observability and redundancy classification in generalized process networks. II: Algorithms", *Comput. Chem. Eng.*, 12, 689-703, (1988b)
- Mah R.S.H., "Chemical process structures and Information flows", *Chem. Eng. Ser. Butterworth*, Boston, (1990)
- Mah R.S.H., G. Stanley, D. Downing, "Reconciliation and rectification of process flows and inventory data", *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 15, 175-183, (1976)
- Manca D., M. Rovaglio, S. Pierucci, T. Faravelli, "Reconciliation, Optimization and Supervisory Control of Crude Oil Distillation Systems", *The First Conference on Chemical and Process Engineering*, Firenze, 255-259, (1993)
- Manca D., M. Rovaglio, "Numerical Modeling of a Discontinuous Incineration Process With On Line Validation", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44, 3159-3177, (2005)



Bibliografia

- **Narasimhan S., C. Jordache, "Data Reconciliation and Gross Error Detection : An Intelligent Use of Process Data", Gulf Professional Publishing, Houston, (2000)**
- Rovaglio M., D. Manca, M. Mariano, G. Nini, R. Gani, "Data Reconciliation and Process Optimization for Hazardous Waste Incineration Plants", Proceedings of "PSE: Process Systems Engineering", pp. 613-621, ISBN 89 950005-1-1, Kyongju Korea, (1994)
- Rovaglio M., D. Manca, "Reconciliation and Model Identification as a First Step for On Line Optimization of Incineration Processes", Proceedings of International Conference on Incineration & Thermal Treatment Technologies, IT3, S. Francisco, USA, pp. 587 596, (1997)
- **Romagnoli J.A., M.C. Sanchez, Data Processing and Reconciliation for Chemical Process Operations, Academic press, New York, 2000**
- Stanley G., R.S.H. Mah, "Observability and redundancy in process data estimation", Chem. Eng. Sci., 36, 259-272, (1981a)
- Stanley G., R.S.H. Mah, "Observability and redundancy classification in process networks – Theorems and algorithms", Chem. Eng. Sci., 36, 1941-1954, (1981b)
- Tjoa I. B., L.T. Biegler, "Simultaneous strategies for data reconciliation and gross error detection of nonlinear systems", Comp. and Chem. Engineering, 15, 679–690, (1991)
- Vaclavek V., "Studies on system engineering. III. Optimal choice of the balance measurement in complicated chemical engineering systems", Chem. Eng. Sci., 24, 947-955, (1969)

