

## *Engenharia de Controle e Automação*

“Quem tem um relógio,  
sabe que horas são, quem  
tem dois relógios tem  
dúvida”

(Anônimo)

## *Production Accounting*

1

## **Production Accounting**

### **O que é contabilidade de Produção ?**

- **Contabilidade de Rendimento**  
A contabilidade das atividades operacionais de uma planta envolvendo a medida quantitativa de entradas e saídas associadas com as várias unidades de processos físicos e lógicos em uma planta.
- **Contabilidade de Estoques**  
A contabilidade da atividade de negócio de uma planta envolvendo a medida quantitativa de produtos recebidos, expedidos, inventários, produções e consumos que ocorrem dentro das fronteiras físicas e legais da planta.

## Production Accounting

### *Melhores Práticas*

- Reconciliação Diária
- Estratégia para resolver discrepâncias de dados
- Entrada automática de dados
- Pessoal dedicado
- Comunicação intra departamental
- Acesso global de toda a planta a um único conjunto de dados reconciliados
- Atualização periódica de sistemas de negócio e financeiro.

## Production Accounting – Conceitos Básicos

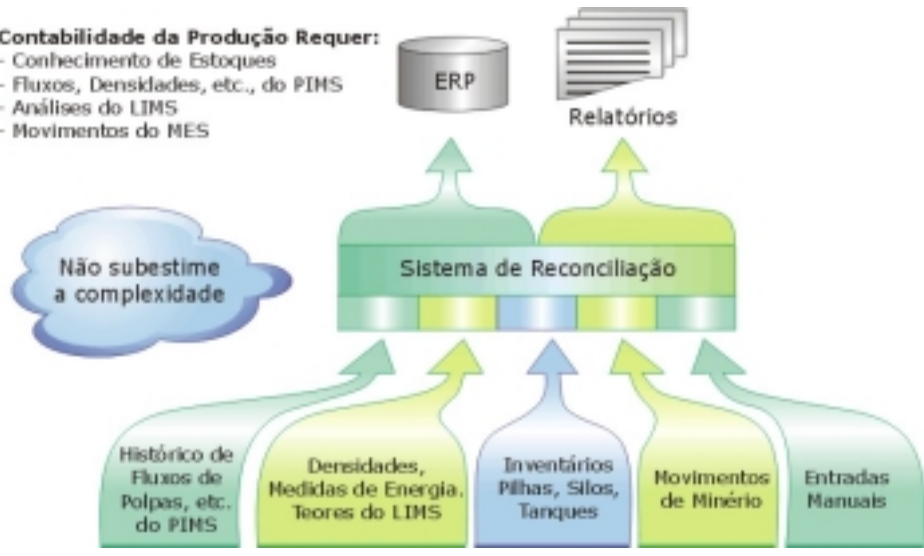
### **Quatro passos básicos e sucessivos:**

1. Coleta, validação e processamento dos dados
2. Detecção e correção de grandes erros
3. Reconciliação
4. Relatórios

## Passo 1: Coleta, Validação e Processamento

### Contabilidade da Produção Requer:

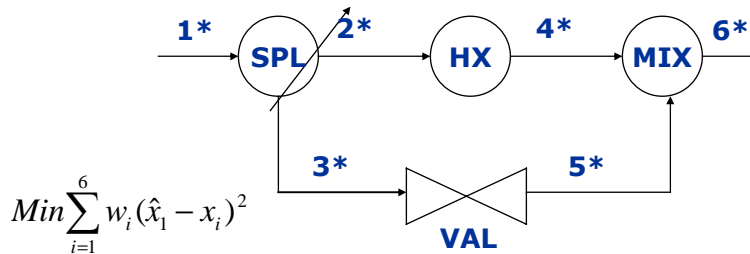
- Conhecimento de Estoques
- Fluxos, Densidades, etc., do PIMS
- Análises do LIMS
- Movimentos do MES



## Passo 2: Detecção e Correção de grandes Erros

- Fontes:
  - Vazamentos, derramamentos, movimentações manuais
  - Movimentos faltantes
  - Alinhamentos incorretos
  - Erros de entrada de dados e de medidas
- Critério
  - $\Sigma$ Fluxos de entrada nos Nodos -  $\Sigma$ Fluxos de saídas dos nodos - Variação de inventário do nodo  $\langle \rangle$  zero or  $\rangle$  algum valor
- Pode tomar tempo: pede procedimentos de entrada de dados automáticos e robustos

## Detecção de Grandes Erros - Algoritmo MIMT - Modified Iterative Measurement Test



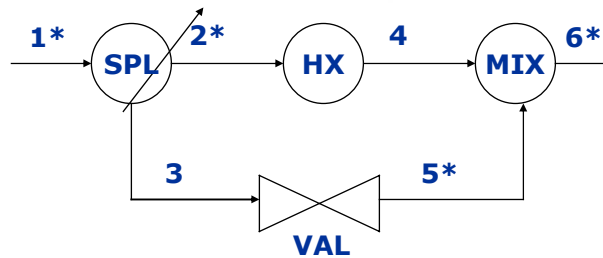
$$\text{Min} \sum_{i=1}^6 w_i (\hat{x}_i - x_i)^2$$

### Restrições:

$$\begin{cases} \hat{x}_1 - \hat{x}_2 - \hat{x}_3 = 0 \\ \hat{x}_2 - \hat{x}_4 = 0 \\ \hat{x}_3 - \hat{x}_5 = 0 \\ \hat{x}_4 + \hat{x}_5 - \hat{x}_6 = 0 \end{cases}$$

| Número do fluxo | Valores reais | Valores Medidos | Valores reconciliados |
|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------|
| 1               | 100           | 101.91          | 100.22                |
| 2               | 64            | 64.45           | 64.50                 |
| 3               | 36            | 34.65           | 35.72                 |
| 4               | 64            | 64.20           | 64.50                 |
| 5               | 36            | 36.44           | 35.72                 |
| 6               | 100           | 98.88           | 100.22                |

## Caso 1: Fluxos 1, 2, 5 e 6 são medidos



$$\text{Min} \sum_{i=1,2,5,6} w_i (\hat{x}_i - x_i)^2 \quad \text{independe dos valores medidos}$$

### Restrições envolvendo medidas:

### Objetivo:

- Reconciliar valores medidos
- Estimar valores não medidos

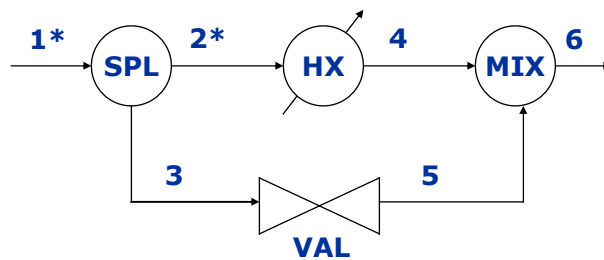
$$\begin{cases} \hat{x}_1 - \hat{x}_2 - \hat{x}_5 = 0 \\ \hat{x}_2 + \hat{x}_5 - \hat{x}_6 = 0 \end{cases}$$

## Caso 1: Fluxos 1, 2, 5 e 6 são medidos

| Número do fluxo | Valores reais | Valores Medidos | Valores reconciliados |
|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------|
| 1               | 100           | 101.91          | 100.49                |
| 2               | 64            | 64.45           | 64.25                 |
| 3               | 36            | -               | 36.24                 |
| 4               | 64            | -               | 64.25                 |
| 5               | 36            | 36.44           | 36.24                 |
| 6               | 100           | 98.88           | 100.49                |

- O valor estimado é menos preciso
- A reconciliação reduzida envolve apenas variáveis medidas
- Cálculo das estimativas das variáveis não medidas
- O sistema é dito **Redundante e Observável**

## Caso 2: Fluxos 1 e 2 são medidos



$$\text{Min} \sum_{i=1,2} w_i (\hat{x}_i - x_i)^2 \quad \text{independe dos valores medidos}$$

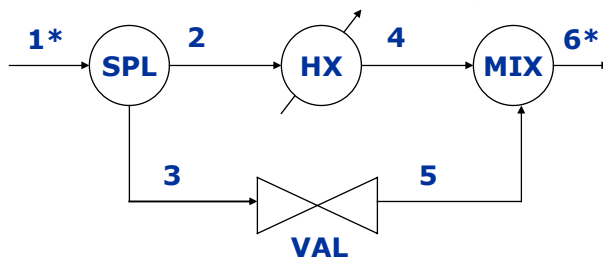
- Não existem restrições para as variáveis medidas

## Caso 2: Fluxos 1 e 2 são medidos

| Número do fluxo | Valores reais | Valores Medidos | Valores reconciliados |
|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------|
| 1               | 100           | 101.91          | 101.91                |
| 2               | 64            | 64.45           | 64.45                 |
| 3               | 36            | -               | 37.46                 |
| 4               | 64            | -               | 64.45                 |
| 5               | 36            | -               | 37.46                 |
| 6               | 100           | -               | 101.91                |

- A melhor estimativa para  $x_1$  e  $x_2$  é dada pelos próprios valores medidos.
- As medidas  $x_1$  e  $x_2$  não foram ajustadas
- O sistema é dito **Não redundante** e **Observável**

## Caso 3: Fluxos 1 e 6 são medidos



$$\text{Min} \sum_{i=1,6} w_i (\hat{x}_i - x_i)^2 \quad \text{independe dos valores medidos}$$

**Restrições envolvendo medidas:**

$$\hat{x}_1 - \hat{x}_6 = 0$$

## Caso 3: Fluxos 1 e 6 são medidos

| Número do fluxo | Valores reais | Valores Medidos | Valores reconciliados |
|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------|
| 1               | 100           | 101.91          | 100,39                |
| 2               | 64            | -               | -                     |
| 3               | 36            | -               | -                     |
| 4               | 64            | -               | -                     |
| 5               | 36            | -               | -                     |
| 6               | 100           | 98.88           | 100,39                |

Os valores reconciliados para  $x_1$  e  $x_6$  são obtidos

- Existem infinitos valores de estimativas para as variáveis não medidas que satisfazem as restrições
- As variáveis  $x_2, x_3, x_4, x_5$  são não observáveis.
- O sistema é dito **Redundante e Não observável**

## Detecção de Grandes Erros - Algoritmo MIMT

| Número do fluxo | Valores reais | Valores Medidos | Valores reconciliados | Erro  | Dados reconciliados sem medida 2 |
|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------|-------|----------------------------------|
| 1               | 100           | 101.91          | 100.89                | 1.02  | 100.23                           |
| 2               | 64            | 68.45           | 65.83                 | 2.62  | 64.53                            |
| 3               | 36            | 34.65           | 35.05                 | -0.40 | 35.71                            |
| 4               | 64            | 64.20           | 65.83                 | -1.63 | 64.53                            |
| 5               | 36            | 36.44           | 35.05                 | 1.39  | 35.71                            |
| 6               | 100           | 98.88           | 100.89                | -2.01 | 100.23                           |

Gross Error →

- Ocorre queda das estimativas de todas as medidas
- Dizemos que a medida contaminou o resultado
- Se eliminamos a medida 2 a redundância cai, mas a precisão aumenta
- Como encontrar a medida com o *gross error* baseado só nas medidas e nas relações entre variáveis ?

## Detecção de Grandes Erros - Algoritmo MIMT

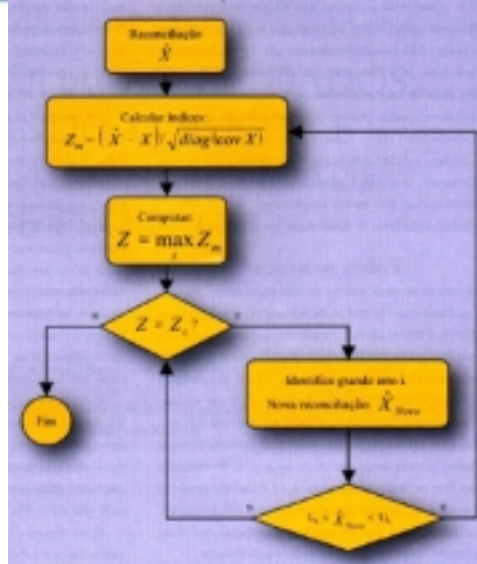
- **Calcular analiticamente a variância esperada das correções** =  $f(\text{matriz de restrições, variância dos erros das medidas})$
- **Desvio padrão das correções é 0.8165**
- **Aplicar um teste estatístico: medidas dentro do intervalo de confiança de  $\pm 2\sigma$  estão OK, neste caso: Intervalo de confiança (95%) = [-1.6, 1.6]**
- **Medidas 2, 4 e 6 estão fora do intervalo**
- **Retiramos o pior caso (medida 2) e reconciliamos as demais medidas.**
- **O método é reaplicado ciclicamente até todas as medidas serem aceitáveis.**

## Definições

- **Observabilidade**  
Uma variável é dita observável se pode se estimada através de outras medidas e das restrições do processo em estado estacionário
- **Redundância**  
Uma variável medida é dita redundante se for observável mesmo quando seu instrumento de medição é removido



## Detecção de Grandes Erros - Algoritmo MIMT



## Passo 3: Reconciliação

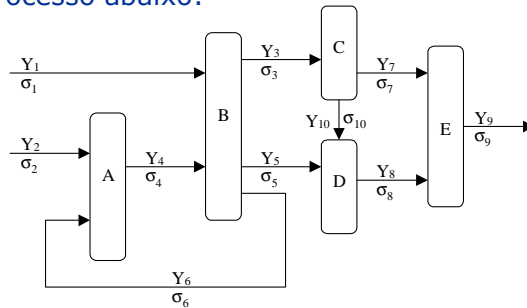
- Erros aleatórios permanecem após correção dos grandes erros.
- Reconciliação distribui os erros residuais pelos nodos para fechamento do balanço.
  - Métodos dos mínimos quadrados ou sistema especialista, cada qual tem os seus méritos
- Não tem propósito contábil: esconde os erros.
- Consome tempo.
- Maneira confiável de detectar erros de instrumentos

## Reconciliação

- **Definição:**  
A reconciliação de dados é um método matemático de se dividir os imbalanços pelas medidas que contribuem para o balanço de forma que os novos valores estimados calculados, fechem perfeitamente a equação de balanço minimizando o somatório do erro quadrático de cada medida real em relação ao estimado pelo algoritmo
- A soma dos erros é em geral ponderada pela precisão de cada instrumento ou pelo grau de confiança das estimativas realizadas para os valores não medidos. Realizar a reconciliação antes da análise de grandes erros é inócuo
- Este procedimento só é útil para distribuir os erros residuais, de natureza aleatória, após a detecção de grandes erros.

## Reconciliação

Como exemplo de matriz de processo vamos definir A para o grafo de fluxo de processo abaixo:



| Nodo | Equação                            | $A = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ |
|------|------------------------------------|--|
| A    | $-Y_2 - Y_6 + Y_4 = 0$             |  |
| B    | $-Y_1 + Y_3 - Y_4 + Y_5 + Y_6 = 0$ |  |
| C    | $-Y_3 + Y_7 + Y_{10} = 0$          |  |
| D    | $-Y_5 + Y_8 - Y_{10} = 0$          |  |
| E    | $-Y_7 - Y_8 + Y_9 = 0$             |  |

## Reconciliação

$$\text{Min}(Y - \hat{X})^T Q^{-1} (Y - \hat{X})$$

Sujeito à equação de restrição linear:

$$A\hat{X} = 0$$

$$Lb \leq x \leq Ub$$

onde A é a matriz do processo,

Y é o vetor de medidas,

$\hat{X}$  é o vetor de medidas reconciliadas

$$Q = \text{diag}[\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \dots, \sigma_n^2]$$

A solução é dada por:  $\hat{X} = Y - QA^T (AQA^T)^{-1} AY$

## Passo 4: Relatórios

- Publicação dos resultados na Intranet
- Relatórios padrões e de melhores práticas
- Enfatiza a abertura do processo de contabilidade de produção.
- Contabilidade em produção: larga aceitação dos resultados é crítica para o sucesso.

## Conceitos Básicos



Figura 1 - Balanço das totalizações dos fluxos externos a um contorno

0682-67-002/00

$$\sum \text{Saídas} = \sum (\text{entradas}) - \text{Armazenado}$$

### Caso Geral:

$$\text{Entradas} - \text{Saídas} + \text{Geração} - \text{Consumo} - \text{Acumulações} = 0$$

## Por que um Balanço de Massas não Fecha?

- As totalizações de entradas e saídas nos equipamentos de processo estão sempre numa situação de balanço matemático, mas as medidas coletadas não
- Os erros são devidos a
  - Erro de medição aleatório
  - Vazamentos, derramamentos, evaporação
  - Movimentos de massas não declarados
  - Erros de alinhamento
  - Instrumento descalibrado
  - Modelamento inadequado
  - Amostragem na frequência incorreta
  - Não linearidade do instrumento
  - Densidade incorreta ou variando com temperatura
  - Polarização de leitura do instrumento
  - Leitura fora de faixa do instrumento
  - Erro de transmissão do sinal
  - Etc

## A Natureza Aleatória dos Erros

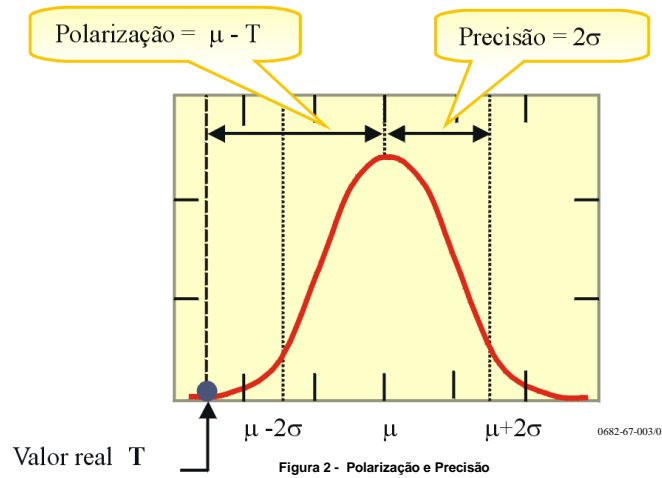


Figura 2 - Polarização e Precisão

$$\text{Incerteza} = \sqrt{(\text{polarização}^2 + \text{precisão}^2)}$$

## A Natureza Aleatória dos Erros

- A figura 3 fornece outra representação gráfica do mesmo conceito

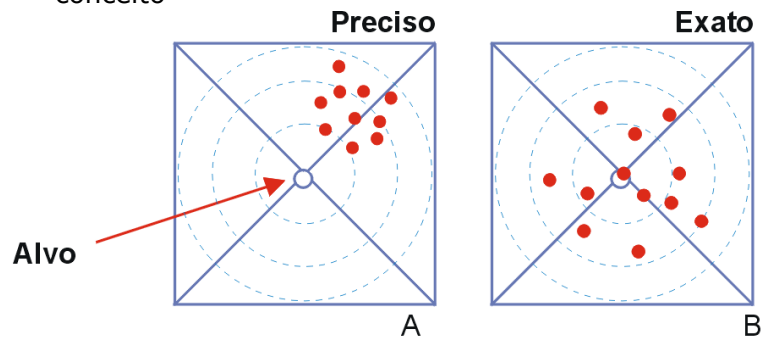


Figura 3

A - Sinal com baixa exatidão e alta precisão

B - Sinal com alta exatidão com baixa precisão

0682-67-004.02

## A Natureza Aleatória dos Erros

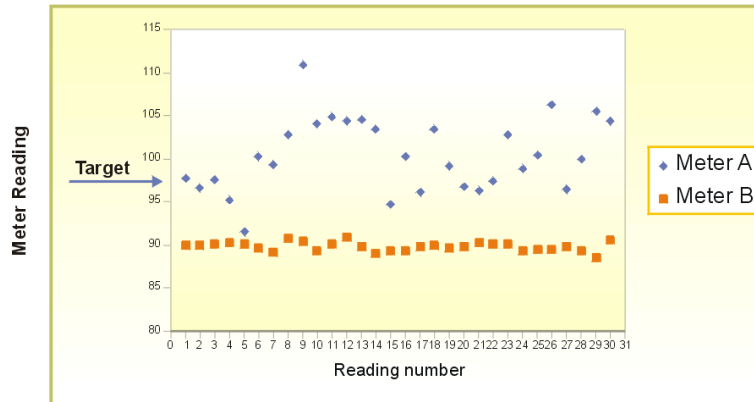


Figura 4 - Amostras de dois medidores

0682-67-005.02

## A Natureza Aleatória dos Erros

|                            | Instrumento A | Instrumento B |
|----------------------------|---------------|---------------|
| Média ( $\mu$ )            | 100.4         | 89.8          |
| Desvio padrão ( $\sigma$ ) | 4.26          | 0.52          |
| Bias                       | 0.4           | -10.2         |
| Precisão                   | 8.52          | 1.04          |
| Incerteza                  | 8.53          | 10.25         |

Tabela 1 – Comparando os instrumentos A e B

## Reconciliação de Dados

- Método Estatístico

- Objetivo: Minimizar função

$$F_r = \frac{\sum (Medida_i - Dado Reconciliado)^2}{Tot_i}$$

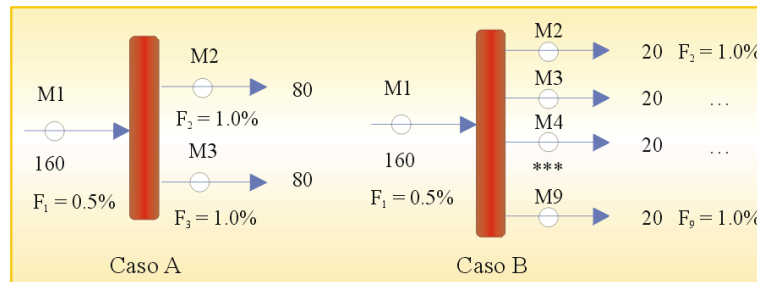
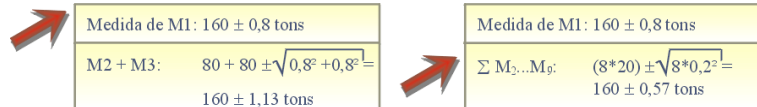


Figura 5 - Comparando precisões



## Minimização de Funções Multivariáveis usando Multiplicadores de Lagrange

- Minimizar

$$f(x,y)$$

- Equação de restrição

$$\varphi(x, y) = 0$$

$$F(X,Y,\lambda) = f(X,Y) + \lambda \varphi(X,Y)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0 \\ \varphi(x, y) = 0 \end{cases}$$

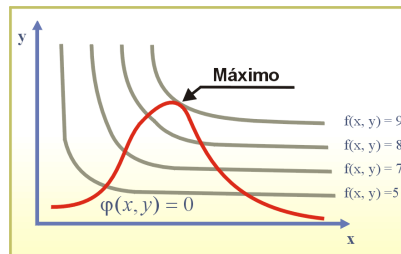


Figura 6 - Caso bidimensional - Interpretação Geométrica

$$\left[ \frac{\partial f}{\partial x}(x, y), \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) \right] = t * \left[ \frac{\partial \varphi}{\partial x}(x, y), \frac{\partial \varphi}{\partial y}(x, y) \right]$$

## Exemplo: Multiplicadores de Lagrange

- Construir um cilindro de volume máximo com  $6\pi$  metros quadrados de folha de alumínio

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r^2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h = 6\pi$$

(restrição)

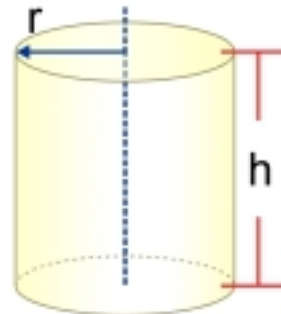
$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

(equação maximizar)

$$F(r, h, \lambda) = \pi r^2 h + \lambda (2\pi r^2 + 2\pi r h - 6\pi)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial r} \rightarrow \pi r h + \lambda (4\pi r + 2\pi h) = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial h} \rightarrow \pi r^2 + 2\pi r \lambda = 0 \\ 2\pi r^2 + 2\pi r h - 6\pi = 0 \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{cases} r = 1 \\ h = 2 \end{cases}$$



0682-67-008/00

## Solução do Balanço de Massas – Método dos Multiplicadores de Lagrange

- Função a minimizar

$$\begin{cases} F(\hat{M}_1, \hat{M}_2, \hat{M}_3, \dots, \hat{M}_n) = \sum_1^n \frac{1}{\sigma^2} (M_i - \hat{M}_i)^2 \\ \left. \begin{aligned} \varphi_1(\hat{M}_1, \hat{M}_2, \hat{M}_3, \dots, \hat{M}_n) &= 0 \\ \varphi_2(\hat{M}_1, \hat{M}_2, \hat{M}_3, \dots, \hat{M}_n) &= 0 \\ \varphi_3(\hat{M}_1, \hat{M}_2, \hat{M}_3, \dots, \hat{M}_n) &= 0 \end{aligned} \right\} m \text{ equações} \end{cases}$$



## Solução do Balanço de Massas – Método dos Multiplicadores de *Lagrange*

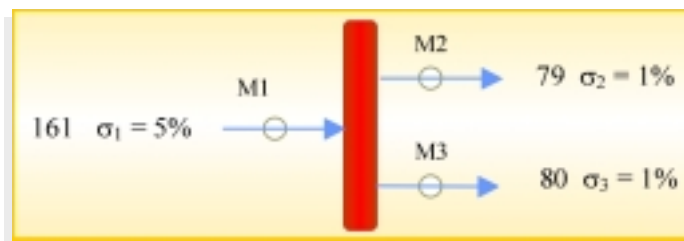
- Equação Auxiliar

$$\Phi = \sum_1^n \frac{1}{\sigma^2} (M_i - \hat{M}_i)^2 + \sum_1^m \lambda_i \varphi_i = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Phi}{\partial \hat{M}_1} = 0 \\ \dots \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \hat{M}_m} = 0 \end{array} \right\} m \text{ equações}$$

- São (m+n) equações a (m+n) incógnitas

## Exemplo



0682-67-009/00

- N = número de medidas = 3
- M = número de nodos = 1
- Vetor de medidas

$$m = [M_1 \ M_2 \ M_3] = [161 \ 79 \ 80]$$

- Vetor de desvios percentuais (incertezas)

$$p = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3] = [0,05 \ 0,01 \ 0,01]$$

## Exemplo

- Vetor de desvios absolutos

$$a = m \cdot p = [8.05 \quad 0.79 \quad 0.80]$$

- Restrição

$$\hat{M}_1 - \hat{M}_2 - \hat{M}_3 = 0.$$

- Equação a minimizar

$$F(\hat{M}_1, \hat{M}_2, \hat{M}_3) = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{a_i} (M_i - \hat{M}_i)^2$$

- Equação auxiliar

$$\Phi = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{a_i} (M_i - \hat{M}_i)^2 + \lambda_1 (\hat{M}_1 - \hat{M}_2 - \hat{M}_3)$$

## Exemplo

- Equação auxiliar

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \hat{M}_1} = -\frac{2}{a_1} (M_1 - \hat{M}_1) + \lambda_1 = 0$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \hat{M}_2} = -\frac{2}{a_2} (M_2 - \hat{M}_2) - \lambda_1 = 0$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \hat{M}_3} = -\frac{2}{a_3} (M_3 - \hat{M}_3) - \lambda_1 = 0$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_1} = \hat{M}_1 - \hat{M}_2 - \hat{M}_3 = 0$$

## Exemplo

- Em notação matricial

$$\begin{bmatrix} \frac{2}{a_1^2} & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2}{a_2^2} & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \frac{2}{a_3^2} & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{M}_1 \\ \hat{M}_2 \\ \hat{M}_3 \\ \lambda_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2M_1}{a_1^2} \\ \frac{2M_2}{a_2^2} \\ \frac{2M_3}{a_3^2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{M}_1 \\ \hat{M}_2 \\ \hat{M}_3 \\ \lambda_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{a_1^2} & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2}{a_2^2} & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \frac{2}{a_3^2} & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{2M_1}{a_1^2} \\ \frac{2M_2}{a_2^2} \\ \frac{2M_3}{a_3^2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

## Exemplo

- O vetor de correções será dado por

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{M}_1 \\ \hat{M}_2 \\ \hat{M}_3 \end{bmatrix}$$

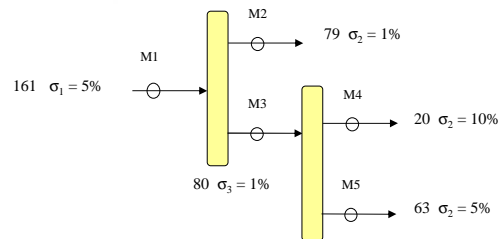
- Resultado

|     |    |    |
|-----|----|----|
| 161 | 79 | 80 |
| 5%  | 1% | 1% |

$$\text{mrec} = [159.0383 \quad 79.0189 \quad 80.0194]$$

$$\text{Correção} = [1.9617 \quad -0.0189 \quad -0.0194]$$

## Exemplo



Vamos fazer o balanço do sistema acima.

- $N =$  número de medidas  $= 5$
- $M =$  número de nodos  $= 2$
- O vetor de medidas é dado por:
 
$$m = [M_1 \ M_2 \ M_3 \ M_4 \ M_5] = [161 \ 79 \ 80 \ 20 \ 63]$$
- O vetor de desvios percentuais é dado por:
 
$$p = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3 \ \sigma_4 \ \sigma_5] = [0.05 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.10 \ 0.05]$$

## Exemplo

O vetor de desvios absolutos, usando a notação do Matlab, pode ser calculado como:

$$a = m .* p = [8.05 \ 0.79 \ 0.80 \ 6.3 \ 1.0]$$

A partir de agora, estaremos trabalhando com os desvios absolutos.

$$\hat{M}_1 - \hat{M}_2 - \hat{M}_3 = 0.$$

$$\hat{M}_3 - \hat{M}_4 - \hat{M}_5 = 0.$$

Pode-se organizar os coeficientes das equações de restrição em uma matriz:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Como veremos esta matriz aparecerá mais à frente:

## Exemplo

$$F(\hat{M}_1, \hat{M}_2, \hat{M}_3, \hat{M}_4, \hat{M}_5) = \sum_{i=1}^5 \frac{1}{a_i^2} (M_i - \hat{M}_i)^2$$

$$\Phi = \sum_{i=1}^5 \frac{1}{a_i^2} (M_i - \hat{M}_i)^2 + \lambda_1 (\hat{M}_1 - \hat{M}_2 - \hat{M}_3) + \lambda_2 (\hat{M}_3 - \hat{M}_4 - \hat{M}_5)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \hat{M}_1} = -\frac{2}{a_1^2} (M_1 - \hat{M}_1) + \lambda_1 = 0$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \hat{M}_2} = -\frac{2}{a_2^2} (M_2 - \hat{M}_2) - \lambda_1 = 0$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \hat{M}_3} = -\frac{2}{a_3^2} (M_3 - \hat{M}_3) - \lambda_1 + \lambda_2 = 0$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \hat{M}_4} = -\frac{2}{a_4^2} (M_4 - \hat{M}_4) - \lambda_2 = 0$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \hat{M}_5} = -\frac{2}{a_5^2} (M_5 - \hat{M}_5) - \lambda_2 = 0$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_1} = \hat{M}_1 - \hat{M}_2 - \hat{M}_3 = 0$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_2} = \hat{M}_3 - \hat{M}_4 - \hat{M}_5 = 0$$

## Exemplo

Em notação matricial:

$$\begin{bmatrix} \frac{2}{a_1^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{2}{a_2^2} & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{a_3^2} & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2}{a_4^2} & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2}{a_5^2} & 0 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{M}_1 \\ \hat{M}_2 \\ \hat{M}_3 \\ \hat{M}_4 \\ \hat{M}_5 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2M_1}{a_1^2} \\ \frac{2M_2}{a_2^2} \\ \frac{2M_3}{a_3^2} \\ \frac{2M_4}{a_4^2} \\ \frac{2M_5}{a_5^2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{M}_1 \\ \hat{M}_2 \\ \hat{M}_3 \\ \hat{M}_4 \\ \hat{M}_5 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{a_1^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{2}{a_2^2} & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{a_3^2} & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2}{a_4^2} & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2}{a_5^2} & 0 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{2M_1}{a_1^2} \\ \frac{2M_2}{a_2^2} \\ \frac{2M_3}{a_3^2} \\ \frac{2M_4}{a_4^2} \\ \frac{2M_5}{a_5^2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

## Exemplo

```

% reconcilia.m
%
mpeso = 2*[m./(a.*a) zeros(1, Nodos)]'

Nodos = 2
Medidas = 5
Diag1 = 2*inv(diag(a)^2) % Matriz MxM

% Grafo: dimensão: Nodos x Medidas
B = [ 1 -1 -1 0 0;
      0 0 1 -1 -1]
% Forma matriz de pesos
Peso= [Diag1 B; B zeros(Nodos)]

% Medidas
m=[161 79 80 63 20]
InvPeso = inv(Peso)

% Calcula medidas reconciliadas, multiplicadores de Lagrange
Result = InvPeso * mpeso

% Tolerâncias
p=[0.05 0.01 0.01 0.10 0.05]
% Medidas reconciliadas
mrec=[Result(1) Result(2) Result(3) Result(4) Result(5)]

% tolerâncias absolutas
a=m.*p
lambda1 = Result(6)
lambda2 = Result(7)

% Calcula vetor
Correcao = m - mrec
Os resultados são:
% mpeso = [ 2* m(1)/a(1)^2;
%          2* m(2)/a(2)^2;
%          2* m(3)/a(3)^2;
%          2* m(4)/a(4)^2;
%          2* m(5)/a(5)^2;
%          0;
%          0]
    
```

## Exemplo

```

recon2
Nodos =
    2
Medidas =
    5
B =
    1 -1 -1 0 0
    0 0 1 -1 -1
m =
    161 79 80 63 20
p =
    0.0500 0.0100 0.0100 0.1000 0.0500
a =
    8.0500 0.7900 0.8000 6.3000 1.0000
mpeso =
    4.9689
   253.1646
   250.0000
    3.1746
   40.0000
    0
    0
Diag1 =
    0.0309    0    0    0    0
    0    3.2046    0    0    0
    0    0    3.1250    0    0
    0    0    0    0.0504    0
    0    0    0    0    2.0000
Peso =
    0.0309    0    0    0    0    1.0000    0
    0    3.2046    0    0    0    -1.0000    0
    0    0    3.1250    0    0    -1.0000    1.0000
    0    0    0    0.0504    0    0    -1.0000
    0    0    0    0    2.0000    0    -1.0000
    1.0000 -1.0000 -1.0000    0    0    0    0
    0    0    1.0000 -1.0000 -1.0000    0    0
InvPeso =
    0.6152 0.3061 0.3091 0.3015 0.0076 0.9810 0.0152
    0.3061 0.3091 -0.0030 -0.0029 -0.0001 -0.0094 -0.0001
    0.3091 -0.0030 0.3120 0.3044 0.0077 -0.0095 0.0153
    0.3015 -0.0029 0.3044 0.7846 -0.4802 -0.0093 -0.9605
    0.0076 -0.0001 0.0077 -0.4802 0.4879 -0.0002 -0.0242
    0.9810 -0.0094 -0.0095 -0.0093 -0.0002 -0.0303 -0.0005
    0.0152 -0.0001 0.0153 -0.9605 -0.0242 -0.0005 -0.0484
    
```

## Exemplo

```
Result =  
159.0835  
79.0185  
80.0651  
60.1372  
19.9279  
0.0591  
-0.1443  
  
mrec =  
159.0835 79.0185 80.0651 60.1372 19.9279  
  
lambda1 =  
0.0591  
  
lambda2 =  
-0.1443  
  
Correcao =  
1.9165 -0.0185 -0.0651 2.8628 0.0721
```

## Uso do Excel - Solver

Nós devemos definir uma função objetivo que neste caso é a função erro total a ser minimizada:

$$F(\hat{M}_1, \hat{M}_2, \hat{M}_3) = \sum_1^3 \frac{1}{a_i^2} (M_i - \hat{M}_i)^2$$

Em seguida definimos as variáveis a serem determinadas:

$$\hat{m} = \begin{bmatrix} \hat{M}_1 & \hat{M}_2 & \hat{M}_3 \end{bmatrix}$$

As restrições a serem obedecidas são:

$$\hat{M}_1 - \hat{M}_2 - \hat{M}_3 = 0.$$

$$\hat{M}_1 \geq 0$$

$$\hat{M}_2 \geq 0$$

$$\hat{M}_3 \geq 0$$

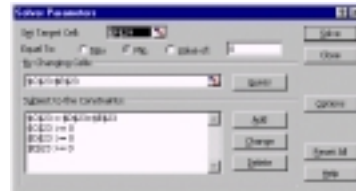
# Uso do Solver



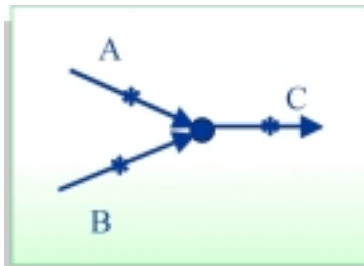
|                       |      |      |      |   |
|-----------------------|------|------|------|---|
| N (Número de Medidas) | 3    |      |      |   |
| M (Número de Nós)     | 1    |      |      |   |
| Medidas               | 161  | 79   | 80   | $m = [M_1, M_2, M_3] = [161, 79, 80]$                     |
| Desvios %             | 0,05 | 0,01 | 0,01 | $p = [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3] = [0,05, 0,01, 0,01]$ |
| Desvios Abs           | 8,05 | 0,79 | 0,8  | $a = m \cdot p = [8,05, 0,79, 0,80]$                      |

Medidas otimizadas: 159,0382    79,0189    80,0194     $\hat{M}_1 - \hat{M}_2 - \hat{M}_3 = 0$

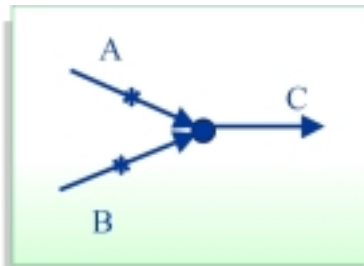
|                         |        |         |                             |
|-------------------------|--------|---------|-----------------------------|
| Erros                   | 1,9618 | -0,0189 | -0,0194                     |
| Erros <sup>2</sup>      | 3,8485 | 0,0004  | 0,0004                      |
| Erros <sup>2</sup> Pond | 0,0594 | 0,0006  | 0,0006                      |
|                         |        |         | <b>Erro Total</b><br>0,0605 |



# Análise da Qualidade de Dados



Os fluxos A, B e C são medidos diretamente ou podem ser calculados pelos outros dois fluxos. Fluxos não checados = 0.



Os fluxos A e B são medidos diretamente e C é calculado pela soma de A e B. Fluxos não checados = 3.

Figura 8 - Fluxos checados e não checados

0682-67-01000



## Análise da Qualidade de Dados

### Figuras de Mérito

|     |   | Objetivo |
|-----|---|----------|
| DX0 | Percentual de massa não checada fluindo através da planta           | 10 a 25% |
| DX1 | Percentual geral de imbalance nas medidas checadas                  | 6 a 15%  |
| DX2 | Percentual geral de correção aplicado às medidas checadas           | 2 a 5%   |
| DX3 | Percentual geral de tolerância estimada para cada medida no balanço | 2 a 5%   |

Tabela 2 – Figuras de mérito para análise da qualidade de dados

## Análise da Qualidade de Dados

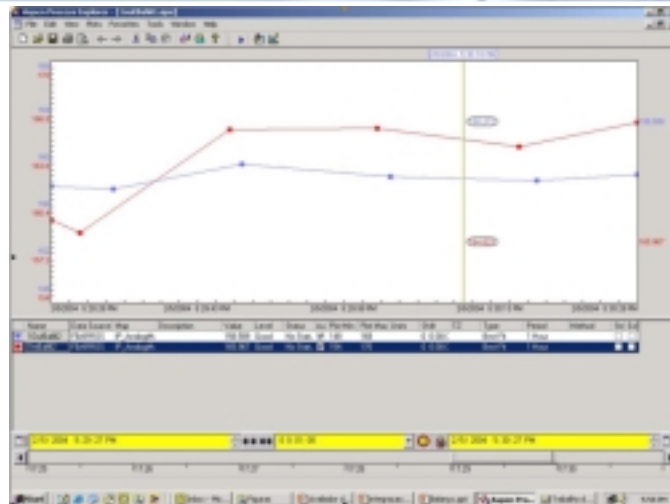


Gráfico de tendência do PIMS comparando valores medidos e reconciliados

## Análise da Qualidade de Dados

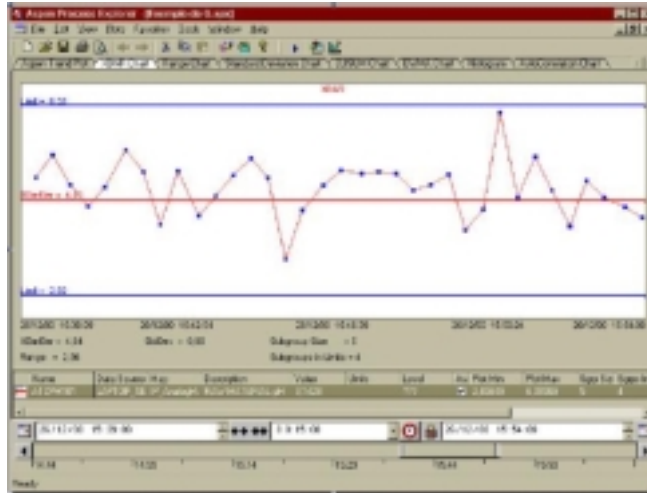
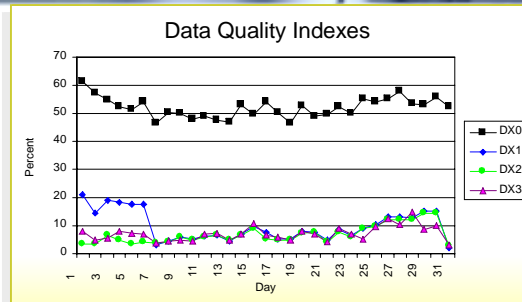


Gráfico de tendência do PIMS monitorando as correções feitas em uma medida

## Análise dos Índices de Performance de Dados



0682-67-021/00

Figura 9 - Índices de qualidade de dados

- DX0 : Muito alto – pouca redundância da instrumentação  
Baixar para < 20%
- DX1 : Bom, mas pode estar mascarado por DX0 alto  
Imbalanço cresceu no final do mês e houve uma ação de correção
- DX2 : Bom, valor baixo
- DX3 = DX2 : Bom. Equipe de manutenção atuou atualizando os índices

## Análise de Balanço dos Nodos

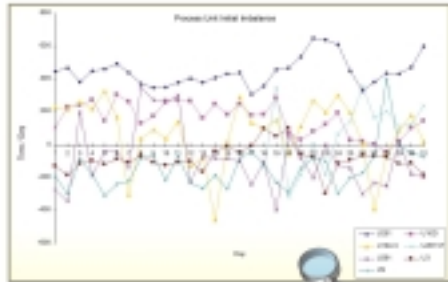


Figura 10 – Sete piores resultados: unidades de processo

- CAV10: Imbalanço crescente: vazamento
- Imbalanço das unidades de processo > imbalanço de acumuladores
- Examinar unidades U251 e V10D

0682-67-011/00

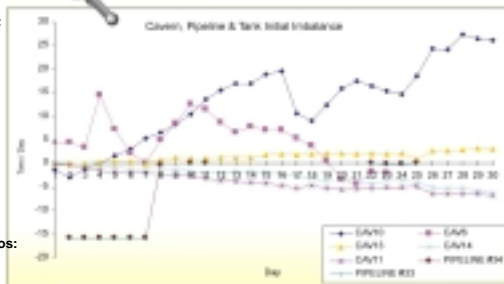


Figura 11 – Sete piores resultados: acumuladores

682-67/00

0682-67-012/00

## Foco na Unidade U251

### ■ Figura 13 - Imbalanços

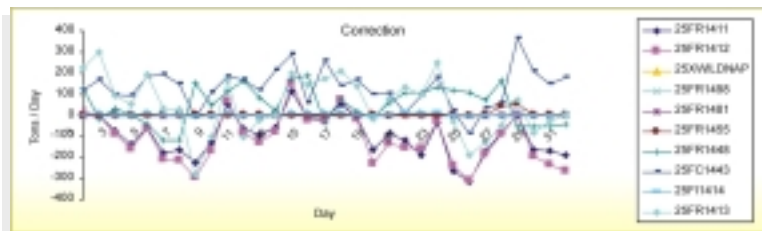


Figura 12 - Correções

0682-67-013/00

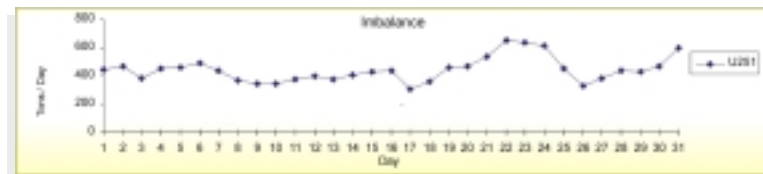


Figura 13 - Imbalanços

0682-67-014/00

sexta-feira, 17 de dezembro de 2004

## Foco na Unidade U251

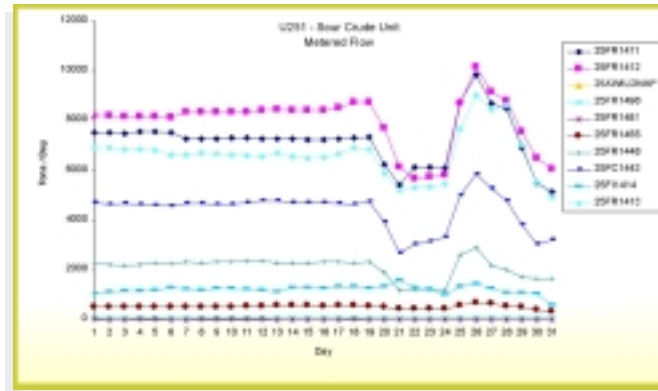


Figura 14 - Fluxos

0682-67-015/00

- Após dia 18: distúrbio na planta
- O distúrbio influencia pouco o imbalance
- Medidor 25FC1443 apresenta correção sempre positiva. Deveria oscilar em torno de zero

sexta-feira, 17 de dezembro de 2004

## Foco na Unidade U10D

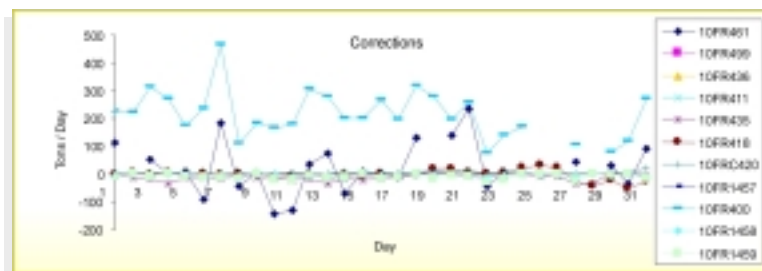


Figura 15 - Correções

0682-67-016/00

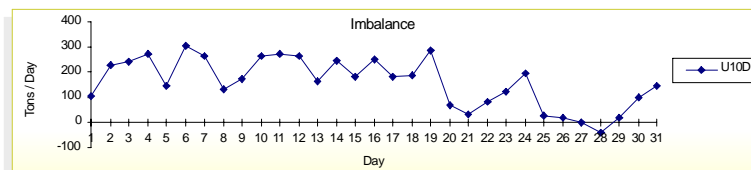
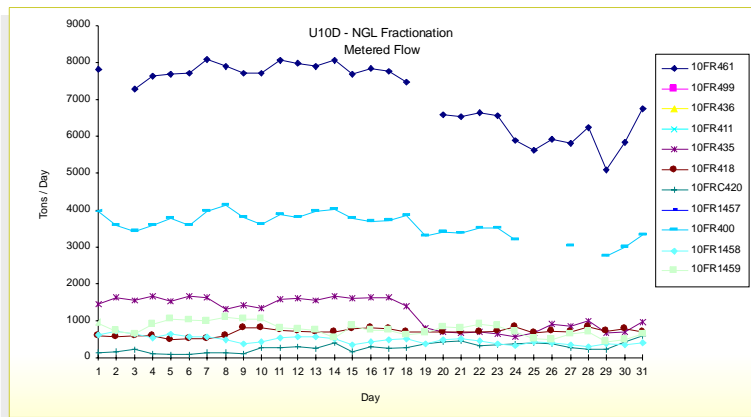


Figura 16 - Imbalanços

0682-67-017/00

## Foco na Unidade U10D



0682-67-018/00

Figura 17 - Fluxos Medidos

- Quando o instrumento IOFR400 sai da linha, o imbalance cai
- Selecionar o instrumento para análise

## Análise de Ponto de Medição

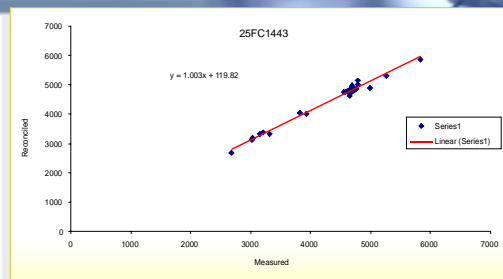
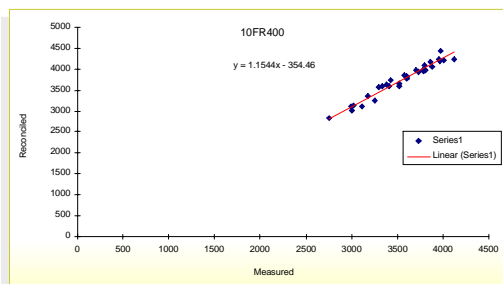


Figura 18 - Curva de correlação reconciliado x medido para medidor 25FC1443

0682-67-019/00

Figura 19 - Curva de correlação reconciliado x medido para medidor 10FR400



0682-67-020/00

## Análise de Medidores em Serviço

Áreas de processo

| Unid  | 10 | 11 | 12 | 14 | 15 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 3 | 4 | 8 | 8  | 8  | 8  | 7  | 8  | 8 | 9  | 10  | 11  | 21 | Total |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|----|----|----|----|----|---|----|-----|-----|----|-------|
| Total | 33 | 14 | 5  | 13 | 5  | 0  | 4  | 7  | 5  | 5  | 12 | 14 | 25 | 34 | 5  | 2  | 5  | 10 | 12 | 5 | 2 | 3 | 15 | 15 | 11 | 13 | 5  | 1 | 11 | 21  | 325 |    |       |
| 01    | 22 |    |    | 11 | 5  |    | 4  | 5  | 2  | 1  | 7  | 11 | 21 | 27 |    | 2  | 14 | 11 | 5  |   | 2 | 5 |    | 5  | 3  | 1  | 10 |   | 7  | 190 |     |    |       |
| 02    | 3  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 15  |     |    |       |
| 03    | 4  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 16  |     |    |       |
| 04    | 1  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 4   |     |    |       |
| 05    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 5   |     |    |       |
| 06    |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 8   |     |    |       |
| 07    |    |    |    | 2  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 2   |     |    |       |
| 08    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 09    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 2   |     |    |       |
| 10    | 1  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 11    |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 12    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 0   |     |    |       |
| 13    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 5   |     |    |       |
| 14    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 9   |     |    |       |
| 15    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 6   |     |    |       |
| 16    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 2   |     |    |       |
| 17    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 18    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 19    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 20    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 21    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 0   |     |    |       |
| 22    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 2   |     |    |       |
| 23    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 2   |     |    |       |
| 24    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 25    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 5   |     |    |       |
| 26    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 0   |     |    |       |
| 27    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 2   |     |    |       |
| 28    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 2   |     |    |       |
| 29    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 2   |     |    |       |
| 30    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 2   |     |    |       |
| 31    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 2   |     |    |       |
| 1     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 2     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 3     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 4     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 5     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 6     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 7     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 8     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 9     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 10    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 1   |     |    |       |
| 11    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 2   |     |    |       |
| 12    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |   |    | 2   |     |    |       |

682-67/00

Tabela 3 – Medidores em serviço

## Requisitos de SW de balanço de massas

- Ser capaz de adquirir dados automaticamente de qualquer fonte de dados: CLP, SCADA, LIMS ou PIMS usando protocolo OPC-DA
- Possuir um editor de diagrama de fluxo de processos para entradas das topologias da planta ou editor de grafos.
- Apresentar o módulo de detecção de grandes erros e reconciliação, etc.
- Exportar dados para Excel para confecção de relatórios.
- Exportar dados para a Intranet.
- Ter capacidade de exportar os dados para o PIMS a fim de estabelecer os históricos dos valores reconciliados e fazer com que dados exibidos no nível 3 em registros de tendência, sinópticos, etc. sejam reconciliados.
- Fornecer índices de qualidade de dados que permitam avaliar a qualidade das medidas independente da sua escala, unidade de engenharia ou origem. Realizar a análise de qualidade de dados no próprio produto ou no PIMS.

sexta-feira, 17 de dezembro de 2004

