

GARANTINDO A CONFIABILIDADE DAS INFORMAÇÕES DE PROCESSO ATRAVÉS DA TÉCNICA DE RECONCILIAÇÃO E ANÁLISE DE QUALIDADE DE DADOS¹

Fábio Barros de Carvalho²
Constantino Seixas Filho³

Resumo

A confiabilidade e a consistência dos dados são a chave para uma operação eficiente do processo produtivo. O uso crescente de modernos sistemas de aquisição de dados permite a medição com uma frequência elevada de uma enorme quantidade de variáveis tais como taxas de escoamento, temperaturas, pressões, níveis e composições. A realização destas medidas tem diversos objetivos: controle de processo, otimização *on-line*, avaliação econômica do processo, manutenção de instrumentação, programação de paradas da planta, análise do desempenho de equipamentos, etc. Entretanto, seja qual for o objetivo final, deve ser uma prática comum processar previamente os dados, de modo a eliminar seus erros e ruídos, aumentando a sua exatidão e garantindo a sua consistência em relação às restrições do processo. A esta prática dá-se o nome de Reconciliação de Dados. O presente artigo faz uma introdução sobre o conceito de reconciliação de dados e cobre os principais aspectos desta técnica buscando mostrar de forma prática as suas principais contribuições.

Palavras-chave: Reconciliação de dados; Balanço de massa; Informações de processo; PIMS.

¹ IX Seminário de Automação de Processos, 05 a 07 de Outubro de 2005, Curitiba-PR

² Engenheiro de Controle e Automação, Departamento de PIMS da ATAN Sistemas, Belo Horizonte – MG, Brasil.

³ Engenheiro Eletrônico, M.Sc., Diretor de Pesquisa e Desenvolvimento da ATAN Sistemas de Automação, Belo Horizonte – MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Em qualquer planta industrial moderna, centenas ou mesmo milhares de variáveis – como vazões, temperaturas, pressões, níveis e composições – são rotineiramente medidas e automaticamente gravadas para o propósito de controle do processo, otimização *on-line* ou avaliação de desempenho econômico da planta.

Entretanto, medidas do processo são inevitavelmente corrompidas por erros durante a medição, processamento e transmissão do sinal medido.

O erro total em uma medida, que é a diferença entre o valor medido e o valor real de uma variável, pode ser convenientemente representado como a soma das contribuições de dois tipos de erros – erros aleatórios (*random errors*) e erros grosseiros (*gross errors*).

Erros aleatórios são aqueles em que nem a magnitude nem o sinal do erro podem ser previstos com certeza. Em outras palavras, se uma medição for realizada várias vezes com um mesmo instrumento e sob condições operacionais idênticas, um valor diferente será obtido em cada medição.

Os erros aleatórios podem ser causados por uma variedade de fatores, dentre eles pode-se destacar: flutuações da fonte de energia dos instrumentos; ruídos na transmissão e conversão dos sinais; mudanças nas condições ambientais; etc.

Como estes erros podem provir de diferentes fontes (sendo que algumas delas estão fora do nosso alcance), estes não podem ser completamente eliminados e estão sempre presentes em qualquer medida.

Já os erros grosseiros são causados por eventos não aleatórios como mau funcionamento do instrumento (devido à instalação imprópria, por exemplo), descalibração, desgaste ou corrosão dos sensores e acúmulo de poeira. A natureza não aleatória destes erros implica que, a qualquer momento, eles possuem uma certa magnitude e sinal que podem ser conhecidos. Assim, se a medição é repetida utilizando um mesmo instrumento sob condições operacionais idênticas, a contribuição de um erro grosseiro sistemático ao valor medido será a mesma para todas as medições.

Através de uma boa instalação e manutenção dos instrumentos, pode-se assegurar que os erros grosseiros não estarão presentes nas medições, pelo menos por algum tempo. Por sua vez, os erros aleatórios podem ser eliminados através da técnica de reconciliação de dados que faz ajustes nas medidas de forma a haver consistência em relação às equações de balanço do processo.

A reconciliação de dados e a detecção e identificação de erros grosseiros integram uma nova estratégia de processamento de dados que aumenta a exatidão das medidas e assegura a consistência dos dados com respeito às inter-relações das diferentes variáveis do processo

2 BENEFÍCIOS

Dentre os benefícios gerados pela aplicação das técnicas de reconciliação de dados e detecção de erros grosseiros, destacam-se:

- **Visão mais clara das condições de operação da planta:** o aumento da confiabilidade dos dados permite que se tenha a exata noção das condições de operação da planta livre das incoerências provocadas pelos erros de medida.

- **Identificação e apontamento de possíveis falhas no processo:** a partir da magnitude das correções feitas nas medidas, é possível apontar os instrumentos com maior grau de imprecisão estabelecendo prioridades na manutenção
- **Maior consistência nos relatórios de produção:** os relatórios de processo passam a ser construídos com dados mais consistentes.
- **Redução da frequência de calibração dos instrumentos:** a calibração dos instrumentos pode passar a ser feita no momento em que a reconciliação de dados apontar algum defeito, reduzindo a necessidade de freqüentes calibrações preventivas;
- **Maior confiabilidade na contabilidade da produção:** A eliminação ou redução de erros nos dados de processo garante uma maior consistência e confiabilidade na posterior contabilidade da produção.

3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE RECONCILIAÇÃO DE DADOS

Como já foi dito, a reconciliação de dados garante uma maior exatidão das medidas, através de ajustes realizados, tendo como base as restrições do processo. Intuitivamente, pode-se impor a condição de que estes ajustes sejam os mínimos possíveis. Este objetivo pode ser representado da seguinte forma:

$$\text{Min}_{x_i} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2$$

Equação 1

onde y_i é o valor medido e x_i é o valor real (ou reconciliado) da variável i .

Este critério de mínimos quadrados é aceitável se todas as medidas apresentam a mesma exatidão. Na prática, porém, algumas medidas são sempre mais exatas que as outras, dependendo do seu instrumento de medição. Isso faz com que seja necessária a inclusão de um fator ponderador na Equação 1. Sendo assim, a reconciliação de dados pode ser formulada pelo seguinte problema de otimização de mínimos-quadrados ponderados:

$$\text{Min}_{x_i, u_j} \sum_{i=1}^n w_i (y_i - x_i)^2$$

Equação 2

sujeito a

$$g_k(x_i, u_j) = 0 \quad k = 1, \dots, m$$

Equação 3

A função objetivo da Equação 2 define o somatório ponderado dos quadrados dos ajustes feitos nas medidas, onde w_i são os pesos e u_j são as estimações de variáveis não medidas. A Equação 3 define o conjunto de restrições do modelo. Os pesos w_i são escolhidos dependendo da exatidão de cada variável.

As restrições do modelo geralmente provêm de balanços de massa e energéticos que podem ser expressos da seguinte forma:

$$\sum (\text{saídas}) - \sum (\text{entradas}) + \text{armazenado} = 0$$

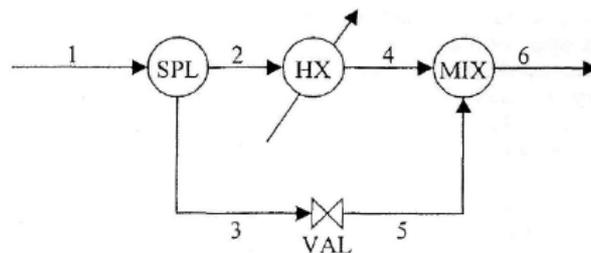
Caso não haja acúmulo de grandezas está caracterizada uma operação em estado estacionário. Para um processo dinâmico, no entanto, os termos de acúmulo não podem ser negligenciados e as restrições passam a ser equações diferenciais.

4 EXEMPLO DE UM PROBLEMA DE RECONCILIAÇÃO SIMPLES

O problema mais simples de reconciliação de dados é aquele em que se reconcilia as vazões de um processo. Inicialmente, assume-se que todas as vazões são medidas diretamente. Tais medidas contêm erros aleatórios desconhecidos, por isso, as entradas e saídas de cada unidade e do processo como um todo não se encontram em balanço matemático. O objetivo da reconciliação é fazer os mínimos ajustes possíveis nas medidas, de forma que estas passem a respeitar tais balanços. Apesar de este ser um problema simples, ele é de extrema importância nas aplicações industriais.

Narasimhan e Jordache⁽¹⁾ ilustram este problema utilizando um processo de um trocador de calor com *bypass* como o mostrado na Fonte: Narasimhan e Jordache⁽¹⁾

Figura 1. Ignoremos os fluxos de energia do processo e vamos focar apenas no fluxo de massa, assumindo que todas as 6 vazões são medidas e apresentam erros aleatórios.



Fonte: Narasimhan e Jordache⁽¹⁾

Figura 1. Processo de um trocador de calor com bypass

Os balanços de massa em torno do divisor de fluxo, trocador de calor, válvula e misturador podem ser escritos como:

$$\begin{cases} x_1 - x_2 - x_3 = 0 \\ x_2 - x_4 = 0 \\ x_3 - x_5 = 0 \\ x_4 + x_5 - x_6 = 0 \end{cases}$$

Equação 4

A presença de erros aleatórios faz com que os valores medidos não satisfaçam estas equações. De forma a estimar valores que satisfaçam estas equações, podemos definir o nosso objetivo como:

$$\text{Min}_{x_i} \sum_{i=1}^6 w_i (y_i - x_i)^2$$

Equação 5

onde os pesos w_i são escolhidos de forma a refletir a exatidão das respectivas medições.

Assim, o problema de reconciliação é um problema de otimização simples, com restrições dadas pela Equação 4 e com função objetivo dada pela Equação 5.

Existem diversos algoritmos na literatura que podem ser usados para solucionar este problema de otimização, dentre eles destacam-se o Método dos Multiplicadores de Lagrange e o Método de Gauss. Normalmente, estes são algoritmos que utilizam conceitos da álgebra linear matricial. Eles recebem como entradas as equações de restrição, o vetor de valores medidos e o vetor de pesos, e retornam como resultado um vetor de valores reconciliados.

Para maiores detalhes sobre como estes algoritmos trabalham, pode-se consultar as referências (1) e (2).

5 EXEMPLOS PRÁTICOS DE APLICAÇÕES DA RECONCILIAÇÃO DE DADOS

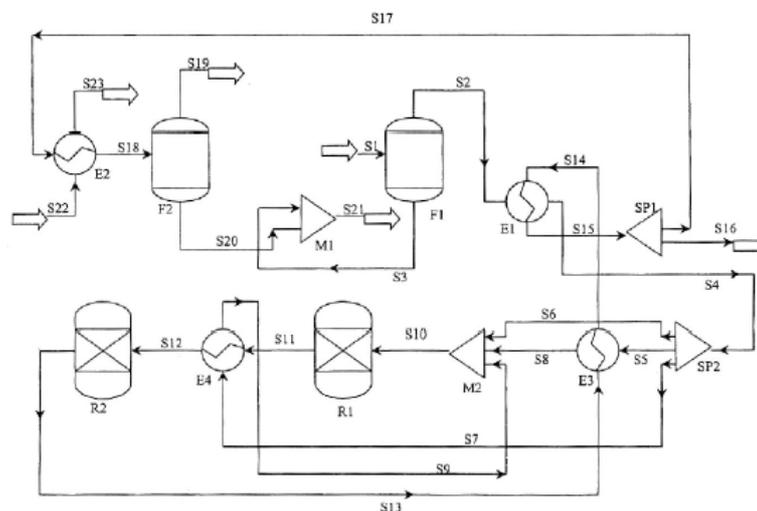
Atualmente, a reconciliação de dados vem sendo amplamente empregada em indústrias químicas, petroquímicas, minerais e outras indústrias de processamento.

Os exemplos abaixo envolvem dois processos com dados simulados e servem para ilustrar um pouco o emprego industrial da reconciliação de dados. Em ambos os exemplos utilizou-se o sistema PIMS como fonte dos dados de processo, e como destino dos valores reconciliados.

5.1 Processo de Síntese de Amônia

A amônia é um produto químico com diversas aplicações industriais como lixiviação básica de metais, refrigeração de plantas industriais em fábricas de refrigerantes, além de ser insumo para indústrias de fertilizantes. A Fonte: Narasimhan e Jordache⁽¹⁾

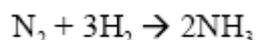
Figura 2 mostra o diagrama de fluxo simplificado para um processo de síntese de amônia.



Fonte: Narasimhan e Jordache⁽¹⁾

Figura 2. Processo Industrial de Síntese de Amônia.

A amônia é produzida através de uma reação exotérmica envolvendo nitrogênio e hidrogênio:



O fluxo de alimentação S1 já contém amônia proveniente de processamentos anteriores. Para separá-lo, o fluxo S1 é resfriado e enviado ao tambor F1, onde o líquido de amônia enriquecida S3 é separado do vapor remanescente S2. Antes de entrar na seção do reator, o fluxo de vapor é pré-aquecido. A seção do reator consiste em dois reatores e dois trocadores de calor. O fluxo S4 é dividido em três novos fluxos (S5, S6 e S7) e estas frações são utilizadas para controlar as temperaturas de alimentação do reator.

O fluxo S7 é usado para reduzir a temperatura do fluxo proveniente do primeiro reator e o fluxo S5 é utilizado para recuperar parte do calor de produto do segundo reator (S13). Os três fluxos são então recombinados e direcionados ao primeiro reator. A maior parte do produto resfriado (S15) é reaproveitada em outra seção da planta (fluxo S16), enquanto que o restante (S17) é resfriado ainda mais com refrigerante (S22), de forma a condensar a maior parte da amônia (fluxo S20). Os dois fluxos condensados (S3 e S20) são combinados e purificados ainda mais.

A planta de síntese de amônia contém instrumentação para medir vazões, temperaturas e diversas composições (frações molares). Para o estudo que se deseja realizar é suficiente conhecer as vazões. Dessa forma, os valores médios das vazões e seus desvios padrões são apresentados na Tabela 1. As linhas em branco indicam variáveis não medidas, ou seja, variáveis cujos valores devem ser estimados e não reconciliados.

Tabela 1. Informações sobre os fluxos do processo.

Fluxo	Status	Unid. Eng.	Nome do Tag	Valor Médio	Desvio Padrão
S1	Não Medido	m ³ /h	-	-	-
S2	Não Medido	m ³ /h	-	-	-
S3	Medido	m ³ /h	F03	100.0	0.5
S4	Medido	m ³ /h	F04	1.03E+05	3075.0
S5	Medido	m ³ /h	F05	5.50E+04	1650.0
S6	Medido	m ³ /h	F06	1.50E+04	450.0
S7	Medido	m ³ /h	F07	3.00E+04	1000.0
S8	Não Medido	m ³ /h	-	-	-
S9	Não Medido	m ³ /h	-	-	-
S10	Medido	m ³ /h	F10	1.03E+05	3075.0
S11	Medido	m ³ /h	F11	9.60E+04	2880.0
S12	Não Medido	m ³ /h	F12	-	-
S13	Medido	m ³ /h	F13	9.25E+04	2775.0
S14	Medido	m ³ /h	F14	9.25E+04	3000.0
S15	Não Medido	m ³ /h	-	-	-
S16	Medido	m ³ /h	F16	9.24E+04	3000.0
S17	Medido	m ³ /h	F17	1600.0	48.0
S18	Não Medido	m ³ /h	-	-	-
S19	Medido	m ³ /h	F19	1500.0	45.0
S20	Não Medido	m ³ /h	-	-	-
S21	Não Medido	m ³ /h	-	-	-
S22	Medido	m ³ /h	F22	375.0	11.25
S23	Não Medido	m ³ /h	-	-	-

Fonte: Narasimhan e Jordache ⁽¹⁾

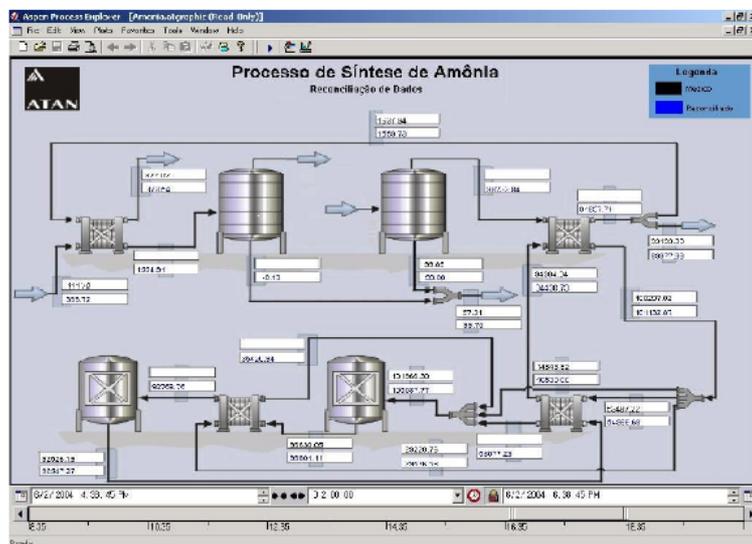
A partir dos dados colhidos, pode ser montada a função objetivo do processo e as suas equações de restrições utilizando o mesmo raciocínio mostrado na seção 4. A diferença é que, neste caso, seriam 8 equações de restrições já que existem 8 unidades não acumuladoras (divisores ou concentradores de fluxo e trocadores de calor) no processo. Apenas para exemplificar, duas dessas equações seriam: “S2 + S14 – S4 – S15 = 0” e “S15 – S17 – S16 = 0”.

Uma vez obtidas a função objetivo e as restrições do processo, e de posse dos valores medidos dos fluxos e dos pesos que serão atribuídos a cada fluxo, aplica-se sobre este conjunto um algoritmo matemático que terá como resultado os valores reconciliados de cada fluxo envolvido. Isso pode ser automatizado de forma que possa ser realizado ciclicamente, constituindo assim a chamada reconciliação *on-line* de dados.

Para se visualizar os resultados do método de reconciliação e estimação das variáveis do processo pode-se utilizar uma tela de acompanhamento como a mostrada na Fonte: ATAN Ciência da Informação Ltda

Figura 3. A tela contém o esquemático do processo e, para cada variável, foram adicionados dois campos: um contendo o valor medido e outro contendo o valor reconciliado (ou estimado – nos casos em que não há valor medido).

A tela permite que se avalie a discrepância entre valor medido e valor reconciliado proporcionando uma forma simples de se identificar problemas na instrumentação e na qualidade das medidas.

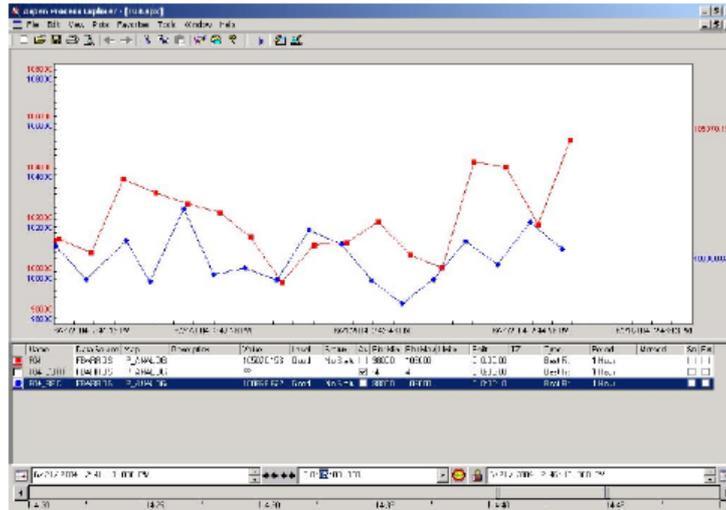


Fonte: ATAN Ciência da Informação Ltda

Figura 3. Tela de acompanhamento do processo de síntese de amônia.

Uma outra opção para o acompanhamento do processo de reconciliação é através de gráficos de tendência. Por exemplo, a Fonte: ATAN Ciência da Informação Ltda.

Figura 4 mostra o gráfico correspondente à vazão S4, que ajuda a comparar os valores medidos e reconciliados da variável.



Fonte: ATAN Ciência da Informação Ltda.

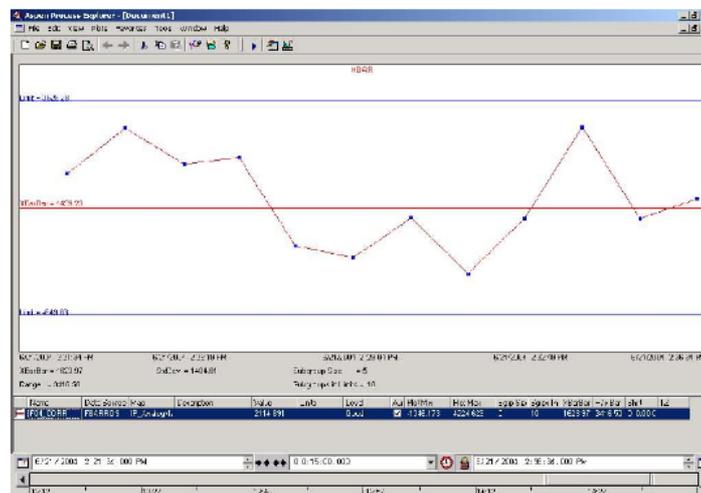
Figura 4. Gráfico de tendência da vazão S4.

Outra alternativa é acompanhar diretamente o valor da correção feita na medida, ou seja, *valor medido – valor reconciliado*. A

Fonte: ATAN Ciência da Informação Ltda.

Figura 5 mostra uma carta de controle criada para o monitoramento das correções feitas nas medidas da vazão S4.

Os limites de controle presentes na carta são usados como base para julgar, de tempos em tempos, a significância da variação das medidas da variável. Em outras palavras, eles oferecem recursos para se decidir quando a variável está dentro ou fora de controle estatístico. A regra mais básica na utilização de cartas de controle diz que pontos residentes fora dos limites de controle indicam dados de má qualidade.



Fonte: ATAN Ciência da Informação Ltda.

Figura 5. Carta de controle das correções feitas na vazão S4

5.2 Processo de Britagem Mineral

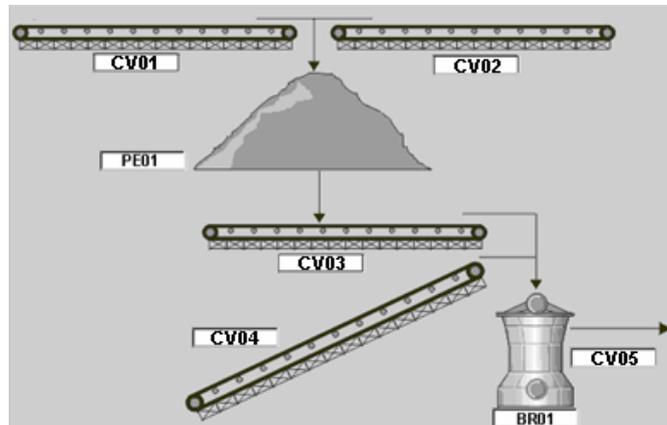
Esta aplicação utiliza a reconciliação *off-line* dos dados. Isto quer dizer que não mais se reconcilia os valores brutos das variáveis do processo e sim um valor totalizado destas variáveis dentro de um determinado período.

Com este exemplo, pretende-se ilustrar a contribuição da reconciliação de dados em uma prática industrial comum: o fechamento diário (ou mensal) do balanço de massas de uma unidade de processo.

A

Fonte: ATAN Ciência da Informação Ltda.

Figura 6 ilustra a unidade a ser estudada. Como pode ser visto, a unidade é composta por cinco correias transportadoras, uma pilha de minério e um britador



Fonte: ATAN Ciência da Informação Ltda.

Figura 6. Processo de britagem mineral.

O minério proveniente da mina (ROM – *run of mine*) é descarregado na pilha através das correias CV01 e CV02. Parte deste minério fica acumulada na pilha e parte é jogada na correia CV03. Soma-se a este fluxo, o ROM da correia CV04. Estas duas composições são então encaminhadas ao britador. Finalmente, o produto da britagem é deslocado para outra unidade do processo através da correia CV05.

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos durante uma execução da reconciliação de dados sobre uma simulação de fechamento diário do balanço mássico da unidade. Em destaque, deve-se notar que o valor do imbalanço é nulo quando são utilizadas medidas reconciliadas, enquanto que o menor imbalanço utilizando valores medidos é da ordem de 10^{-1} u.e., que poderiam significar algumas toneladas de minério.

Tabela 2. Resultados do balanço diário do processo

Totalizador	Valor Medido (u.e.)	Valor Reconciliado (u.e.)
Alimentação total CV01	219.32	219.10
Alimentação total CV02	365.88	365.67
Acumulado na pilha	71.91	72.12
Alimentação total CV03	512.55	441.38
Alimentação total CV04	73.07	62.83
Acumulado no britador	74.98	65.36
Alimentação total CV05	511.20	438.86
CV01+CV02-PE01-CV03	-0.30	0
CV03+CV04-BR01-CV05	1.73	0

Fonte: ATAN Ciência da Informação Ltda.

6 CONCLUSÃO

O artigo apresentou uma solução tecnológica que se mostra muito útil para empresas que tenham percebido a importância de se obter dados mais consistentes do processo produtivo e de se conhecer melhor a planta.

Uma gama de sistemas especialistas e de otimização vêm surgindo, e para se aproveitar ao máximo os recursos de tais sistemas é preciso garantir a consistência do seu principal insumo – os dados de processo. Sendo assim, a reconciliação de dados também serve de alicerce para os sistemas de alto nível e para diversas operações corporativas.

Finalmente, os exemplos que foram citados já permitem se ter uma noção do extenso horizonte de aplicação da técnica, o que garante sua presença nos mais diversos setores produtivos do mercado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 NARASIMHAN, S., JORDACHE, C. Data reconciliation and gross error detection. Houston: Gulf Publishing Company, 2000. 405p.
- 2 CARVALHO, F. B. “Implementação de software para reconciliação e análise de qualidade de dados”. 2004. 117f. Monografia – Universidade Federal de Minas Gerais.

BIBLIOGRAFIA

- 1 SEIXAS FILHO, C., CARVALHO, F. B., BARATA, L. G. M. Reconciliação de dados: criando o alicerce para a contabilidade da produção. InTech Brasil: 2004, nº60, p. 16-22.

GUARANTEEING THE RELIABILITY OF THE PROCESS INFORMATION THROUGH THE DATA RECONCILIATION AND QUALITY ANALYSIS TECHNIQUE

*Fábio Barros de Carvalho
Constantino Seixas Filho*

Abstract

Data reliability and consistency is the key for an efficient operation of the productive process. The increasing use of modern data acquisition systems allows the measurement of an enormous amount of variables such as draining taxes, temperatures, pressures, levels and compositions. The accomplishment of these measures has diverse objectives: process control, on-line optimization, economic evaluation of the process, instrumentation maintenance, plant stops scheduling, equipment performance analysis, etc. However, whichever the final objective, one common practice must be to process the data previously, in order to eliminate its errors and noises, increasing its exactness and guaranteeing its consistency in relation to the restrictions of the process. To this practice is given the name Data Reconciliation. The present article makes an introduction on the concept of data reconciliation and discusses the main aspects of this technique trying to show in a practical way its main contributions.

Key-words: Data reconciliation; Mass balance; Process information; PIMS.