

# BALANÇO DE MASSAS AUTOMÁTICO NA MINA DE FERRO DE CARAJÁS DA CIA VALE DO RIO DOCE

Martins, M.A.S.M.<sup>1</sup>; Pereira, F.F.P.<sup>2</sup>; Silva, C.J.S.<sup>3</sup>

1, 2 e 3 - CEMI – Consultoria em Engenharia Mineral, Av. José Cândido da Silveira 311, conj. 104, Cidade Nova,  
Belo Horizonte MG

1 - [marco@ccmi.eng.br](mailto:marco@ccmi.eng.br)

2 - [fernando@ccmi.eng.br](mailto:fernando@ccmi.eng.br)

3 - [cacio@ccmi.eng.br](mailto:cacio@ccmi.eng.br)

Para que seja possível a avaliação da performance de uma usina de beneficiamento de minérios e o controle de sua operação são necessários dados confiáveis dos diversos fluxos em termos de taxas mássicas e constituintes metalúrgicos. Normalmente, ocorrem erros de medidas nos instrumentos que permitem contabilizar de forma contínua as taxas mássicas ou os metais contidos nos diversos fluxos. Outros dados relativos aos vários fluxos de uma planta podem ser obtidos através de amostragens sistemáticas, que podem conter desvios dos valores reais devido a erros de amostragem, preparação e análise em laboratório. O objetivo deste trabalho é apresentar uma alternativa muito eficaz para a obtenção de balanço de massas e metalúrgico através do tratamento matemático dos dados obtidos no processo. O balanço de massas em Carajás é obtido continuamente com a utilização de computadores de processo e medição contínua dos fluxos; e de forma completa, com balanços coerentes de massas, água e energia elétrica. É utilizado um software para reconciliação do balanço, dotado de algoritmos para minimização de erros, que recebe dados do processo através do PIMS - banco de dados de produção e processos e automaticamente calcula o balanço final para um período determinado de tempo, sendo respeitados critérios de confiabilidade e estratégias adequadas.

**Palavras-chave:** balanço de massas, balanço metalúrgico, balanço de energia, modelagem

**Área Temática:** Instrumentação e Controle de Processos

## INTRODUÇÃO

Em qualquer processo haverá separação de massas em dois ou mais produtos. A proporção de cada produto pode ser determinada com base no conhecimento de características físicas e químicas da alimentação e dos produtos.

Na indústria mineral cada operação unitária do processo poderá ter um tempo de residência relativamente alto. Assim, as variações na alimentação de uma planta terão seus reflexos nos produtos finais ou intermediários após tempos variados. Algumas premissas são básicas para a avaliação do desempenho de um processo relativo à separação das massas: devem ser observadas condições estacionárias do processo; melhor que sejam feitas análises do processo com dados acumulados de turno, dia ou mês; as características do minério deverão ser escolhidas adequadamente de forma que definam com nitidez a separação de massas; podem ser analisadas mais de uma característica de um mesmo fluxo; e, finalmente, deverá haver redundância para uma adequada distribuição de erros de medições.

## MÉTODO DE MINIMIZAÇÃO DE ERROS

A maioria dos sistemas computadorizados para fechamento de balanços de massas utiliza o método dos mínimos quadrados, onde as medidas, sejam contínuas ou obtidas por amostragem sistemática, podem ser corrigidas.

Considerando que cada medida em um processo mineral possui um erro associado, que corresponde à diferença entre esse valor  $M_i$ , e o valor mais provável  $\hat{M}_i$ , o erro em cada ponto será:

$$E_i = M_i - \hat{M}_i \text{ ou} \quad (1)$$

O erro total para todo o sistema será:

$$\sum E_i^2 = (M_i - \hat{M}_i)^2 \quad (2)$$

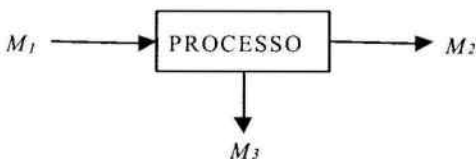
Tendo em vista que cada medida  $M_i$  não possui o mesmo erro relativo, pesos diferentes poderão ser dados às diferenças quadráticas de forma a se encontrar o menor erro possível do balanço. Esses pesos serão tomados como sendo inversamente proporcionais à variância das medidas ( $1/S_i^2$ ).

O objetivo será então minimizar a função:

$$\sum E_i^2 = \left( M_i - \hat{M}_i \right)^2 \frac{1}{S_i^2}$$

Sujeito ao constrangimento  $\sum \hat{M}_i = 0$ , o que será justamente a equação do balanço de massas.

Considerando o circuito simples abaixo:



$M_1 - M_2 - M_3 \neq 0$  (valores medidos) e,

$$\hat{M}_1 - \hat{M}_2 - \hat{M}_3 = 0 \text{ (equação de constrangimento)}$$

Para resolução desse problema de minimização, são utilizados os multiplicadores de Lagrange, de forma que a função a ser minimizada passa a ser:

$$\phi = \sum (M_i - M_i)^2 \left( \frac{1}{Si^2} \right) + \sum_j \lambda_j C_j$$

onde  $\lambda$  é o multiplicador de Lagrange para cada equação de constrangimento ( $C_j$ ).

Então o circuito exemplificado:

$$\phi = \sum (M_i - \hat{M}_i)^2 \left( \frac{1}{Si^2} \right) + \lambda_1 \left( \hat{M}_1 - \hat{M}_2 - \hat{M}_3 \right)$$

A função  $\phi$  deverá ser diferenciada em relação a cada uma das medidas desconhecidas ( $\hat{M}_i$ ) e em relação aos multiplicadores. As derivadas parciais deverão ter valor igual a zero para minimização da função. Para o circuito exemplificado:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \hat{M}_1} = -2(M_1 - \hat{M}_1) \left( \frac{1}{Si^2} \right) + \lambda_1 = 0$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \hat{M}_2} = -2(M_2 - \hat{M}_2) \left( \frac{1}{Si^2} \right) - \lambda_1 = 0$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \hat{M}_3} = -2(M_3 - \hat{M}_3) \left( \frac{1}{Si^2} \right) - \lambda_1 = 0$$

$$\frac{\lambda \phi}{\lambda \lambda_1} = \hat{M}_1 - \hat{M}_2 - \hat{M}_3$$

ou generalizando:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial M_1} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{\lambda \phi}{\partial \lambda_1} = 0$$

Os valores de  $M_i$  e  $\lambda_i$  serão obtidos pela resolução do sistema de equações lineares gerado.

## **BALANÇO DE MASSAS EM CARAJÁS**

Para a Usina de Carajás, o Balanço de Massas é disponibilizado com as informações mais atualizadas disponíveis no sistema. Isso significa que o Balanço de Massas da Usina é gerado on-line, ou seja, tem seus dados atualizados constantemente de forma contínua e automática pelo sistema.

Para isso, o sistema PIMS faz, a partir dos sistemas de supervisão da usina, a aquisição de dados provenientes de balanças nas correias, proporcionando desta forma informações para determinação de valores de entrada e saída do Balanço de Massas. Níveis de silos nas diversas áreas da usina, volumes estocados e recuperados nas pilhas intermediárias de minério e totalização do rejeito enviado para a barragem também precisam ser considerados no cálculo. No caso do rejeito, as linhas de underflow dos 2 espessadores da planta dispõem de densímetros e medidores de vazão. Assim, o sistema pode efetuar os cálculos necessários visando a obtenção da vazão mássica do rejeito. Estes valores devem estar disponíveis no sistema para utilização pelo pessoal de operação / processo da Usina.

Adicionalmente, estão previstas entradas manuais de dados para ajustes de parâmetros. Por serem estes dados importantes para o desempenho geral da função, estes parâmetros devem ter sua alteração registrada em um log de operação capaz de registrar a data, hora, o usuário responsável pela alteração, os valores anterior e atual da variável, além de um campo de justificativa, livre para entrada de um texto que explique o motivo da alteração.

O sistema apresenta, sempre sob solicitação, os resultados do balanço de um período qualquer, de forma rápida, permitindo assim a geração de relatórios de turno, diário e mensal, entre outros.

Outros resultados a serem apresentados pelo Balanço de Massas são a totalização de rejeito e a recuperação em massa da usina.

O pacote utilizado para implementação dos cálculos e fechamentos relativos ao Balanço de Massas é o BILCO, produzido pela BRGM, França.

## **INTERFACES DO BALANÇO DE MASSAS**

Para que o dados sejam inseridos no BILCO 3.0 de forma coerente e automatizada, é necessário que seja utilizada uma interface. Esta interface é chamada de Interface COM.

A interface COM do BILCO 3.0 usa a tecnologia padrão COM (Component Object Modeling) e permite que outros aplicativos se comuniquem com o BILCO 3.0. Sua ferramenta principal é o MS - Visual Basic, mas os aplicativos MS - Office (MS - Excel, MS - Access, etc) podem se comunicar com o BILCO a partir de sua versão 3.0, através de macros escritas no VBA (Visual Basic for Application).

Ela permite a transferência de dados para o BILCO e a captura dos resultados do Balanço de Massas calculado, usando um problema predefinido (gráfico de dependência, descrição dos dados e definição das restrições) desenvolvido no BILCO e salvo em um arquivo experimental conhecido como modelo.

## DADOS PARA O BALANÇO DE MASSAS

O sistema adquire, a partir do sistema de despacho da mina, dados de produção e de localização das máquinas escavadeiras que estão alimentando a usina, proporcionando dessa forma informações para a determinação dos valores de entrada do Balanço de Massas. Dados de produção das britagens, níveis de silos nas diversas áreas da usina e os volumes estocado e recuperado nas pilhas intermediárias de minério também devem ser considerados no cálculo.

Estão também disponíveis entradas manuais de dados para ajustes de parâmetros ou complementação de informações não disponíveis através de medição por instrumentação. Além disso o sistema deve ser preparado para identificar as situações nas quais o Balanço de Massas é válido, visto que isso só acontece quando o sistema trabalha em REGIME NORMAL (steady state), e manter dados de longo prazo para identificação de médias e desvios padrão coerentes e não influenciados por eventuais desajustes dos instrumentos.

Basicamente, o PIMS fornece uma tabela de dados ao Bilco com as seguintes colunas de informações:

- Seq.: número seqüencial do dado na tabela.
- Fluxo: identificação da fonte de dados para o fluxo no modelo do BILCO; esta identificação deve estar de acordo com a notação de nomes de equipamentos no PIMS ou de acordo com as regras de tratamento da rotina de processamento do Balanço no PIMS.
- Fator (%): percentual a ser aplicado sobre o valor apurado pela instrumentação, coletado pelo PIMS.
- Umidade (%): fator de umidade a ser aplicado sobre o apurado pela instrumentação, coletado pelo PIMS, após ser aplicado o percentual indicado na coluna "Fator (%)".
- Descrição: descritivo complementar, quando desejado.

Segue abaixo o fluxograma do projeto, como representado no software Bilco:

Material Balance Graph of Project CARAJAS

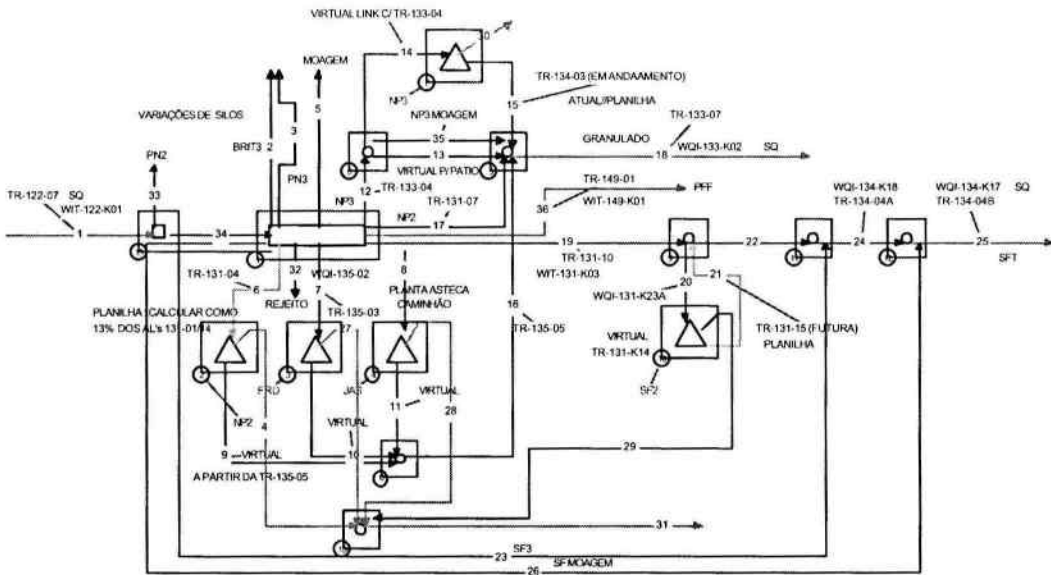


Figura 01 – Fluxograma esquemático da planta de Carajás.

## CRITÉRIOS DE PROJETO

Várias premissas foram assumidas para que o Bilco 3.0 pudesse receber informações coerentes e redundantes para o fechamento do balanço de massas. A seguir serão listadas as principais premissas assumidas:

### 1.Considerações nas medidas dos fluxos

Todas as medidas de massas deverão ser feitas em TBS (base seca) para equalização das informações de entrada e saída. Desta maneira são assumidos alguns valores padrões de umidade para os fluxos chave.

### 2.Utilização de Balanças Virtuais:

As balanças virtuais são artificios utilizados para determinar a direção na qual o fluxo estava sendo enviado com base em uma balança localizada no fluxo anterior ou no fluxo imediatamente após as balanças virtuais.

Em vários pontos foram utilizadas balanças virtuais:

- Saídas das pilhas de NP2, FRD e Jaspilito, com base na TR-135-05 (fluxo 16);
- NP3 desviando para pilha ou para pátio, com base na TR-133-04 (fluxo 12);

### 3.Cálculos feitos pela sala de Controle\*:

Para as saídas das pilhas de SF2 (fluxo 21) e NP3 (fluxo 15), os cálculos de taxas horárias devem ser feitos pela sala de controle em planilha específica.

Os valores encontrados deverão ser alimentados pela sala de controle em um banco de informações (tela) criado pelo PIMS.

\* Esta situação deve perdurar até que entrem em funcionamento as balanças dos transportadores:

TR-131-15: Retomada de SF2 (fluxo 21)

TR-134-03: Retomada da Pilha de NP3 (fluxo 15)

#### 4. Resultados do Balanço de Massas, fornecidos pelo BILCO

O BILCO fornece o Balanço de Massas por tratamento matemático dos dados obtidos no processo.

Os resultados apresentados são os seguintes:

**Tabela 01** – Resumo dos resultados que são apresentados.

1	2	3	4	5
Fluxo	Valor Lido	Valor Ajustado	% de Ajuste (Lido/Corrigido)	Confiabilidade do valor calculado

- Na coluna “Fluxos” estão incluídos os resultados relativos aos rejeitos e à recuperação em massa da usina.

Através da análise destes resultados podem ser determinadas, continuamente, as variâncias dos diversos dados dos fluxos que serão utilizadas como fator de ponderação para a distribuição dos erros.

## BALANÇO DE ENERGIA

Para o balanço de energia são disponibilizadas informações similares às do balanço de massas, porém relacionadas ao consumo de energia elétrica, indicadas nos diversos medidores espalhados pela planta de Carajás.

O sistema prevê a apresentação, sempre sob solicitação, dos resultados do Balanço em um período qualquer, de forma rápida, permitindo assim a geração de relatórios de turno, diários e mensais, dentre outros.

O software utilizado para implementação dos cálculos e fechamentos relativos ao Balanço de Energia é o BILCO. Outras informações sobre as interfaces e mecanismos de interação com o PIMS podem ser obtidas no item INTERFACES DO BALANÇO DE MASSAS.

## RESULTADOS DO BALANÇO DE ENERGIA

O BILCO fornece o Balanço de Energia através do tratamento matemático dos dados obtidos no processo. O padrão de resultados é o mesmo apresentado para o balanço de massas.

Através da análise destes resultados podem ser determinadas, continuamente, as variâncias dos diversos dados dos fluxos que serão utilizadas como fator de ponderação para a distribuição dos erros.

## **BALANÇO DE ÁGUA**

Com relação ao Balanço de Água, na ocasião em que foi realizada a implantação do sistema na planta de Carajás, não havia ainda disponibilidade de instrumentação suficiente que permitisse a realização deste balanço. Devido a isto, este balanço não se encontra disponível no PIMS ainda atualmente.

## **CONCLUSÕES**

O avanço da computação e o desenvolvimento contínuo de softwares específicos para a mineração, tornam possível a execução de balanços de massas automatizados, obtidos pelo tratamento matemático dos dados de entrada, em usinas de processamento mineral que possuem instrumentação adequada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a todos os profissionais da Companhia Vale do Rio Doce – Carajás, que estiveram envolvidos na elaboração / desenvolvimento dos trabalhos. Agradecemos também à BRGM pelo apoio recebido.