

# CONSTRUÇÃO DE INVENTÁRIO DA PRODUÇÃO E CONTROLE DA PRODUÇÃO E ESTOQUES ATRAVÉS DE BALANÇO DE MASSAS E METALÚRGICOS<sup>1</sup>

Marco Aurélio Soares Martins<sup>2</sup>  
Mônica Guimarães Vieira<sup>3</sup>

## Resumo

Os instrumentos de uma planta ou técnicas de medição de produção e estoques contêm sempre erros aleatórios intrínsecos por mais que sejam precisos e exatos. Este fato pode levar a vários problemas dentro de uma usina, sendo os principais impactos a penalização da produtividade, desordem nos pátios de estocagem e perda de confiabilidade do mercado impactando no valor de mercado da empresa. O presente trabalho apresenta uma técnica de construção de inventário da produção. O método é baseado no algoritmo Lagrangiano de redução de erros aliado a ferramenta matemática da simulação dinâmica, onde é levada em consideração a realidade do processo. Com esta técnica as plantas podem ter em curtos períodos de tempo dados confiáveis a respeito do que entrou, do que foi produzido e o que foi descartado. Dados como estes elevam a confiabilidade da empresa e servem como instrumentos para apoio de técnicos para análise de processos

**Palavras-chave:** Balanço de massas; Controle de estoque; Controle de processo.

## CONSTRUCTION OF INVENTORY AND PRODUCTION CONTROL AND STOCKS FROM MASS AND METALLURGICAL BALANCE

### Abstract

The plant field instrumentation or production and supply measurement techniques always has intrinsic random errors even if they are the most precise and accurate. The main impacts are the production penalty of a processing plant, uncertainty in storage yards and loss of reliability on the market, leading to value loss of the company. This paper presents a method based on the Lagrangian algorithm for errors reduction combined with mathematical tool of dynamic simulation, which takes into account the reality of the process. With this technique the processing plant can have in a short term reliable data about what went in, what was produced and what was disposed. Data like these rise the reliability of the company and serve as instrumentation to support technician on process analysis.

**Keywords:** Metallurgical accounting; Stock management; Process control.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 16º Seminário de Automação e TI Industrial, 18 a 21 de setembro de 2012, Belo Horizonte, MG.

<sup>2</sup> Engenheiro de Minas. Diretor de Operações. CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia, Belo Horizonte - Minas Gerais.

<sup>3</sup> Engenheira Química. Consultora Técnica. CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia, Belo Horizonte - Minas Gerais.

## 1 INTRODUÇÃO

Os balanços materiais globais ou detalhados são os meios fundamentais usados para projetar e avaliar as operações de usinas de processamento. Para estabelecer balanços para fluxos nestas usinas, primeiro é necessário obter dados experimentais, assim como fluxos, composição química e distribuição de tamanho de partículas. Geralmente é difícil calcular balanços precisos a partir desses parâmetros pelas seguintes razões:

- os dados são inconsistentes e/ou redundantes, devido a erros de medida; e
- um grande número de equações é requerido para estabelecer um balanço detalhado em uma usina complexa.

Características como a taxa de sólidos, densidade da polpa, vazões de água, distribuições granulo-químicas tendem a influenciar a dinâmica da distribuição de massa ao longo do processo de tratamento. Essas características podem ser verificadas de modo automático-contínuo ou discreto, através de campanhas de amostragem. Independentemente da forma, ao processo de amostragem é inerente a representação de uma grande quantidade de material por uma pequena porção do mesmo o que faz com que as medidas apresentem naturalmente erros e precisões, que são função dos equipamentos e da técnica de amostragem. Além disso, ao longo das etapas do processo o material apresenta um determinado tempo de residência em cada uma delas e flutuações nas características do material podem tornar a amostragem menos representativa caso seja executada um intervalo de tempo reduzido.

Para a determinação da recuperação metalúrgica de um circuito, cálculo da adição de reagentes, e a definição de diversos parâmetros operacionais é necessário o conhecimento do funcionamento exato do circuito no que diz respeito à partição dos fluxos de alimentação até os produtos finais. A inconformidade entre os valores de produção previstos por um balanço de massas inconsistente pode prejudicar o planejamento de estocagem, logística e até ter repercussões na confiança do mercado na empresa.

## 2 BALANÇO DE MASSAS CLÁSSICO

Os sistemas de balanço de massas clássicos utilizam o método dos mínimos quadrados para realizar o ajuste. Considerando que para cada medição exista um erro associado, que corresponde à diferença entre o valor medido  $M_i$  e o valor mais provável  $\hat{M}_i$ , o erro em cada medida então será:

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

Considerando-se todos os fluxos do sistema, temos o erro total dado por:

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

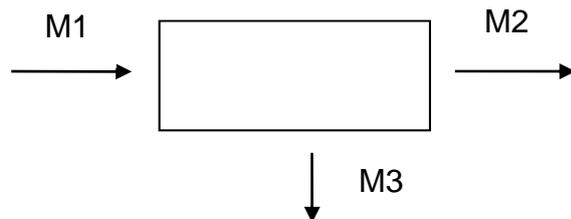
Uma vez que os erros relativos irão apresentar magnitudes variadas, a adoção de pesos é uma estratégia usada para equilibrar a influência individual de cada medida nos resultados do balanço.

A diferença existente entre os erros relativos para medidas distintas é introduzida no modelo ao se considerar pesos diferentes. Esses pesos são inversamente proporcionais as variâncias das medidas  $1/S_i^2$ .

A função objetivo da minimização será então:

$$\sum E_i^2 = \sum (M_i - \hat{M}_i)^2 \cdot 1/S_i^2 \quad (3)$$

Adicionando-se as restrições  $\sum \hat{M}_i = 0$ , é estabelecido o sistema balanço de massas. Considerando um sistema simples abaixo, temos:



$$M_1 - M_2 - M_3 = 0 \quad (4) \text{ (valores medidos) e,}$$

$$\hat{M}_1 - \hat{M}_2 - \hat{M}_3 = 0 \quad (5) \text{ (equação de restrição)}$$

A técnica dos multiplicadores de Lagrange é geralmente utilizada para a minimização da função:

$$\phi = \sum (M_i - \hat{M}_i)^2 \cdot 1/S_i^2 + \sum \lambda_i C_i \quad (6)$$

Onde  $\lambda$  é o multiplicador de Lagrange para cada equação de restrição ( $C_j$ ). Dessa forma, no exemplo, a minimização torna-se:

$$\phi = \sum (M_i - \hat{M}_i)^2 \cdot 1/S_i^2 + (\hat{M}_1 - \hat{M}_2 - \hat{M}_3) \quad (7)$$

A função  $\phi$  é então derivada em função dos multiplicadores para cada medida ( $\hat{M}_i$ ) e igualado a zero. Assim temos:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \hat{M}_1} = -2(M_1 - \hat{M}_1) \left( \frac{1}{S_1^2} \right) + \lambda_1 = 0 \quad \frac{\partial \phi}{\partial \hat{M}_2} = -2(M_2 - \hat{M}_2) \left( \frac{1}{S_2^2} \right) + \lambda_2 = 0$$

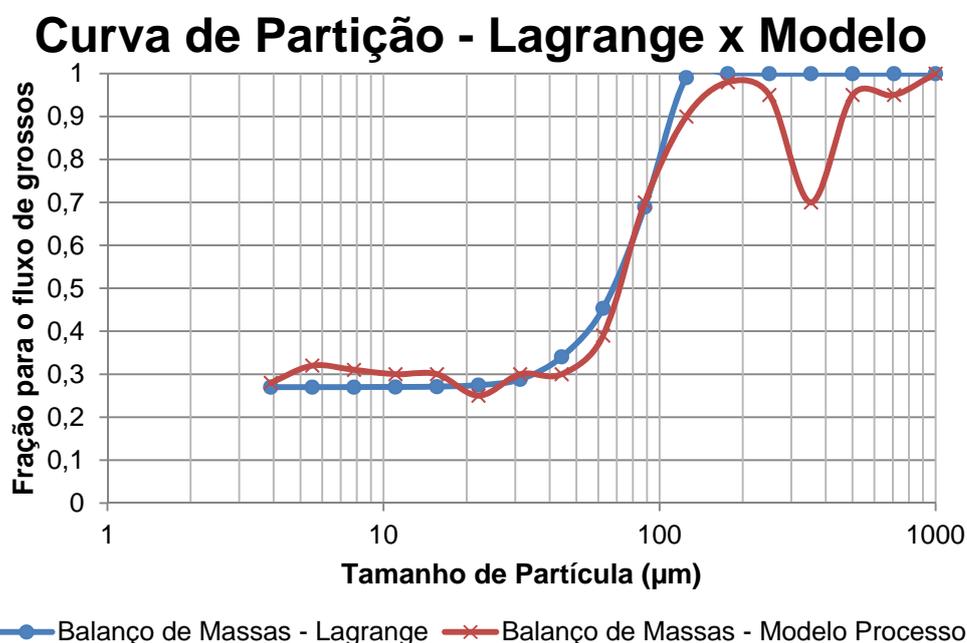
$$\frac{\partial \phi}{\partial \hat{M}_3} = -2(M_3 - \hat{M}_3) \left( \frac{1}{S_3^2} \right) + \lambda_3 = 0 \quad \frac{\partial \phi}{\partial \lambda_1} = \hat{M}_1 - \hat{M}_2 - \hat{M}_3$$

Ou, em termos genéricos:  $\frac{\partial \lambda_1}{\partial M_1} = 0$  e  $\frac{\partial \phi_i}{\partial \lambda_{1j}} = 0$

Os valores de  $\hat{M}_1$  e  $\lambda_j$  são obtidos pela resolução do sistema linear acima, que também pode ser feito por métodos de otimização não lineares. A metodologia apresentada é amplamente utilizada e difundida na solução de problemas reais de balanço de massas. Aplicações computacionais facilitam o manuseio das medidas e permitem a rápida avaliação dos resultados.

## 3BALANÇO DE MASSAS OTIMIZADO

Ao se processar um balanço de massas clássico obtêm-se resultados coerentes em termos da conservação de massa entre as entradas e saídas do sistema, porém podem não satisfazer a fenômenos naturais de determinadas operações unitárias. Por exemplo, em uma classificação por tamanho o processo o material é classificado obedecendo a uma curva de partição característica. Pode ocorrer, conforme mostra a Figura 1, que o resultado de um balanço de massas coerente com a conservação de massas entre a entrada e saídas do processo não esteja de acordo com o comportamento do processo, no caso, a curva de partição obtida pelo balanço de massas clássico não obedece a curva de partição esperada e provável. Assim sendo, são necessários ajustes adicionais ao balanço de massas com a finalidade de tornar o conjunto de dados coerentes com os diversos processos.



**Figura 1** – Curva de Partição do balanço de massas obtido pelo método dos multiplicadores de Lagrange e ajustados com a utilização do modelo fenomenológico do processo.

Essa tecnologia torna o balanço de massa mais representativo integrando as relações fenomenológicas do processo ao sistema de equações lineares do balanço de massas. Dessa forma temos:

$$\phi = \sum (M_i - \hat{M}_i)^2 \cdot 1/S_i^2 + \sum \lambda_i C_i + \sum \beta_n \quad (8)$$

A metodologia para correção de dados incoerentes e o balanço de massas automáticos foi desenvolvida pela CEMI no aplicativo OptBal©. O aplicativo é aplicado na correção de dados incoerentes, do ponto de vista fenomenológico, além de ser permitir o desenvolvimento de um procedimento para o balanço de massa automático, a partir da validação e substituição dos dados medidos com aqueles obtidos a partir da simulação do processo em questão.

## 4OPTBAL© E INVENTÁRIO DA PRODUÇÃO

O OptBal© é um sistema desenvolvido pela CEMI para realizar o balanço de massas automaticamente. O balanço de massas coerente e consistente com o processo real possibilita o cálculo de índices de desempenho do processo e contabilização da produção de maneira confiável.

O sistema especialista é capaz de gerenciar todo o processo de validação dos dados medidos, executar correções, enviar os dados para um banco de dados do sistema e executar o cálculo do balanço de massas.

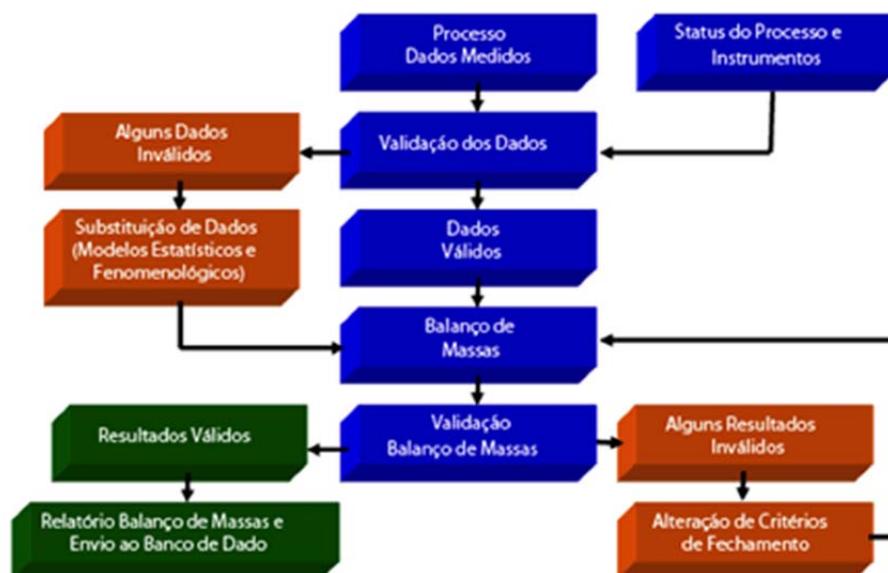
A aquisição e tratamento dos dados é completamente automatizado e reflete com fidelidade todos os passos de um especialista de processo para a obtenção de Balanço de massas coerente e confiável

Ao longo do processo de recebimento de dados do processo, ajustes dos dados e determinação de critérios é realizado o armazenamento dos dados obtidos a cada etapa e ciclo do sistema para garantir a segurança e confiabilidade. A construção de um inventário do processo é uma virtude do sistema que permite o armazenamento de todas as informações de cada ciclo de cálculo do sistema.

O OptBal© é um sistema integrado constituído de uma interface inteligente capaz de comunicar com o processo e banco de dados externos – PIMS e LIMS – visando o tratamento dos dados de processo de modo automático e levando em consideração premissas da operação, o que garante a utilização de dados coerentes com a realidade.

O diagrama da Figura 2 apresenta a dinâmica de informações entre os vários componentes do sistema de automação e obtenção do balanço de massas.

**Diagrama Funcional do Sistema - BM Automático**



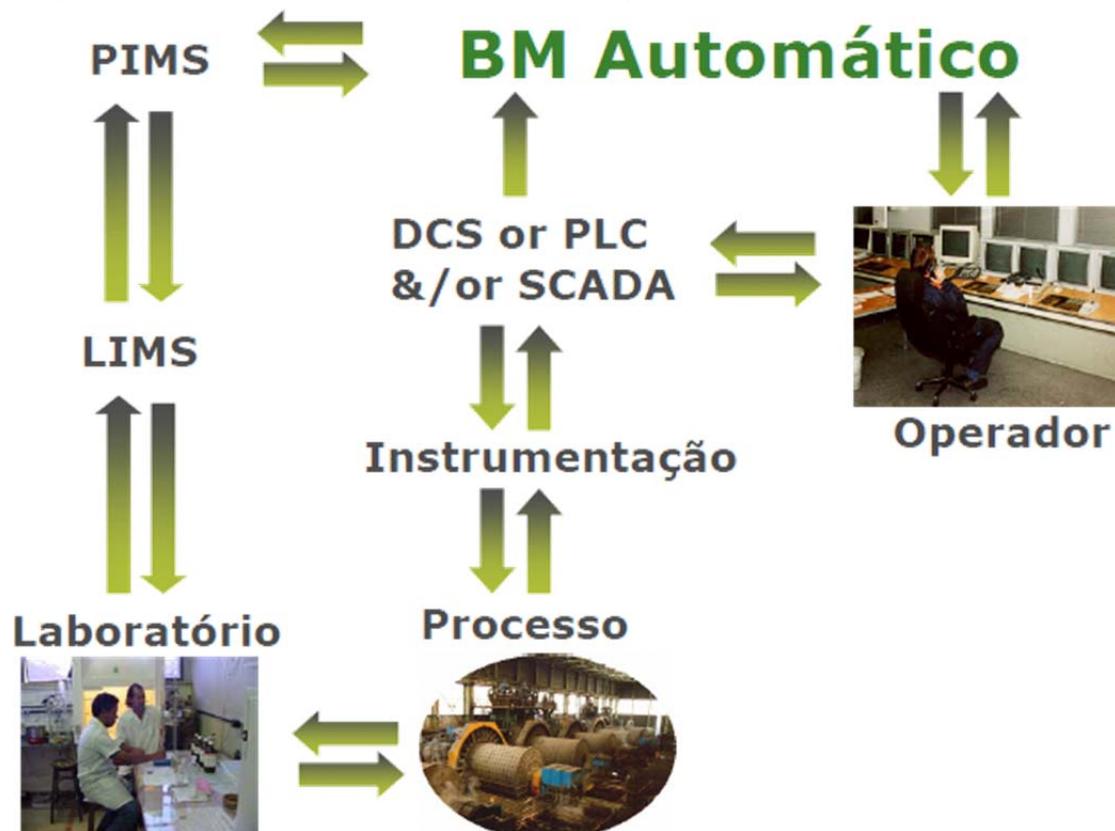
**Figura 2** – Diagrama funcional do sistema de obtenção de balanço de massas automático.

- Aquisição de dados medidos do processo: inicialmente é necessário estabelecer as conexões do sistema ao processo e alimentar com as medições contínuas do processo. Adicionalmente, os dados de análises laboratoriais também são recebidos diretamente dos bancos de dados do processo e laboratório – PIMS e LIMS.

- Validação de dados medidos: esta etapa garante o sucesso e a continuidade de todo o processo de obtenção do balanço de massas. Eventualmente os dados medidos diretamente nos instrumentos da planta, tais como balanças integradoras, medidores de vazão de polpa e água, densímetros, etc., podem registrar aberrações e apresentar medidas com erros grosseiros, por defeitos dos instrumentos, erros de comunicação ou outras interferências. A verificação dos dados consiste em determinar seus valores e suas variâncias se enquadram dentro de limites aceitáveis. O status dos equipamentos também é dado de entrada do sistema para avaliação automática da rota de processo corrente e servem de suporte para avaliação da validade da medição. Uma medição de fluxo através de um instrumento muitas vezes pode ser válida, mas o equipamento pode estar parado, o que invalida a medida, devendo assumir um valor nulo neste momento. Nesta etapa são utilizadas técnicas de inteligência artificial, o módulo de sistema especialista, associados a técnicas de estatística condicional para validar, substituir e obter um conjunto de dados ajustados para serem utilizados na obtenção do balanço de massas. A utilização de dados medidos sem estas correções preliminares pode conduzir a erros irreparáveis na obtenção de balanços de massas automáticos.
- Ajustes de dados: o ajuste de dados medidos é necessário para impedir a utilização de dados incoerentes com o processo para o cálculo do balanço de massas e associar um nível conveniente de confiabilidade. Estes ajustes devem ser feitos através de uma rede decisória complexa como uma mímica da atitude humana e conta ainda com inserção do conhecimento do processo. Os sistemas especialistas são configurados de forma simples e amigável para esta finalidade e funcionam como um gerente para tomada de decisão correta para cada situação específica.
- Cálculo do balanço coerente: conforme visto, o cálculo do balanço é feito através de métodos de minimização de funções não lineares. O resultado será a obtenção de dados ajustados que satisfazem a lei de conservação de massas. Este algoritmo de cálculo escrito para um processo específico pode estar contido em uma mesma ferramenta de comunicação com o processo e com o sistema especialista ou operar de forma independente. É comum a utilização de um *software* específico para o balanço de massas devido a possibilidade de se obter a comunicação entre módulos de gerenciamento com funções de inteligência artificial com o software de cálculo. Estes softwares possuem ferramentas adequadas para a formatação de todas as equações do balanço em função do processo e estrutura dos dados, descrição dos fluxos de forma bastante simples e amigável, além de conterem um ou mais algoritmos de cálculos e solução de problemas complexos de funções não lineares.
- Validação do resultado: os resultados do balanço após o processo de cálculo devem ser avaliados e “criticados” para garantir que não somente a lei de conservação de massas, mas também a coerência com o processo físico. O módulo de gerenciamento ou sistema especialista irá validar os resultados ou alterar os critérios de obtenção do balanço para alcançar resultados satisfatórios.
- Critérios do balanço: os critérios de fechamento do balanço de massas são pré-estabelecidos a partir da validade dos dados medidos e das etapas anteriores. O módulo de gerenciamento ou sistema especialista também

deverá conter estratégias específicas para alterar os critérios de fechamento do balanço para se ter ao final do processo cíclico resultados finais satisfatórios.

A Figura 3, apresenta os componentes do sistema OptBal© de obtenção de balanço de massas e as interfaces com o processo e banco de dados do processo e laboratório. Neste diagrama, todos os módulos do sistema – dados e balanço de massas são apresentados como um único sistema totalmente integrado, mas podem na prática funcionarem como módulos independentes.

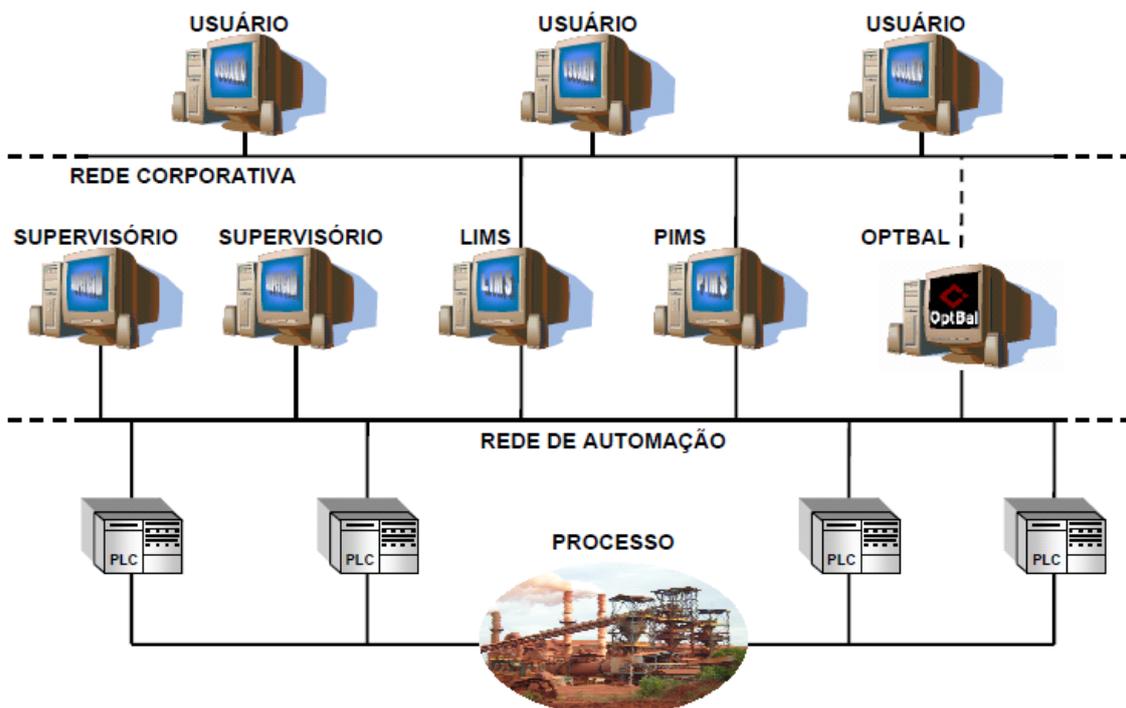


**Figura 3** – Hierarquia do fluxo de informações entre os vários componentes do sistema de automação, banco de dados e obtenção do balanço de massas.

Os resultados do balanço somente devem ser enviados para os bancos de dados do processo caso sejam coerentes e aceitáveis com as relações fenomenológicas do processo. O envio destes dados é feito de forma semelhante ao recebimento dos dados medidos, mas neste caso o sistema integrado de obtenção de balanço de massas é um servidor de dados para o banco de dados existente ou para geração de relatórios específicos.

O inventário da produção mantém registro do fluxo de material da alimentação até os diversos produtos, calculando o volume e composição das pilhas e tanques por modelos de blendagem. As imprecisões inerentes às medidas são acumuladas no tempo e utilizadas para estimar a variância nas medidas de estoque.

A Figura 4 apresenta a arquitetura do sistema integrado de automação e rede corporativa e seus vários componentes.



**Figura 4** – Arquitetura do sistema integrado de automação e rede corporativa e seus vários componentes.