

# ANÁLISE DINÂMICA DE RESTRIÇÕES DO PROCESSO – IDENTIFICAÇÃO ONLINE DOS GARGALOS FOCANDO NA MELHORIA DE DESEMPENHO DO PROCESSO E ELIMINAÇÃO DE PERDAS <sup>1</sup>

Luiz Guilherme Arruda e Souza<sup>2</sup>

Rodrigo Santos<sup>3</sup>

Marcos Alves<sup>4</sup>

Marcelo Szuster<sup>4</sup>

Braulio Damasceno<sup>2</sup>

Luiz Alfredo Greco<sup>2</sup>

## Resumo

Na busca pela maior competitividade no mercado global, empresas em todo mundo tentam aprimorar suas operações a fim de garantir maior produtividade a custos menores através de otimizações em seus processos, melhorias na utilização de insumos, automação de suas atividades, redução de refugos e melhoria na logística de toda sua cadeia produtiva, além de realizar tal aperfeiçoamento através de outras abordagens. Entretanto, observa-se que investimentos isolados em incrementos de produtividade e aplicados pontualmente em um determinado processo de uma cadeia produtiva, muitas vezes não atingem os objetivos delineados na concepção do projeto, quando não há o planejamento necessário para aumentar também a capacidade de processamento das operações subsequentes ao processo que está tendo sua produtividade aumentada. A consequência disto é a diminuição da eficácia global dos equipamentos (OEE), aumento da quantidade de refugos, maior esforço no planejamento da produção, aumento da perda de material processado e diminuição da produção de toda a cadeia. Nesse contexto, foi concebida e desenvolvida uma abordagem para a monitoração em tempo real do processo de beneficiamento de minério de ferro, permitindo a identificação de pontos de perda e de melhorias no processo, identificação de restrições (gargalos) e apoio a rápidas tomadas de decisões que gerem valor e não prejudiquem toda a cadeia produtiva. O sistema desenvolvido tem como base o conceito de restrição, que pode ser considerada como qualquer coisa que limita o desempenho geral da planta, também conhecido como "gargalo". O presente trabalho apresenta o conceito do sistema Análise Dinâmica de Restrições do Processo, assim como um caso real de sua aplicação, especificamente desenvolvido para uma usina de beneficiamento de minério de ferro. A aplicação do conceito é descrita, evidenciando as suas potencialidades e os principais resultados obtidos.

**Palavras-chave:** Eficácia global de equipamentos; Aumento de produtividade; Restrições; Gargalos.

## DINAMIC ANALYSIS OF PROCESS RESTRICTIONS – BOTTLENECK ONLINE MONITORING FOCUSING ON IMPROVING PROCESS PERFORMANCE AND REDUCING LOSSES

### Abstract

To achieve greater competitiveness in the global market, companies worldwide tries to improve its operations to ensure greater productivity at lower costs through improvements in its processes, improvements in the use of raw materials, automation of its activities, reduction of scraps and improvement of the logistics of its entire production chain besides the use of other approaches. However, it is observed that isolated investments in increments of productivity applied individually only in a specific process of a production chain, often do not achieve the goals outlined. This occurs often when there was no planning to increase also the processing capacity of the operations subsequent to the process that is taking their productivity increased. The result is a decrease in overall equipment effectiveness (OEE), increase in the amount of scrap, more effort in planning of production, increased loss of processed material and reduced production of the entire chain. In this context, an approach was developed to monitor in real-time the production process, allowing the identification of material loss and process improvements opportunities, identification of constraints (bottlenecks) and to support decision-making that generate value and do not negatively impact the entire production chain. The system developed is based on the concept of restriction, which is defined as anything that limits the overall performance of the plant; also know as "bottleneck". This paper presents the concept of the Dynamic Analysis of Restrictions in the process, and a real case of its application, specifically developed for an iron ore beneficiation plant. The application of the concept is described, highlighting their potential and the main results.

**Key words:** Global equipment effectiveness; productivity increases; restrictions; Bottlenecks.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 13º Seminário de Automação de Processos, 7 a 9 de outubro de 2009, São Paulo, SP.

<sup>2</sup> Engenheiro de Controle e Automação, Accenture.

<sup>3</sup> Engenheiro de Processos, Vale.

<sup>4</sup> Engenheiro Eletricista, Accenture.

## **1 INTRODUÇÃO**

Cada indústria possui pelo menos uma restrição que limita a produção de toda a operação. Esta é freqüentemente não-identificada e limita a rentabilidade do negócio – assim como o elo mais fraco de uma corrente limita sua força.<sup>(1,2)</sup> Estas restrições, denominadas gargalos, definem o fluxo do sistema produtivo, por serem limitantes de capacidade, e são os principais condicionantes dos estoques.<sup>(1,3)</sup> Alterar uma parte de um sistema afeta seu desempenho local, porém, aumentar a capacidade de um gargalo aumenta o desempenho do sistema como um todo. Por isso, identificar e tratar os gargalos de um sistema pode levar a um considerável aumento de ganho de produção.<sup>(4)</sup> Além de identificar limitações ao aumento de produção, o sistema de análise dinâmica do processo é útil para mapear os principais pontos de perdas do processo fazendo com que a produção real chegue cada vez mais perto da produção planejada.<sup>(5)</sup>

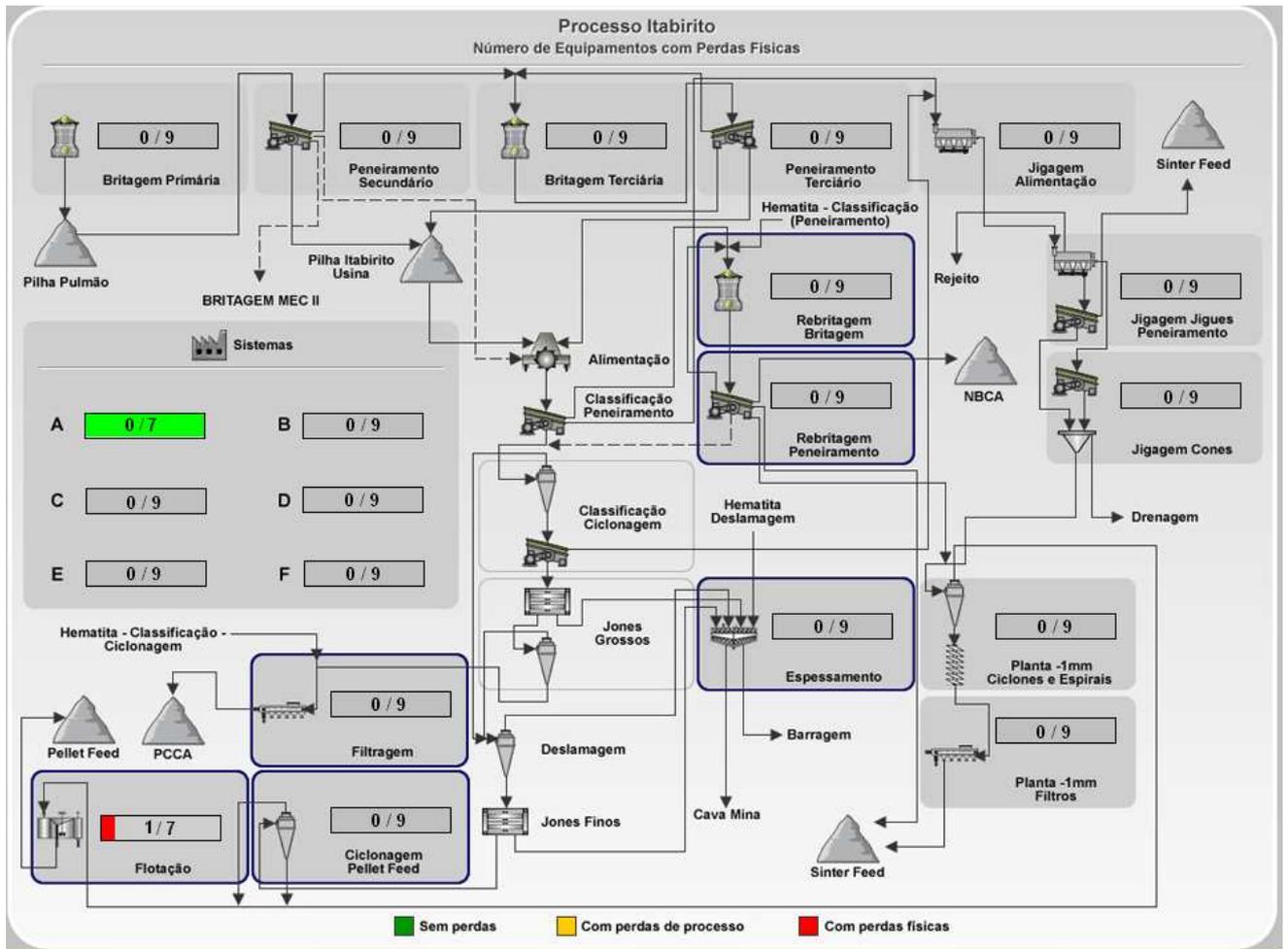
## **2 ABORDAGEM PROPOSTA**

Para identificar as restrições em uma unidade de beneficiamento de minério de ferro, foi desenvolvida uma aplicação construída sobre a plataforma de um sistema PIMS.

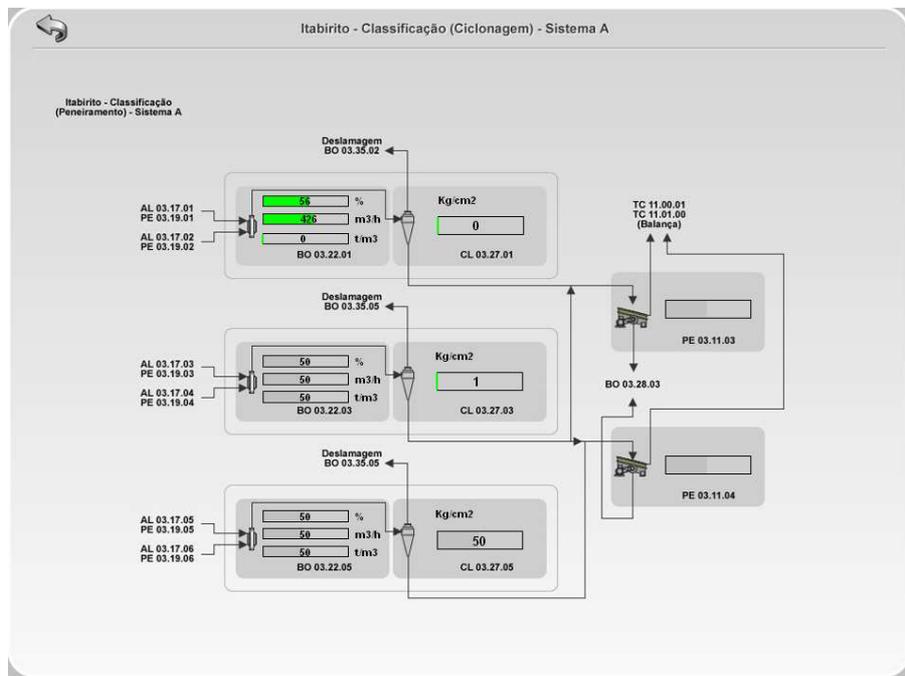
A aplicação exibe de forma gráfica as operações e equipamentos do beneficiamento, e usa barras para indicar quais estão funcionando como um gargalo para o processo. A solução proposta faz o mapeamento dos gargalos em dois diferentes níveis: Operações Unitárias e Equipamentos. Devido à diferente natureza de operações unitárias e equipamentos, a forma de exibição, o conceito e os critérios de identificação de gargalos foram definidos separadamente para cada nível.

A Figura 1 mostra um exemplo de como as informações de gargalo são exibidas para o nível de Operações Unitárias, e a Figura 2 mostra um exemplo de como as informações são exibidas pelo sistema para o nível de equipamentos.

Os tópicos seguintes deste trabalho detalham como o sistema trabalha os dados do processo para exibir informações que permitem à operação identificar e atuar nos gargalos do processo.



**Figura 1** – Identificação de gargalos de operações unitárias.



### 3 CRITÉRIOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE GARGALOS

#### 3.1 Nível de Operações Unitárias

As perdas físicas foram apontadas como o principal fator para a diminuição da produção. Por exemplo, uma caixa de bomba que está vazando por mais de 5 minutos pode representar uma perda de aproximadamente 4 toneladas de minério. Portanto, nesse nível, as operações unitárias são consideradas como gargalo quando pelo menos um de seus equipamentos estiver perdendo material.

Outro conceito que foi identificado como limitador da produção é a perda de processo. Perda de processo é caracterizada por qualquer equipamento que esteja funcionando fora dos seus limites. Um equipamento fora da faixa significa perda de eficiência ou subutilização. Por exemplo, uma peneira que foi projetada para receber 100 ton/h não irá conseguir separar o material se estiver recebendo o dobro de sua capacidade. No entanto, se ela estiver recebendo apenas 10 ton/h significa que a produção das operações anteriores poderia ser aumentada.

Portanto, para o nível de operações unitárias foram definidos três estados principais: perdas físicas, perdas de processo e sem perdas.

No estado de perdas físicas, o sistema mostra uma barra vermelha e graduada de acordo com número de equipamentos que apresentam perdas. Por exemplo, se uma caixa de bomba estiver transbordando em uma operação que possui sete caixas, um sétimo da barra ficará preenchida com a cor vermelha, como pode ser visualizado na Figura 3. O mostrador da barra mostra o número de equipamentos com perdas, e o número de equipamentos totais.



**Figura 3 – Perdas físicas.**

Para os estados de “perdas de processo” e “sem perdas” o número mostrado na barra sempre será zero.

No estado de “perdas de processo” a barra fica amarela e totalmente preenchida. Conforme mencionado anteriormente, a operação apresenta perda de processo quando pelo menos um de seus equipamentos estiver funcionando fora dos seus limites de eficiência. Quando uma operação unitária estiver neste estado, o operador deverá identificar qual equipamento está trabalhando fora da faixa e tomar as ações para corrigir o problema. A barra no estado de perdas de processo pode ser visualizada na Figura 4.



**Figura 4 – Perdas de processo.**

O terceiro estado das operações unitárias é a situação sem perdas. Nesse caso, o mostrador analógico fica verde e a barra totalmente preenchida. Quando uma operação unitária está neste estado, isto não significa que o sistema está na capacidade máxima, mas tão somente que seus equipamentos não estão perdendo material nem trabalhando fora da sua faixa de eficiência, significando, portanto, que a operação está funcionando de acordo com a produção planejada ou esperada.

Figura 5 – Sem perdas.

### 3.2 Nível de Equipamentos

Cada tipo de equipamento tem função específica no processo e, portanto, diferentes sintomas indicam que se atingiu o limite de capacidade.

Neste trabalho, o primeiro passo foi definir de forma teórica como identificar estas situações para cada categoria de equipamento.

Em seguida, estudando-se as medições existentes, foram definidas alternativas de cálculos com as grandezas disponíveis que possibilitassem inferir as situações de limitação de capacidade.

#### 3.2.1 Critérios teóricos

Foram descritos os critérios ideais para identificação de gargalos por tipo de equipamento. Para a maioria desses critérios não existem meios de medição em campo, e por isso a denominação **teóricos**. A **Tabela 1** mostra as condições teóricas que foram consideradas para identificar a situação de equipamento funcionando em gargalo.

Tabela 1 – Critérios teóricos

Equipamento	Condição de Gargalo
Alimentador	Velocidade de alimentação. Pode ser utilizada adicionalmente a corrente do motor. Estará em gargalo se a velocidade e/ou corrente for maior que o valor máximo estipulado.
Britador	Para britagem primária, a fila de caminhões para descarregar é um indício de que o mesmo está em gargalo. Se a pilha de estoque, antes da britagem secundária estiver com tendência de alta é forte indício que britador está em gargalo. Também pode-se utilizar a corrente conforme explicado para o alimentador.
Peneira	Quantidade excessiva de finos na saída de grossos. Também pode-se utilizar a corrente acima de determinado valor.
Conjunto Peneira-Britador	O volume de carga circulante (ton/h) é um importante indicador da eficiência do conjunto. Se o volume estiver acima do especificado, tudo indica que o sistema está sendo gargalo
Correia transportadora	Velocidade ou corrente do motor. Se o valor máximo for atingido por determinado período a mesma estará em gargalo.
Ciclone	Vazão de entrada fora do especificado, alto teor de ferro no rejeito ou alto teor de contaminante no concentrado. Estas situações indicam que o ciclone está operando de forma inadequada.
Jones de Finos	Vazão e teor de Fe de entrada fora do especificado, alto teor de ferro no rejeito ou alto teor de contaminante no concentrado.
Jones de Grossos	Vazão e teor de Fe de entrada fora do especificado, alto teor de ferro no rejeito ou alto teor de contaminante no concentrado.
Jigagem	Vazão e teor de Fe de entrada fora do especificado, alto teor de ferro no rejeito ou alto teor de contaminante no concentrado.
Espessamento	Vazão de entrada fora do especificado e quantidade de sólido no overflow
Flotação	Vazão mássica de entrada (Fe + contaminante) fora do especificado, alto teor de Fe no rejeito e alto teor de contaminante no concentrado. Nível de espuma, vazão de amido e vazão de amina fora do especificado.
Filtragem	Vazão de entrada fora do especificado e percentual de umidade no produto

Os critérios utilizados para as medições existentes na planta foram denominados de critérios **adotados no sistema**. A **Erro! Fonte de referência não encontrada**. contém estes critérios com as principais medições levantadas para cada tipo de equipamento e uma breve descrição da escolha de seus limites para inferir condições de gargalo.

### 3.2.2 Critérios adotados no sistema

Foram mapeados todos os equipamentos e todas as medições disponíveis de cada equipamento. De posse dessa massa de dados foram definidos os limites em que cada equipamento funciona na sua eficiência máxima.

Considerando que cada equipamento poderá ter mais de uma medição, o equipamento será considerado como em Gargalo se pelo uma de suas medições estiver fora dos limites de eficiência. Na Figura 6 pode se visualizar a monitoração de um equipamento.

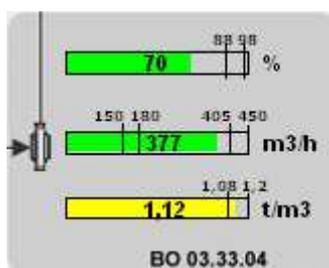


Figura 6 – Medições de um equipamento.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada**. mostra as principais medições levantadas para cada tipo de equipamento e uma breve descrição das condições adotadas para identificação de gargalos.

**Tabela 2** - Critérios utilizados pelo sistema para identificação de gargalos

Equipamento	Medições Disponíveis	Condição de Gargalo
Alimentador	Velocidade (rpm)	Defini-se valor mínimo ou máximo ou ambos (faixa) e tempo de permanência. O equipamento estará em gargalo se ficar na faixa de valor durante o período especificado.
Alimentador	Taxa(ton/h)	Defini-se valor mínimo ou máximo ou ambos (faixa) e tempo de permanência. O equipamento estará em gargalo se ficar na faixa de valor durante o período especificado.
Alimentador	% Nível Silo	Defini-se valor mínimo ou máximo e tempo de permanência. O equipamento estará em gargalo se ficar na faixa de valor durante o período especificado.
Alimentador	Corrente (A)	Defini-se valor máximo e tempo de permanência. O equipamento estará em gargalo se ficar acima desse valor durante o período especificado.
Bomba	Nível da caixa	Defini-se valor mínimo ou máximo ou ambos (faixa) e tempo de permanência. O equipamento estará em gargalo se ficar na faixa de valor durante o período especificado.

**Tabela 2 - Critérios utilizados pelo sistema para identificação de gargalos (cont.)**

Equipamento	Medições Disponíveis	Condição de Gargalo
Bomba	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Defini-se valor mínimo ou máximo ou ambos (faixa) e tempo de permanência. O equipamento estará em gargalo se ficar na faixa de valor durante o período especificado.
Bomba	Densidade (t/m <sup>3</sup> )	Defini-se valor mínimo ou máximo ou ambos (faixa) e tempo de permanência. O equipamento estará em gargalo se ficar na faixa de valor durante o período especificado.
Britador	Corrente do motor (A)	Defini-se valor mínimo ou máximo ou ambos (faixa) e tempo de permanência. O equipamento estará em gargalo se ficar na faixa de valor durante o período especificado.
Ciclone	Pressão (kg/cm <sup>2</sup> )	Pressão acima de determinado limite indica sobrecarga. Pressão abaixo de determinado limite indica funcionamento não apropriado.
Correia Transportadora	Taxa de alimentação (ton/h)	Defini-se valor mínimo ou máximo ou ambos (faixa) e tempo de permanência. O equipamento estará em gargalo se ficar na faixa de valor durante o período especificado.
Correia Transportadora	Corrente do motor (A)	Defini-se máximo e tempo de permanência. O equipamento estará em gargalo se ficar na faixa de valor durante o período especificado
Peneira	Taxa de alimentação (ton/h)	Defini-se valor mínimo ou máximo ou ambos (faixa) e tempo de permanência. O equipamento estará em gargalo se ficar na faixa de valor durante o período especificado
Peneira	Corrente (A)	Defini-se máximo e tempo de permanência. O equipamento estará em gargalo se ficar na faixa de valor durante o período especificado
Peneira	Nível do Silo	O Nível do Silo não pode ser inferior a um determinado número para que as peneiras não trabalhem a uma taxa menor do que a projetada.
Jones Finos	Taxa de alimentação (ton/h)	Alimentação de entrada (toh/h), normalmente medido na vazão da bomba
Jones Grossos	Taxa de alimentação (ton/h)	Alimentação de entrada (toh/h), normalmente medido na vazão da bomba
Células de Flotação	Taxa de alimentação (ton/h)	Alimentação de entrada (toh/h), normalmente medido na vazão da bomba
Células de Flotação	Análise em laboratório	Não foram definidos limites para as células de flotação. Devem ser monitoradas as bombas que alimentam os Jones.

Com base nos conceitos descritos na Tabela 2, foram definidas as barras para os operadores identificarem cada estado.

Para as medições que possuem limite superior e inferior, foi criada uma barra com os quatro limites. Sendo que os limites das extremidades quando ultrapassados significam que o equipamento está em gargalo. Já os limites internos representam os estados de alerta. As barras que representam os estados descritos na tabela acima podem ser visualizadas na Figura 7. A unidade da medição também ficará sempre evidenciada em cima ou ao lado da barra.

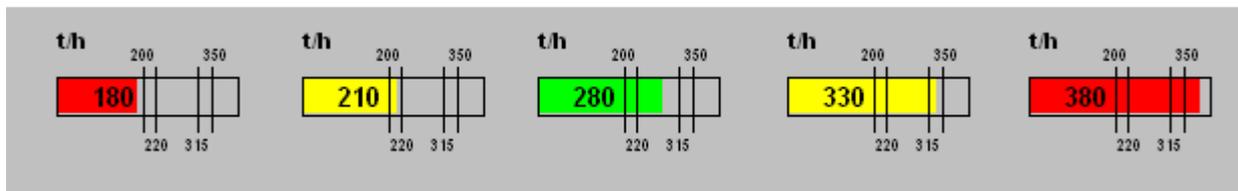


Figura 7 – Barras de status de equipamentos.

Para as medições que possuem apenas limite superior, a barra possuirá apenas dois indicadores de limite e apenas irá representar três estados, como pode ser visualizado na Figura 8.

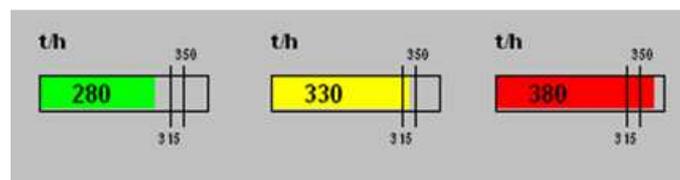


Figura 8 – Barras do nível de equipamentos (2).

### 3.3 Critérios Temporais

Para que o sistema alerte o operador que um equipamento está em gargalo, não é suficiente que a condição de gargalo definida no projeto seja atingida. É preciso adicionalmente que a condição se mantenha por um determinado tempo. Com isto evitam-se alertas desnecessários em flutuações típicas do processo.

## 4 AÇÕES A SEREM TOMADAS PARA TRATAR PROBLEMAS OPERACIONAIS

Além de mostrar a informação de gargalos para o operador, o sistema tem como diretriz gerar subsídios para ações que realmente melhorem o processo. Portanto, ao clicar em um equipamento em gargalo, o sistema exibe uma tela com as ações sugeridas para esse equipamento e as variáveis controladas, conforme a Figura 9.

As ações exibidas dependem do estado de cada equipamento. Por exemplo, quando um equipamento está em gargalo são exibidas as ações que o operador deverá tomar para que o equipamento saia do estado de gargalo. No entanto, quando o equipamento estiver no estado de eficiência (verde) serão exibidas ações para maximizar a produção como aumentar a taxa de alimentação para que o equipamento chegue próximo ao limite superior, por exemplo.

Bomba BO 03.22.01 - Funcionamento com Restrição			
Váriaveis Controladas	Valor Atual	Limite Inferior	Limite Superior
Nível da Caixa de Bomba	100	80	98
Vazão	489	450	500
Densidade	1,30	1,28	1,42

Ações:			
1 - Diminuir alimentação do AL 03.17.01			
2 - Diminuir alimentação do AL 03.17.02			

Figura 9 – Tela de ações.

## 5 CONCLUSÕES

A aplicação permite que informações em tempo real da planta sejam exibidas num formato apropriado para a identificação de gargalos e a tomada de ações corretivas. Por exemplo, uma perda que indique transbordamento de material pode ser evitada tomando-se uma ação de modo a diminuir a carga a qual o equipamento seria submetido impedindo que houvesse perda de material. O registro das ações corretivas apropriadas em cada situação traz como benefício disseminar melhores práticas operacionais entre as equipes.

Além disso, o registro histórico das ocorrências de gargalo permite uma base para análise do processo como um todo. Quando uma perda acontece um número significativo de vezes, deve-se avaliar a necessidade de investimento em aumento da capacidade ou alteração no processo para que os fluxos do beneficiamento fiquem equilibrados.

## REFERÊNCIAS

- 1 ALMEIDA, L. R. **Uma abordagem para aplicação de projetos Seis Sigma baseada na Teoria das Restrições**. In: ENEGEP, XXVI, 10, 2006, Fortaleza. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2006\\_TR450310\\_8580.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2006_TR450310_8580.pdf)> Acesso em: 30 abr. 2009.
- 2 COOK, D. (1994). “**A simulation comparison of traditional, JIT, and TOC manufacturing systems in a flow shop with bottlenecks**”, *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 35, No. 1, pp. 73-8.
- 3 GOLDRATT, E.; FOX, J. (1997). **A Meta: Um processo de aprimoramento contínuo**. São Paulo, Educator.
- 4 NOREEN, E.; SMITH, D.; MACKAY, J.T. (1996). **A Teoria das Restrições e suas implicações na Contabilidade Gerencial**. São Paulo. Educator.
- 5 MCMULLEN, T.B. (1998). **Introduction to the Theory of Constraints (TOC) Management System**, St. Lucie Press, Boca Raton, FL.