

# APLICAÇÃO DE ESTUDO DE BENEFÍCIOS DE CONTROLE AVANÇADO MULTIVARIÁVEL PARA REFINARIAS DE ALUMINA<sup>1</sup>

Rafael Lopes<sup>2</sup>  
Leonardo Vieira<sup>3</sup>  
Roberto Seno Junior<sup>4</sup>  
André Arantes<sup>5</sup>  
Marco Moura<sup>5</sup>

## Resumo

Esse artigo apresenta uma metodologia para cálculo de benefícios em potencial da aplicação de Controle de Processos Avançados. É citado um exemplo no qual a metodologia é aplicada a um trem de digestores de alumina. Essa metodologia encontra-se baseada em modelos estatísticos, utilizando o histórico da planta e determinando um “Caso-Base”, posteriormente usando esse *Base Case* para calcular os benefícios resultantes na aplicação do processo de controle avançado. Esse método fornece estimativas realistas desses benefícios tendo em vista todos os efeitos primários e secundários do processo.

**Palavras-chave:** Digestão; Alumina; Honeywell; RMPCT.

## MULTIVARIABLE ADVANCED CONTROL BENEFITS STUDY APPLICATION TO ALUMINA REFINERIES

## Abstract

This paper presents a methodology to calculate the potential benefits of applying Advanced Process Control. An example is given where the methodology is applied to a series of alumina digesters. The methodology is based on statistic methods, using historical plant data and then setting a Bases Case, to later be used to calculate benefits resulting from the application of advanced process control. This method provides realistic estimates of benefits taking into account all the primary and secondary effects on the process.

**Key words:** Digestion; Alumina; Honeywell; RMPCT.

<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> Líder do Centro de Excelência em Soluções Avançadas - Honeywell do Brasil

<sup>3</sup> Líder de Soluções Avançadas - Honeywell do Brasil

<sup>4</sup> Coordenador de Processo – Companhia Brasileira de Alumínio

<sup>5</sup> Técnico de Processo – Companhia Brasileira de Alumínio

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Overview

Substancial retorno para plantas de alumina pode ser obtido através da utilização de novas tecnologias de controle, que utilizam a infraestrutura existente e requerem uma mínima equipe de suporte. A globalização de mercados e a consolidação de produtores criou um ambiente mais competitivo, que leva à necessidade de otimização de produção e performance nas plantas de recuperação de alumina. Dessa forma, o controle avançado multivariável está tornando-se umas das principais ferramentas em termos de retorno de capital investido. Este artigo discutirá a metodologia de estudo de benefícios da aplicação de controle avançado para o processo de digestão de alumina.<sup>(1)</sup>

O método para estudo de benefícios baseia-se em levar a planta às suas restrições operacionais. Tal metodologia é baseada em procedimentos homologados de tratamento de dados e cálculo de variabilidade e sua redução. A redução da variabilidade é então utilizada para calcular um novo patamar para uma variável-chave da planta. Deve-se tomar o cuidado de identificar restrições de processo não óbvias na análise primária dos dados, particularmente se quaisquer afirmativas são realizadas a respeito de linearidades ou condições de restrições para a variável-chave. No caso específico da digestão de alumina, pode-se considerar uma redução da variabilidade da relação A/TC (alumina – teor cáustico), podendo-se posteriormente aumentá-la e reduzir a utilização de licor por tonelada de alumina produzida.

O desafio atual para qualquer unidade de obtenção de alumina é minimizar o custo de produção por tonelada de produto, consistentemente com considerações ambientais e de segurança. Isto é traduzido na maximização da produção de alumina, em conjunto com minimização (ou racionalização) da utilização de energia.<sup>(1)</sup>

Neste cenário, o processo de digestão é um dos que apresenta o maior potencial para a aplicação de controle preditivo multivariável. Isto se deve a seu maior potencial de obtenção de lucros, com a implementação de controle avançado. Além disto, a digestão é considerada pela maioria das unidades como uma unidade-chave para produção e também é a que oferece melhores condições para a obtenção de uma boa modelagem para APC.<sup>(1)</sup>

## 1.2 Descrição do Processo

Uma refinaria de alumina é projetada para extrair, utilizando uma solução de soda cáustica, o aluminato de sódio da bauxita, um minério constituído basicamente de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), titânio ( $\text{TiO}_2$ ). O processo de refino envolve uma etapa de moagem, onde são adicionados leite de cal e uma solução de soda cáustica, formando uma pasta chamada de polpa de bauxita. A polpa é digerida em uma cadeia de digestores, onde ocorre a reação de extração da alumina, a temperatura de 1.450.

A alumina em solução é filtrada e transferida para o circuito de precipitação e separado em espessadores e filtros e este produto é o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de alumínio), ou alumina.

A digestão foi projetada para atingir os dois principais objetivos:

- extração de Alumina Gibsítica da Bauxita, utilizando soda cáustica (hot spent alumina liquor); e
- remoção da sílica dissolvida do licor que sai dos digestores, para assegurar que os níveis de hidrato no produto estejam dentro da especificação requerida.

Os digestores fornecem meios para a mistura do licor gasto aquecido (soda cáustica com alumina) e a polpa de bauxita, mantendo-se a digestão em um valor-alvo de temperatura. Esta temperatura é mantida em um espaço de tempo suficiente para dissolver a alumina da bauxita e levar a sílica dissolvida a um nível tolerável, através de reação de dessilicação.

A digestão de bauxita para extrair alumina acontece em um trem de digestores verticais, arranjados em série. O trem de digestão possui um conjunto de digestores pequenos e outro de digestores maiores. Os digestores pequenos, equipados com agitadores, realizam a dissolução da alumina e os digestores maiores, sem agitação, fornecem o tempo de residência necessário para assegurar a dessilicação.

### 1.3 MPC (*Model Predictive Control*)

MPC (*model predictive control*) é muitas vezes definido como uma família integrada de controladores, onde aplica-se (ou obtém-se) um modelo explícito e separadamente identificável das interações entre as mais diversas variáveis. A capacidade principal desta matriz de modelos é prever as respostas do processo com relação a mudanças futuras em variáveis manipuláveis e a possíveis distúrbios. Na prática, o MPC é caracterizado por sua habilidade em lidar com restrições tanto nas variáveis manipuladas, quanto nas controladas. Técnicas de MPC fornecem a única metodologia para lidar com restrições de uma forma sistemática, durante o design e a implementação do controlador. Além disso, a otimização se dá através de uma função objetivo, que considera os parâmetros econômicos (preços) de cada variável. A otimização se dá através da minimização (ou maximização, dependendo da abordagem de cada algoritmo) da função objetivo.<sup>(4)</sup>

As variáveis em um processo que devem ser mantidas dentro de um range operacional ou em um valor-alvo são chamadas variáveis controladas (CVs). Para manter os valores das CVs dentro do objetivo definido pelo controlador, a aplicação ajusta o valor das variáveis manipuladas (MVs). Em um controle “single output-single input”, há apenas uma CV (a entrada do controlador ou o valor do processo) e uma MV (saída do controlador – abertura de válvula). Com a técnica de MPC, há múltiplas MVs e múltiplas CVs. O controlador observa todas as variáveis e as toma juntas em um mesmo sistema. Com isto, a tecnologia considera as interações entre todas as MVs, CVs e DVs (variáveis distúrbio) simultaneamente.<sup>(4)</sup>

### 1.4 RMPCT (*Robust Model predictive Control Technology*)

A tecnologia RMPCT representa um avanço das técnicas tradicionais de implementação de controle avançado (MPC). Assim como as anteriores, esta tecnologia modela o processo, realiza as previsões necessárias e utiliza movimentos de controle multivariável para otimizar o processo, mantendo as variáveis dentro dos limites operacionais e respeitando as restrições apresentadas. O ganho em performance e robustez deve-se a uma técnica chamada *funneling*, que faz com que os distúrbios e erros de previsão inerentes ao controlador sejam considerados em

seu plano de movimentos futuros. Isto possibilita que a aplicação lide de maneira mais suave e eficiente com erros de modelagem (inversão de ganhos, colinearidades, ganhos menores ou maiores do que os reais, erros na dinâmica).<sup>(5)</sup>

Esta tecnologia tem ainda como características básicas: mínimos movimentos nas MVs, trajetórias ótimas de resposta são calculadas em cada execução, sintonia baseada nas variáveis controladas, e não nas variáveis manipuladas.

### 1.5 Benefícios

Os benefícios da aplicação de tais estratégias avançadas de controle resultam em uma significativa redução da variabilidade das CVs (variáveis controladas). É um *benchmarking* aceitável pela indústria - utilizando-se como medição o desvio padrão - que 50% de redução na variabilidade das variáveis-chave pode ser obtida com a implementação de controle avançado.<sup>(6)</sup> A Figura 1 mostra esse conceito.

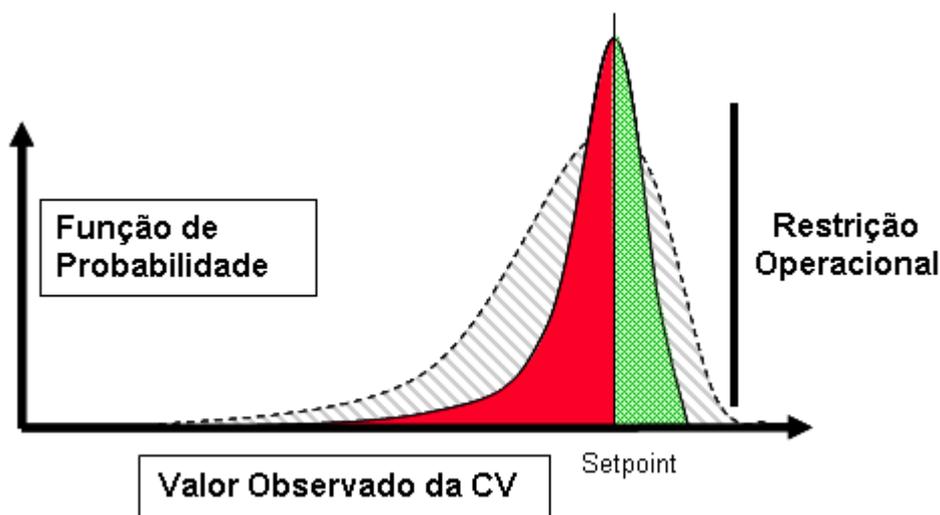
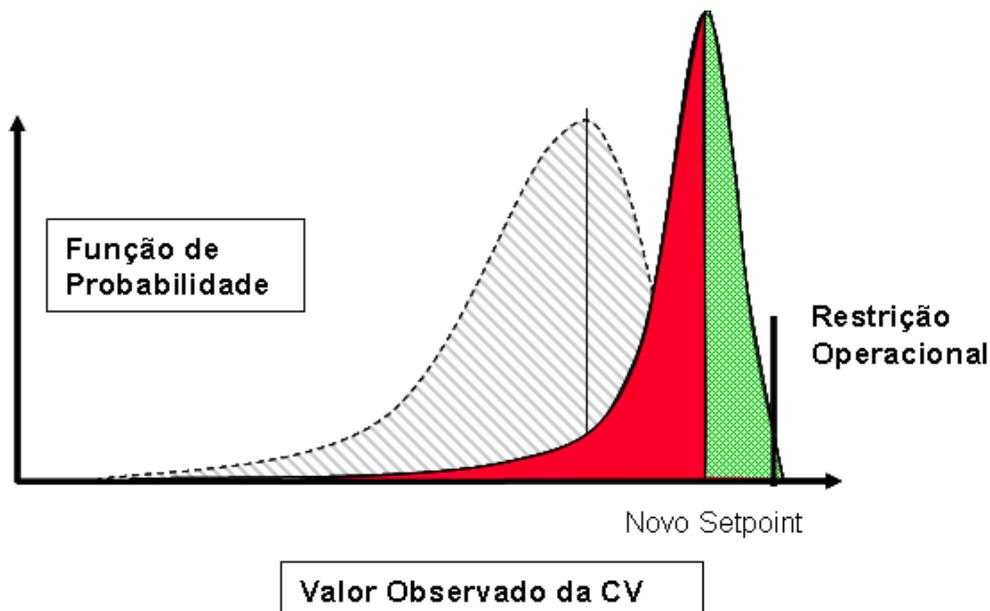


Figura 1 – Redução de variabilidade operacional.

Nessa figura, a área hachurada representa a função de probabilidade para o valor da CV, apenas sob controle regulatório. A área colorida representa a função de probabilidade da CV, sob controle avançado multivariável. Uma vez que a variabilidade (ou desvio padrão) é reduzido, quando implementado o APC, a probabilidade de exceder as restrições operacionais é reduzida. Se é permitido manter a mesma probabilidade de exceder as restrições operacionais, assim como era antes do APC, pode-se mover o setpoint até a restrição operacional e produzir benefícios tangíveis. Tal fato é ilustrado na Figura 2.<sup>(7)</sup>



**Figura 2** – Novo setpoint, após redução da variabilidade.

Nessa figura, é ilustrado que, com o APC, pode-se mover a CV para mais próximo da restrição operacional, enquanto mantém-se a mesma probabilidade de excedê-la. Esse, geralmente, é um ponto de operação mais lucrativo. Por exemplo, se a CV que está sendo controlada é relacionada à alimentação da planta, pode-se operar mais proximamente ao limite de capacidade de alimentação da planta. Conseqüentemente, pode-se produzir mais produto, o que na maioria dos casos resulta em maior lucratividade.

Um dos grandes desafios que os engenheiros encontram é a decisão de aplicar ou não APC a seus processos e, caso se deseje aplicar, qual seria uma estimativa realista de benefícios a serem atingidos. Isso é especialmente importante no ambiente econômico vivido atualmente, onde gastos devem ser sempre justificados sob o ponto de vista financeiro.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Resumo

Em suma, o cálculo de benefícios consiste nas seguintes partes:

- obter dados;
- “limpar” dados;
- filtrar “outliers” de eventos não-controlados;
- analisar restrições para o cálculo de disponibilidade;
- calcular o desvio padrão, para um potencial incremento na média; e
- calcular a nova média e benefícios, com o APC.

### 2.2 Obtenção de Dados

Cálculos de benefícios de APC são geralmente realizados, baseados em dados histórico de processo. Dados instantâneos são preferidos, uma vez que os mesmos capturam melhor a variabilidade, especialmente para taxas mais longas de

amostra (como, por exemplo, amostras diárias), nas quais a média do intervalo irá resultar em resultados mais conservadores de benefícios. De uma maneira geral, a taxa de amostragem de dados deve ser relacionada com a constante de tempo do APC. Tipicamente, 1 hora é o recomendado. Para processos com dinâmica mais veloz, dados de amostragem com frequência de 15 – 30 minutos e períodos de 3 a 6 meses são recomendados.

Com relação ao período de tempo, 1 a 2 anos de dados oferecem uma panorâmica confortável a respeito de toda a planta. Em um período como esse, podem-se observar as mudanças sazonais (como, por exemplo, mudanças com relação a estações do ano mais quentes ou mais frias).

### 2.3 Limpeza dos Dados

Esse passo limpa erros óbvios, relacionados a paradas de planta ou de equipamentos, que irão impactar nos cálculos de desvio padrão, utilizados para mover os parâmetros mais importantes do processo. Para facilitar o processo, informações de paradas de equipamentos e da planta, bem como um software para plotagem de gráficos de dados são de suma importância. O processo é sumamente manual e depende da capacidade analítica de quem realiza o estudo. Por outro lado, dados como os descritos são facilmente identificados, como a Figura 3 demonstra.

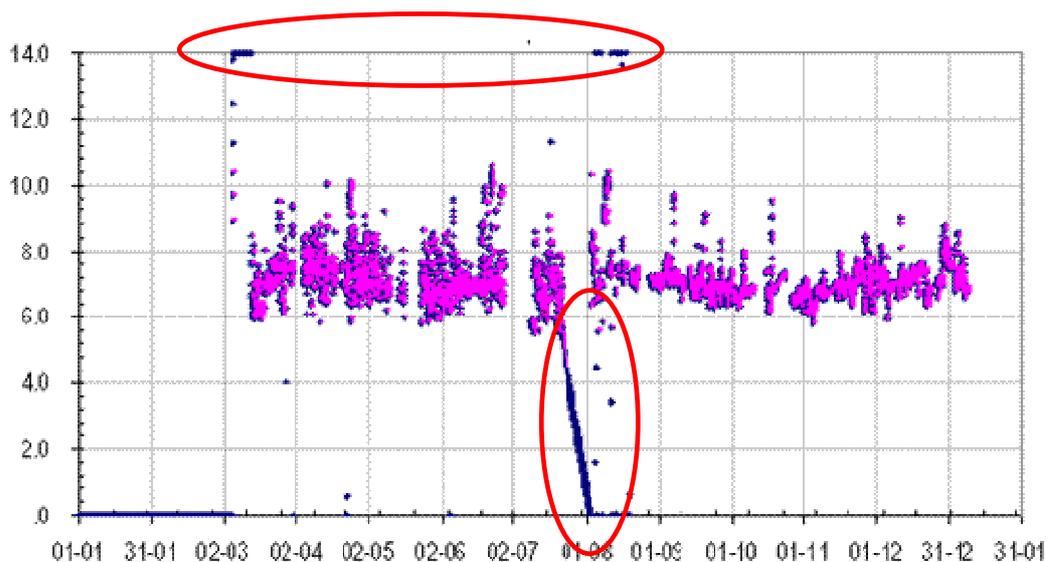


Figura 3 – “Limpeza” de dados de Ph.

### 2.4 Filtrar *Outliers* de Eventos Não-Controlados

Uma prática frequentemente utilizada para estudos de controle avançado é remover os dados fora da faixa normal do conjunto de dados. Presume-se que tais dados devem ser retirados, uma vez que os mesmos não poderão ser impactados por nenhuma implementação de controle avançado. Como exemplo, no processo de alumina, uma quantidade grande de licor dentro do digestor, sem quase nenhuma bauxita, pode gerar dados anormais da relação A/TC. A idéia principal é saber de forma precisa a variabilidade do processo, em um período de tempo relacionado com o período de tempo de controle, sem incluir variações que não são relacionadas com o controle.

A remoção dos *outliers* é recomendada, para evitar erros de cálculos, devido a variações de médio-prazo nos dados, tais como mudanças sazonais (efeitos de chuva, seca, temperatura ambiente e mudanças normais e sazonais na qualidade da matéria-prima).

Para remoção dos *outliers*, recomenda-se o cálculo da média dos dados não tratados, bem como o cálculo do desvio padrão ( $\sigma$ ). Isso é realizado em qualquer software estatístico, ou qualquer software de cálculos em planilhas, com funções estatísticas básicas. Em uma distribuição normal, 1 sigma possui 68% dos dados 2 sigma possuem 95% dos dados. Para estudos mais conservadores, aplica-se o filtro de 2 sigma e conservam-se 68% dos dados. Um cálculo preciso do desvio padrão será apresentado no item 2.6. A figura a seguir mostra, em lilás, os dados conservados após o filtro.

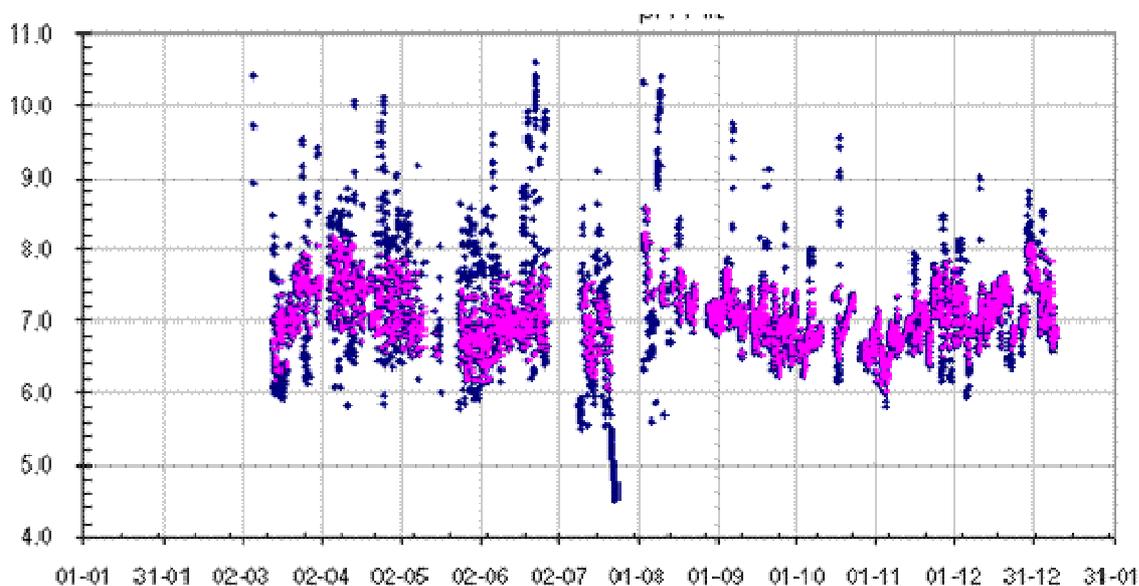


Figura 4 – Dados filtrados.

## 2.5 Análise das Restrições e Cálculo da Disponibilidade

Esse é um passo opcional, para cálculos mais conservadores. A idéia é calcular a disponibilidade do APC para incrementar o controle de processos, baseado na percentagem de tempo que o mesmo pode manter-se funcionando. Os cálculos preliminares determinaram o desvio padrão e a média. Esse passo calcula a parcela de tempo que o APC pode funcionar. Outra vez, é um passo totalmente manual e deve ser realizado juntamente aos engenheiros de processo/produção e aos operadores de planta.

Algumas ferramentas importantes para esse passo:

- *Registros Operacionais ou Tempo de Parada* – Os dados de registro são utilizados para eliminar os dados, baseados em períodos determinados de parada ou manutenção; e
- *Conhecimento das Restrições de Processo* – Devem-se filtrar os momentos em que o APC não seria efetivo em controlar o processo. No caso da planta de alumina, uma dessas restrições seria a falta de licor ou bauxita para alimentar a unidade.

Com isso, faz-se o cálculo do tempo em que a planta encontrava-se parada e divide-se o mesmo pelo tempo total do período estudado. A porcentagem encontrada é determinada como a disponibilidade total da planta. Por exemplo, se o número total de amostras (a ser contado pelo número de linhas no software de cálculo em planilhas) é 8760 e os dados remanescentes após a identificação das paradas e restrições é 7450, a disponibilidade é de 7450/8760, ou 85% do tempo.

## 2.6 Cálculo do Novo Desvio Padrão

Após a retirada dos *outliers* e cálculo da disponibilidade da planta, faz-se o cálculo do desvio padrão dos dados obtidos. O desvio padrão é a medida mais comum da dispersão estatística. Define-se como a raiz quadrada da variância. É definido desta forma, de maneira a fornecer uma medida da dispersão que:

- seja um número não negativo; e
- use as mesmas unidades de medida que os dados obtidos.

Se uma variável aleatória  $X$  toma os valores  $x_1, \dots, x_n$ , então o desvio padrão para esta amostra de  $N$  números pode ser computado como segue. Primeiro, a média de  $X$ ,  $\bar{x}$  é definida como:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Dessa forma, o desvio padrão é calculado como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

## 2.7 Cálculo da nova média com o APC

O cálculo da nova média é relativamente simples e considera o padrão de experiência em implementações de APC para cada tipo de processo/unidade/equipamento. A equação geral para cálculo do movimento na média seria:

Movimento na Média = (Redução de Variabilidade com o APC) \* (Disponibilidade) \* (Variabilidade) \* (Confiabilidade nos Dados de Planta)

Onde:

- Redução da Variabilidade com o APC = considera o padrão de experiência em implementações de APC para cada tipo de processo/unidade/equipamento. Entretanto, um valor universalmente utilizado é 50%. Quando o estudo é feito essencialmente com dados de laboratório, 33% é uma medição mais conservadora.
- Disponibilidade: Determinada pelo passo 2.5.
- Variabilidade: Desvio Padrão dos dados. Determinada no passo 2.6.
- Confiança nos dados da planta: Opcional. É utilizado quando os operadores/engenheiros desejam inserir o conhecimento da planta,

informando se os dados apresentados apresentam algum nível específico de confiabilidade.

A nova média para a variável chave a ser calculada será a soma (ou subtração, nos casos em que a redução da média é a variável de otimização econômica) da média com o movimento calculado pela fórmula apresentada anteriormente.

### 3 RESULTADOS

Os benefícios para a unidade de digestão de alumina foram calculados, através da comparação da produtividade de cada linha, como a diferença entre a relação A/TC do tanque de armazenagem de licor e a relação A/TC da saída da digestão. Os benefícios são derivados do melhor controle da relação A/TC de saída da digestão e seu consequente aumento. Tal aumento resultará em um incremento da produtividade da unidade, por unidade de vazão de licor. A análise será demonstrada para uma linha de digestão apenas.

Os dois primeiros gráficos a seguir mostram os dados brutos e os dados após a “limpeza” dos outliers óbvios. O terceiro gráfico mostra os dados de relação de saída da digestão, após o filtro de 2 sigma para acima e abaixo da média. O número de pontos que permaneceram após o filtro permitiram o cálculo da disponibilidade da planta. O fator de disponibilidade encontrado para a linha em questão foi de **75,3%**.

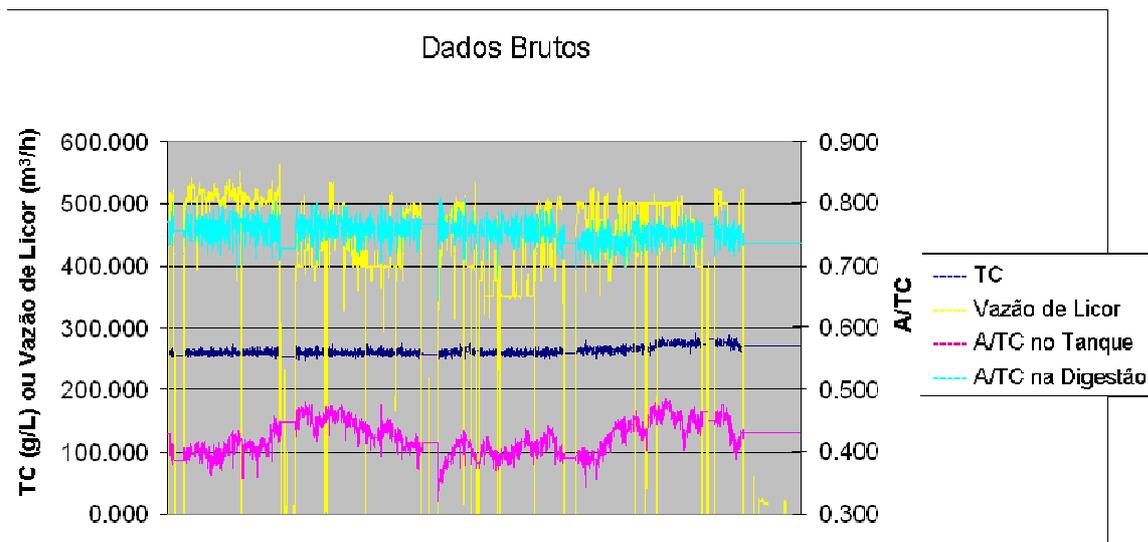


Figura 4 – Dados brutos.

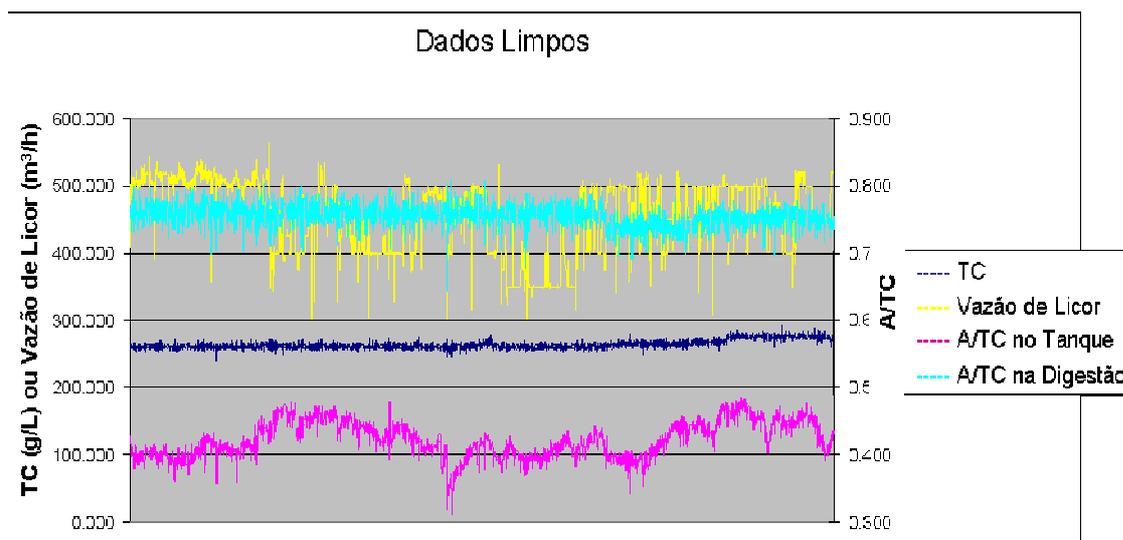


Figura 5 – Dados limpos.

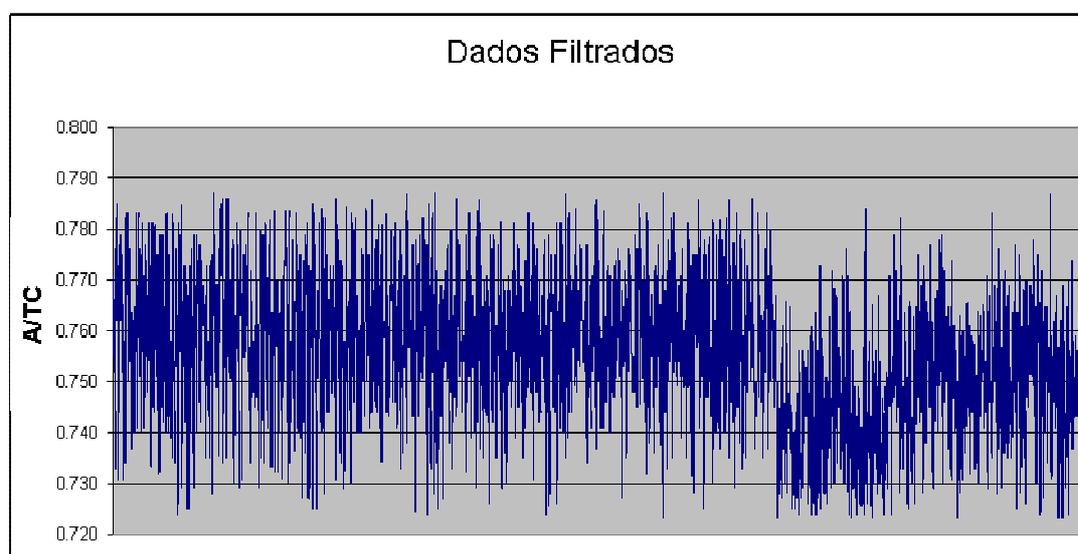


Figura 6 – Dados filtrados.

A tabela demonstrada a seguir lista a variabilidade da razão A/TC de saída da digestão e a potencial melhora. A análise também mostra que a média da relação do tanque de estocagem de licor foi 0,422, após o tratamento adequado dos dados. A diferença entre as razões do tanque de estocagem de licor e da saída da digestão, multiplicadas pela vazão de licor são uma medição da produtividade da digestão. Sendo assim, qualquer aumento da diferença entre as relações A/TC anteriormente listadas representam um aumento na produção de hidrato de alumínio por unidade de vazão de licor.

Tabela 1 – Relação A/TC de Saída da Digestão, Antes e Depois do APC

	Média	Desvio Padrão	Nova Média	Fator de Redução de Licor
Relação A/TC da Saída da Digestão	0.756	.014	~.763	2.0 %

O fator de redução de licor e de aumento da média da relação A/TC é baseado na redução de 50% do desvio padrão dessa relação. Na tabela a seguir,

isso é chamado “relação incrementada”. Todos os cálculos consideram a disponibilidade da linha (75,3%). Para melhor dimensionar a economia, considerou-se a redução de licor como economia de energia, uma vez que utiliza-se aproximadamente 0,115 ton de vapor por tonelada de licor inserida na unidade. A tabela a seguir resume o resultado dos cálculos.

**Tabela 2 – Dados de ganho**

Média Incrementada	<b>0,763</b>	Relação A/TC de Saída da Digestão
Diferença Atual Entre as Relações	0,333	A/TC Saída – A/TC Tanque de Estocagem
Diferença Incrementada	0,34	Aumento de 0,07
Fator de Redução de Licor	98%	Conforme Tabela Anterior
Vazão de Licor Antiga	457	Dados de Processo
Vazão de Licor Após APC	448	Após a Redução
Economia de Licor	9.207	m <sup>3</sup> /hora
Economia de Licor	80.652	m <sup>3</sup> /ano, considerando-se os 75,3% de disponibilidade
Economia de Vapor	9.274.930	(kg/ano)
Economia de Gás Natural	648.596	(14.2 kg de vapor = 1m <sup>3</sup> de gás natural)
Economia Anualizada de Gás Natural	518.877	R\$/Ano (1 m <sup>3</sup> GN = R\$ 0,8)

#### 4 CONCLUSÃO

Nesse artigo, uma metodologia foi apresentada para estimar benefícios da aplicação de um controle multivariável de processos a refinarias de alumina. Além disso, um exemplo real foi apresentado, com dados de uma refinaria de alumina localizada no Brasil. Com base nos valores observados pôde-se mensurar a capacidade de ganhos no processo, com a implementação da solução apresentada.

Desta forma, pode-se concluir que a execução de estudo de benefícios para refinarias de alumina é de suma importância, pois aponta importantes alternativas de ganho para as companhias. Além disso, tais estudos são a base da implementação da solução de APC e guiam a fornecedora e a cliente pelo mais indicado caminho a ser seguido.

#### REFERÊNCIAS

- 1 Loyola, L. M., " Avaliação do Desempenho da Mini Planta-Piloto de Flotação da CVRD: Estudo Comparativo com Plantas Industriais", Defesa de Tese de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, Brasil (2006)
- 2 PERES, A.E.C. Flotação. Apostila do Curso de Flotação – Pós Graduação UFMG, 2004.

- 3 Cortés, G., Verdugo, M., Fuenzalida, R., Cerda, J., Cubillos, E., "Rougher Flotation Multivariable Predictive Control; Concentrator A-1 Division Codelco Norte", PROCEMIN, Santiago, Chile (2008).
- 4 Garcia, C.E., D.M. Prett and M. Morari (1989). "Model predictive control: Theory and practice - a survey". *Automatica* 25(3), 335–348.
- 5 Qin, J., Badgwell, T., "An Overview of Industrial Model Predictive Control Technology". Department of Chemical Engineering, Rice University, USA (1997)
- 6 G.D. MARTIN, L.E. TURPIN, R.R. CLINE, Estimating Control Function Benefits, *Hydrocarbon Processing*, June 1991, page 58 – 59
- 7 CRAW, I.A., Simulação de aplicações de controle avançado em processos de decantação em série: Cálculo de benefícios, Iron Making Seminar, ABM, São Luís, Maranhão, Brasil, 2008.
- 8 Lopes, R., Charr, J. , "Alunorte Digestion Phase I Detail Design V2.1", Belém, Brasil (2007).