

Implementação de controle avançado e otimização no processo de caustificação

Implementation of advanced control and optimization in the causticizing process

Autores/Authors*: Alexandre Augusto de Andrade¹
Claudia Regina de Freitas Sartori¹
Vilson Luiz da Costa¹
Marcos Freitas²
Thiago Rothen²
José Vicente Hallak d'Angelo³

Palavras-chave: Caustificação, controle avançado de processo

RESUMO

Este trabalho busca apresentar a implementação de um sistema de controle avançado e de otimização na planta de caustificação da unidade de Monte Alegre da Klabin S.A. Será apresentada uma breve introdução sobre Controle Avançado de Processos, uma ferramenta que vem sendo utilizada nos projetos da área de Pesquisa e Desenvolvimento da Klabin Monte Alegre, com o intuito de auxiliar o controle e a otimização de processos complexos e altamente não lineares, característicos da indústria de celulose e papel. Este trabalho apresenta os passos da implementação de uma ferramenta de controle multivariado preditivo e adaptativo mediante adoção de malhas MIMOs e MISOs. As melhorias, em todo o processo, são detalhadas através dos dados de qualidade do sistema de caustificação, tais como álcali ativo e eficiência da caustificação. Os ganhos com a introdução dessa ferramenta, que chegaram a mais de 50% na redução da variabilidade do processo, podem ser facilmente observados no controle de temperatura e no álcali ativo que são consequência da melhoria na eficiência da caustificação de 69% para 78%.

Keywords: *Causticizing, advanced process control*

ABSTRACT

This work aims to present the implementation of a system of advanced control and optimization in the causticizing plant of Monte Alegre Unit of Klabin S.A. A brief introduction to Advanced Process Control, a tool being used in the projects of the Research and Development area of Klabin Monte Alegre, with the purpose of assisting in the control and optimization of complex and highly nonlinear processes, characteristic of the pulp and paper industry, will be presented. This work presents the steps in implementing a tool of multivariate predictive and adaptive control with the implementation of MIMO and MISO loops. The improvements in the whole process are detailed through the quality data of the causticizing process, such as active alkali and causticizing efficiency. The gains from the introduction of this tool surpassed a 50% reduction in the variability of the process, which can be easily observed in the temperature control and active alkali, resulting from the increase in causticizing efficiency from 69% to 78%.

*Referências dos Autores / Authors' references:

- 1 - Klabin S.A. – Telêmaco Borba – PR – Brasil
Klabin S.A. – Telêmaco Borba – PR - Brazil
- 2 - Andritz Automation – Curitiba – PR – Brasil
Andritz Automation – Curitiba – PR – Brazil
- 3 - DESQ/FEQ/Unicamp – Campinas – SP – Brasil
DESQ/FEQ/Unicamp – Campinas – SP - Brazil

INTRODUÇÃO

Justificativa

A automação é uma área do conhecimento humano já muito antiga. Dispositivos para operar automaticamente determinados processos, principalmente nas aplicações agrícolas, já existiam antes mesmo da Era Cristã. O controle manual, primeira forma de controle utilizada pelo homem e ainda presente em muitos processos, requer a necessidade de um operador humano, que deve conhecer o sistema e ter razoável experiência e habilidade.

Com o crescente aumento no grau de sofisticação das atividades humanas, surgiu o interesse e a necessidade de automatizar ou semi-automatizar determinados processos, e isso foi possível a partir do desenvolvimento científico e tecnológico que, dentre os diversos conhecimentos, nos trouxe as teorias clássicas de controle. Entretanto, somente após o desenvolvimento das teorias de controle, tratamento da informação e disponibilidade dos controladores é que a automação toma o caráter atual (Costa, 2005).

A teoria clássica de controle por realimentação tem sido a base para o desenvolvimento de sistemas simples de controle automático. As principais razões para a boa aceitação na indústria devem-se à simplicidade de implementação, baixo custo e o princípio matemático de fácil entendimento por operadores (engenharia de controle não complexa). Apesar dessas vantagens, as técnicas clássicas nem sempre conseguem contornar situações adversas encontradas na prática, como não linearidade do processo, suas variações paramétricas ou mudanças ambientais, que comprometem a estabilidade da malha de controle (Clarke, 1994). A magnitude das perturbações de uma planta pode variar ao longo do seu funcionamento. O resultado pode ser um sistema altamente complexo e com comportamento não linear (Santos, 1998).

Uma das soluções para contornar estes problemas é a utilização de estratégias de controle avançado. Segundo Vieira (2003), o controle avançado executa simultaneamente todas as ações de controle da unidade atuando nos *set-points* das variáveis de operação e, por sua vez, tem como *set-points* outras variáveis que, normalmente, são representativas do desempenho geral da unidade em questão. Essa ferramenta vê a unidade como um todo, e isso é que a difere dos sistemas de controle comumente utilizados nos processos industriais que buscam manter os valores desejados das variáveis pontuais.

A **Figura 1** mostra a pirâmide dos vários níveis de controle existentes. Como podemos notar, o sistema de controle avançado está em um nível superior aos sistemas convencionais de controle comumente usados.

A tecnologia de controle avançado permite que o

INTRODUCTION

Justification

Automation is already a very ancient area of the human knowledge. Devices to automatically operate certain processes, especially in agricultural applications, already existed even before the Christian era. The manual control, the first form of control used by mankind and still present in many processes, requires a human operator, who must know the system and have reasonable experience and skill.

The increasing degree of complexity and sophistication of the human activities led to the interest and need to automatize or semiautomatize certain processes, which became possible as a result of the scientific and technological development, bringing, among the various spheres of knowledge, the classical theories of control. Nevertheless, it was not before the development of the theories of control, treatment of the information, and availability of the controllers that automation assumed its present character (Costa, 2005).

The classical theory of control by feedback has been the basis for the development of simple automatic control systems. The main reasons for the good acceptance in the industry are the simplicity of implementation, low cost, and the mathematical principle of easy understanding by operators (not complex control engineering). Despite these advantages, not always the classical techniques contrive to bypass adverse situations encountered in practice, such as nonlinearity of the process, its parametric variations, or environmental changes, which jeopardize the stability of the control loop (Clarke, 1994). The magnitude of the disturbances of a plant may vary over the course of its operation, the result of which may be a highly complex system with nonlinear behaviour (Santos, 1998).

One of the solutions to bypass these problems is the use of advanced control strategies. According to Vieira (2003), the advanced control carries out simultaneously all control actions of the unit acting on the set-points of the operating variables, having for its part, as set-points, other variables that are normally representative of the general performance of that unit. This tool considers the unit as a whole, and this is what distinguishes it from the control systems commonly used in industrial processes, which try to keep the desired values of the spot variables.

Figure 1 shows the pyramid of the various existing control levels. As it can be observed, the advanced control system occupies a level which is higher than those corresponding to the conventional, commonly used control systems.

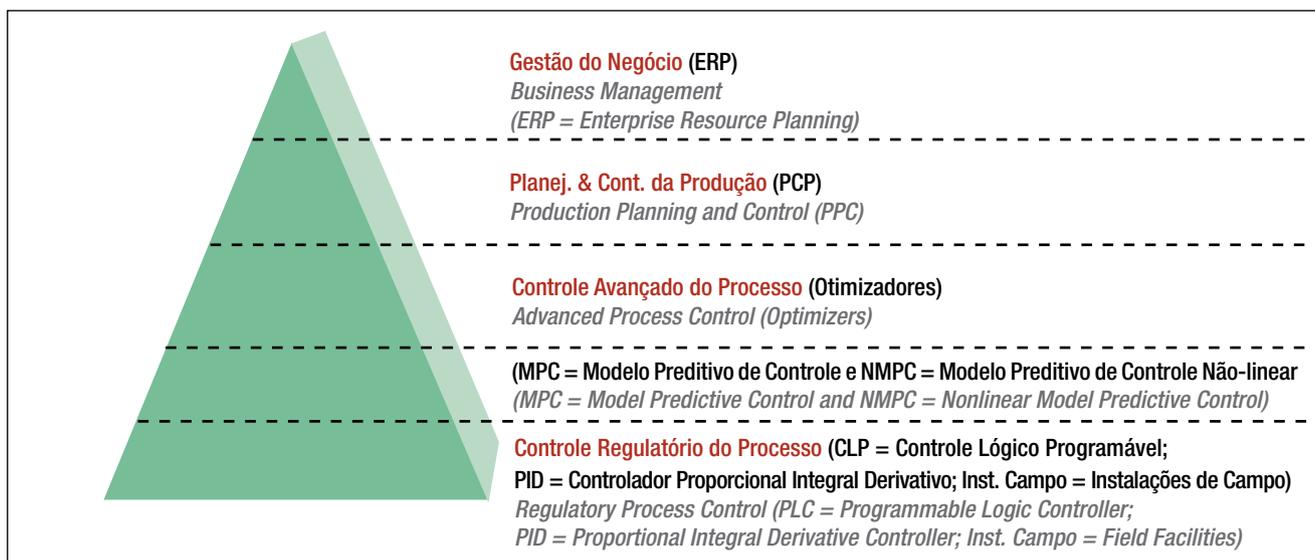


Figura 1. Diferentes níveis de controle / **Figure 1.** Different control levels

processo trabalhe em múltiplas condições operacionais, como, por exemplo: condição de máxima economia de energia em determinadas situações (tal como escassez de matéria-prima) e condição de produção máxima para situações de excesso de material a ser processado. Essa tecnologia funciona como um controle mestre de todo o processo, definindo os melhores *set-points* para cada regime de operação. Os benefícios da implementação são numerosos:

- Objetivo mais específico para as características da planta;
- Aumenta a produtividade e a qualidade dos produtos;
- Respeita os limites operacionais, de modo a prolongar a vida útil dos equipamentos;
- Garante o melhor aproveitamento da mão-de-obra e das matérias-primas;
- Reduz o custo variável da produção.

A habilidade para preservar o desempenho do sistema de controle avançado em malha fechada a partir da identificação das variações na dinâmica da planta e do meio por um algoritmo on-line, bem como uma sintonização adequada para o controlador em diferentes pontos de operação, motiva um crescente número de aplicações de algoritmos de controle avançado nos mais diversos pontos de uma fábrica de celulose e papel. Nas últimas três décadas, várias técnicas de controle avançado têm sido propostas na literatura de controle de processos para substituição dos métodos de controle clássicos convencionais na indústria, isso em virtude dos desenvolvimentos promovidos nas teorias da estabilidade e controle modernos. Segundo Vieira (2003), a nível global a indústria de papel e celulose está começando a experimentar os benefícios dos desenvolvimentos recentes na área de

The advanced process control technology allows the process to work under multiple operating conditions, as e.g.: maximum energy-saving condition in certain situations (such as raw material shortage) and maximum production condition in situations of excess of material to be processed. This technology functions as a master control of the whole process, defining the best set-points for each operating regime. Many are the benefits derived from the implementation:

- *More specific objective for the characteristics of the plant;*
- *Increase in productivity and product quality;*
- *Respect for the operating limits, so as to extend the service life of the equipment;*
- *Guarantee of the best utilization of labour and raw materials;*
- *Reduction in the variable production cost.*

The ability to preserve the performance of the advanced control system in closed loop from the identification of the variations in the dynamics of the plant and the environment by an online algorithm, as well as a suitable tuning for the controller at different operating points, motivate an increasing number of applications of advanced control algorithms at the most different points of a pulp and paper mill. During the past three decades, several advanced control techniques have been proposed in the literature on process control, in order to replace the conventional classical control methods in the industry, due to the developments made in the theories of stability and modern control. According to Vieira (2003), at global level the pulp and paper industry is beginning to reap the benefits of the recent developments in the area of predictive process control. In 1999, according to the five main

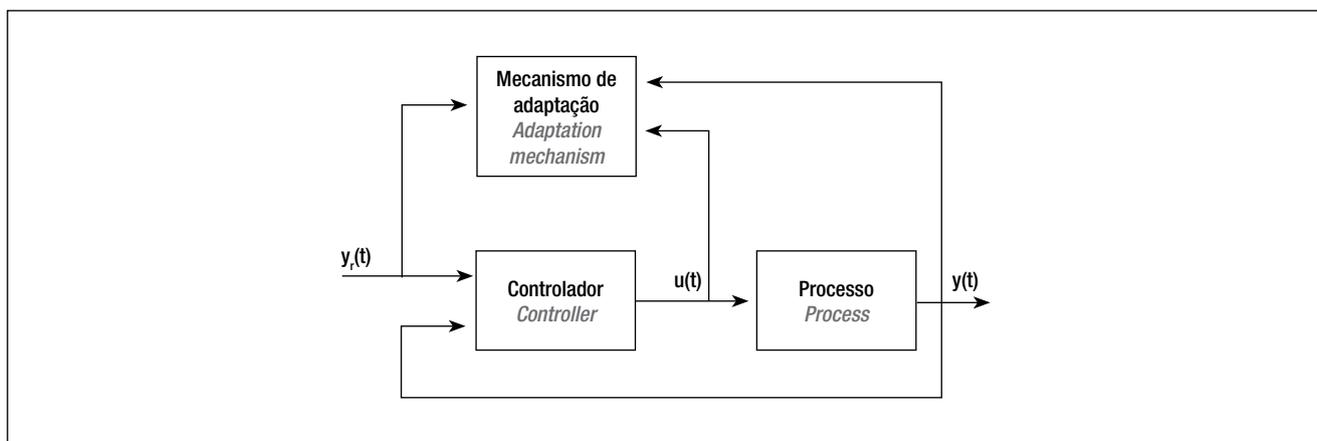


Figura 2. Diagrama de um controlador adaptativo / **Figure 2.** Diagram of an adaptive controller

controle preditivo de processo. Em 1999, segundo as cinco principais empresas fornecedoras, algo em torno de 4500 aplicações desta tecnologia foram realizadas, sendo 43% relacionadas a refinarias e apenas 1,5% à indústria de papel e celulose.

Controladores preditivos (**Figura 2**) têm sido vistos como uma das mais importantes classes de algoritmos para controle avançado de processos, especialmente o controle de processos químicos (Zhang e Xi, 1997). Controladores preditivos podem atuar eficientemente sobre sistemas instáveis em malha aberta e sistemas de fase não mínima, apresentando características desejáveis de estabilidade mesmo em sistemas não lineares (Sorensen *et al.*, 1999).

Geralmente, os modelos utilizados como preditores são obtidos a partir de identificação *black-box*, os quais não apresentam modelos fenomenológicos. No contexto industrial, a identificação desses modelos envolve um alto custo em virtude de fatores como o tempo necessário para identificação e a dificuldade de se efetuar testes em unidades industriais. Sendo assim, é cada vez maior a busca por estratégias de identificação que permitam contornar as dificuldades acima apresentadas, e ao mesmo tempo aprimorar a aplicação de novas tecnologias.

Para contornar as dificuldades descritas, modelos dinâmicos desempenham uma importante função no desenvolvimento de tecnologias que empregam controle preditivo adaptativo, porém são poucas as aplicações desses modelos em processos fabris. Tendo em vista as condições de operação do processo da Klabin Monte Alegre e o processo em estudo, definiu-se trabalhar com controle adaptativo dotado de uma DMT (do Inglês *Dynamic Modeling Tecnology*). DMT é um método de função de transferência desenvolvido pela Universidade da British Columbia. Este modelo diminui o tempo de esforço para se obter um modelo correto do processo. A DMT é hábil em construir automaticamente o modelo da função de transferência usando uma serie de

supplying companies, something like 4,500 applications of this technology have been made, 43% of which related to refineries and just 1.5% connected with the pulp and paper industry.

Predictive controllers (Figure 2) have been considered to be one of the most important classes of algorithms for advanced process control, especially chemical process control (Zhang and Xi, 1997). Predictive controllers can act efficiently on unstable open loop systems and nonminimum phase systems, presenting desirable characteristics of stability even in nonlinear systems (Sorensen et al., 1999).

In general, models used as predictors are obtained from black box identification and do not present any phenomenological models. In the industrial context, the identification of these models involves a high cost, due to such factors as the time required for identification and difficulty in running tests in industrial units. Thus, the search for identification strategies which will allow bypassing the above-mentioned difficulties and at the same time improving the application of new technologies is more and more meticulous.

To obviate the above-described difficulties, dynamic models fulfil an important function in the development of technologies using adaptive predictive control, but the applications of these models to manufacturing processes are just a few. Considering the operating conditions of Klabin Monte Alegre process and the process studied, it was decided to work with an adaptive control with a DMT (Dynamic Modeling Technology). DMT is a transfer function method developed by the University of British Columbia. This model reduces the time of effort to obtain a correct model of the process. DMT is skillful at automatically constructing the model of the transfer function by us-

funções ortogonais de Laguerre (Kovac *et al.*, 1999). A função de Laguerre é definida como:

$$l_i(t) = \sqrt{2p} \frac{e^{pt}}{(i-1)!} \frac{d^{i-1}}{dt^{i-1}} \left[t^{i-1} e^{-2pt} \right] \quad (1)$$

Onde : $i = 1$ até N
 $p =$ Polinômio de Laguerre
 $t =$ Tempo

Uma função de transferência pode ser aproximada pela soma de cada função da série, onde cada função é multiplicada por um coeficiente apropriado ou um peso.

$$g(t) = \sum_{i=0}^{i=\infty} c_i l_i(t) \quad (2)$$

Onde : $g^{(i)}$ = Função de transferência do processo
 $c = i^{th}$ Coeficiente de Laguerre

A opção para a implementação desta técnica de controle avançado se deu através da análise das condições de operação do processo de caustificação da Klabin Monte Alegre (descritas a seguir). Essas condições operacionais que motivaram o trabalho foram:

- Controle tipicamente em manual devido à dinâmica lenta do processo;
- Variações bruscas no processo, afetando a qualidade do licor branco;
- Adição excessiva de cal, gerando dificuldades na filtração e lavagem da lama;
- Processo instável;
- Variações de temperatura, afetando a eficiência da reação no apagador.

Objetivos do controle na caustificação da Klabin Monte Alegre

Este projeto visa controlar automaticamente o processo de caustificação, processo em que o licor verde proveniente da caldeira de recuperação segue para sua transformação em licor branco. Esse licor verde, que basicamente é uma solução de Na_2S e Na_2CO_3 , é encaminhado à caustificação e, num primeiro momento, estocado em um tanque ou filtrado para a retirada de impurezas, os chamados *dregs*, e é em seguida encaminhado ao apagador de cal, onde é adicionada a cal virgem (CaO), gerando-se as seguintes reações:

- 1) $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ e
- 2) $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow 2\text{NaOH} + \text{CaCO}_3$

Logo após esta reação, o licor é encaminhado a filtros

ing a series of orthogonal Laguerre functions (Kovac *et al.*, 1999). The Laguerre function is defined as:

$$l_i(t) = \sqrt{2p} \frac{e^{pt}}{(i-1)!} \frac{d^{i-1}}{dt^{i-1}} \left[t^{i-1} e^{-2pt} \right] \quad (1)$$

Where: $i = 1$ to N
 $p =$ Laguerre Polynomial
 $t =$ Time

A transfer function can be approximated by the addition of each function of the series, where each function is multiplied by an appropriate coefficient or a weight.

$$g(t) = \sum_{i=0}^{i=\infty} c_i l_i(t) \quad (2)$$

Where: $g^{(i)}$ = Transfer function of the process
 $c = i^{th}$ Laguerre Coefficient

The option for implementing this advanced control technique resulted from an analysis of the operating conditions of the causticizing process of Klabin Monte Alegre (described in the following). These operating conditions that motivated the work were as follows:

- Control typically in manual mode due to the slow dynamics of the process;
- Abrupt variations in the process, affecting white liquor quality;
- Excessive addition of lime, causing mud filtering and washing difficulties;
- Unstable process;
- Variations in temperature, affecting the efficiency of reaction in the slaker.

Objectives of control in Klabin Monte Alegre causticizing

This project aims to control automatically the causticizing process, in which the green liquor coming from the recovery boiler follows to its transformation into white liquor. This green liquor, which is basically a solution of Na_2S and Na_2CO_3 , is directed to causticizing and, at a first moment, stored in a tank or filtrate, in order to remove impurities from the liquor - the so-called *dregs* -, and thereafter it is sent to the slaker, where quicklime (CaO) is added thereto, after which the following reactions occur:

- 1) $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ and
- 2) $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow 2\text{NaOH} + \text{CaCO}_3$

Right after this reaction, this liquor flows to filters,

onde se separa o carbonato de cálcio, na forma de lama, e o licor branco forte, composto basicamente de Na_2S e NaOH , que será utilizado na etapa de digestão da madeira. A lama de carbonato de cálcio é enviada, então, ao forno de cal, onde ocorre a recuperação da cal, enquanto o licor branco segue para os digestores.

Esse controle se faz necessário visto que era operado um processo químico altamente instável, em modo manual, ou seja, totalmente dependente da experiência dos operadores. Com o auxílio da ferramenta de controle avançado tem-se como objetivo reduzir as variações bruscas ocorrentes no processo e, ao final, ter ganhos de eficiência de reação e, em consequência, aumento na qualidade do licor branco produzido.

Como objetivos específicos têm-se:

- Controlar automaticamente a temperatura do apagador através do controle de temperatura de entrada do licor verde, utilizando adição de cal como variável antecipativa;
- Controlar a condutividade e/ou álcali efetivo do licor branco através da adição de cal no apagador;
- Gerenciar os estoques e calcular *set-points* para o controle avançado através de uma ferramenta de gerenciamento e, assim, otimizar o processo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo descreve-se a metodologia utilizada no desenvolvimento do presente trabalho, sendo esta etapa dividida em: reconstituição das condições de base do sistema; configuração das malhas MISO de controle e, por fim, na configuração das malhas MIMO do sistema de gerenciamento.

Reconstituição das condições de base dos instrumentos de controle

O primeiro passo para uma boa ação de controle avançado é possuir confiabilidade no sistema, no controle regulatório do processo e em seus equipamentos, pois sem uma boa condição dos instrumentos e do sistema regulatório não será possível um controle de processo confiável.

Através de uma auditoria de todo o processo apresentado na **Figura 3**, notou-se a necessidade da troca dos condutivímetros (responsáveis pela medida indireta de álcalis nos licores), sua realocação em diferentes pontos do processo e restabelecer as condições operacionais do trocador de calor do licor verde que, como veremos a seguir, são de extrema importância para que os parâmetros de controle sejam devidamente sintonizados.

Descrição das estratégias de controle

Para o controle da caustificação foram adotadas duas estratégias de controle com múltiplas entradas e uma saída (MISO). Uma para o licor verde e outra para a condutividade

where the calcium carbonate, in the form of mud, is separated from the strong white liquor, basically composed of Na_2S and NaOH , which will be used in the wood digestion stage. Then the calcium carbonate mud is directed to the lime kiln for lime recovery, while the white liquor flows to the digesters.

This control is required due to the fact that a highly unstable chemical process was operated in manual mode, i.e. fully depending on the operators' experience. With the aid of the advanced control tool, the purpose is to reduce the sharp variations occurring in the process, and, at the end, to get gains in reaction efficiency, which will cause the quality of the white liquor produced to increase.

Specific goals are as follows:

- Automatic slaker temperature control through green liquor inlet temperature control, using addition of lime as anticipative variable;
- White liquor conductivity and/or effective alkali control by addition of lime to the slaker;
- Stock management and set-point calculation for the advanced control by means of a management tool, thus optimizing the process.

MATERIALS AND METHODS

This section describes the methodology used for developing this work, a step which was divided into: reconstitution of the basic conditions of the system; configuration of MISO control loops; and, last of all, configuration of MIMO loops of the management system.

Reconstitution of the base conditions of the control instruments

The first step towards a good advanced control action is to rely on the system, the regulatory process control, and its equipment, as without a good condition of both instruments and regulatory system a reliable process control will not be possible.

An audit of the whole process presented in **Figure 3** pointed to the need to change the conductivity analyzer (responsible for the indirect measurement of alkalis in the liquors) and to reallocate them at different points of the process, as well as to reestablish the operating conditions of the green liquor heat exchanger, which are extremely important for the control parameters to be duly tuned, as it will be seen in the following.

Description of the control strategies

Two control strategies with multiple inputs and one output (MISO) were adopted for the causticizing control, one of them for the green liquor and the other one for the conductivity of the system, and, later, the management

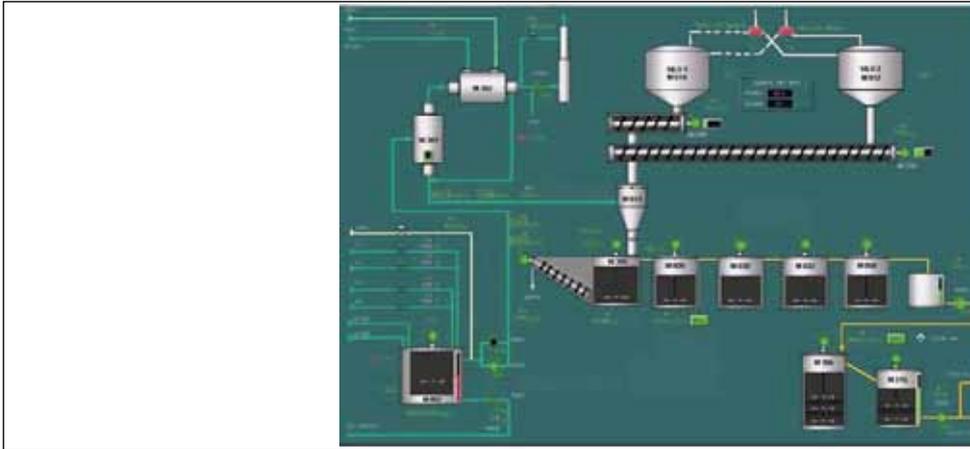


Figura 3. Tela principal de controle / Figure 3. Main control screen

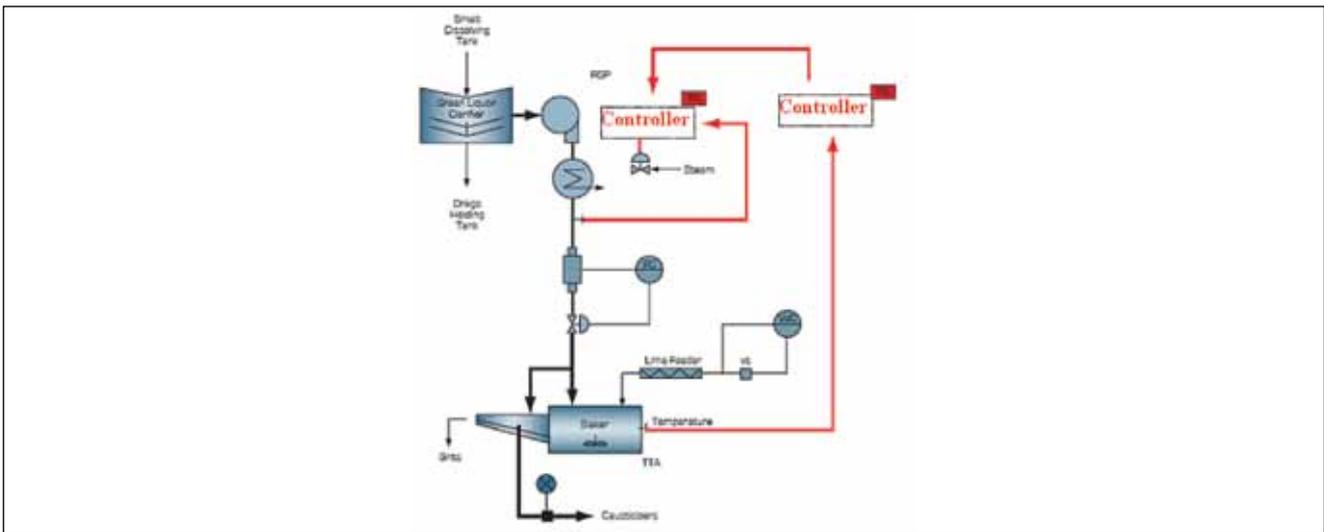


Figura 4. Estratégia de controle da temperatura/ Figure 4. Temperature control strategy

do sistema. Foi posteriormente elaborado o sistema de gerenciamento, que foi desenvolvido através de um modelo com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO).

Controle das temperaturas do licor verde e do slaker

A temperatura do licor verde é controlada através da estratégia demonstrada na **Figura 4**. O *set-point* da temperatura do licor é enviado pela saída de controle da malha da temperatura do *slaker*. O controle desta temperatura é antecipativo e conta com o fluxo de licor verde e a velocidade das roscas de adição de CaO no reator *slaker*.

Controle da condutividade

A condutividade no 1º e 5º reatores é controlada também por um sistema em cascata (**Figura 5**), com envio de *set-point* remoto de um controlador para o outro. No primeiro reator, a condutividade é mantida dentro dos limites através do controle de velocidade das roscas de adição de CaO no sistema. O *set-point* de controle do 1º reator é enviado pela saída de controle do 5º reator, ou seja, o sistema se ajusta conforme o resultado obtido no último estágio.

system was developed through a model with multiple inputs and multiple outputs (MIMO).

Green liquor and slaker temperature control

*The green liquor temperature is controlled through the strategy shown in **Figure 4**. The liquor temperature set-point is sent through the control output of the slaker temperature loop. The control of this temperature is anticipative and counts on the green liquor flow and the speed of the screws for adding lime to the slaker reactor.*

Conductivity control

*Conductivity in the 1st and 5th reactors is also controlled by a cascade system (**Figure 5**), where a remote set-point is sent from one controller to the other one. In the first reactor, conductivity is kept within limits through the speed control of the screws for adding CaO to the system. The control set-point of the 1st reactor is sent through the control output of the 5th reactor, i.e. the system adjusts itself according to the result obtained in the last stage.*

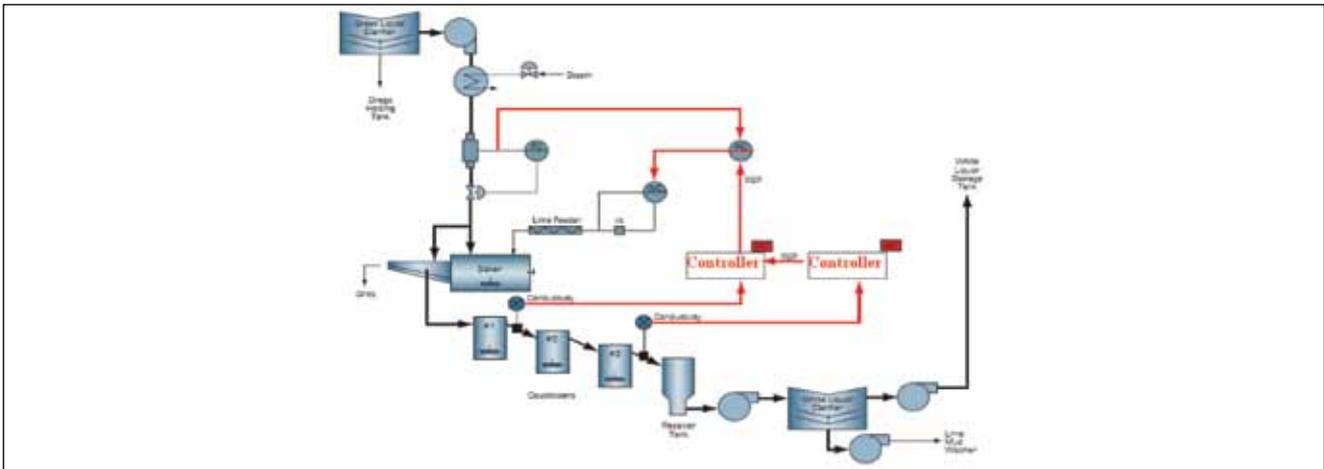


Figura 5. Estratégia de controle da condutividade / *Figure 5. Conductivity control strategy*

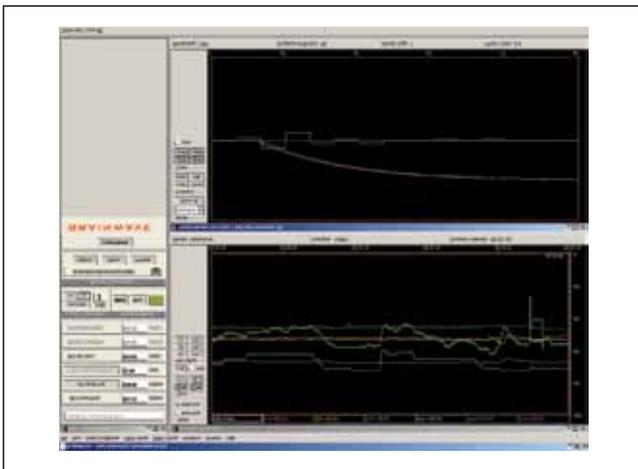


Figura 6. Tela principal do software de controle / *Figure 6. Main control software screen*

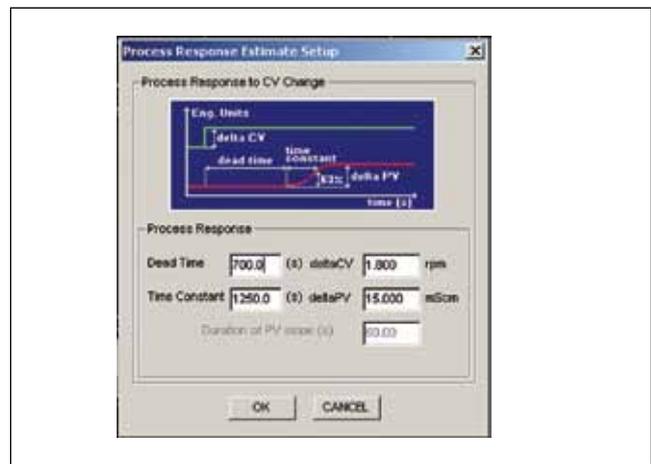


Figura 7. Pop-up de ajuste de parâmetros / *Figure 7. Parameter setting pop-up*

Malhas MISO

Para todo o processo, foram desenvolvidas 4 malhas de controle MISO, responsáveis por todo o controle do processo. Os passos para a configuração dessas malhas são apresentados a seguir:

A **Figura 6** mostra uma cópia da tela da malha de controle da temperatura do *slaker*. Os gráficos que podem ser vistos no canto superior direito da figura representam os dados do processo, dos quais são obtidos os parâmetros para a sintonia do controlador. A parte inferior direita da figura 6 mostra o modelo do processo baseado nos parâmetros ajustados e 15 funções de Laguerre, as quais são responsáveis pela modelagem do processo. Os parâmetros do controle, como ganho e tempo morto, são adicionados ao modelo através de telas como a apresentada na **Figura 7**.

Gerenciamento do controle

Para o gerenciamento de todas as 4 malhas de controle MISO foram configuradas duas (MIMO), que têm como objetivo determinar o ponto operacional ótimo utilizando,

MISO loops

Altogether, 4 MISO control loops were developed for the whole process, which are responsible for the whole process control. The steps towards configuration of these loops are presented in the following:

Figure 6 shows a copy of the slaker temperature control loop screen. The graphs that can be seen in the upper right-hand corner of the figure represent the process data, which the controller tuning parameters are obtained from. The lower right-hand part of Figure 6 shows the model of the process based on the adjusted parameters and 15 Laguerre functions, which are responsible for the modeling of the process. The control parameters, as gain and dead time, are added to the model through screens like that presented in **Figure 7**.

Control management

Two MIMO loops were configured for the management of all 4 MISO control loops, the purpose of which is to determine the optimum operating point, using as

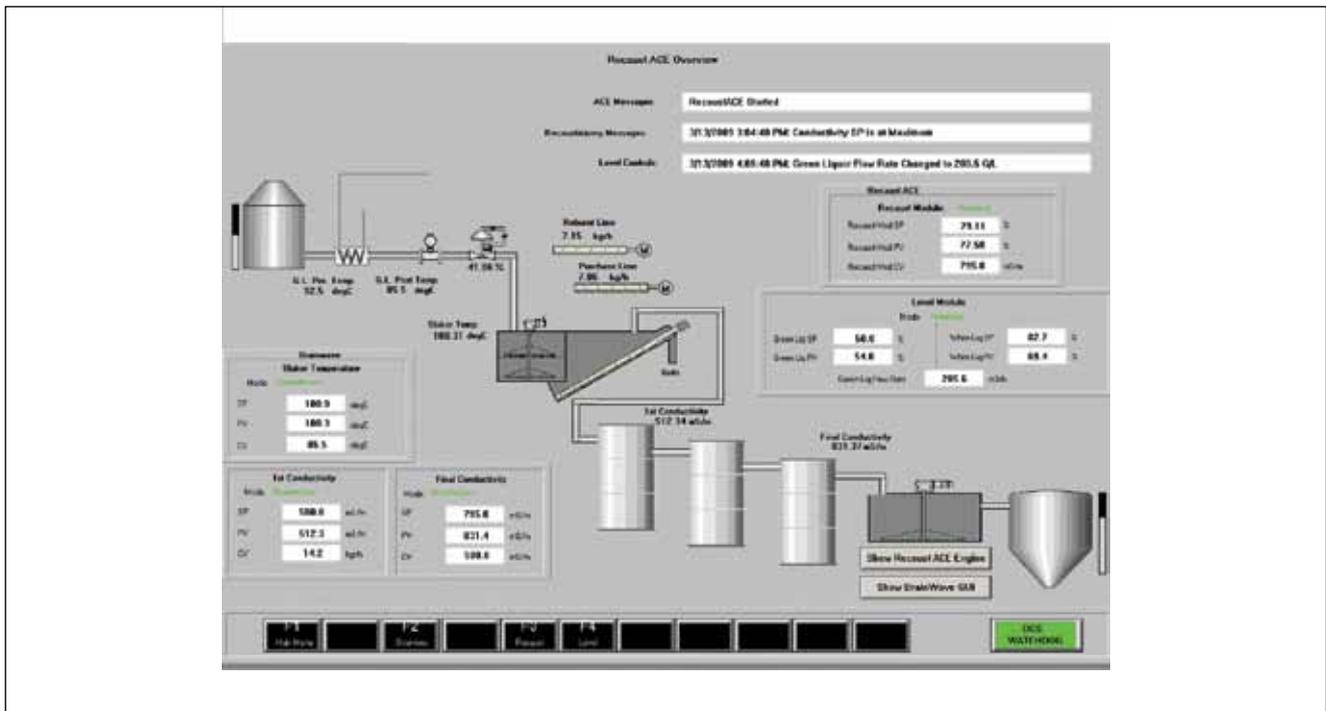


Figura 8. Controle supervísório / Figure 8. Supervisory control

como parâmetros de controle, dados laboratoriais como álcali total, eficiência e sulfidez (controle de caustificação), além de controlar os níveis dos tanques de licor branco por meio da vazão de licor verde, assim como a condutividade do último reator (controle de inventário).

Malhas MIMO - Controle supervísório

Para o gerenciamento e otimização do processo, o sistema de controle foi configurado com duas malhas de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (MIMO), cuja finalidade é controlar os níveis dos tanques de licor branco e licor verde a partir da vazão de licor verde no sistema, além de fazer correlações da qualidade do licor branco (através das análises laboratoriais) e, assim, enviar os *set-points* para a condutividade do 5º reator em busca da melhor eficiência da reação e controle dos álcalis do licor produzido. A Figura 8 demonstra a tela do controle supervísório.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, são apresentados os resultados e as discussões desses resultados, obtidos com a aplicação do sistema de controle avançado preditivo adaptativo multivariado. O sistema de controle aqui descrito foi implementado em 19/08/2008, e a partir deste período já se conseguiu notar, como mostra a Figura 9, boa estabilidade da temperatura do licor verde, temperatura, essa, imprescindível à reação de caustificação.

control parameters laboratory data as total alkali, efficiency, and sulphidity (causticizing control), and to control the white liquor tank levels by means of the green liquor flow, besides the conductivity of the last reactor (inventory control).

MIMO loops – Supervisory control

For the process management and optimization, the control system was configured with two Multiple Input and Multiple Output (MIMO) loops, the purpose of which is to control the white and green liquor tank levels from the green liquor flow in the system, besides establishing white liquor quality correlations (by means of the laboratory quality analyses) and, thus, sending the set-points for the 5th reactor conductivity, in search of the best efficiency of reaction and control of the alkalis of the liquor produced. Figure 8 shows the supervisory control screen.

RESULTS AND DISCUSSIONS

The results and the discussions about these results, obtained by applying the multivariate predictive adaptive advanced control system, are presented in the following. The control system described herein was implemented on 08/19/2008, and from this time on a stability of the green liquor temperature could be already observed, as shown in Figure 9, a temperature which is indispensable for the causticizing reaction.

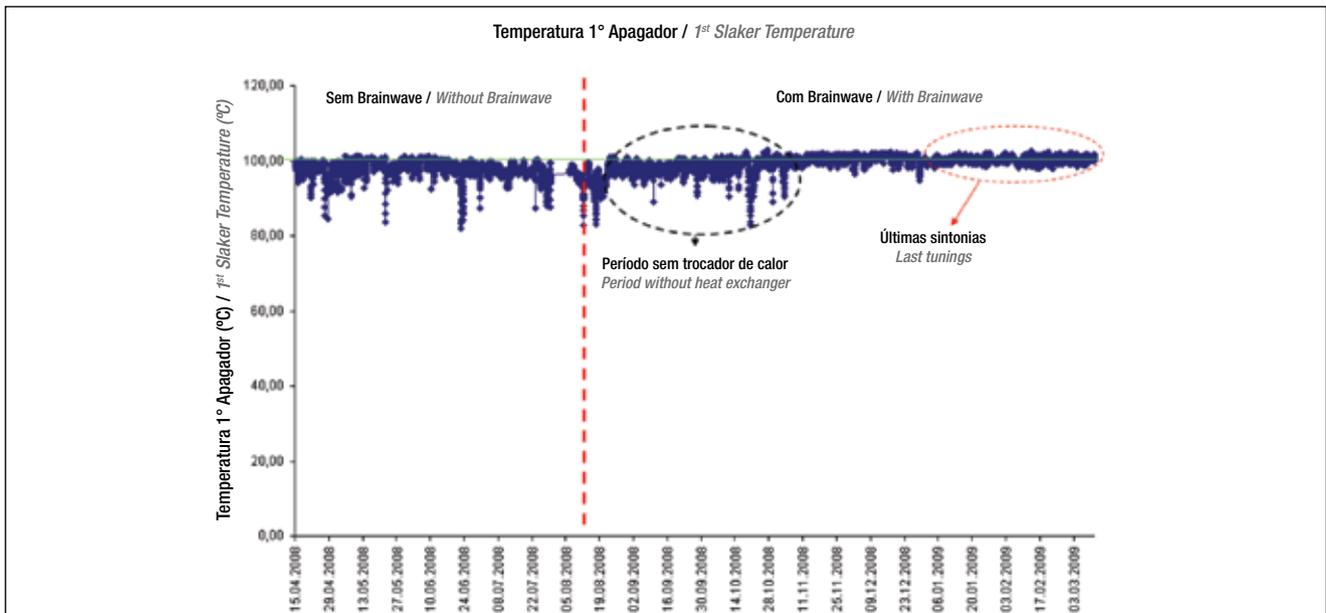


Figura 9. Acompanhamento da temperatura do licor verde / Figure 9. Green liquor temperature progress

A estabilidade se deu mediante controle dessa temperatura, feita por meio da malha de controle de temperatura do licor verde por via de adição adequada de cal. Como podemos notar, a temperatura teve melhorias na estabilidade em diferentes níveis. Na fase inicial de controle não havia, ainda, o sistema de gerenciamento, fato que gerava variação nas temperaturas, além de o equipamento de controle de temperatura não estar em funcionamento normal. Após a implementação do sistema supervisorio em 28/10/2009 e a estabilidade do equipamento de controle da temperatura, pôde-se notar uma estabilidade ainda maior no processo. Com novas sintonias no sistema de

This stability resulted from the control of that temperature by the green liquor temperature control loop, through suitable addition of lime. As it can be observed, the temperature had improvements in stability at different levels. In the initial control phase the management system did not yet exist, which still caused a variation in temperature, in addition to the fact that the temperature control equipment was not in normal operation. After implementing the supervisory system on 10/28/2009, and achieving the stability of the temperature control equipment, an even greater stability can be observed in the process. With new tunings in the management

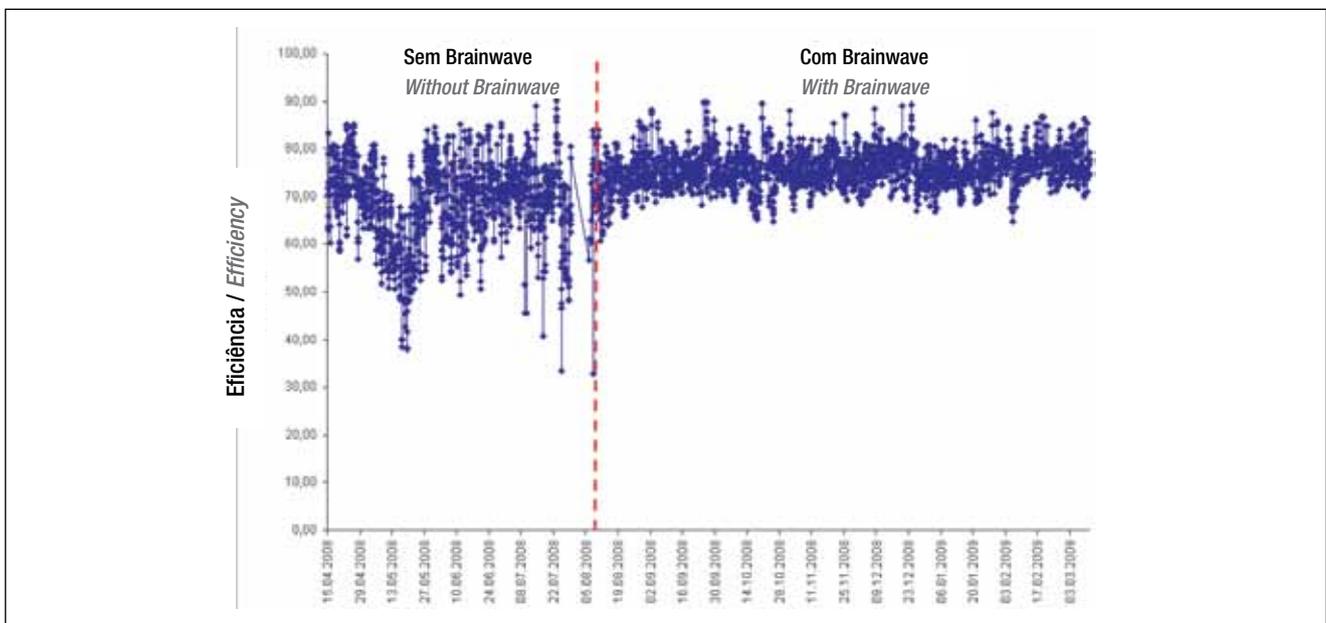


Figura 10. Eficiência da caustificação / Figure 10. Causticizing efficiency

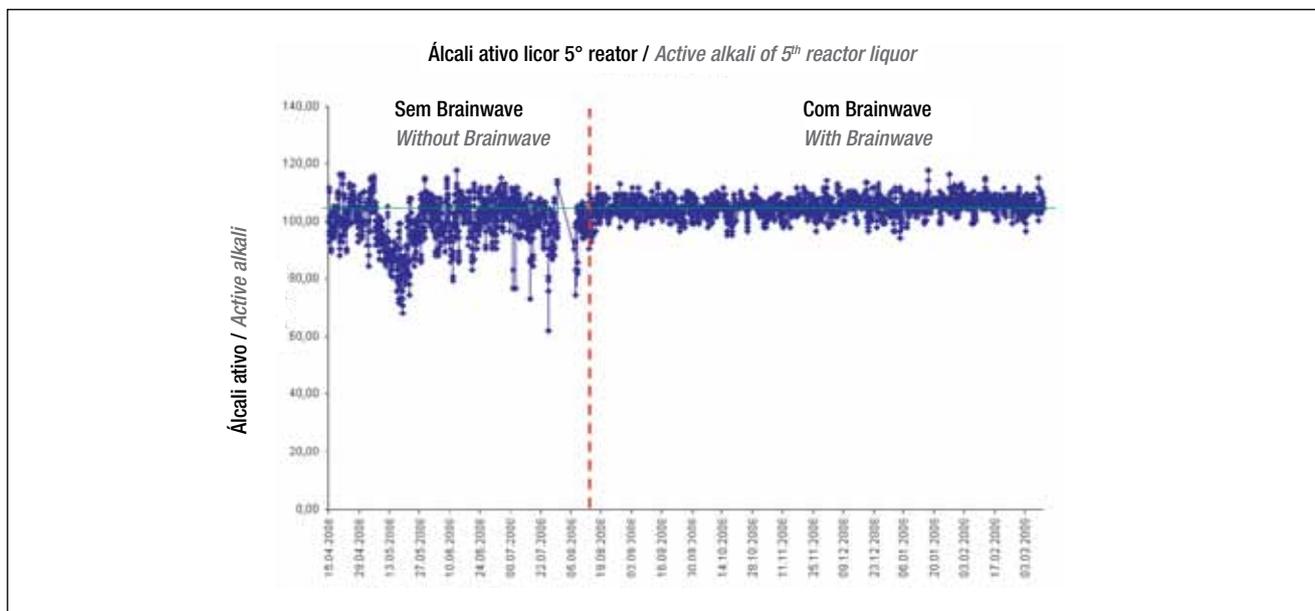


Figura 11. Estabilidade da qualidade do licor branco / *Figure 11.* Stability of white liquor quality

gerenciamento e nas malhas de controle chegou-se aos resultados de estabilidade esperados.

Com a estabilidade da temperatura do licor verde e a adição adequada de cal obteve-se a estabilidade no processo, e a condutividade no último reator pôde ser estabilizada ao ponto de possibilitar a geração dos *set-points* para as temperaturas do *slaker*, que posteriormente geram o *set-point* para adição de cal. Com isso, podemos observar aumento da eficiência de reação como mostrado pela **Figura 10**, que passou de 69% para 78% em média, e a redução da variação da qualidade do licor branco, como demonstrado pelo álcali ativo na **Figura 11**, o que reduziu a variabilidade do álcali ativo em mais de 50%.

CONCLUSÃO

Com o presente trabalho, é possível notar que a implementação de um sistema de controle preditivo multivariado em um processo altamente não-linear e com altos tempos de residência se demonstrou ferramenta eficiente para a estabilização e melhoria da qualidade do produto.

Como o processo de caustificação da Klabin operava em modo manual, principalmente pela alta variabilidade do processo, o simples trabalho de colocar a caustificação sob controle, condição realizada pelas malhas de controle MISO, foi um grande benefício.

Além de o sistema atuar em automático, pode-se observar o êxito no gerenciamento e otimização da qualidade, controlados pelas malhas MIMO, com o aumento em 9% na eficiência da caustificação e a redução de mais de 50% na variabilidade da qualidade do licor branco, possibilitando, assim, mais estabilidade nos processos subsequentes ao da caustificação. ▲

system and control loops, the expected stability results could be attained.

*As a result of the stability of the green liquor temperature and suitable addition of lime, the stability of the process was obtained, and conductivity in the last reactor could be stabilized to such an extent that the set-points could be generated for the temperatures of the slaker, which later generates the set-points for addition of lime. Thus, an increase in reaction efficiency can be observed, as shown in **Figure 10**, which rose on average from 69% to 78%, as well as the reduction in white liquor quality variation, as demonstrated by the active alkali in **Figure 11**, which reduced active alkali variability by over 50%.*

CONCLUSION

Based on the present work, it is possible to observe that the implementation of a multivariate predictive control system in a highly nonlinear process with long residence times showed to be an efficient tool for stabilizing and improving the quality of the product.

As the causticizing process at Klabin operated in manual mode, which was mainly due to the high variability of the process, the simple work of bringing causticizing under control, carried out by MISO control loops, resulted in a great benefit.

In addition to the fact that the system operates in automatic mode, success can be observed in quality management and optimization, controlled by MIMO loops, which are reflected in the increase in causticizing efficiency by 9%, as well as reduction in variability of the white liquor quality by over 50%, thus resulting in additional stability of the processes subsequent to causticizing. ▲

REFERÊNCIAS / REFERENCES

1. Aguiar, H. C. I. L.; *Modelagem do Digestor Kraft Contínuo: redes neurais e modelos híbridos*. Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas -SP, 2000.
2. Almeida, A. M.; *Otimização das Condições de Operação da MP-7 da Klabin Papeis Monte alegre através do uso da Modelagem Híbrida*. Dissertação de Mestrado apresentada a PEC/UEM, Maringá – PR 2003.
3. Avramidis, S. and Iliadis, L.; *Predicting Wood Thermal Conductivity Using Artificial Neural Networks*. Wood and Fiber Science N° 37 pg 682-690, 2005.
4. Clarke, D. W.; *Advances in Model-Based Predictive Control*. Oxford Sci. Publication, New York, 1994.
5. Costa, A. O. S.; *Alternativas para o Controle de um Sistema Múltiplo Efeito*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - RJ, 2000.
6. Costa, C. Alves da; *Automação de sistemas industriais*. Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal da Bahia - Ba, 2005.
7. Gerhard, M.; *Controle de Processos em Celulose e Papel*. Seminário da ABTCP, São Paulo-SP, 1998.
8. Gough, B. and Kay, J.T.; *Predictive Adaptive Control Aids Pulp Digestion*. Control Engineering, November, 1997.
9. Jarvensivu, M.; Saari K.; Jamsa-Jounela, S.; *Intelligent Control System of an Industrial Lime Kiln Process*. Control Engineering Practice N°9 pg 589 – 606, Pietarsaari, Finlândia, 2001.
10. Kovac, S.; Gough, B; Le, L; Roberts, G.; *A New Generation of Adaptive Model Based Predictive Controllers Applied in Batch Reactor Temperature Control* Control Engineering, Abril, 1999.
11. Vieira, Osvaldo; *Construção de modelos empíricos e projeto de operação de uma máquina de produção de cartão de embalagem*. Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - RJ, 2003.
12. Santos, J. E. S. dos; *Critérios de Desempenho e Aspectos de Robustez na Síntese de Controladores Preditivos Adaptativos*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina - SC, 1998.
13. Sorensen, P.H., Norgaard, M., Ravn, O., Poulsen, N.K.; *Implementation of neural networks based non-linear predictive control*. Neurocomputing, 28, 37-51, (1999).
14. Sosa, Ivan R. H.; *Sistemas Multiagentes para Controle Inteligente da Caldeira de Recuperação*. Dissertação de Mestrado apresentada a escola politécnica da Universidade de São Paulo - SP, 2007.
15. Zanollo, R and Budman, H.; *Model Predictive Control with Soft Constraints with Application to Lime Kiln Control*. Computers and Chemical Engineering, n° 23 pg 791 – 806, 1999.
16. Zhang, J., Xi, Y.; *Study on the closed-loop properties of GPC*, Science in China (Series E), 40, 54-63 (1997).