

Considerações práticas acerca da aplicação de sistemas híbridos de controle avançado na indústria de celulose

Practical considerations about application of hybrid advanced control systems in the pulp industry

Autores/Authors*: Alfredo Restrepo¹
 Ertan Yuzak²
 Lucas A. Rodrigues¹
 Rodrigo Affonso¹
 Rubens Gedraite¹

Palavras-chave: Celulose, controle, híbrido, multivariável, otimização

RESUMO

Este trabalho descreve as aplicações de sistemas híbridos de controle avançado para otimização de processos típicos da indústria de celulose. Usando modelos empíricos obtidos a partir da resposta aos testes aplicados nos processos analisados, o controlador preditivo compensou de forma adequada os atrasos e as fortes interações existentes, reduzindo as variações mais significativas para os processos considerados. O controlador multivariável preditivo empregado fez uso de programação quadrática e/ou linear para otimizar as funções “custo” dos processos de caustificação e do forno de cal. O sistema de controle avançado utilizou a associação de estruturas baseadas em regras (Lógica Fuzzy) para os processos de caustificação e forno de cal. A inferência, em tempo real, do parâmetro de qualidade “eficiência da caustificação” foi feita utilizando Rede Neural. Os resultados obtidos foram comparados com o modo de operação anteriormente praticado, sendo constatado que a implantação do sistema de controle avançado sugerido neste trabalho levou a redução da variabilidade do processo e a aumento na eficiência dos processos considerados.

Keywords: Control, hybrid, multivariable, optimization, pulp

ABSTRACT

This paper describes the applications of hybrid advanced control systems for the optimization of typical pulp industry processes. Using empirical models obtained from the response to the tests applied to the analyzed processes, the predictive controller adequately made up for the delays and strong existing interactions, reducing the most significant variations for the processes considered. The multivariable predictive controller employed made use of quadratic and/or linear programming to optimize the “cost” functions of causticizing and lime kiln processes. The advanced control system used the association of rule based structures (Fuzzy Logic) for the causticizing and lime kiln processes. The real-time inference of the quality parameter “causticizing efficiency” was made by using the Neural Network. From comparing the results thus obtained to the previously practiced mode of operation it was found out that the implementation of the advanced control system suggested in this paper led to a reduction in process variability, as well as to an increase in efficiency of the processes under consideration.

*Referências dos Autores / Authors' references:

1. Invensys Process Systems - São Paulo – Brasil
Invensys Process Systems - São Paulo – Brazil
2. Invensys Process Systems – Massachusetts – EUA
Invensys Process Systems – Massachusetts – USA

Autor correspondente/Corresponding author:

Lucas A. Rodrigues - E-mail: lucas.rodrigues@ips.invensys.com

INTRODUÇÃO

Entre os principais produtores mundiais de celulose e papel, o Brasil é referência internacional nesse setor por suas práticas sustentáveis. O principal diferencial competitivo é que praticamente toda a produção de celulose e papel no País é proveniente de florestas plantadas, que são recursos renováveis. Este fato coloca o Brasil em nível superior de competitividade em relação a grandes produtores globais, uma vez que estes ainda fazem uso de florestas naturais para produzir celulose e papel.

De forma semelhante à agricultura, que cultiva e colhe soja, café, milho, entre outros produtos, o setor cultiva florestas, plantando e colhendo dois gêneros de árvores – o pinus e eucalipto – a fim de obter a celulose, matéria-prima essencial para a produção do papel. Entretanto, dentre todos os gêneros de árvores utilizados no mundo para a produção de celulose, o eucalipto brasileiro é a que tem o menor ciclo de crescimento - somente sete anos.

As principais dificuldades encontradas na produção de celulose podem ser definidas como segue: (i)- o alto custo do investimento, (ii)- o relativamente baixo rendimento do processo e (iii)- a baixa alvura da fibra. A indústria de celulose vem buscando aumentar a eficiência das fabricas por meio da redução dos custos de produção. Uma das vertentes desta busca baseia-se na recuperação dos reagentes utilizados no processo de polpação (também conhecida como recuperação química) e na auto sustentabilidade do fornecimento de energia elétrica. A queima dos sólidos dissolvidos (lignina) em caldeiras de recuperação permite tanto a geração de vapor de água como a reciclagem de reagentes, proporcionando desta forma um impacto ambiental.

A **Figura 1** apresenta um diagrama de blocos que representa de forma simplificada o processo de fabricação de papel e de celulose. Este último consiste, basicamente,

INTRODUCTION

Among the main pulp and paper world producers, Brazil is an international reference due to its sustainable practices. The main competitive differential is that practically the whole pulp and paper production of the country comes from planted forests, which are renewable resources. This fact places Brazil on a superior level of competitiveness with regard to the largest global producers, who still make use of natural forests to produce pulp and paper.

Similarly to agriculture, which cultivates and harvests soybean, coffee, and corn, among other products, the sector cultivates forests, planting and harvesting two genres of trees - pinus and eucalyptus-, in order to obtain pulp, the essential raw material for paper production. However, among all genres of trees used all over the world for pulp production, the Brazilian eucalyptus is the one presenting the shortest growth cycle - just seven years.

The main difficulties encountered in pulp production can be defined as follows: (i)- the high cost of investment, (ii)- the relatively low process yield, and (iii)- the low fiber brightness. The pulp industry is trying to increase mill efficiency by reducing the costs of production. One of the sides of this search is based on recovery of the reagents used in the pulping process (also known as chemical recovery) and on the self-sustainability of the electric power supply. Burning dissolved solids (lignin) in recovery boilers allows both water steam generation and reagent recycling, thus providing an environmental impact.

Figure 1 presents a block diagram representing in a simplified way the paper and pulp manufacturing process. The latter basically consists in trans-

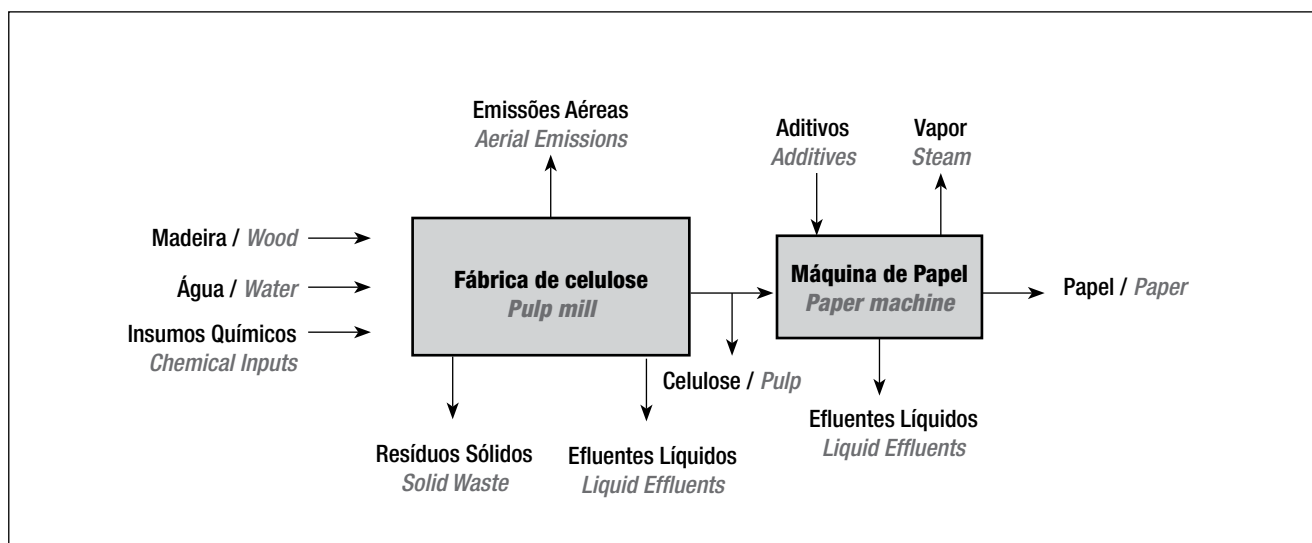


Figura 1. Fabricação de celulose e papel / **Figure 1.** Pulp and paper manufacturing

na transformação da madeira em material fibroso, que é denominado pasta, polpa ou celulose industrial.

O processo tem início na área de manuseio de madeira, onde a matéria-prima é recebida na forma de toras em caminhões que transportam, em média, 36 toneladas por dia cada um.

As toras são descarregadas e cortadas ao meio. Após o corte, são processadas em descascadores de tambor rotativo. Dos descascadores, as toras são conduzidas aos picadores, onde são transformadas em cavacos. Estes são estocados em pilhas e transportados por correias até os silos dos digestores, onde se inicia o processo de cozimento.

O cozimento consiste em submeter os cavacos a uma ação química do licor branco forte (uma mistura de soda cáustica e de sulfeto de sódio) e do vapor d'água. No interior do digestor ocorre a dissolução da lignina existente entre fibras. As fibras liberadas são, na realidade, a celulose industrial. O digestor é um vaso de pressão, com altura aproximada de 57m, onde os cavacos e licor branco forte são introduzidos continuamente pela parte superior. O tempo total do cozimento da madeira é de 120 minutos, e realiza-se do topo até o centro do digestor. Do centro até a parte inferior ocorre operação de lavagem, visando retirar a solução residual - o licor preto fraco, que é uma mistura de licor branco forte usado no cozimento com lignina dissolvida da madeira. Esta último será utilizada como combustível na caldeira de recuperação.

Após a lavagem, a celulose é retirada do digestor, sendo em seguida submetida a uma operação de lavagem complementar nos difusores. Na sequência, a celulose é submetida à operação de deslignificação em um ou dois reatores de deslignificação com emprego de oxigênio. Em seguida, a celulose é submetida a depuração. Esta operação é necessária para que seja obtida celulose de melhor qualidade, e consiste em submeter a celulose industrial à ação de peneiramento que visa remover impurezas sólidas nela contidas, uma vez que durante a lavagem são removidas somente impurezas solúveis.

Após a etapa anterior, a celulose, agora livre de impurezas, é submetida a um processo de branqueamento, que consiste em tratá-la com peróxido de hidrogênio, dióxido de cloro, oxigênio e soda cáustica em cinco estágios diferentes, equipados com seus respectivos filtros lavadores. Pode-se definir o branqueamento como um tratamento que visa melhorar as propriedades da celulose industrial - alvura, limpeza e pureza química, dentre outras.

Após o branqueamento, a celulose é depurada novamente e enviada para a secagem. Operação em que a água é retirada da celulose até que esta atinja o ponto de equilíbrio com a umidade relativa do ambiente (90% de fibras e 10% de água).

forming wood into fibrous material, which is called pulp, or industrial cellulose.

The process starts in the wood handling area, where the raw material is received in the form of logs, brought by trucks transporting, on average, 36 tons per day each.

The logs are unloaded and cut in half. After having been cut, they are processed in rotary drum debarkers, from which they are led to the chippers, where are transformed into chips. The latter are stored in stacks and belt conveyed to the digester silos, where the cooking process starts.

Cooking consists in submitting the chips to a chemical action of the strong white liquor (a mixture of caustic soda and sodium sulphide) and the water steam. Dissolution of the lignin existing between fibers occurs inside the digester. The fibers released are, as a matter of fact, the industrial pulp. The digester is an approximately 57m high pressure vessel, in which chips and strong white liquor are continuously introduced through the top. The overall wood cooking time is 120 minutes, cooking occurring from the top to the center of the digester. From the center to the bottom a washing operation occurs, aiming to remove the residual solution – the weak black liquor –, which is a mixture of strong white liquor used in the cooking process with lignin dissolved from the wood. The latter will be used as fuel in the recovery boiler.

After washing, the pulp is removed from the digester, and thereafter submitted to a supplementary washing operation in diffusers. Subsequently, the pulp undergoes a delignification operation in one or two delignification reactors, with use of oxygen. Then, the pulp undergoes a cleaning process. This operation is required in order to obtain a better quality pulp, and consists in submitting the industrial cellulose to a screening action, aiming to remove the solid impurities contained in it, since only soluble impurities are removed during washing.

After the previous step, the pulp, now free from impurities, undergoes a bleaching process, which consists in treating it with hydrogen peroxide, chlorine dioxide, oxygen, and caustic soda in five different stages, equipped with their respective washing filters. Bleaching can be defined as a treatment aiming to improve the properties of the industrial cellulose - brightness, cleaning, and chemical purity, among others.

After bleaching, the pulp is screened again and sent to the drying process. In this operation water is removed from the pulp until it reaches the point of equilibrium with the relative humidity of the environment (90% fibers and 10% water).

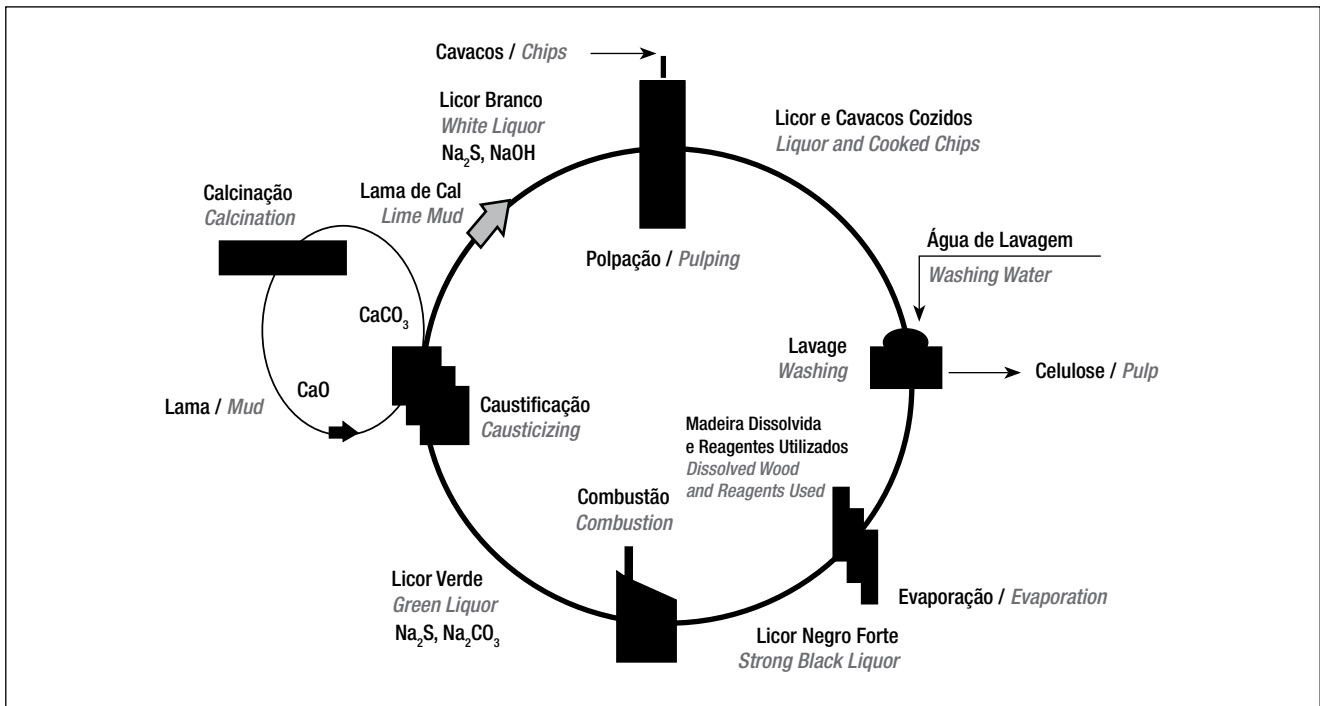


Figura 2. Principais etapas consideradas na fabricação de celulose / **Figure 2.** Main steps considered in pulp manufacturing

A **Figura 2** apresenta um diagrama simplificado mostrando o encadeamento das principais etapas consideradas no processo estudado e a **Figura 3** apresenta um fluxograma de fábrica de celulose típica a partir do eucalipto.

A máquina de secagem é constituída de três elementos: mesa plana, prensas e uma seção secadora. Na parte final da

Figure 2 presents a simplified diagram showing the enchainment of the main steps considered in the process studied, while **Figure 3** presents a flow diagram of a typical eucalyptus pulp mill.

The drying machine consists of three elements: four-drinier, presses, and a drying sector. At the drying sector

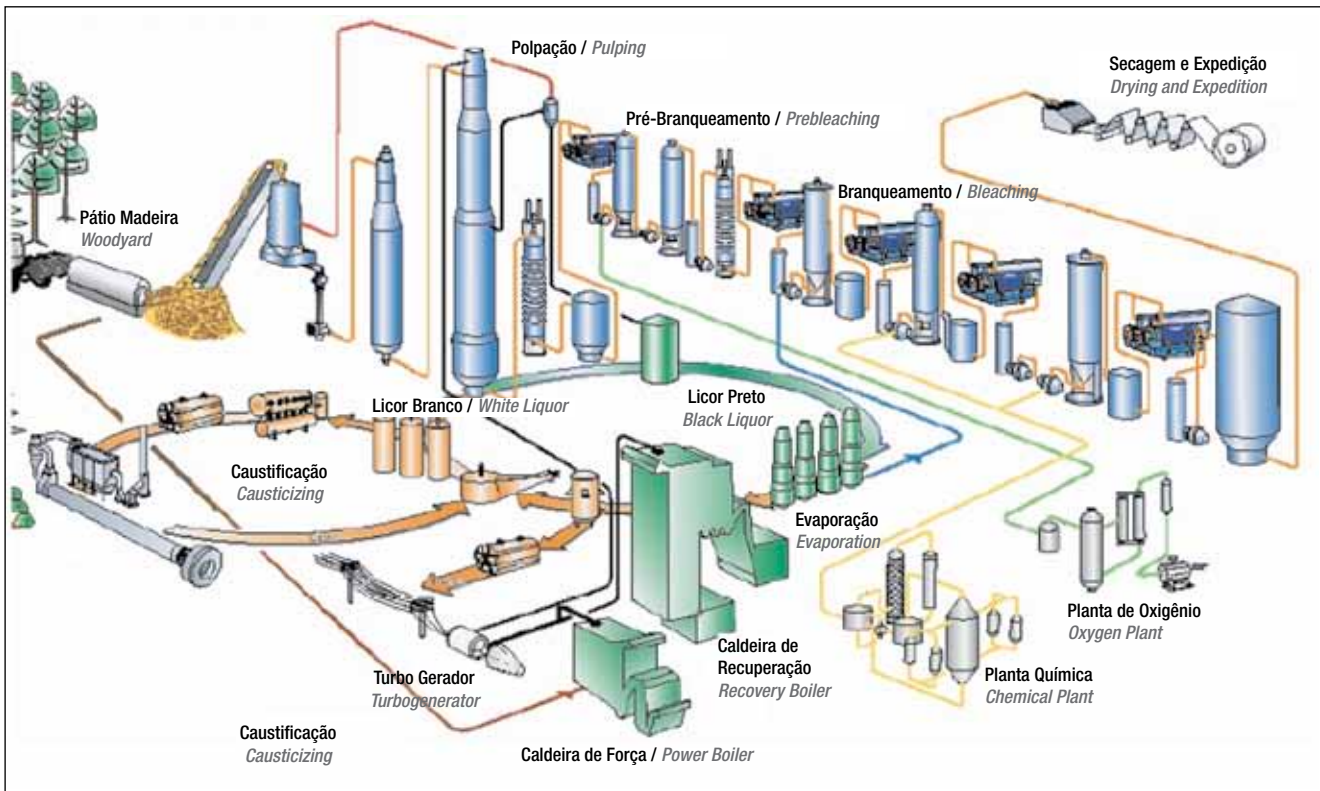


Figura 3. Fluxograma de uma fábrica de celulose típica / **Figure 3.** Flow chart of a typical pulp mill

seção secadora fica a cortadeira, que reduz a folha contínua em outras menores, de formato padronizado, com 67 cm por 92 cm. Essas folhas formam os fardos com 250 kg de celulose, oito dos quais constituem uma unidade de carga (2 t) para fins de manuseio e transporte.

Uma fábrica de celulose pode ser subdividida em três grandes áreas, a saber:

Linha de fibra - Recepção de madeira, preparação da madeira, polpação, lavagem, pré-branqueamento, branqueamento, secagem e expedição;

Linha de recuperação - Lavagem da polpa marron, evaporação, caldeira de recuperação e caustificação/forno de cal;

Linha de Utilidades - Tratamento de águas e efluentes, produção de químicos, ar comprimido, vapor e outros.

Devido à natureza multivariável dos processos da linha de recuperação de uma fábrica de celulose típica, a atuação do controle regulatório frequentemente não atende ao critério de minimização dos efeitos dos distúrbios em curto período de tempo, pois a ação corretiva só é executada após a ocorrência de desvios, e inclusive após ter transcorrido um intervalo de tempo prolongado; desta forma, a perda de eficiência não pode ser evitada (VARGAS, J.M.; GARCIA, C. 1997).

OBJETIVOS DE CONTROLE A SEREM ALCANÇADOS

Considerando a melhoria de performance como um alvo prioritário a ser alcançado no âmbito do processo produtivo, torna-se necessária a otimização das fases que compõem o processo de fabricação de celulose.

Neste contexto, algumas tecnologias mais modernas têm sido implementadas. Dentre elas, pode-se citar o controle multivariável baseado em modelo preditivo. Este tipo de controle faz uso de controladores preditivos de processo, equipados com otimizadores baseados em programação linear e/ou quadrática da função objetivo a ser maximizada e formam sistemas híbridos de controle avançado que incluem, ainda, os sistemas especialistas baseados em regras e a rede neural (JÄRVENSIVU *et al.*, 2001).

Na sequência, são apresentados os objetivos que um sistema de controle avançado (Advanced Process Control – APC) deve buscar em uma unidade de caustificação:

- Maximizar a eficiência de cada linha de caustificação, caracterizada por cada um dos apagadores e seus respectivos caustificadores;
- Minimizar o consumo de cal, seja queimado ou de fornecimento externo;
- Diminuir a variabilidade na concentração do licor branco produzido; e
- Diminuir a carga morta de carbonatos no ciclo de recuperação.

Para alcançar estes objetivos, o APC deve atuar sobre as seguintes variáveis do processo, levando em conta o modelo

end there is a cutter, which divides the continuous sheet into smaller ones, of standardized format, measuring 67cm by 92 cm. These sheets compose the pulp bales, weighing 250 kg each, eight of which form a (2 t) loading unit for handling and transportation purposes.

A pulp mill can be subdivided into three large areas, as follows:

***Fiber Line** – Wood reception, wood preparation, pulping, washing, prebleaching, bleaching, drying, and expedition;*

***Recovery Line** – Brown pulp washing, evaporation, recovery boiler, and causticizing/lime kiln;*

***Utilities Line** – Water and effluent treatment, production of chemicals, compressed air, steam, among other.*

Due to the multivariable nature of the processes of the recovery line of a typical pulp mill, the regulatory control action often does not correspond to the criterion of minimization of the effects of disturbances in a short period of time, as the corrective action is only taken after the occurrence of deviations, and also after a prolonged interval has elapsed; thus, the loss of efficiency cannot be avoided (VARGAS, J.M.; GARCIA, C. 1997).

CONTROL TARGETS TO BE ACHIEVED

When considering the improvement in performance as a priority target to be reached in the scope of the production process, it becomes necessary to optimize the phases composing the pulp manufacturing process.

*In this context, some more modern technologies have been implemented, among which the multivariable predictive model based control can be highlighted. This kind of control makes use of predictive process controllers equipped with optimizers based on linear and/or quadratic programming of the target function to be maximized and forming hybrid advanced control systems, which also include the rule based specialized systems and the neural network (JÄRVENSIVU *et al.*, 2001).*

The objectives that an advanced control system (Advanced Process Control – APC) should pursue in a causticizing unit are presented in the following:

- *To maximize the efficiency of each causticizing line, characterized by each of the slakers and their respective causticizers;*
- *To minimize the consumption of lime, either burned or from external supply;*
- *To reduce variability in the concentration of the white liquor produced; and*
- *To reduce the dead load of carbonates in the recovery cycle.*

To meet these goals, the APC should act on the following process variables, taking into account the

matemático empírico identificado a partir dos dados operacionais obtidos:

- Controle da temperatura no apagador;
- Controle da diferença de temperaturas entre o apagador e a alimentação de licor verde;
- Cálculo da eficiência da caustificação da linha, baseada nas medições de condutividade do licor na entrada do primeiro e a saída do último caustificador.

As malhas de controle anteriormente citadas permitem a operação do apagador na máxima temperatura possível sem que ocorra o fenômeno da fervura (overboiling), ao mesmo tempo em que evitam o excesso ou falta de alimentação de cal.

A seguir, são apresentados os objetivos que um APC deve buscar em um forno de cal:

- Eficiência energética;
- Redução do uso de cal comprado;
- Maximização da produção;
- Manter o teor de TRS dentro dos limites ambientais;
- Melhoria da reatividade da cal na caustificação;
- Aumento da vida dos refratários, devido a redução da variabilidade no perfil de temperatura do forno.

Para alcançar estes objetivos, o APC deve atuar sobre as seguintes variáveis do processo, levando em conta o modelo matemático empírico identificado a partir dos dados operacionais obtidos:

- Controle da temperatura da zona quente;
- Controle da temperatura da zona alimentação;
- Controle de O_2 ;
- Controle de CO ;
- Controle de TRS;
- Controle de vazão de combustível;
- Controle de velocidade IDF;
- Controle de velocidade rosca alim. 1;
- Controle de vazão de lama.

VISÃO GERAL DO PROCESSO CONSIDERADO

O objetivo do processo de caustificação é converter o carbonato de sódio (Na_2CO_3) contido no licor verde em hidróxido de sódio ($NaOH$), que será posteriormente utilizado no processo de digestão da polpa no digestor. O licor verde clarificado, que contém sulfeto de sódio (Na_2S), carbonato de sódio (Na_2CO_3) e hidróxido de sódio ($NaOH$) dissolvidos, é alimentado ao apagador (*slaker*), onde é adicionada cal (CaO) para converter o carbonato de sódio em hidróxido de sódio. Por ser uma reação reversível, ela pode não ocorrer de forma completa. Por se tratar de uma reação química lenta, a condição de equilíbrio químico pode não ser alcançada no interior do apagador de cal, mas sim à medida que o licor flui através dos três caustificadores. O grau de conversão total só é alcançado se o tempo de residência for adequado e suficiente. Deve ser ressaltado o fato de que o grau de con-

empirical mathematical model identified from the operating data obtained:

- *Slaker temperature control;*
- *Control of the temperature difference between slaker and green liquor feeding;*
- *Calculation of the line causticizing efficiency, based on the measurements of liquor conductivity at the first causticizer inlet and last causticizer outlet.*

The previously mentioned control loops allow operating the slaker at maximum possible temperature without occurring overboiling, while avoiding either excess or lack of lime feeding.

The objectives to be pursued by an APC, as far as a lime kiln is concerned, are presented in the following:

- *Energetic efficiency;*
- *Reduction in the use of purchased lime;*
- *Production maximization;*
- *To sustain TRS content within environmental limits;*
- *Improvement in lime reactivity at causticizing;*
- *Increase in refractory service life, due to the reduction in variability of the temperature profile of the kiln.*

To accomplish these goals, the APC should act on the following process variables, taking into account the empirical mathematical model identified from the operating data obtained:

- *Hot zone temperature control;*
- *Feeding zone temperature control;*
- *O_2 control;*
- *CO control;*
- *TRS control;*
- *Fuel flow control.*
- *IDF (Induced Draft Fan) Speed control;*
- *Feeding Screw No. 1 Speed control;*
- *Mud Flow control.*

GENERAL VIEW OF THE PROCESS CONSIDERED

The purpose of the causticizing process is to convert sodium carbonate (Na_2CO_3) contained in the green liquor into sodium hydroxide ($NaOH$), which will be later used in the pulp digestion process in the digester. The clarified green liquor, containing dissolved sodium sulphide (Na_2S), sodium carbonate (Na_2CO_3) and sodium hydroxide ($NaOH$), is fed into the slaker, where lime (CaO) is added in order to convert sodium carbonate into sodium hydroxide. As this is a reversible reaction, it may not occur in full. Since it is a slow chemical reaction, the chemical equilibrium condition may not be reached inside the slaker, but as the liquor flows through the three causticizers. The degree of total conversion is only reached if the residence time is suitable and long enough. It should be stressed that the degree of conversion of the

versão da reação química está em relação inversa ao valor de vazão alimentada ao sistema, bem como da temperatura e da quantidade de sulfeto presente em solução. O sulfeto de sódio reage com a água formando íons hidroxila, que tendem a mudar o ponto de equilíbrio da reação.

Tendo em vista o fato de que, na prática, a reação não se completa integralmente, o operador de processo deve selecionar a eficiência na caustificação (CE) desejada, a ser alcançada. O valor de CE é definido como a concentração de hidróxido de sódio dividida pela soma das concentrações de hidróxido de sódio e carbonato de sódio no licor branco.

A cal é adicionada ao apagador por meio de roscas dosadoras. Com base em sua composição química, a cal reage completamente com a água do licor verde, formando hidróxido de cálcio ((Ca(OH)₂). Esta reação é exotérmica e libera uma grande quantidade de calor no processo, por volta de 1 kJ por kg de CaO. O hidróxido de cálcio reage, então, com o carbonato de sódio contido no licor verde, produzindo licor branco, com carbonato de cálcio (CaCO₃) e hidróxido de sódio em solução.

Caso a Cal seja adicionada em quantidade insuficiente, será necessário usar um volume maior de licor branco, mais fraco e, no digestor, o processo operará de forma ineficiente e com altos custos. Se muita cal for adicionada, o processo será severamente perturbado pela precipitação do hidróxido de cálcio e haverá a possibilidade de ocorrer fervura (overboiling) no apagador. Acontecerão também outras perturbações em todo o processo, resultando na queda da eficiência, com subsequente aumento da carga morta (deadload) de carbonato de sódio no sistema fechado de licor. A **Figura 4**

chemical reaction presents inverse ratio to the value of the flow fed into the system, as well as to the temperature and the amount of sulphide present in solution. Sodium sulphide reacts with water, forming hydroxyl ions, which tend to change the point of equilibrium of the reaction.

In view of the fact that in practice the reaction is not completed in full, the process operator must select the causticizing efficiency (CE) desired, to be achieved. The CE value is defined as the concentration of sodium hydroxide divided by the sum of the concentrations of sodium hydroxide and sodium carbonate in the white liquor.

Lime is added to the slaker by means of dosing screws. Based on its chemical composition, lime reacts in full with the green liquor water, forming calcium hydroxide ((Ca(OH)₂). This reaction is exothermal and releases a large amount of heat in the process, about 1 kJ per kg of CaO. Then, calcium hydroxide reacts with the sodium carbonate contained in the green liquor, producing white liquor, with calcium carbonate (CaCO₃), and sodium hydroxide in solution.

In case not enough lime is added, a larger volume of white liquor - weaker liquor - will be required, and in the digester the process will operate inefficiently and involving high costs. If too much lime is added, the process will be severely disturbed by calcium hydroxide precipitation and there will be the possibility of overboiling in the slaker. Other disturbances will also occur in the whole process, resulting in drop in efficiency, with subsequent increase in sodium carbonate dead load in the closed liquor system. **Figure 4** presents

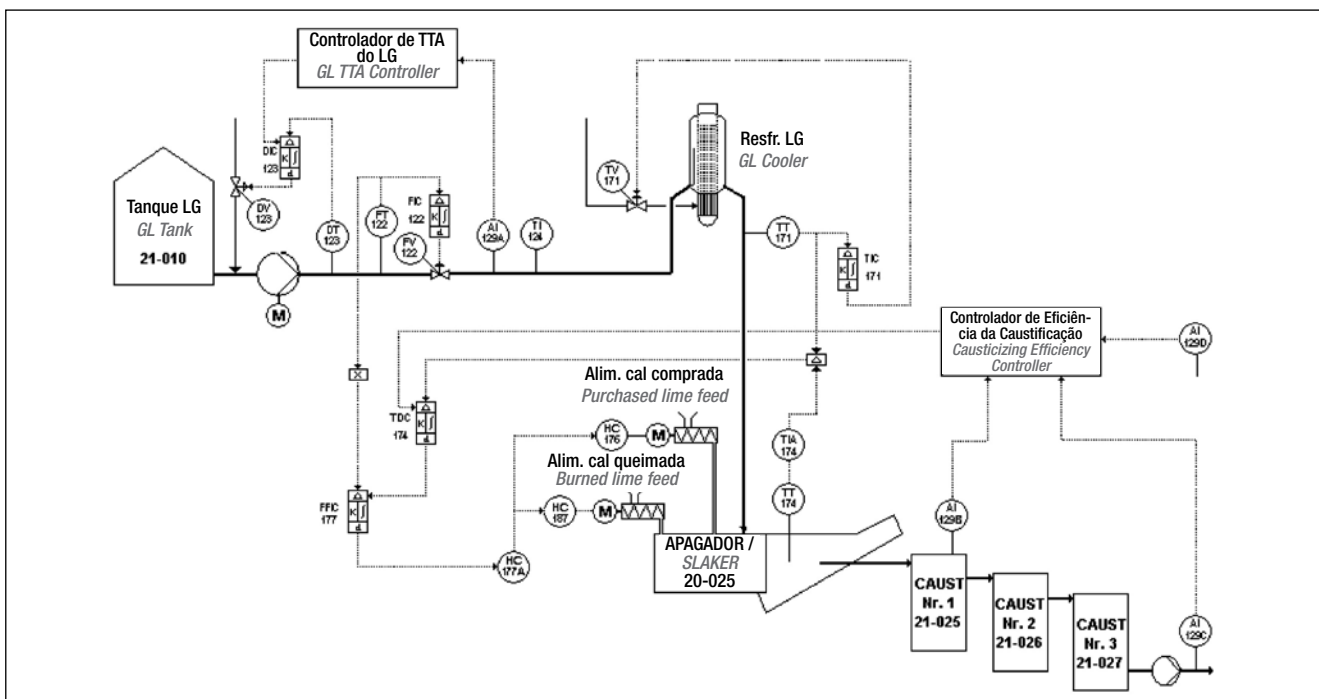


Figura 4. Fluxograma de processo de caustificação típico / **Figure 4.** Flow chart of a typical causticizing process

apresenta uma representação simplificada de um processo de caustificação.

O objetivo do processo no forno de cal é a conversão do carbonato de cálcio em óxido de cálcio. Para que isso seja obtido, a temperatura do forno deve estar compreendida entre 1000°C e 1150°C.

A energia térmica requerida para a calcinação é fornecida pela queima de gás natural alimentado ao forno. Um ventilador (ID) cria o vácuo necessário para mover os gases para fora do forno, passando por precipitadores eletrostáticos e, na sequência, por ciclone, no qual ocorre a separação da poeira, sendo esta realimentada ao forno, juntamente com lama. A velocidade do ventilador ID é manipulada para controlar o excesso de oxigênio e o perfil de temperatura do forno.

A principal variável de qualidade é o carbonato residual contido no produto, que é medido por meio de análise em laboratório de controle de qualidade. Tipicamente, o valor ótimo está compreendido no intervalo entre 1% e 3%. Um elevado teor de carbonato residual implica no aumento da carga morta no circuito de caustificação e um pequeno teor de carbonato residual pode implicar no fato de o produto final não reagir bem no apagador da caustificação. A **Figura 5** apresenta uma tela de operação típica de um forno de cal.

CONTROLE DE PROCESSO AVANÇADO

O sistema de Controle de Processo Avançado (APC), também conhecido como controle multivariável baseado em mo-

a simplified representation of a causticizing process.

The purpose of the lime kiln process is to convert calcium carbonate into calcium oxide. To achieve it, the kiln temperature must range from 1000°C to 1150°C.

The thermal energy required for calcination is supplied by burning natural gas fed into the kiln. A fan (ID) generates the vacuum required to extract the gases from the kiln inside, causing them to pass through electrostatic precipitators and, subsequently, through a cyclone, where dust is separated and fed again into the kiln, along with mud. The ID fan speed is manipulated in order to control the excess of oxygen and the temperature profile of the kiln.

*The main quality variable is the residual carbonate contained in the product, which is measured by means of a quality control laboratory analysis. Typically, the optimum value ranges from 1% to 3%. High residual carbonate content implies an increase in dead load in the causticizing circuit, while low residual carbonate content may imply that the end product does not react well in the causticizing slaker. **Figure 5** presents a typical operating screen of a lime kiln.*

ADVANCED PROCESS CONTROL

The Advanced Process Control system (APC), also known as multivariable predictive model based

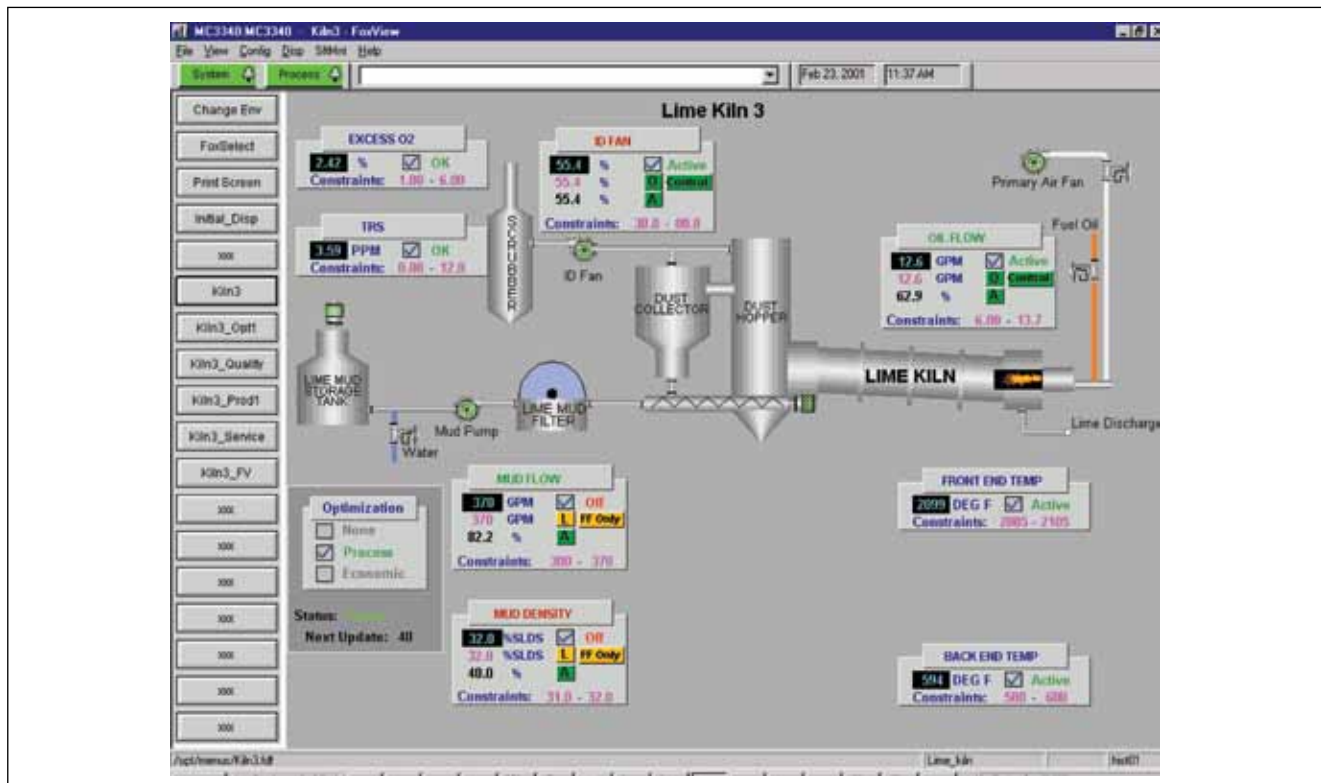


Figura 5. Tela de operação típica de um forno de cal / **Figure 5.** Typical operating screen of a lime kiln

delo preditivo, vem sendo usado de forma intensa no controle de processos de plantas de celulose (GEDRAITE *et al.*, 2008).

Como já citado anteriormente, os processos típicos das indústrias de celulose exibem uma série de características que tornam a execução do controle regulatório tradicional difícil, a saber:

- **Não linearidade** - As respostas características dos processos podem variar, dependendo da condição de operação vigente;
- **Distúrbios** - As perturbações podem surgir sem que a causa seja conhecida;
- **Ruído** - Normalmente, estes processos apresentam níveis muito elevados de ruído aleatório em comparação com as amplitudes dos sinais de controle; e
- **Comportamento variável** - As respostas do processo podem mudar ao longo do tempo devido aos desgastes dos equipamentos e/ou às variações na alimentação dos equipamentos.

Controle baseado em modelo preditivo

O modelo preditivo utilizado pelo controlador multivariável linear simples tem um formato de séries temporais. Os parâmetros do modelo são estimados utilizando dados gerados a partir de testes de resposta Pseudo-Random Binary Sequence (PRBS). Nesses testes, as várias entradas do modelo foram sequencialmente estimuladas com perturbações de amplitude fixa e de duração aleatória. Este procedimento gera dados que são respostas não correlacionadas com qualquer outra variação atual do processo e que podem afetar o mesmo ao longo do tempo. Adicionalmente, os dados permitem a identificação de um modelo multivariável dinâmico de alta qualidade. Algumas respostas dos testes PRBS são mostradas na **Figura 6**. Uma vez que cada sequência de perturbações é aleatória e ortogonal entre si, as características individuais de

*control, is being intensely used in the pulp plant process control (GEDRAITE *et al.*, 2008).*

As already mentioned, the typical pulp mill processes present a series of characteristics that make it difficult to perform the traditional regulatory control, as follows:

- **Nonlinearity** – *the characteristic process responses may vary, depending on the effective operating condition;*
- **Disturbances** – *Disturbances may appear without their cause being known;*
- **Noise** - *Normally, these processes involve very high levels of random noise in comparison to the control signal amplitudes; and*
- **Variable behaviour** - *The process responses may change in the course of time due to equipment wear and/or variations in equipment feeding.*

Predictive model based control

*The predictive model used by the simple linear multivariable controller has a temporal series format. The parameters of the model are estimated by using data generated from Pseudo-Random Binary Sequence (PRBS) response tests. In these tests, the various model inputs were sequentially stimulated with fixed amplitude and randomly lasting disturbances. This procedure generates data which are responses not correlated with any other current variation of the process and may affect the latter in the course of time. In addition, the data allow identifying a high-quality dynamic multivariable model. Some PRBS tests responses are shown in **Figure 6**. Since each sequence of disturbances is aleatory and orthogonal between each other, the individual characteristics of response can be*

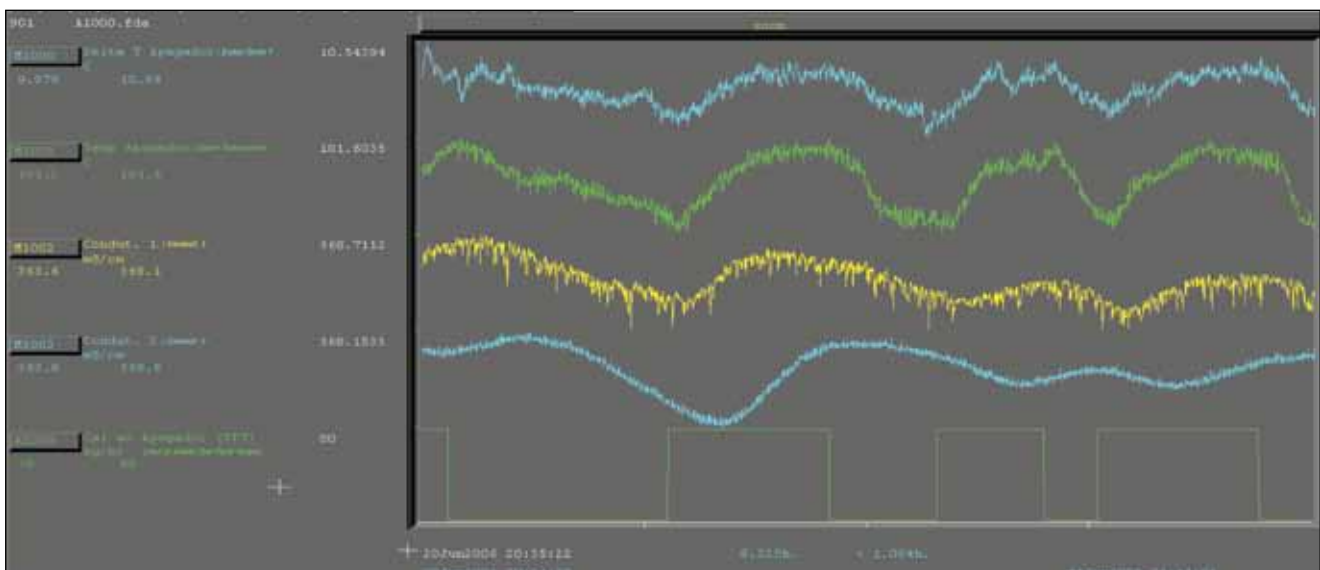


Figura 6. Resposta de teste PRBS / **Figure 6.** PRBS test response

resposta podem ser corretamente extraídas dos dados experimentais obtidos. Esta é uma das principais características do método PRBS em contraposição ao tradicional método de ensaio que corresponde à aplicação de degraus no processo (SIMSCI-ESCOR. 2005).

A técnica utilizada na identificação foi a *Recursive Least Squares* (RLS). O modelo utiliza uma estrutura do tipo ARX (Auto Regressive with eXogenous inputs), que confere vantagens significativas em relação à *Finite Impulse Response* (FIR). Testes comparativos entre os algoritmos anteriormente citados demonstram que o modelo ARX apresenta um desempenho superior na capacidade de rejeição a perturbações.

O algoritmo do tipo programação quadrática (QP) calcula a melhor sequência de movimentos no elemento final de controle para o ajuste das variáveis manipuladas do processo, de tal forma que:

- As limitações das variáveis manipuladas (alta, baixa e incremental) são respeitadas;
- As limitações das variáveis controladas (alta e baixa) são respeitadas; e
- O erro entre as variáveis controladas e os *setpoints* sejam minimizados.

Cada componente é multiplicado por um fator de ponderação, que permite ajustar da maneira mais adequada a contribuição relativa de cada variável manipulada, como se fosse uma sintonização de parâmetro. Por meio dos fatores de ponderação, o esforço de controle pode ser redirecionado. O controlador QP atualiza as saídas a intervalos de 2 minutos, e considera previsões das respostas das CVs com um horizonte de quatro horas, o tempo máximo considerado para que os processos estudados alcancem a condição de regime permanente.

Os valores *target* correspondentes ao estado estacionário para as variáveis manipulada e controlada são determinados por um otimizador que emprega a técnica de programação linear (LP). O Otimizador LP maximiza a função custo, a qual é uma combinação linear das variáveis manipuladas/controladas, ponderadas pelos respectivos fatores de custo e conduz o processo para as respectivas condições ótimas. Em muitas aplicações, o modelo usado pelo controlador multivariável também é o usado pelo próprio otimizador LP. A atuação do otimizador LP é transparente ao operador do processo.

Inferência baseada em rede neural

Muitas medições críticas de variáveis de processo, particularmente aquelas referentes à qualidade de produto, são disponíveis somente através de amostragem manual e posterior análise em laboratório. Isso porque a tecnologia de medição direta em tempo real não existe ou porque a sua implementação é muito onerosa. Consequentemente, faltam

correctly extracted from the experimental data obtained. This is one of the main characteristics of PRBS method, in contrast to the traditional testing method which corresponds to the application of degrees within the process (SIMSCI-ESCOR. 2005).

The identification technique used was the Recursive Least Squares (RLS). The model utilizes an ARX (Auto Regressive with eXogenous inputs) type structure, which confers significant advantages as compared to the Finite Impulse Response (FIR). Comparative tests between the previously cited algorithms demonstrate that ARX model presents a superior performance as to the capacity for rejecting disturbances.

The quadratic programming (QP) type algorithm calculates the best sequence of movements in the final control element for the adjustment of the manipulated process variables, so that:

- *The limitations of the manipulated variables (high, low, and incremental) are observed;*
- *The limitations of the controlled variables (high and low) are observed; and*
- *The error between controlled variables and setpoints is minimized.*

Each component is multiplied by a weighting factor, which allows adjusting most adequately the relative contribution of each manipulated variable, as though it were a parameter tuning. By means of the weighting factors, the control effort can be re-directed. The QP controller updates the outputs in a 2 minutes' interval and considers forecasts of CV (controlled variable) responses with a four-hour horizon, the maximum time considered for the studied processes to reach the permanent regime condition.

The target values corresponding to the stationary state for the manipulated and controlled variables are determined by an optimizer using the linear programming (LP) technique. The LP Optimizer maximizes the cost function, which is a linear combination of the manipulated/controlled variables, weighted by the respective cost factors, and leads the process to the respective optimum conditions. In many applications, the model used by the multivariable controller is also that used by the LP optimizer itself. The LP optimizer action is transparent to the process operator.

Neural network based Inference

Many critical measurements of process variables, particularly those concerning product quality, are only available through manual sampling and later laboratory analysis, either because the direct real-time measuring technology does not exist, or because its implementation is very expensive. Consequently, the process operator lacks

ao operador de processo informações importantes sobre a qualidade do produto, informações em que possa se basear para tomar decisões em relação ao sistema de controle. Tipicamente, o operador de processo necessita conhecer o valor de medições de variáveis de processo complementares (temperaturas, pressões, vazões, etc.) e interpretá-las da melhor forma possível para fazer ajustes no controle do processo. Porém, dada a característica multivariável e não linear do comportamento dinâmico da maior parte dos processos dessa área de conhecimento, o problema torna-se complexo.

Os modelos baseados em rede neural permitem realizar tais inferências de forma consistente e robusta, tornando os valores estimados disponíveis em tempo real ao operador do processo e ao sistema de controle da instalação industrial. A **Figura 7** apresenta um diagrama de blocos que ilustra o conceito citado.

A informação de entrada para o modelo baseado em rede neural é constituída pelos valores reais das medições do processo. As saídas do modelo baseado em rede neural são os valores previstos para os parâmetros de qualidade do produto. O modelo desenvolvido foi treinado com base em conjunto de dados formado pelos valores reais das variáveis, obtidos com a equipe de operação do processo. O modelo pode, então, ser empregado em tempo real, de forma preditiva, conforme apresentado na **Figura 8**.

A disponibilidade de informação precisa e confiável sobre a medição inferida permite que o processo seja operado de forma mais estável e mais próximo das condições ótimas de produção. Este fato certamente acarreta impacto direto na produtividade e na lucratividade do processo.

Utilizou-se uma forma particular de modelagem do processo com base em rede neural para predição inferencial devido a sua simplicidade e facilidade de implementação por meio da função denominada *Radial Basis Function (RBF)*, que apresenta as características mostradas na Figura 8 e relacionadas a seguir (SIMSCI-ESCOR. 2005):

Uma camada de entrada (input layer): Cada nó da camada de entrada está conectado a um valor particular de uma medição do processo, seja este atual ou histórico;

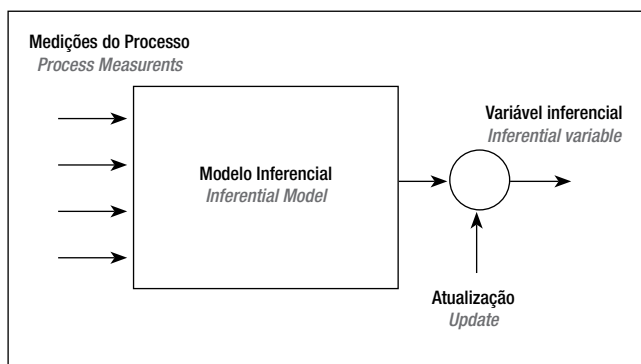


Figura 7. Diagrama de blocos de sistema inferencial típico
Figure 7. Block diagram of a typical inferential system

important information on the product quality, information upon which to base in order to reach decisions with regard to the control system. Typically, the process operator must know the measuring values of supplementary process variables (temperatures, pressures, flows, etc.) and interpret them in the best possible way in order to make adjustments to the process control. However, considering the multivariable and nonlinear characteristic of the dynamic behaviour of most processes of this sphere of knowledge, this problem becomes complex.

The neural network based models allow drawing such inferences in a consistent and robust way, making the estimated values available in real time to the process operator and to the control system of the industrial plant. **Figure 7** presents a block diagram illustrating the concept referred to.

The input information for the neural network based model consists of the actual values obtained from the process measurements. The neural network based model outputs are the values foreseen for the product quality parameters. The developed model was trained based on a set of data formed by the actual values of the variables, obtained from the process operation team. Then the model can be employed in real time, in a predictive manner, as shown in **Figure 8**.

The availability of accurate and reliable information on the inferred measurement allows the process to be operated in a more stable way and closer to the optimum production conditions. This fact certainly is to cause a direct impact on the productivity and profitability of the process.

A particular form of modeling of the neural network based process was used for inferential prediction due to its simplicity and ease of implementation by means of the function called *Radial Basis Function (RBF)*, which presents the characteristics shown in Figure 8 and listed in the following (SIMSCI-ESCOR. 2005):

An input layer: Each input layer knot is connected to a particular value of a measurement of the process, be the latter present or historical;

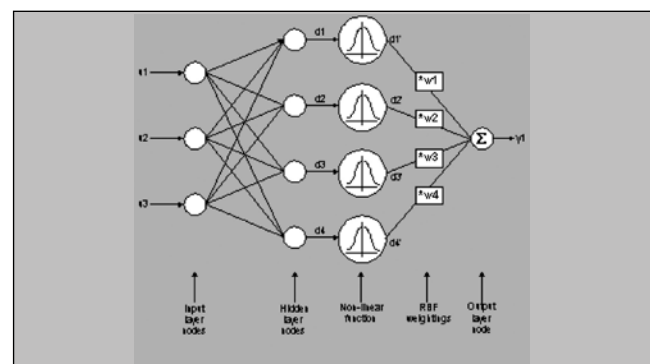


Figura 8. Estrutura de rede neural RBF
Figure 8. RBF neural network structure

Uma camada oculta (*hidden layer*): Cada nó da camada oculta está conectado a cada nó da camada de entrada. A saída do nó da camada oculta é um parâmetro de “distância”, que representa o deslocamento da informação de entrada a partir de um ponto particular de referência no espaço compreendido pelos dados do modelo;

Uma função não linear (*non-linear function*): Cada uma das saídas dos nós da camada oculta é utilizada como referência em função não linear para calcular o valor modificado da saída. Estão disponíveis as funções logarítmica e gaussiana;

Uma matriz de ponderação (*RBF weighing matrix*): A saída de cada função não linear é multiplicada por fator de peso individual definido nesta matriz;

Uma camada de saída (*output layer*): Finalmente, a informação proveniente da matriz de computação é somada em um nó de saída para gerar o valor inferido.

A criação da rede neural considerada neste trabalho foi feita *off-line*. Para tanto, foi necessário definir a estrutura da rede neural, seguida pela aplicação da matriz de ponderação. A definição da estrutura da rede neural compreende:

- Identidade e perfil de tempo das variáveis de entrada;
- Identidade da variável (predita) de saída;
- Número de nós da camada oculta;
- Tipo de função não linear.

A aplicação da matriz de ponderação (*weighting matrix*) requer um conjunto de dados do processo com as variações normais dos valores, tanto das variáveis de entrada como da variável a inferir. Esta informação foi utilizada para estabelecer o conjunto de fatores de peso.

Uma vez criado e validado, o modelo de rede neural foi instalado para inferir os valores *on-line*. Deve-se ressaltar o fato de que o modelo neural foi instalado juntamente com outras funções também executadas em tempo real, a saber: (i)- controladores preditivos baseados em modelo (*model-based predictive controllers*), (ii)- otimizadores lineares (*LP optimizers*) e (iii)- controladores baseados em regras (Lógica Fuzzy). Os valores inferidos pelo modelo de rede neural são utilizados como variáveis controladas em estratégias de controle avançado baseado em regras e modelos preditivos multivariáveis.

O controlador de *CE* tem como finalidade estabilizar o *CE* em torno de um valor pré-definido e também evitar a adição excessiva de cal. O esquema de controle do *CE* consiste dos seguintes componentes: medição de *CE*; controlador de *CE*; meta de *CE* e o controlador de ΔT .

O controlador de *CE* no 1º caustificador visa manter a eficiência de caustificação no valor definido pelo operador, tipicamente em torno de 75% a 77%. Quando há uma variação na medição da *CE*, a saída do controlador manipula a taxa de reação no apagador ajustando o *setpoint* do controlador de ΔT . Este controlador regula a diferença

A hidden layer: Each hidden layer knot is connected to each input layer knot. The hidden layer knot output is a “distance” parameter, representing the input information displacement from a particular point of reference in the space comprised by the model data;

A nonlinear function: Each of the hidden layer knot outputs is used as reference in nonlinear function, in order to calculate the modified output value. The logarithmic and Gaussian functions are available;

An RBF weighting matrix: The output of each nonlinear function is multiplied by an individual weight factor defined in this matrix;

An output layer: Finally, the information coming from the computation matrix is added at an output knot, in order to generate the inferred value.

The creation of the neural network considered in this paper was made off-line. For this purpose it was necessary to define the neural network structure, followed by the weighting matrix application. The neural network structure definition comprises:

- *Input variables identity and time profile;*
- *(Predicted) output variable identity;*
- *Number of hidden layer knots;*
- *Type of nonlinear function.*

The weighting matrix application requires a set of process data with the normal variations in the values of the input variables, as well as of the variable to be inferred. This information was used to establish the set of weight factors.

Once created and validated, the neural network model was installed to infer the values on-line. It should be stressed that the neural model was installed along with other likewise real-time performed functions, as follows: (i)- model-based predictive controllers, (ii)- LP optimizers, and (iii)- rule based controllers (Fuzzy Logic). The values inferred by the neural network model are used as controlled variables in strategies of advanced control based on rules and multivariable predictive models.

The purpose of the CE controller is to stabilize the CE around a predefined value, as well as to avoid an excessive addition of lime. The CE control system consists of the following components: CE measurement; CE controller; CE target; and ΔT controller.

The CE controller in the 1st causticizer aims to maintain the causticizing efficiency at the value defined by the operator, typically around 75% to 77%. When there is a variation in the CE measurement, the controller output manipulates the reaction rate in the slaker adjusting the ΔT controller setpoint. This controller regulates the

de temperaturas entre o apagador e a alimentação de licor verde, de acordo com *setpoint* ótimo calculado pelo controlador de *CE*, gerando o *setpoint* do controlador de relação cal/licor, o qual, por sua vez, manipula a velocidade da rosca de alimentação de cal.

A **Figura 9** apresenta um diagrama de blocos que ilustra o funcionamento do sistema de controle considerado.

Controle por Lógica Fuzzy

O controle do processo com base em Lógica Fuzzy é recomendado quando for impossível estabelecer um modelo determinístico para a dinâmica do processo capaz de quantificar a relação matemática das dependências entre a entrada e a saída do processo. Nesses casos, o método de execução de controle automático faz uso do conhecimento acumulado pelos operadores do processo - adquirido durante a vivência na operação da unidade industrial – em modo manual por muitos anos.

As regras informais, que são utilizadas por todos os operadores do processo da instalação industrial foram codificadas em um programa que pode ser executado em tempo real.

O funcionamento de um controle por Lógica Fuzzy envolve as etapas apresentadas na **Figura 10** e relacionadas na sequência:

Fuzzificação: Transformação da variável controlada do processo em variável fuzzy;

Inferência: Calcula uma saída fuzzy com base nas regras especificadas; e

Defuzzificação: Transformação da saída fuzzy em variável manipulada para aplicar ao processo.

temperature difference between slaker and green liquor feeding, according to the optimum setpoint calculated by the CE controller, generating the setpoint of the lime/ liquor ratio controller, which, in turn, manipulates the lime feeding screw speed.

Figure 9 presents a block diagram illustrating the operation of the control system considered.

Fuzzy Logic control

The Fuzzy Logic based process control is recommended when it is impossible to establish a deterministic model for the process dynamics able to quantify the mathematical dependencies ratio between process input and output. In such cases, the automatically controlled execution method makes use of the knowledge accumulated by the process operators – acquired during the experience in operating the industrial unit – in manual mode for many years.

The informal rules used by all process operators of the industrial plant were codified in a program, which can be performed in real time.

The operation of a Fuzzy Logic control involves the stages presented in **Figure 10** and listed in the following:

Fuzzification: Transformation of the controlled process variable into fuzzy variable;

Inference: Calculation of a fuzzy output based on the specified rules; and

Defuzzification: Transformation of the fuzzy output into manipulated variable to apply to the process.

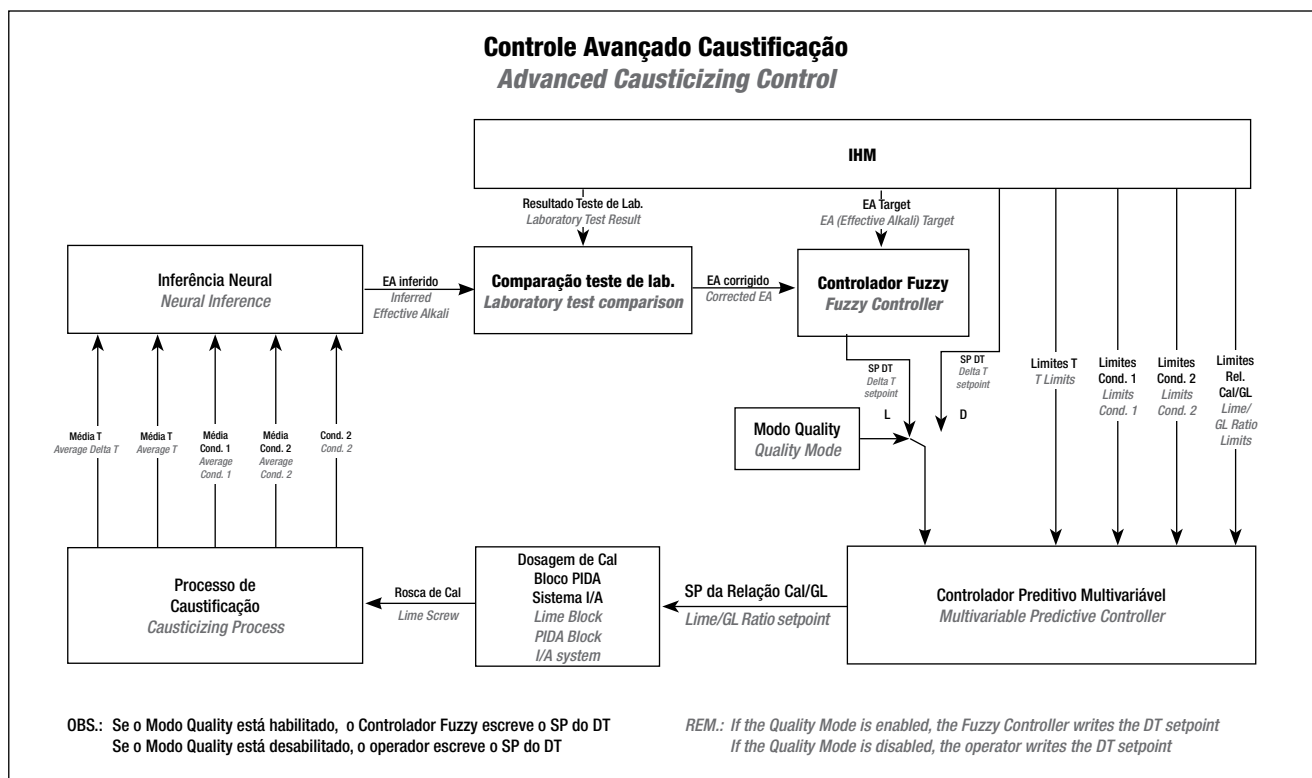


Figura 9. Diagrama de blocos do APC híbrido / **Figure 9.** Block diagram of the hybrid APC

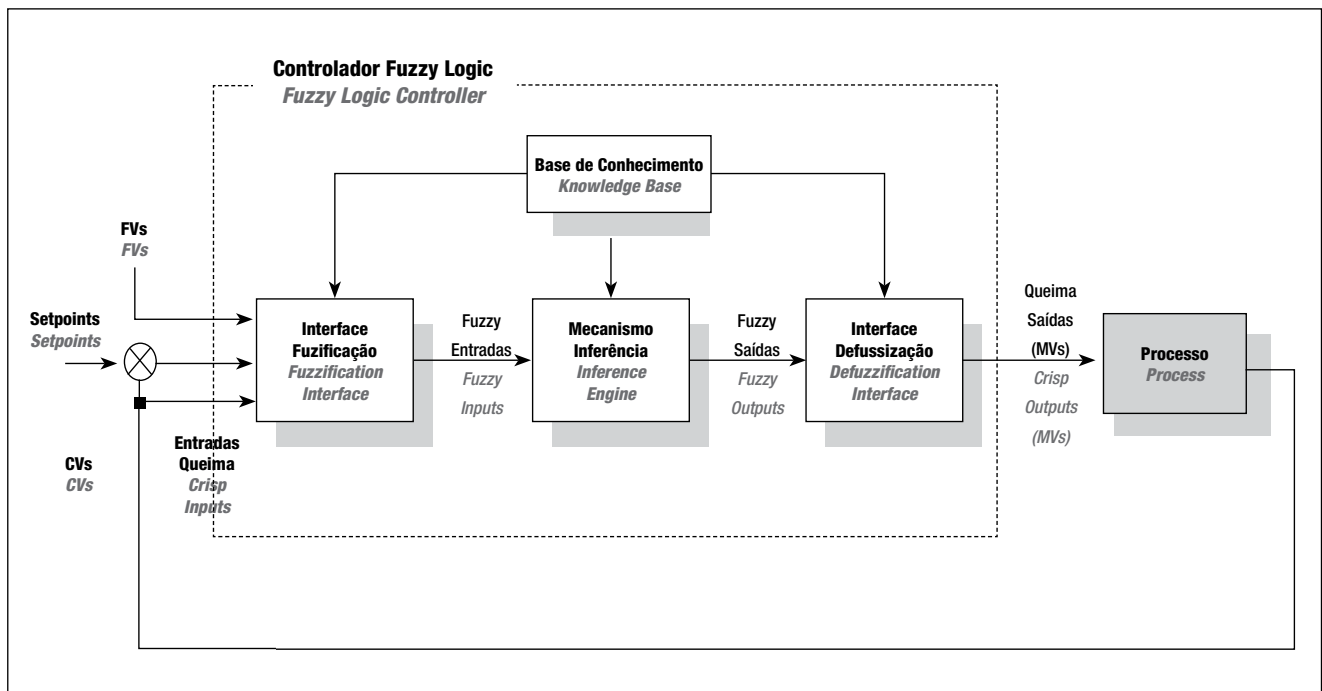


Figura 10. Estrutura básica de controlador por Lógica Fuzzy / **Figure 10.** Basic structure of a Fuzzy Logic controller

O controle por Lógica Fuzzy usa um conjunto de declarações condicionais que são expressas como *IF – THEN*. Essas declarações formam as regras de um controlador baseado em Lógica Fuzzy. A regra base é definida por meio do que segue:

Variável Controlada: Escolha da variável de entrada Fuzzy e das funções membro teve forte influência na estrutura do controlador baseado em Lógica Fuzzy. Quanto maior o número de variáveis controladas, maior o número de regras envolvidas e maior a complexidade do problema

Regras: A formulação de regras foi obtida por meio de questionamentos formulados por especialistas experientes e/ou operadores de processo igualmente experientes, caracterizando-se por uma abordagem baseada no conhecimento.

Um controlador tipo *Fuzzy Logic* foi implementado para controlar o teor de carbonato residual presente na corrente de processo que deixa o forno de cal. A queima exagerada ou a queima insuficiente da cal será regulada manipulando-se os limites de temperatura da zona quente do forno. Quando o resultado do carbonato residual estiver disponível, o operador entrará com o valor no sistema. Com base nas regras configuradas no controlador, uma ação de controle será tomada para aumentar ou diminuir os limites de temperatura da zona quente. Isso forçará o controlador preditivo multivariável a reagir, usando as variáveis manipuladas para aumentar ou diminuir a temperatura de operação. As correções são executadas somente quando há uma entrada de valores pelo operador; portanto, a frequência com que as amostras são tiradas definem a eficiência do controlador.

The Fuzzy Logic control uses a set of conditional declarations expressed as IF – THEN. These declarations form the rules of a Fuzzy Logic based controller. The basic rule is defined by the following:

Controlled Variable: *The choice of the Fuzzy input variable and of the member functions had a strong influence on the Fuzzy Logic based controller structure. The higher the number of controlled variables, the higher the number of rules involved and the greater the complexity of the problem.*

Rules: *The formulation of rules was achieved by means of questions formulated by experienced specialists and/or equally experienced process operators, and was characterized by a knowledge based approach.*

A Fuzzy Logic type controller was implemented to control the residual carbonate content present in the process chain leaving the lime kiln. The exaggerated or insufficient lime burning will be regulated by manipulating the temperature limits of the hot zone of the kiln. When the residual carbonate result is available, the operator will enter the value into the system. Based on the rules configured in the controller, a control action will be taken either to increase or to reduce the hot zone temperature limits. This will force the multivariable predictive controller to react, using the manipulated variables either to increase or to reduce the operating temperature. Corrections are only made when a set of values is entered by the operator; therefore, the samples taking frequency defines the controller efficiency.

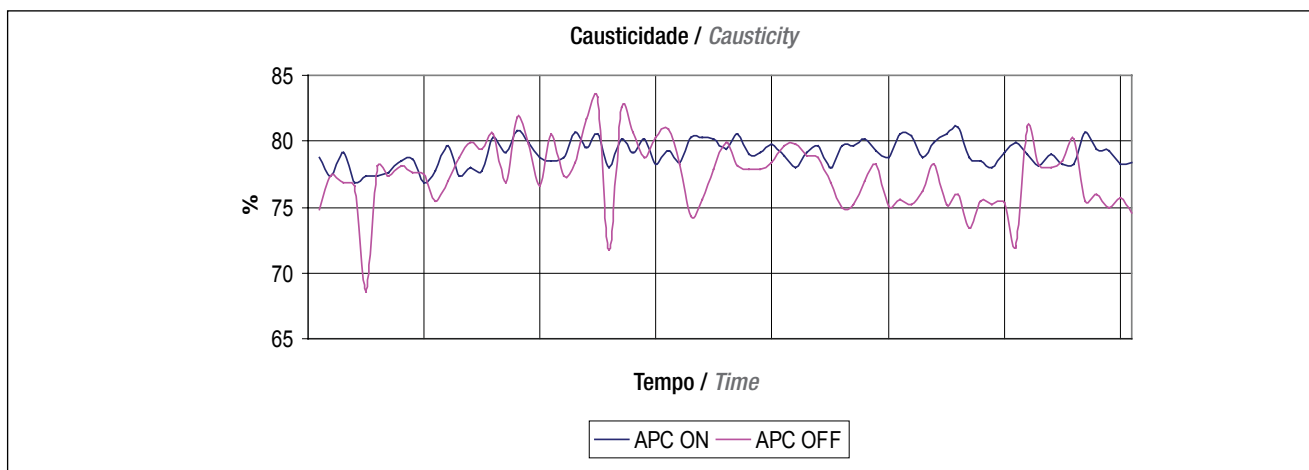


Figura 11 / Figure 11

Tabela 1. Comportamento do CE (%) / Table 1. Behaviour of CE (%)

Parâmetro / Parameter	APC ON	APC OFF
Valor médio / Mean value	79,06	77,44
Desvio padrão / Standard deviation	1,05	2,59
Desvio absoluto médio / Mean absolute deviation	0.86	2.01

RESULTADOS OBTIDOS

O gráfico apresentado na **Figura 11** mostra o comportamento da causticidade (CE), expressa em porcentagem, na entrada do caustificador estudado neste trabalho.

A **Tabela 1** apresenta os resultados da média e do desvio padrão para a variável considerada.

A **Figura 12** apresenta os valores da função densidade de probabilidade para a variável CE em função dos valores desta mesma variável. Pode-se verificar um aumento no valor da eficiência da caustificação e a conseqüente redução da variabilidade com o uso do APC.

RESULTS OBTAINED

The graph presented in **Figure 11** shows the behaviour of causticity (CE), expressed as a percentage, at the inlet of the causticizer studied in this paper.

Table 1 presents the average and standard deviation results for the variable considered.

Figure 12 presents the values of the density function probability for the CE variable, as a function of the values of the same variable. An increase in causticizing efficiency value and the consequent reduction in variability can be found out by using the APC.

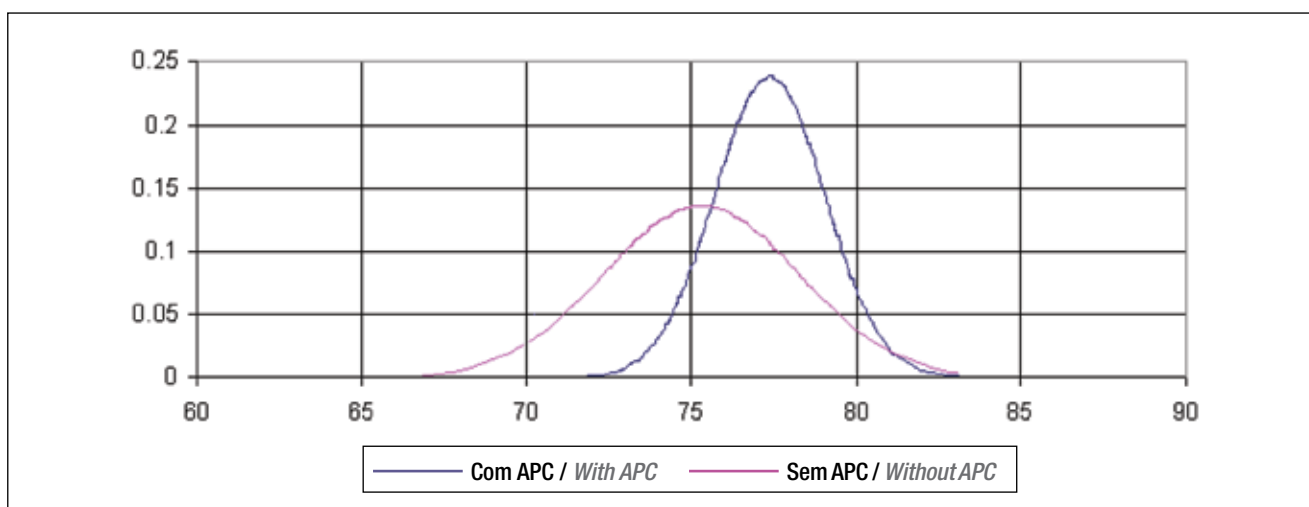


Figura 12. Distribuição normal para variável CE / Figure 12. Normal distribution for CE variable

Tabela 2. APC aplicado ao forno de cal / *Table 2. APC applied to the lime kiln*

APC	Desempenho / Performance	Redução [%] Reduction [%]
Forno de Cal Lime Kiln	Variabilidade da Qualidade da Lama / Variability in Mud Quality	43
	Variabilidade da Concentração de O ₂ / Variability in Concentration of O ₂	41
	Variabilidade da Concentração de TRS / Variability in Concentration of TRS	26
	Variabilidade da Temperatura do Gás ESP / Variability in ESP Gas Temperature	18

Com base nos resultados apresentados anteriormente, pode-se constatar que houve uma significativa diminuição na variabilidade apresentada pelas variáveis de processo.

A **Tabela 2** apresenta um resumo dos resultados obtidos para a aplicação do APC ao forno de cal.

É importante ressaltar que, além da redução da variabilidade das variáveis tais como O₂, CO e TRS, houve a redução de seus valores médios, o que representa melhoria na eficiência no forno de cal e, conseqüentemente, menor consumo de combustíveis.

A **Figura 13** apresenta uma tela de registro de tendências que mostra, de forma clara, a melhoria no controle do processo após a implantação do APC.

Based on the previously presented results, it can be found out that there was a significant reduction in the variability presented by the process variables.

Table 2 summarizes the results obtained from applying the APC to the lime kiln.

It is important to stress that, besides the reduction in variability of variables such as O₂, CO, and TRS, there occurred the reduction in their average, which represents an improvement in lime kiln efficiency, and, as a consequence, a lower fuel consumption.

Figure 13 presents a tendency recording screen, clearly showing the improvement in process control after APC implementation.

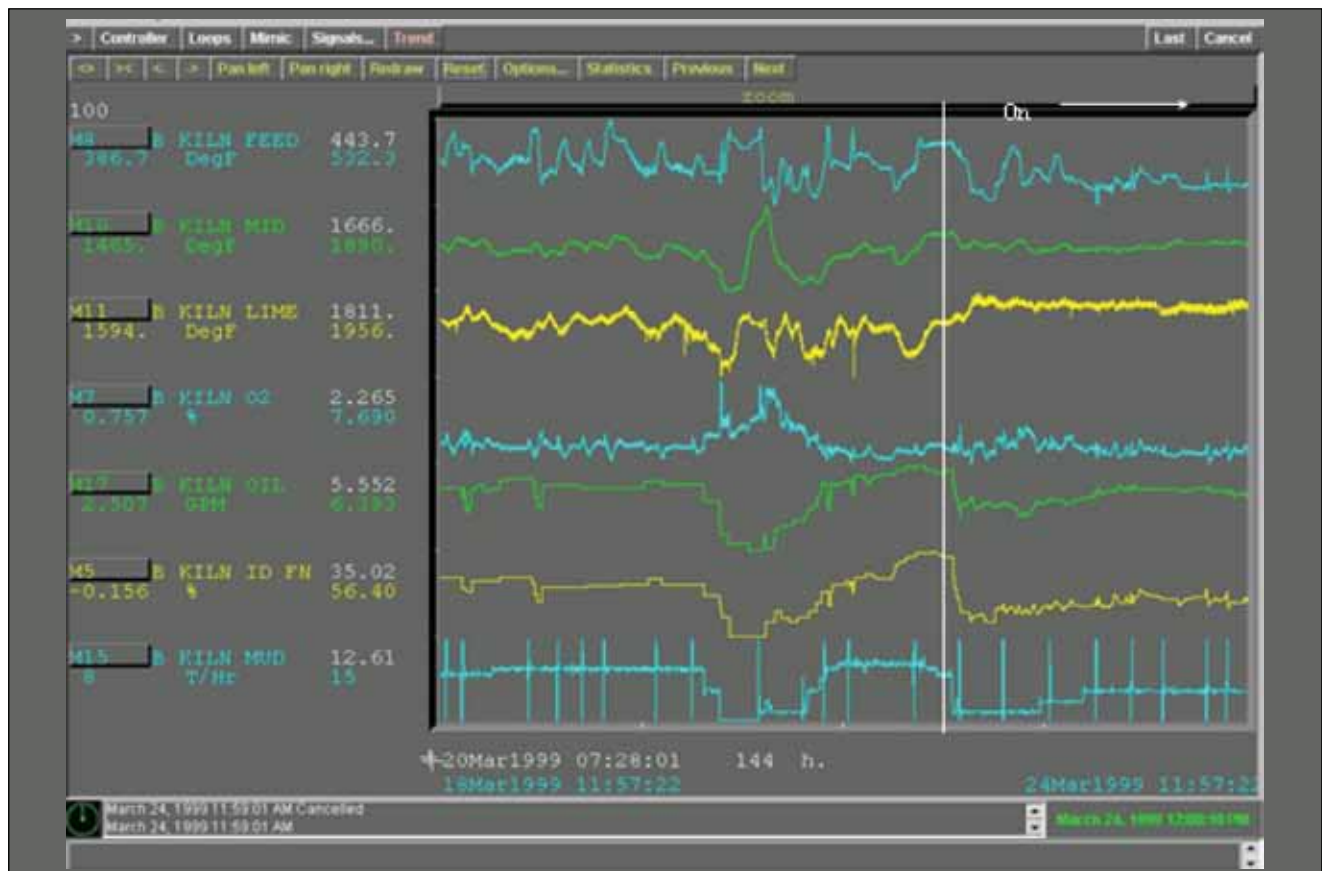


Figure 13. Comparação do controle do forno de cal com e sem APC / *Figure 13. Comparison of the lime kiln control with and without APC*

CONCLUSÕES

O estudo apresentado neste trabalho sugere que o emprego de modelos preditivos de controle multivariável apresenta contribuição relevante para a indústria de celulose e para o meio ambiente, pois que permite controle mais estreito das oscilações tipicamente apresentadas pelas variáveis de processo. No entanto, o conhecimento das exigências específicas do processo de fabricação de celulose ainda é um campo a ser investigado. A possibilidade de utilizar uma única plataforma de controle que ofereça todas as tecnologias tratadas neste trabalho é uma opção interessante para o usuário, pois simplifica a implantação do APC e a integração com os sistemas de controle da base regulatória (SEBORG *et al.*, 1989).

Com base nos resultados apresentados anteriormente, pode-se constatar que a melhoria obtida com a implantação do sistema híbrido de Controle de Processo Avançado sugere que:

- i)- O aumento da eficiência do processo de caustificação foi de aproximadamente 1,6%;
- ii)- A diminuição do valor do desvio padrão da eficiência do processo de caustificação variou de 2,59% para 1,09%;
- iii)- A temperatura média de operação dos apagadores foi de 104°C, com desvio padrão de 2°C;
- iv)- Houve redução de 1% no consumo de cal. ▲

CONCLUSIONS

*The study presented in this paper suggests that using predictive multivariable control models represents a relevant contribution to both pulp industry and environment, since it allows a closer control of the oscillations typically presented by the process variables. However, the knowledge of the specific requirements of the pulp manufacturing process is still a field to be further investigated. The possibility of using an only control platform offering all technologies treated in this work is an interesting option for the user, as it simplifies the implementation of the APC and the integration with the control systems of the regulatory base (SEBORG *et al.*, 1989).*

Based on the previously presented results, it can be found out that the improvement achieved with the implementation of the hybrid Advanced Process Control system suggests that:

- i)- The increase in causticizing process efficiency corresponded to approximately 1.6%;*
- ii)- The reduction in the value of the standard deviation from the causticizing process efficiency varied from 2.59% to 1.09%;*
- iii)- The average slaker operating temperature was 104°C, with a standard deviation of 2°C; and*
- iv)- There was a 1% reduction in lime consumption. ▲*

REFERÊNCIAS / REFERENCES

1. JÄRVENSIVU, M.; SAARI, K.; JÄMSÄ-JOUNELA, S.-L. *Intelligent Control system of an industrial lime kiln process*. USA. Control Engineering Practice 9 (2001) 589 – 606.
2. SEBORG, D.E., EDGAR, T.F. & MELLICHAMP, D. A. 1989. *Process Dynamics & Control*. 2nd Edition. John Wiley & Sons. USA
3. SIMSCI-ESCOR. 2005. *CONNOISSEUR Multivariable Process Control Software Manual*. USA.
4. VARGAS, J.M.; GARCIA, C. 1997. *Controle Preditivo Multivariável: Evolução Histórica, Conceitos e Aplicações em Processos Industriais*. Anais do 3º Congresso de Equipamentos & Automação da Indústria Química e Petroquímica. São Paulo.
5. GEDRAITE, R. ; RESTREPO, A. ; RODRIGUES, L. A. ; SILVA, F. A. Redução de variabilidade e aumento da qualidade de produto em fornos de cal na área de recuperação usando controle avançado de processos ABTCP. 2008