

# Otimização do processo de deslignificação com oxigênio

## Optimizing the oxygen delignification process

Autores/Authors\*: Flávio H. Mine<sup>1</sup>  
Leonardo S. Figueirêdo<sup>1</sup>  
Roselito A. Teixeira<sup>2</sup>

**Palavras-chave:** Deslignificação com oxigênio, kappa, otimização de processos, redes neurais artificiais, viscosidade

**Keywords:** Artificial neural networks, kappa, oxygen delignification, process optimization, viscosity

### RESUMO

Neste trabalho foram implementadas estratégias de controle que resultaram na otimização do processo de deslignificação com oxigênio, tendo sido também desenvolvido um modelo matemático de predição do número kappa de saída desse estágio baseado em redes neurais artificiais. O objetivo deste projeto foi a minimização da perda de viscosidade mantida a máxima deslignificação e o menor consumo de químicos. Os resultados alcançados foram satisfatórios, com salvaguarda do grau de deslignificação e alvura, ganho de viscosidade e ainda redução do consumo dos químicos envolvidos no processo.

### ABSTRACT

This work relates to the implementation of control strategies resulting in oxygen delignification process optimization, as well as development of a mathematical model based on artificial neural networks to predict the kappa number leaving this stage. This project aims to minimizing viscosity loss, associated with maximum delignification and lower chemical consumption. The results obtained were satisfactory, with maintenance of delignification degree and brightness, increase in viscosity, and reduction in consumption of chemicals involved in the process.

### INTRODUÇÃO

O processo de deslignificação com oxigênio tem se tornado extremamente importante para as tecnologias de branqueamento de celulose no século 21. O uso de um estágio com oxigênio nas sequências de branqueamento reduz significativamente a emissão de compostos organoclorados, cor, demanda química de oxigênio - DQO e demanda bioquímica de oxigênio - DBO no efluente (Miller *et al.*, 1999).

O fato de seu filtrado ser livre de íons cloreto permite sua reutilização na lavagem marrom, sendo depois enviado para evaporação e caldeira de recuperação, onde é utilizado como fonte de energia e não como um poluente (Iijima e Taneda, 1996). Embora apresente um benefício ambiental,

### INTRODUCTION

The oxygen delignification process has gradually become extremely important to the pulp bleaching technologies in the 21<sup>st</sup> century. Including an oxygen stage in the bleaching sequences significantly reduces the emission of organochlorinated compounds, color, chemical oxygen demand (COD), and biochemical oxygen demand (BOD) in the effluent (Miller *et al.*, 1999).

The fact that this filtrate is free from chloride ions allows its reutilization in brown washing, after which it is sent to evaporation and recovery boiler, where it is used as a source of energy, not as a pollutant (Iijima and Taneda, 1996). Although presenting an environmental

#### \*Referências dos autores / Authors' references:

1. Celulose Nipo-brasileira S.A. – Cenibra, Rodovia 381 – km 172, 35196-000 Belo Oriente, MG, Brasil  
Celulose Nipo-brasileira S.A. - Cenibra, Rodovia 381 – km 172, 35196-000 Belo Oriente, MG, Brazil
2. UnilesteMG, Av. Tancredo Almeida Neves, 3500, 35170-056 Coronel Fabriciano, MG, Brasil  
UnilesteMG, Av. Tancredo Almeida Neves, 3500, 35170-056 Coronel Fabriciano, MG, Brazil

E-mails: flavio.mine@cenibra.com.br; leonardo.figueiredo@cenibra.com.br; roselito@unilestemg.br

este processo tem 2 grandes inconvenientes que são: a baixa seletividade e deslignificação limitada a não mais do que 50%. (Miller *et al.*, 1999).

Apesar disso, do ponto de vista de rendimento e seletividade, este processo é melhor do que o cozimento convencional, sendo interessante um kappa um pouco maior na descarga do digestor com posterior estágio com oxigênio de forma a atingir a deslignificação desejada para entrada da polpa no estágio de branqueamento. (Santos *et al.*, 2000; Steffes *et al.*, 1998).

O branqueamento com oxigênio é uma reação heterogênea que acontece em um sistema composto de fibras, solução alcalina e oxigênio, onde sua cinética depende principalmente de temperatura, pressão do oxigênio e carga alcalina (Rubini e Yamamoto, 2006).

### MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A CENIBRA possui 2 plantas de deslignificação com oxigênio. O sistema de controle dessas plantas era do tipo “caixa preta”, onde as variáveis de controle não eram explícitas e, portanto, de difícil entendimento para os operadores.

Além disso, o processo não era muito seletivo e por muitas vezes tínhamos problemas de baixa viscosidade na saída do pré-branqueamento.

Visando otimização do processo, realizamos este projeto com os objetivos de substituir o sistema de controle existente e desenvolver um modelo matemático de predição do kappa de saída do processo de deslignificação com oxigênio.

Foram aspectos motivadores para o desenvolvimento desse projeto os trabalhos anteriores (Figueirêdo, 2006, 2009; Figueirêdo *et al.*, 2010) de modelagem matemática do processo de caustificação e (Ribeiro, 2007) no processo de cozimento, desenvolvidos na CENIBRA, que deram resultados positivos, bem como a pesquisa desenvolvida por Rubini e Yamamoto (2006) no processo de pré-branqueamento de celulose.

### DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O presente trabalho iniciou-se pela planta de deslignificação com oxigênio da fábrica 2, que trabalha a média consistência (10% a 11%) e possui dois reatores. No início do processo, a solução de álcali é adicionada à polpa na rosca de alimentação do tanque de estocagem que antecede os reatores. Cerca de 95% do total de oxigênio e o vapor de média pressão são adicionados em um misturador posterior à bomba que succiona a polpa do tanque de estocagem, de onde a mistura é alimentada ao primeiro reator. Após o primeiro estágio de reação a polpa é novamente aquecida, e então adicionados cerca de 5% do total de oxigênio consumido pelo processo e bombeada para o segundo reator. Em ambos os reatores o fluxo é ascendente e o oxigênio, que em meio alcalino forma uma dispersão gasosa estável na polpa, é consumido nas

*benefit, this process has two serious inconveniences: low selectivity and delignification limited to no more than 50%. (Miller et al., 1999).*

*In spite of that, from the point of view of yield and selectivity, this process is better than conventional cooking, a somewhat higher kappa being convenient at digester discharge, followed by an oxygen stage, so as to achieve the degree of delignification desired for the pulp entering the bleaching stage (Santos et al., 2000; Steffes et al., 1998).*

*The oxygen bleaching is a heterogeneous reaction occurring in a system composed of fibre, alkaline solution, and oxygen, where its kinetics depends primarily on temperature, oxygen pressure, and alkaline charge (Rubini and Yamamoto, 2006).*

### MOTIVATION FOR DEVELOPING THE WORK

*CENIBRA has two oxygen delignification plants. The control system of these plants was of the “black box” type, where the control variables were not explicit and hence difficult to be understood by the operators.*

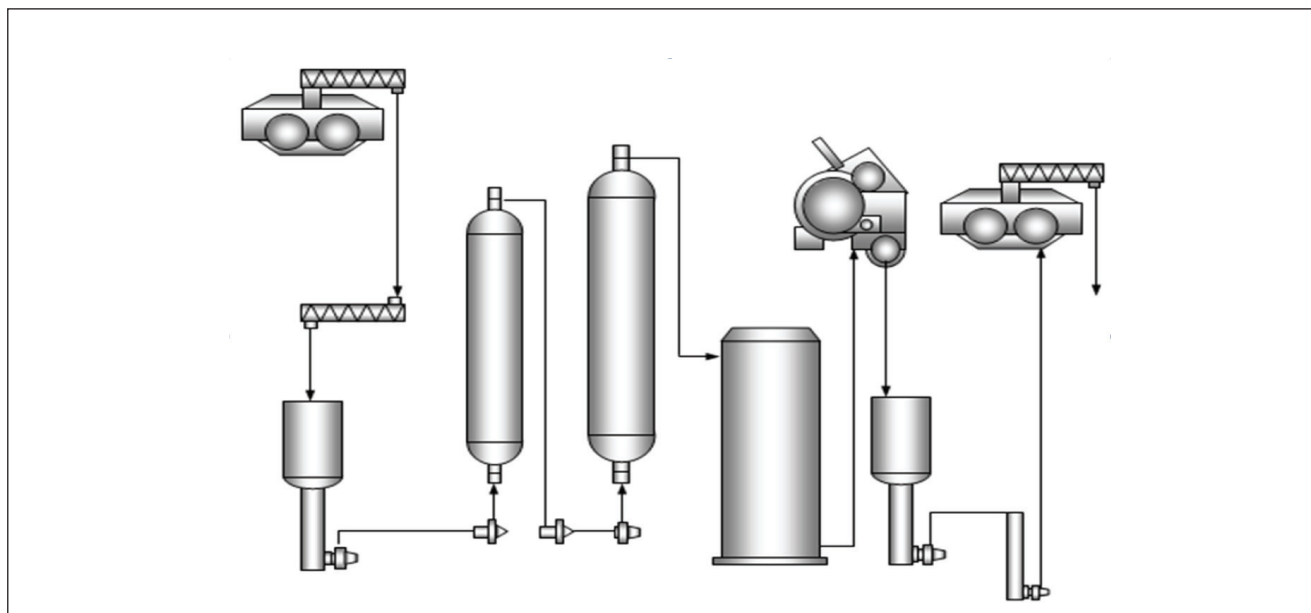
*Furthermore, the process was not very selective and there were often low viscosity problems at prebleaching outlet.*

*With the aim of optimizing the process, we carried out this project with the objectives of replacing the existing control system and developing a mathematical model for predicting the kappa number at the oxygen delignification process outlet.*

*Motivating aspects for developing this project were the previous works (Figueirêdo, 2006, 2009; Figueirêdo et al., 2010) of mathematical modelling of the causticizing process and (Ribeiro, 2007) cooking process, developed at CENIBRA, which yielded positive results, as well as the research conducted by Rubini and Yamamoto (2006) in the pulp prebleaching process.*

### PROCESS DESCRIPTION

*The present work was initiated with the mill's oxygen delignification plant 2, which works at medium consistency (10% to 11%) and has two reactors. At the beginning of the process, the alkali solution is added to the pulp at the feeding screw of the storage tank preceding the reactors. Approximately 95% of the total oxygen and the medium-pressure steam are added to a mixer following the pump drawing the pulp from the storage tank, the mixture thereof being fed into the first reactor. After the first reaction stage the pulp is heated anew, about 5% of the total oxygen consumed by the process is added thereto, and then it is pumped into the second reactor. In both reactors the flow is ascending and the oxygen, which in an alkaline medium forms a stable gaseous dispersion*



**Figura 1.** Fluxograma do processo / **Figure 1.** Process flowsheet

reações com a lignina. A polpa que deixa esses reatores é descarregada em um tanque e posteriormente enviada para ser lavada em duas prensas, alimentando, então, o primeiro estágio de branqueamento. A **Figura 1** apresenta o esquema simplificado da planta 2 de deslignificação da CENIBRA.

A medida utilizada para identificar o desempenho da planta de deslignificação é o número kappa da polpa. Esse valor é adimensional, linearmente proporcional à quantidade de lignina remanescente na polpa, por isso um valor importante para se estimar a demanda de reagentes para o processo.

Em um processo industrial, é normal obter-se um grau de deslignificação com oxigênio entre 40% e 50%. Quando o sistema é forçado em busca de excessiva deslignificação, ocorre degradação da celulose, o que causa redução da viscosidade da polpa, ou seja, perda de resistência da fibra.

O resultado da deslignificação é principalmente dependente da carga de álcali, temperatura e pressão dos reatores, que são os principais parâmetros regentes da cinética da reação (Backa e Ragnar, 2003; Gendron *et al.*, 2002; Chirat e Lachenal, 1998; McDonough *et al.*, 1999; Lai *et al.*, 1998; Agarwal *et al.*, 1998; Miller *et al.*, 1999; Iijima e Taneda, 1996; Santos *et al.*, 2000; Steffes *et al.*, 1998), uma vez que é normalmente usado excesso de oxigênio, superior à estequiometria da reação, por se tratar de um reagente relativamente de baixo custo.

### PROJETO DE OTIMIZAÇÃO DO PRÉ-BRANQUEAMENTO

Visando a otimização do processo através de um melhor controle sobre as principais variáveis da cinética da reação de deslignificação (Backa e Ragnar, 2003; Gendron *et al.*, 2002; Chirat e Lachenal, 1998; McDonough *et al.*, 1999; Lai *et al.*, 1998; Agarwal *et al.*, 1998; Miller *et al.*, 1999; Iijima e Taneda, 1996; Santos *et al.*, 2000; Steffes *et al.*, 1998), foi

in the pulp, is consumed in the reactions with the lignin. The pulp leaving these reactors is discharged into a tank and afterwards sent to be washed in two presses, feeding then the first bleaching stage. **Figure 1** shows the simplified diagram of CENIBRA's delignification plant 2.

The measure used to identify the performance of the delignification plant is the kappa number of the pulp. This value is undimensional, linearly proportional to the amount of lignin remaining in the pulp, thus being an important value to estimate the demand for reagents used in the process.

In an industrial process it is usual to achieve a degree of oxygen delignification between 40% and 50%. When the system is forced to yield an excessive delignification, there occurs pulp degradation, causing a reduction in pulp viscosity, i.e. loss of fibre strength.

The result of delignification is mainly dependent on the alkali charge, temperature, and reactor pressure, which are the major parameters governing the reaction kinetics (Backa and Ragnar, 2003; Gendron *et al.*, 2002; Chirat and Lachenal, 1998; McDonough *et al.*, 1999; Lai *et al.*, 1998; Agarwal *et al.*, 1998; Miller *et al.*, 1999; Iijima and Taneda, 1996; Santos *et al.*, 2000; Steffes *et al.*, 1998), since oxygen in excess is normally used, higher than the stoichiometry of the reaction, as it is a relatively low-cost reagent.

### PREBLEACHING OPTIMIZATION PROJECT

Aiming to optimize the process through a better control over the main variables of the delignification reaction kinetics (Backa and Ragnar, 2003; Gendron *et al.*, 2002; Chirat and Lachenal, 1998; McDonough *et al.*, 1999; Lai *et al.*, 1998; Agarwal *et al.*, 1998; Miller *et al.*, 1999; Iijima and Taneda, 1996; Santos *et al.*, 2000; Steffes *et al.*,

desenvolvido um novo sistema de controle do processo, com o objetivo de aumentar a preservação da viscosidade da polpa com máxima deslignificação e economia de reagentes.

Foram desenvolvidos 5 grupos de controle, que funcionam de maneira paralela (**Figura 2**):

1. controle de pressão dos reatores;
2. controle de carga alcalina baseado no pH;
3. controle antecipativo de carga alcalina baseado no kappa de entrada;
4. controle de dosagem de  $O_2$  de acordo com o kappa de entrada;
5. controle de temperatura baseado no kappa de saída.

Vale ressaltar que, além da utilização de malhas de controle e ajustes na sintonia dos parâmetros Proporcional, Integral e Derivativo (Controlador PID), o diferencial desse projeto foi o desenvolvimento de estratégias de controle através da implementação de algoritmos no SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído) visando otimização do sistema utilizando o conceito de APC (*Advanced Process Control*) com geração automática de set points, de acordo com as variáveis de processo.

Embora os resultados iniciais tenham sido satisfatórios, pode-se dizer que essas estratégias de controle funcionam de maneira paralela, porém, não são completamente integradas. Visando aperfeiçoamento constante do processo decidiu-se pelo desafio de se desenvolver um controle preditivo multivariável de acordo com o modelo matemático do processo, baseado no conceito de MPC (*Multivariable Predictive Control*).

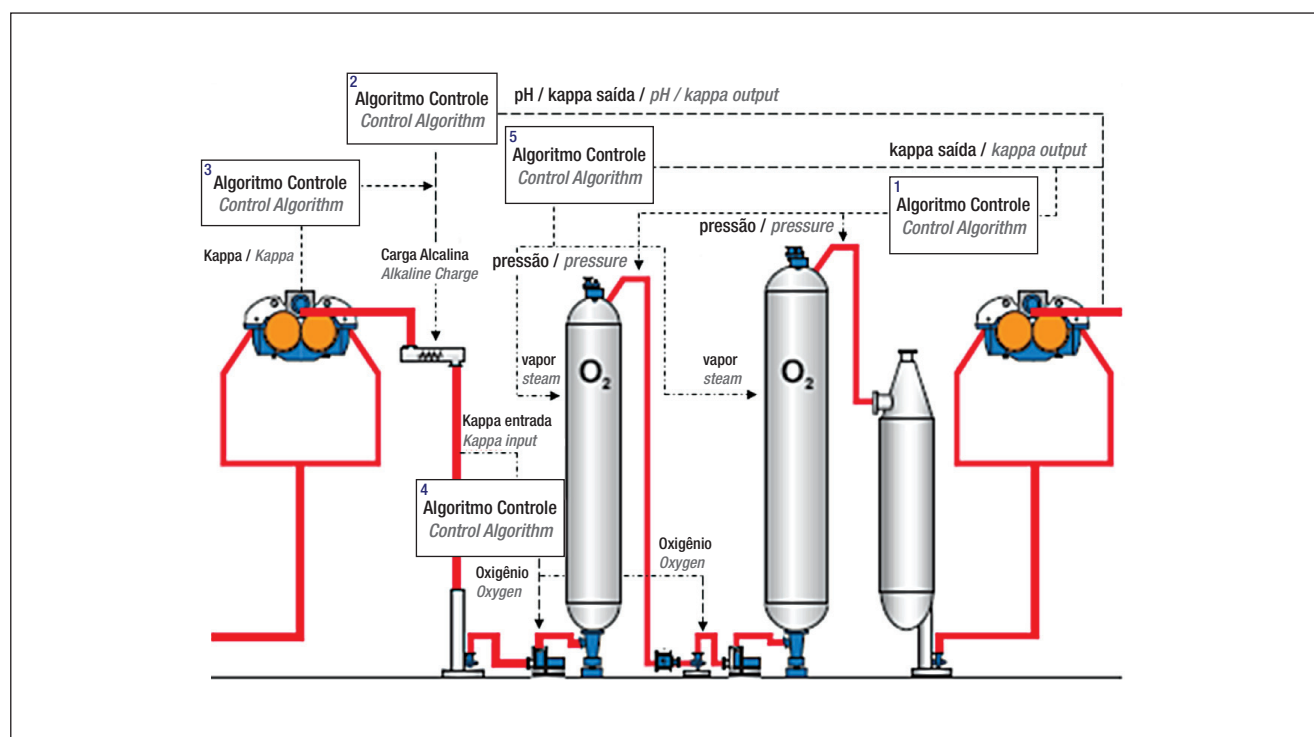
1998), a new process control system was developed, intended to increase pulp viscosity preservation associated with maximum delignification and savings in reagents.

Five control groups functioning in parallel were developed (**Figure 2**):

1. reactors pressure control;
2. pH based alkaline charge control;
3. anticipatory alkaline charge control based on the input kappa number;
4.  $O_2$  dosage control according to the input kappa;
5. temperature control based on the output kappa.

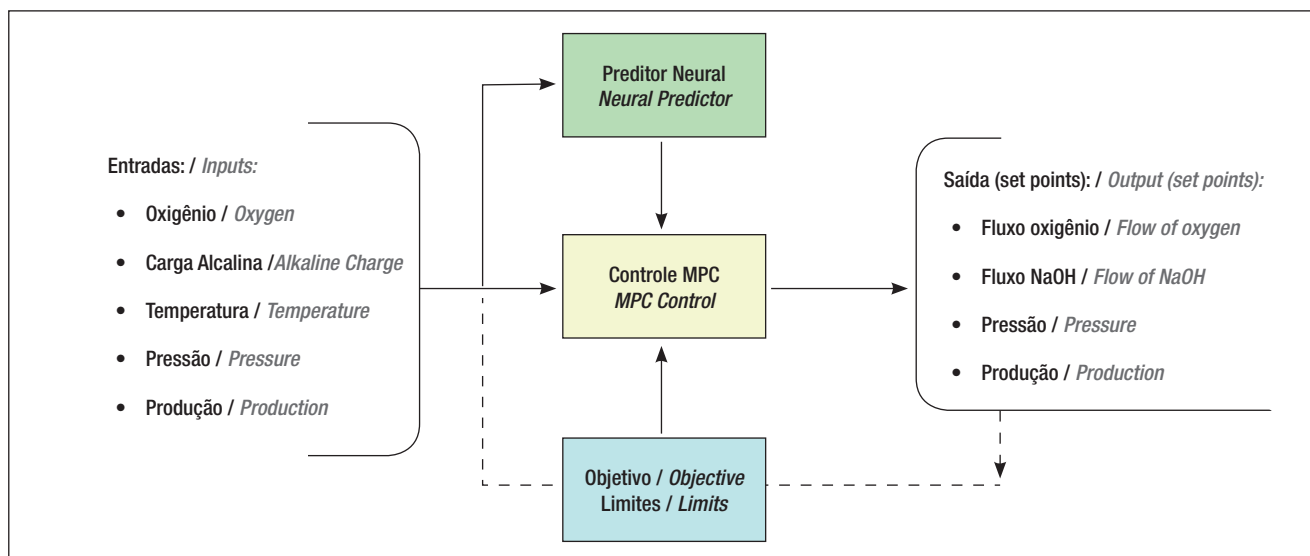
It is worthwhile stressing that besides using control loops and adjustments in tuning the Proportional, Integral and Derivative (PID Controller) parameters, the differential of this project was the development of control strategies through the implementation of algorithms in the SDCD (Digital Distributed Control System) aiming to optimize the system by using the concept of APC (*Advanced Process Control*) with automatic generation of set points, according to the process variables.

Though the initial results were satisfactory, it can be said that these control strategies function in parallel, but they are not fully integrated. Aiming to improve constantly the process, it was decided in favour of the challenge of developing a multivariable predictive control according to the mathematical model of the process, based on the concept of MPC (*Multivariable Predictive Control*).



**Figura 2.** Tela com os algoritmos de controle / **Figure 2.** Screen with the control algorithms





**Figura 3.** Estratégia MPC a ser implantada / **Figure 3.** MPC strategy to be implemented

A implementação dessa estratégia baseada em MPC, conforme **Figura 3**, é o primeiro projeto com essas características na CENIBRA. Para tal, foi escolhido como metodologia o desenvolvimento de um modelo matemático baseado em RNA (Redes Neurais Artificiais) devido à experiência de trabalho anteriormente desenvolvido na área de caustificação, Figueirêdo, 2006 e Ribeiro, 2007 na área de cozimento.

### REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

As redes neurais artificiais são estruturas matemáticas baseadas no funcionamento do cérebro humano, numa tentativa de reproduzi-lo.

É composta por unidades de processamento denominadas neurônios, organizadas em camadas, conectadas por pesos, que retornam saídas para um conjunto de entradas assim como acontece às sinapses nos neurônios biológicos.

Conforme Haykin (1999), a característica mais importante da rede neural é que não depende de um modelo matemático que relacione a entrada do processo com a saída. Ela tem a capacidade de “aprender”, semelhante ao aprendizado de um cérebro humano, a partir de um processo de treinamento.

Os modelos RNA's constituem uma importante técnica estatística não-linear capaz de resolver uma gama de problemas de grande complexidade.

O modelo do neurônio proposto por McCulloch e Pitts (1969) é uma simplificação do neurônio biológico. Sua descrição matemática resultou em um modelo com  $n$  terminais de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (que representam os dendritos) e apenas um terminal de saída  $y$  (representando o axônio). Para emular o comportamento das sinapses os terminais de entrada do neurônio têm pesos acoplados  $w_1, w_2, \dots, w_n$  cujos valores podem ser positivos ou negativos. O efeito de uma sinapse particular  $i$  no neurônio é dado por  $x_i w_i$ . Os pesos determinam

*The implementation of this MPC based strategy, as per **Figure 3**, is the first project with these characteristics at CENIBRA. For this purpose, the development of an RNAs (Artificial Neural Networks) based mathematical model was chosen as methodology, due to the experience gained from a previously work developed in the causticizing area, Figueirêdo, 2006, and Ribeiro, 2007, in the cooking area.*

### ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

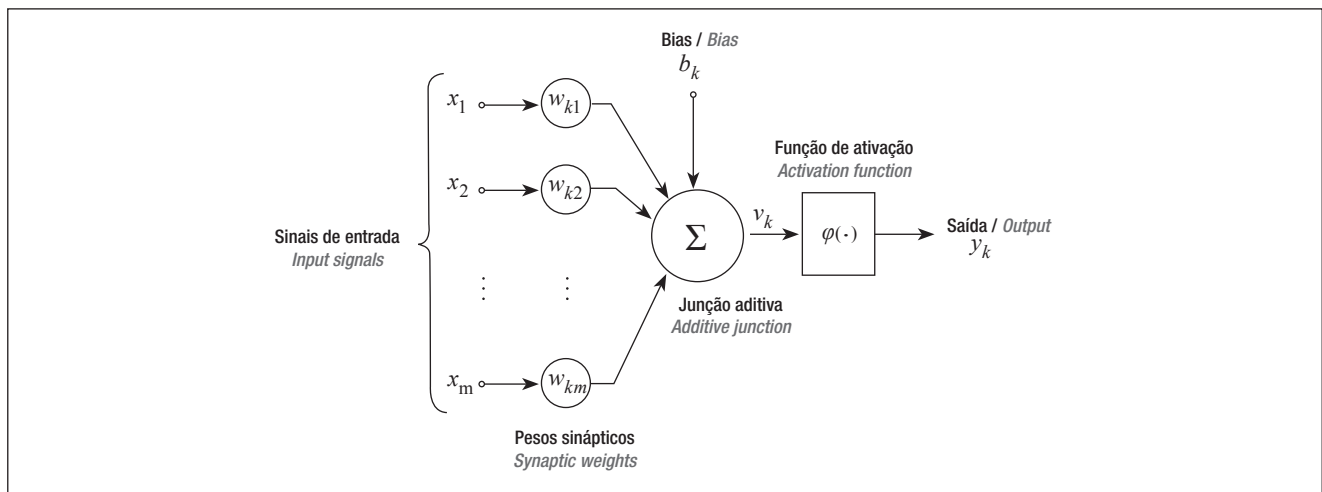
*The artificial neural networks are mathematical structures based on the action of the human brain, in an attempt to reproduce it.*

*They are composed of processing units called neurons, organized in layers, connected by weights, which return inputs to a set of inputs, like it occurs with the synapses in the biological neurons.*

*According to Haykin (1999), the most important characteristic of the neural network is that it does not depend on a mathematical model correlating the process input with its output. It has a capacity for “learning”, similar to the learning process of a human brain, starting from a training process.*

*The RNA models are an important non-linear statistical technique capable of solving a series of problems of great complexity.*

*The neuron model proposed by McCulloch and Pitts (1969) is a simplification of the biological neuron. Its mathematical description resulted in a model with  $n$  input terminals  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (representing the dendrites) and only one output terminal  $y$  (representing the axon). To emulate the behaviour of the synapses, the neuron input terminals have coupled weights  $w_1, w_2, \dots, w_n$ , the values of which can be either positive or negative. The effect of a particular synapsis  $i$  on the neuron is given by  $x_i w_i$ .*



**Figura 4.** Modelo de um neurônio artificial 9 (Fonte: Haykin, 1999) / **Figure 4.** Model of an artificial neuron 9 (Source: Haykin, 1999)

em que grau o neurônio deve considerar sinais de disparo que ocorrem naquela conexão. Uma descrição do neurônio está ilustrada na **Figura 4**.

O modelo neuronal da Figura 4 inclui também um *bias* aplicado externamente, representado por  $b_k$ . O *bias* tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada líquida da função de ativação, dependendo se ele é positivo ou negativo, respectivamente.

Em que:

- $x_1, x_2, \dots, x_n$  são os sinais de entrada;
- $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$  são os pesos sinápticos do neurônio  $k$ ;
- $u_k$  é a saída do combinador linear devido aos sinais de entrada;
- $b_k$  é o *bias*;
- $\varphi(\bullet)$  é a função de ativação;
- $y_k$  é o sinal de saída do neurônio.

A função de ativação define a saída do neurônio em função da saída linear  $v_k$ .

Uma propriedade que é de importância primordial para uma rede neural é a sua habilidade de aprender a partir de seu ambiente e de melhorar o seu desempenho através da aprendizagem.

O método mais comum de aprendizado utilizado no treinamento de RNA's é o aprendizado supervisionado. Os exemplos mais conhecidos de algoritmos para aprendizado supervisionado são a regra delta proposta por Wildrow e Hoff (1960) e a sua generalização para redes de múltiplas camadas, o algoritmo *backpropagation* desenvolvido por Rumelhart *et al.* (1986).

### MODELAGEM DE UMA REDE NEURAL

Conforme Figueirêdo (2006), para o treinamento de uma RNA é de fundamental importância que existam dados do processo que se deseja modelar. Quanto maior for a represen-

*The weights determine to which extent the neuron should consider tripping signals occurring in that connection. A description of the neuron is illustrated in **Figure 4**.*

*The neuronal model shown in Figure 4 also includes an externally applied bias, represented by  $b_k$ . The bias has the effect of increasing or reducing the net input of the activation function, depending on whether it is positive or negative, respectively.*

Where:

- $x_1, x_2, \dots, x_n$  are the input signals;
- $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$  are the synaptic weights of neuron  $k$ ;
- $u_k$  is the linear combiner output due to the input signals;
- $b_k$  is the bias;
- $\varphi(\bullet)$  is the activation function;
- $y_k$  is the neuron output signal.

*The activation function defines the neuron output as a function of the linear output  $v_k$ .*

*A property of paramount importance to a neural network is its ability to learn from its environment and to improve its performance through the learning process.*

*The most common learning method used in RNA training is the supervised learning process. The most familiar examples of algorithms for supervised learning are the delta rule proposed by Wildrow and Hoff (1960) and its generalization to multiple layer networks, the backpropagation algorithm developed by Rumelhart *et al.* (1986).*

### MODELLING OF A NEURAL NETWORK

*According to Figueirêdo (2006), for the training of an RNA it is of paramount importance that there are data regarding the process one wishes to model. The greater*

tatividade estatística desses dados, melhor será a capacidade de generalização da rede treinada.

O treinamento e validação do modelo de RNA foram baseados em valores reais do processo, obtidos através do armazenamento realizado através de Sistema PIMS (*Process Information Management System*), que é um banco de dados com o objetivo de armazenar informações de processo, por longo período de tempo.

Foi realizada a coleta dos dados de kappa de entrada, kappa de saída, produção, carga alcalina, fluxo de oxigênio, temperatura e pressão dos reatores, durante período de 3 meses, totalizando 8.640 dados de cada variável, num total de 112.320 amostras.

### TREINAMENTO E VALIDAÇÃO DA RNA

Após a análise dos dados foram obtidas 55.172 amostras para treinamento e validação da rede, sendo essas uma massa de dados confiável e consistente, necessária para o desenvolvimento de uma boa RNA.

A implementação dos modelos foi feita através de redes neurais completamente conectadas, modelo MLP – *Multilayer Perceptron* - (Rumelhart *et al.*, 1986), com uma camada intermediária e com realimentação, treinada com algoritmo *early stopping*.

Na camada escondida foram utilizados 7 neurônios com função de ativação do tipo tangente hiperbólica. Na camada de saída foi utilizado um único neurônio, com função de ativação linear.

Como critério de desempenho da RNA foi utilizada a função de erro médio quadrado, dado por:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (alvo_i - saída_i)^2$$

Após o treinamento da RNA foi realizada a validação do modelo, obtendo resultados satisfatórios, com coeficiente de correlação igual a 0,968, conforme **Figura 5** abaixo:

*the statistical representativeness of these data, the better the capacity for generalization of the trained network.*

*The training and validation of the RNA model were based on actual process values, obtained by means of the storage carried out through PIMS (Process Information Management System), which is a database with the purpose of storing process information for a long period of time.*

*A collection of input kappa, output kappa, production, alkaline charge, oxygen flow, temperature, and reactor pressure data was made, covering a three-month period and totalling 8,640 data of each variable, in a total amount of 112,320 samples.*

### RNA TRAINING AND VALIDATION

*After the data analysis, 55,172 samples were obtained for network training and validation, which is a reliable and consistent mass of data, required for the development of a good RNA.*

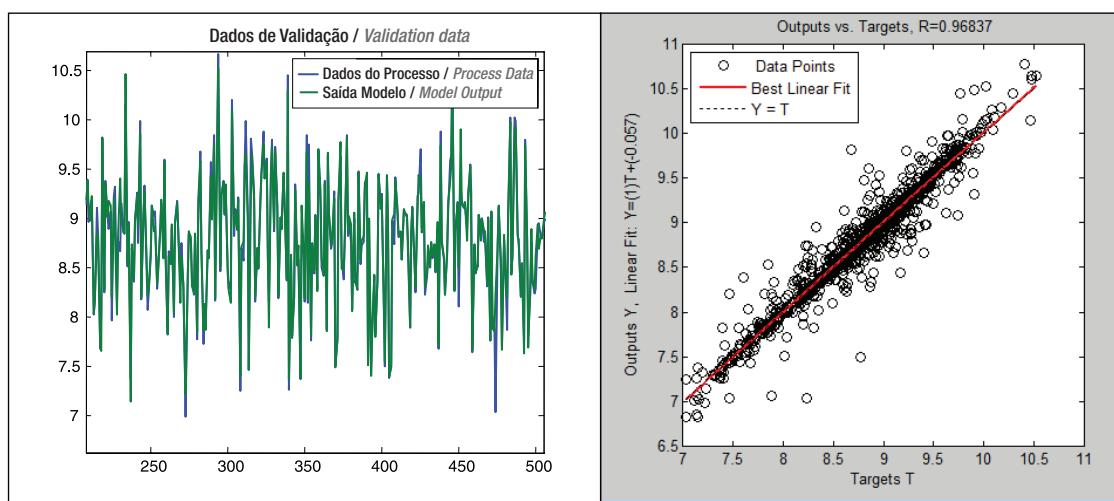
*The implementation of the models was made through fully connected MLP – Multilayer Perceptron – model (Rumelhart *et al.*, 1986) neural networks, with an intermediate layer and feedback, trained with early stopping algorithm.*

*Seven neurons were used in the hidden layer, with activation function of the hyperbolic tangent type. In the output layer a single neuron, with linear activation function, was used.*

*As criterion for RNA performance, the root mean square error was used, given by:*

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (target_i - output_i)^2$$

*After the RNA training, the model validation was made, yielding satisfactory results, with a coefficient of correlation equal to 0.968, according to **Figure 5** below:*



**Figura 5. Validação e correlação do modelo obtido / Figure 5. Validation and correlation of the model obtained**

## IMPLEMENTAÇÃO NO SDCD

A partir da obtenção do modelo neural, foi feita sua implementação no SDCD, visando validação final do modelo obtido para futura utilização nas estratégias e algoritmos de controle implementados.

A **Figura 6** mostra uma visão geral da implementação do preditor neural no SDCD.

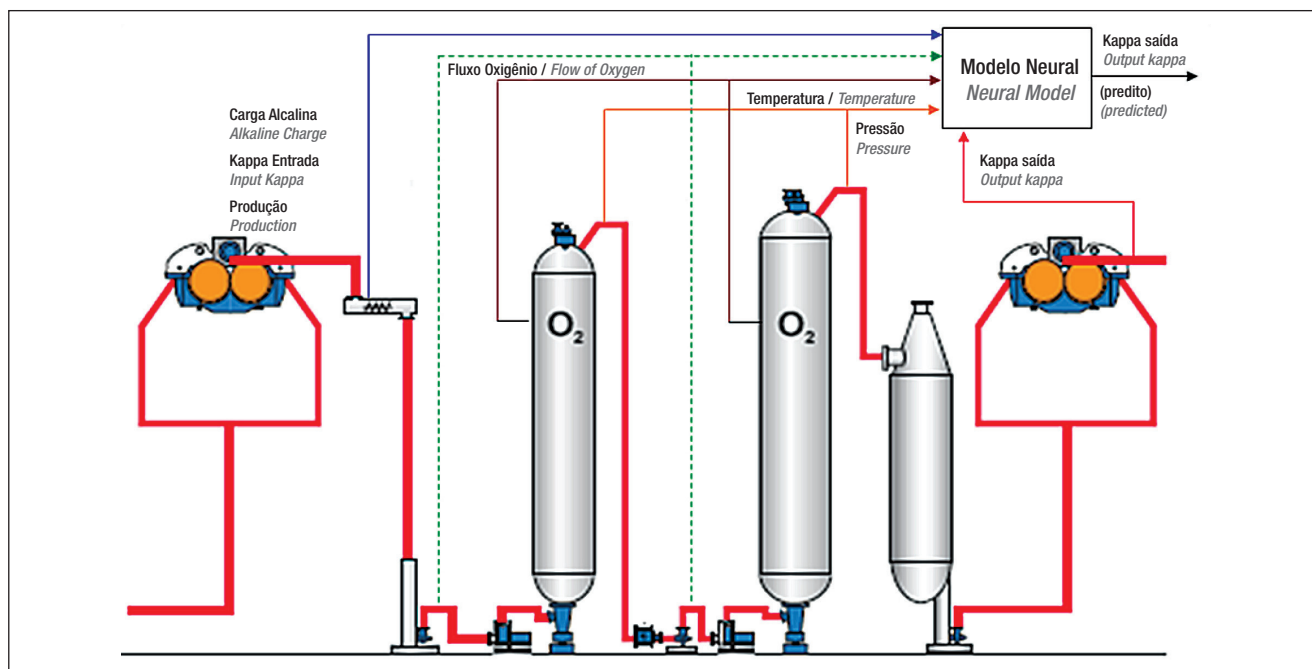
A **Figura 7** mostra o comportamento do modelo neural em comparação com os dados reais do processo.

## IMPLEMENTATION IN THE SDCD

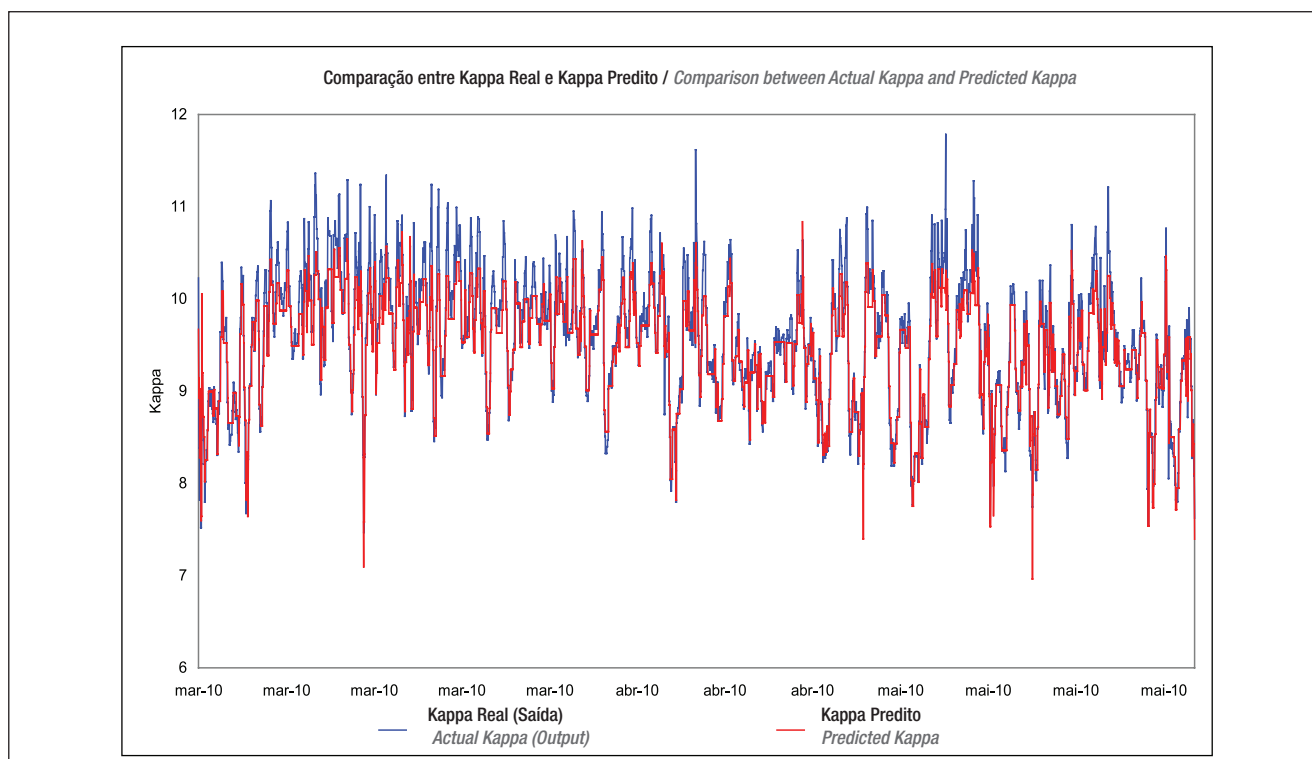
Once the neural model had been obtained, its implementation in the SDCD was carried out, aiming for the final validation of the model obtained for future utilization in the control strategies and algorithms implemented.

**Figure 6** shows a general survey of the implementation of the neural predictor in the SDCD.

**Figure 7** shows the neural model behaviour in comparison with the actual process data.

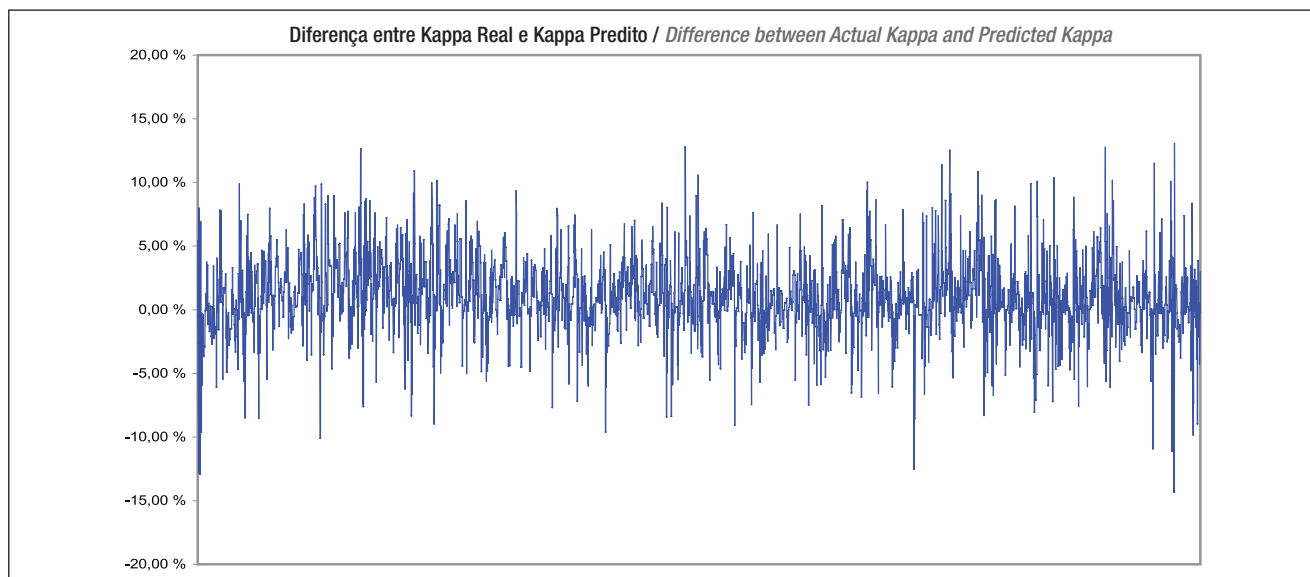


**Figura 6.** Tela com as variáveis alimentando o modelo neural / **Figure 6.** Screen with the neural model feeding variables



**Figura 7.** Comparação entre os valores reais do processo e o obtido pelo modelo neural / **Figure 7.** Comparison between the actual process values and that obtained by the neural model





**Figura 8.** Erro percentual entre os dados reais e os valores obtidos pelo modelo neural / **Figure 8.** Percentage error between the actual data and the values obtained by the neural model

Vale ressaltar que o erro médio entre o valor predito pelo modelo neural em comparação com o valor real foi inferior a 3%, conforme **Figura 8**.

A partir dos bons resultados obtidos com o modelo RNA desenvolvido, foi feita a implementação no SDCD, sendo utilizado como parâmetro de referência para os algoritmos desenvolvidos e futura geração dos *set points* no processo de deslignificação com oxigênio, objetivando alcançar os objetivos traçados.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram obtidos os seguintes ganhos mensuráveis:

1 - Redução de 41,02% no desvio padrão do pH, obtendo melhor controle sobre o processo, como mostrado na **Figura 9**.

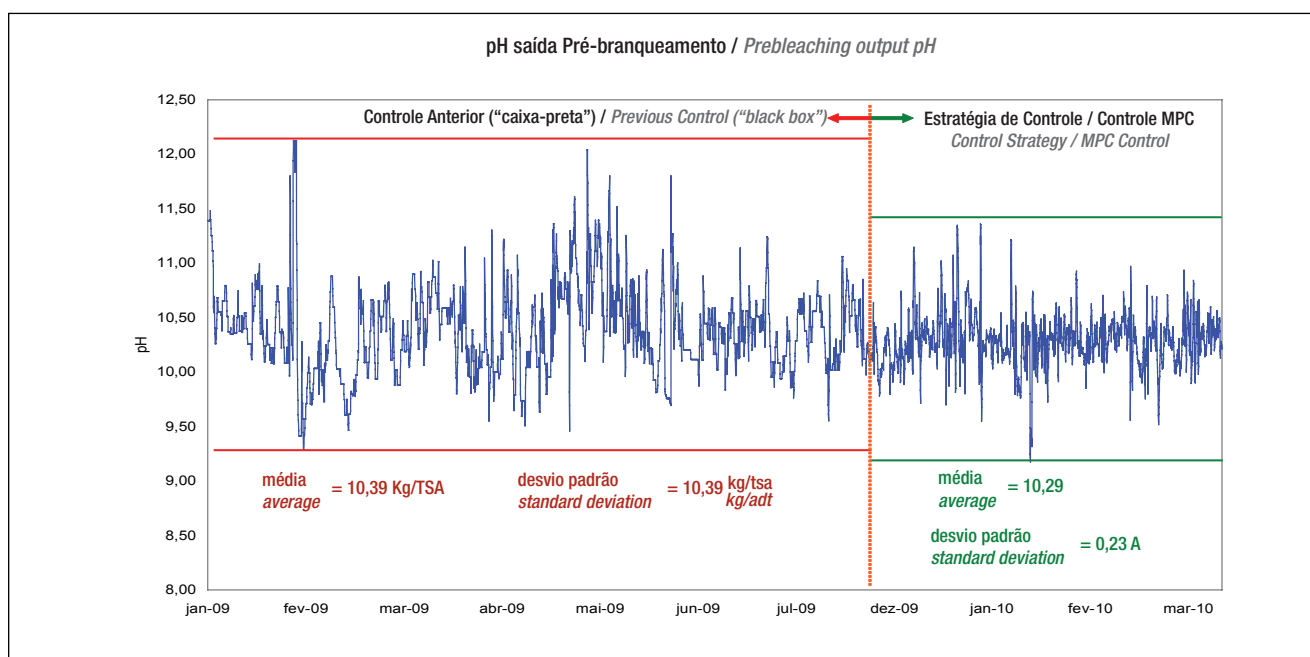
*It is worthwhile stressing that the mean error between the value predicted by the neural model in comparison to the actual value was lower than 3%, as per **Figure 8**.*

*Based on the good results obtained with the RNA model developed, it was implemented in the SDCD, and used as parameter of reference for the developed algorithms and future generation of the set points in the oxygen delignification process, aiming to achieve the set goals.*

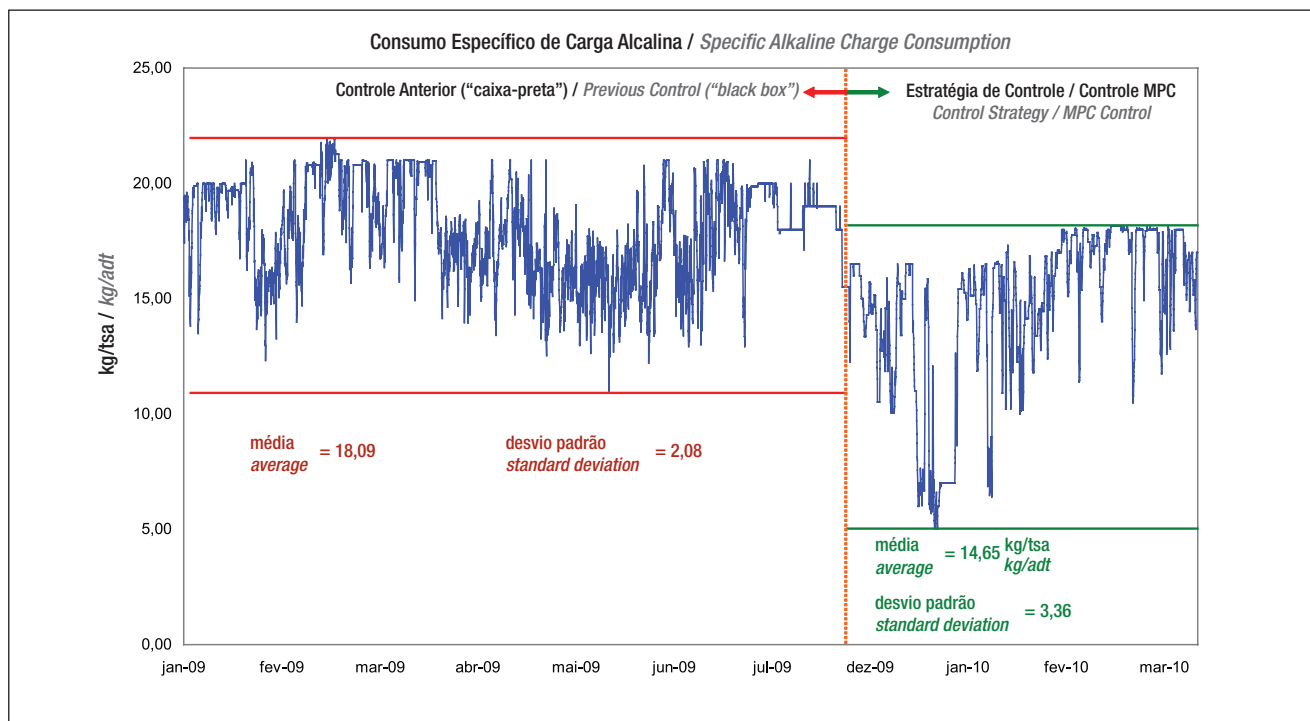
## RESULTS AND DISCUSSIONS

*The following measurable gains were obtained:*

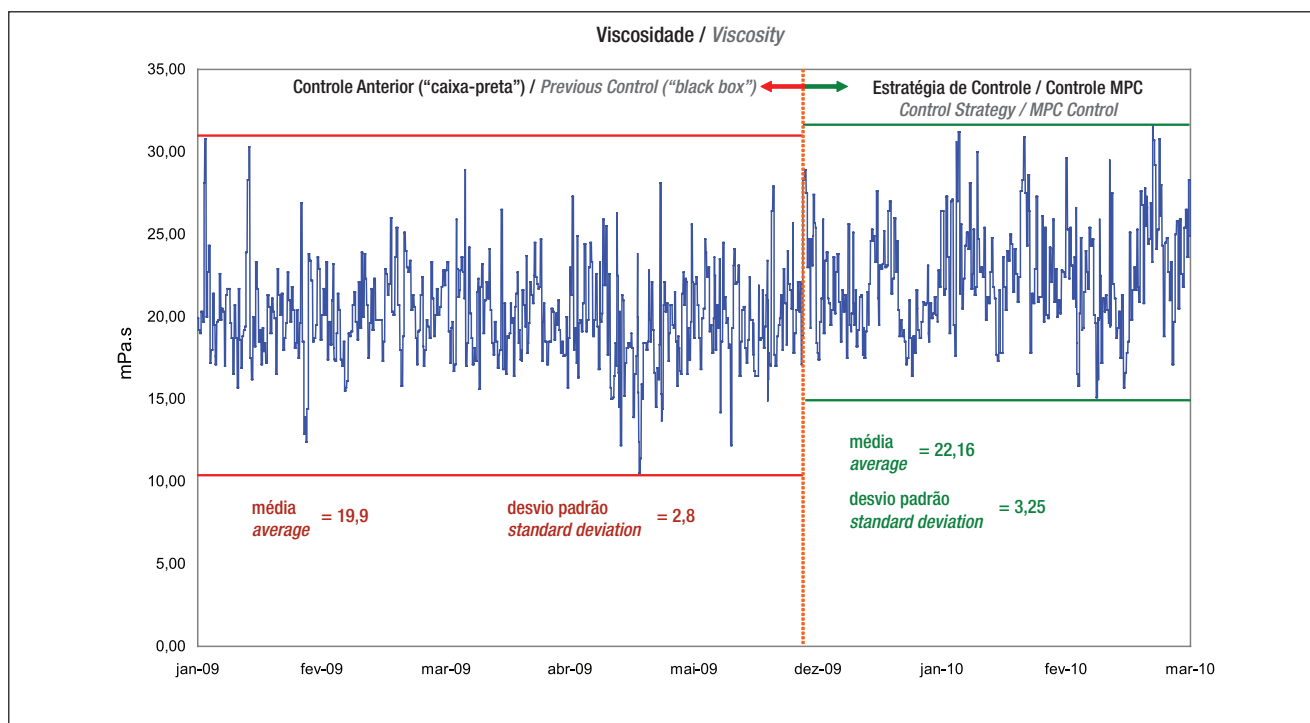
*1 – Reduction by 41.02% in pH standard deviation, obtaining a better control over the process, as shown in **Figure 9**.*



**Figura 9.** Variabilidade do pH antes e após a otimização do processo / **Figure 9.** Variability of pH prior to and after process optimization



**Figura 10.** Consumo médio de carga alcalina antes e após a otimização do processo / **Figure 10.** Average alkaline charge consumption prior to and after process optimization



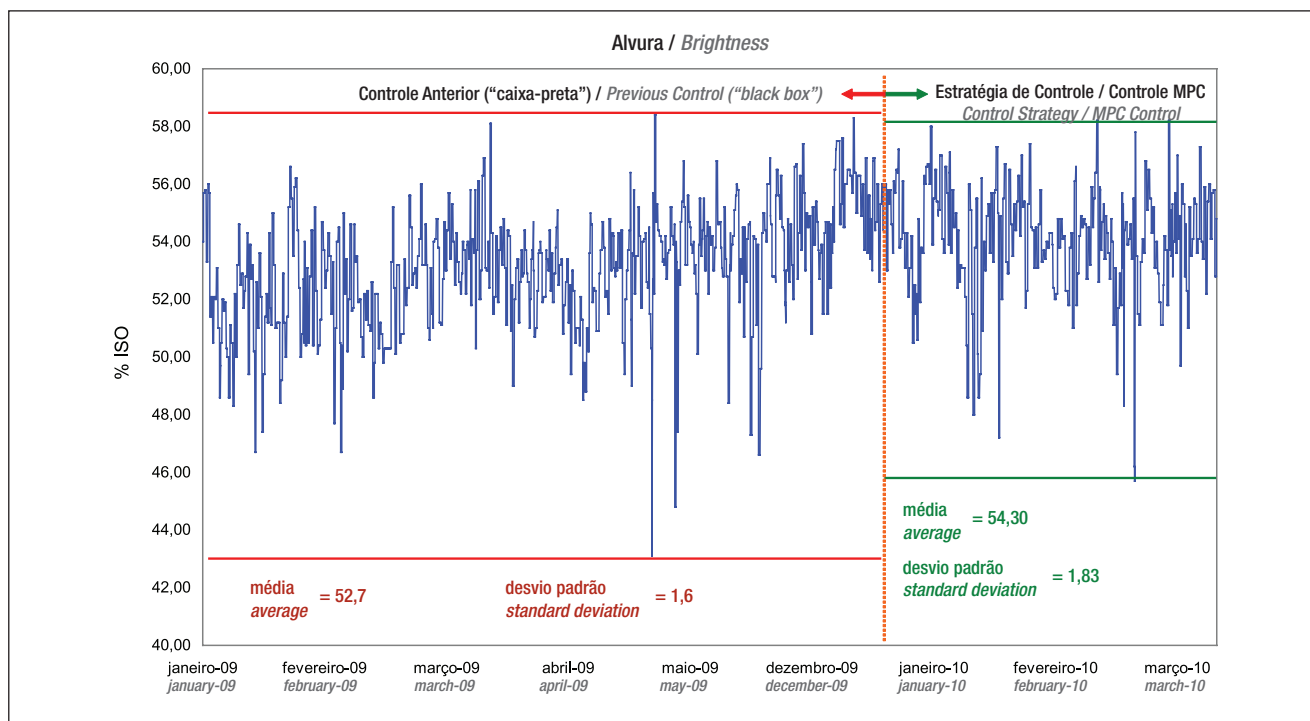
**Figura 11.** Viscosidade na saída do reator, antes e após a otimização do processo / **Figure 11.** Viscosity at reactor outlet, prior to and after process optimization

2 - Redução de 3,44 kg/tsa (19,03 %) no consumo específico de carga alcalina (NaOH), como mostrado na **Figura 10**.

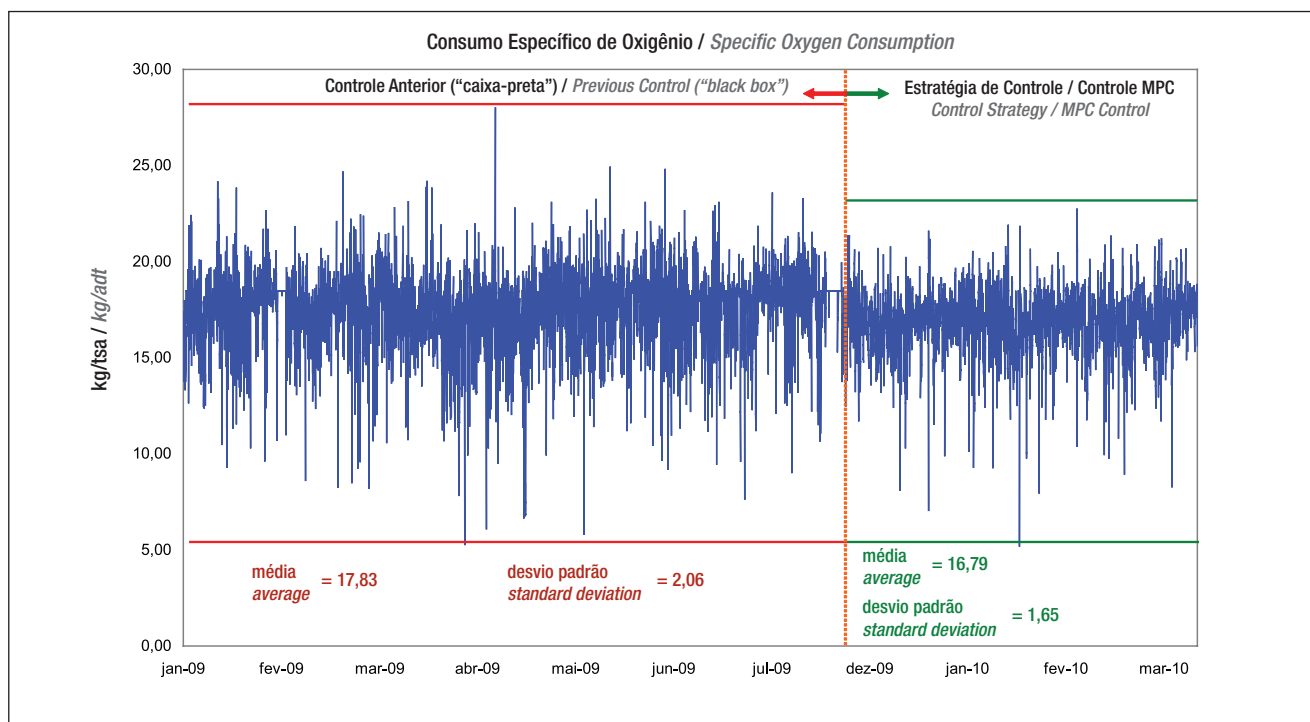
2 – Reduction by 3.44 kg/adt (19.03 %) in specific consumption of alkaline charge (NaOH) as shown in **Figure 10**.

3 - Ganho de 2,26 pontos (11,36%) em viscosidade (mPa.s), como mostrado na **Figura 11**.

3 – Gain of 2.26 points (11.36%) in viscosity (mPa.s), as shown in **Figure 11**.



**Figura 12.** Alvura na saída do reator antes e após a otimização do processo / **Figure 12.** Brightness at reactor outlet, prior to and after process optimization



**Figura 13.** Consumo médio de oxigênio antes e após a otimização do processo / **Figure 13.** Average oxygen consumption prior to and after process optimization

4 - Ganho de 1,6 pontos (3,04%) na alvura (ISO), como mostrado na **Figura 12**.

5 - Redução de 1,04 kg/tsa (5,83%) no consumo específico de oxigênio, como mostrado na **Figura 13**.

4 – Gain of 1.6 points (3.04%) in brightness (ISO), as shown in **Figure 12**.

5 – Reduction by 1.04 kg/adt (5.83%) in specific oxygen consumption, as shown in **Figure 13**.

A seguir, é dada a **Tabela 1** comparativa do processo, antes e após implementação das estratégias de controle.

*In the following, is given the comparative **Table 1** of the process, prior to and after control strategy implementation.*

**Tabela 1.** Comparação dos resultados após implementação das estratégias de controle

**Table 1.** Comparison between results after control strategy implementation

Variáveis / Variables	Antes / Prior to	Após / After	Diferença / Difference	
Kappa Entrada Input Kappa	14,97	15,78	0,81	5,40%
Temperatura 1º Reator (°C) 1 <sup>st</sup> Reactor Temperature (°C)	92,10	93,87	1,77	1,93%
Temperatura 2º Reator (°C) 2 <sup>nd</sup> Reactor Temperature (°C)	99,01	99,73	0,72	0,72%
Pressão 1º Reator (Kg/cm <sup>2</sup> ) 1 <sup>st</sup> Reactor Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	5,69	5,77	0,08	1,33%
Pressão 2º Reator (Kg/cm <sup>2</sup> ) 2 <sup>nd</sup> Reactor Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	2,01	2,30	0,29	14,37%
pH saída output pH	10,39	10,28	-0,10	-0,99%
Carga Alcalina (kg/tsa) Alkaline Charge (kg/adt)	18,09	14,65	-3,44	-19,03%
Viscosidade saída (mPa.s) Output viscosity (mPa.s)	19,90	22,16	2,26	11,36%
Alvura (%) Brightness (%)	52,70	54,30	1,60	3,04%
Kappa Saída Output Kappa	8,81	9,39	0,58	6,61%
Designificação (%) Delignification (%)	41,14	40,46	-0,68	-1,65%
Perda Viscosidade (%) Viscosity Loss (%)	51,33	45,01	-6,32	-12,31%
Seletividade Selectivity	0,31	0,35	0,04	13,60%
Produção (tsa/h) Production (adt/h)	84,94	84,51	-0,43	-0,51%
Consumo Oxigênio (kg/tsa) Oxygen Consumption (kg/adt)	17,83	16,79	-1,04	-5,83%

## CONCLUSÕES

Os objetivos principais deste projeto foram atingidos: manutenção do grau de designificação e alvura, com ganho de viscosidade, e, ainda, redução em consumo dos químicos envolvidos no processo.

O desenvolvimento de estratégias de controle, visando a substituição do sistema “caixa-preta” previamente existente, trouxe, além dos ganhos relatados, um incremento no conhecimento do processo de designificação pelos profissionais envolvidos.

## CONCLUSIONS

*The main objectives of this project were met: maintenance of the delignification degree and brightness, with gain in viscosity and moreover reduction in consumption of chemicals involved in the process.*

*The development of control strategies, aiming to replace the previously existing “black box” system, besides the reported gains resulted in an increase in the knowledge about the delignification process by the professionals involved.*



A utilização de redes neurais na modelagem de processos em fábricas de celulose são ferramentas poderosas e podem ser de grande utilidade, podendo ser aplicadas para simulação, otimização e controle dos processos industriais.

Na modelagem neural, foram testadas diversas estruturas, com diferentes números de neurônios na camada oculta e diferentes combinações de variáveis na camada de entrada da rede.

A rede escolhida forneceu erro absoluto inferior a 3%, sendo possível a sua utilização para previsão da saída do processo em um sistema dinâmico.

Os resultados iniciais nos mostram a possibilidade de ganhos consideráveis de consumos químicos, dentro os quais podemos destacar:

- Redução de 41,02% no desvio padrão do pH, obtendo melhor controle;
- Redução de 3,44 kg/tsa no consumo específico de carga alcalina;
- Redução de 1,04 kg/tsa no consumo específico de oxigênio;
- Ganho de seletividade na deslignificação com oxigênio;
- Ganho de 2,26 pontos na viscosidade (mPa.s);
- Ganho de 1,6 pontos de alvura (ISO);
- Diminuição da variabilidade;
- Aumento da estabilidade do processo;
- Padronização nas dosagens e operação do processo.

A economia estimada deste projeto está em torno de R\$ 1,5 milhão por ano, considerando as 2 linhas de produção.

O próximo passo será a implementação do modelo de controle multivariado no processo para ajustes de set-points “ótimos”, tendo como objetivos a máxima deslignificação, preservação da viscosidade e menor consumo de químicos.

Novos medidores de pH na linha de massa também serão adquiridos para aumentar ainda mais o grau de confiabilidade dessa medição.

Futuramente será utilizada essa mesma filosofia de controle nos estágios de branqueamento, com perspectiva de obtenção de ganhos significativos, com manutenção de boa alvura, preservação da viscosidade e redução no consumo de químicos. ▲

*The utilization of neural networks in process modeling at pulp mills is a powerful tool and may be greatly useful when applied for simulation, optimization, and control of the industrial processes.*

*Several structures have been tested in neural modeling, with different numbers of neurons in the hidden layer and different combinations of variables in the network input layer.*

*The chosen network provided an absolute error lower than 3%, so that its use is possible for process output forecast in a dynamic system.*

*The initial results show us the possibility of considerable gains in chemical consumption, among which the following can be highlighted:*

- *Reduction by 41.02% in pH standard deviation, thus obtaining better control;*
- *Reduction by 3.44 kg/adt in specific alkaline charge consumption;*
- *Reduction by 1.04 kg/adt in specific oxygen consumption;*
- *Gain in oxygen delignification selectivity;*
- *Gain of 2.26 points in viscosity (mPa.s);*
- *Gain of 1.6 points in brightness (ISO);*
- *Reduction in variability;*
- *Increase in process stability;*
- *Dosage and process operation standardization.*

*The estimated savings of this project amount to about R\$ 1.5 million per year, considering both production lines.*

*The next step will be the implementation of the multivariate control model in the process intended for “optimum” set-point adjustments, having as goals the maximum delignification, viscosity preservation, and lower chemical consumption.*

*New pH measuring devices in the stock line will be also acquired to increase still more the degree of reliability of this measuring.*

*In future, this very control philosophy will be used in the bleaching stages, with a prospect of obtaining significant gains, associated with the maintenance of a good brightness, viscosity preservation, and reduction in chemical consumption. ▲*

## REFERÊNCIAS / REFERENCES

1. Agarwal, S., J.M. Genco, W. Miller, AND B.J.W. Cole, “Medium Consistency Oxygen Delignification Kinetics and Tower Design”, in Innovative Advances in the Forest Products Industries, edited by Brian Brogdon, *AIChE Symp. Series No. 319*, 94, pages 32-46, 1998
2. Backa, S; Ragnar, M.; *The Importance of High Final pH in the Oxygen Delignification*, Tappi Fall Conference 2003
3. Castro, A. S., “Identificação, Sintonia e Avaliação de Desempenho de Malhas de Controle utilizando Visual Basic no Excel e Banco de Dados PIMS”. Monografia de Conclusão Curso (Curso de Engenharia Elétrica) – Centro Universitário do Leste de Minas Gerais - UnilesteMG, Coronel Fabriciano, 2007.
4. Chirat, C. and Lachenal, D.; “Limits of Oxygen Delignification.” TAPPI Pulping Conference Proceedings. Quebec, p. 619-624(1998).

5. Figueirêdo, L. S. *Modelagem e Simulação do Processo de Caustificação*. Monografia de Conclusão Curso (Pós Graduação Lato Sensu em Tecnologia de Celulose e Papel) – Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, Viçosa, 2006.
6. Figueirêdo, L. S. *Modelagem Matemática do Estado Estacionário de um Real Sistema de Caustificação em uma Fábrica de Celulose*. Dissertação (Conclusão do Curso de Pós Graduação Strictu Sensu em Engenharia Industrial) – Centro Universitário do Leste de Minas Gerais - UnilesteMG, Programa de Pós Graduação em Engenharia, Coronel Fabriciano, 2009
7. Figueirêdo, L. S.; Costa, D. S.; Pimenta, E. M. *Optimization of recausticizing plants in a Brazilian pulp Mill*. 2010 International Chemical Recovery Conference. Williamsburg, Virginia, USA, 29 March – 1 April, 2010.
8. Gendron, S; Bouchard, J; Berry, R.: *Optimal Selection of Operating Conditions for an Oxygen Delignification Tower*, 2002 International Pulp Bleaching Conference Proceedings
9. Haykin, S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2 ed. Prentice Hall, 1999.
10. Iijima, J.F. and Taneda, H.; “*Effects of Several Factors on Medium-Consistency Oxygen Delignification*.” International Pulp Bleaching Conference Proceedings. Washington, D.C. p. 403-410 (1996).
11. Lai, Y.-Z.; Luo, S.; Yang, R.; “*Influence of Alkaline Pulping Conditions on the Efficiency of Oxygen Delignification*.” 1998 TAPPI Pulping Conference. Part 1 (of 3), 5p.
12. McDonough, T.J., Burton, J.T., Yethon, A.E., “*A Model for Predicting Yield in Oxygen Delignification of Softwood Kraft Pulps*”, 1999 TAPPI Pulping Conference Proceedings, Orlando, FL, 171-182.
13. Miller, W. S., S. Agarwal, B.J.W. Cole, and J.M. Genco, “*Kinetics of Oxygen Delignification*”, Journal of Pulp and Paper Science, 25(10):361:366, (1999).
14. Mine, F. H., “*Retorno de investimento com a utilização do Sistema PIMS na Auditoria de Malhas de Controle da CENIBRA*”. Revista Controle & Instrumentação, ano 10, nº 121, 2006, Editora Valet.
15. Ribeiro, R. N., “*Utilização de Redes Neurais Artificiais E Tecnologia FT-NIR para predição do número Kappa em um processo de cozimento de madeira em indústria de celulose*”. Dissertação (Conclusão do Curso de Mestrado) – Centro Universitário do Leste de Minas Gerais - UnilesteMG, Curso de Mestrado em Engenharia Industrial, Coronel Fabriciano, 2007.
16. Rubini, B. R.; Yamamoto C. I. *Development of Prediction Oxygen Delignification Models Using Kinetic Expressions and Neural Networks*. Tappi Journal, v. 5, n. 4, p. 3-6, 2006.
17. Santos, C.A., Shackford, L.D., Miller, W.J., Johnson, D.A., Genco, J.M., Park, S., Sullivan, D.P., Kwon, H.B. (2000) *Extended oxygen delignification for increased yield using pulps produced with conventional and modified cooking*. In: Proceedings of the International Pulp Bleaching Conference: Poster Presentations, Jun 27–30, 2000, Halifax, NS, Canada. pp. 27–31
18. Steffes, F., Bokstrom, M., Norden, S., “*Pulp Yield Improvements Using Two-stage, Extended Oxygen Delignification*”, 1998 TAPPI Proceedings. Breaking the pulp Yield Barrier Symposium, TAPPI PRESS, Atlanta, GA, 183-195.
19. Teixeira, R. A., “*Treinamento de Redes Neurais Artificiais através da Otimização Multi-Objetivo: Uma nova Abordagem para o Equilíbrio entre a Polarização e a Variância*”. Dissertação (Conclusão do Curso de Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, 2001.



29-31 March 2011 (Exhibition)  
28-31 March 2011 (Conference)  
Acropolis,  
Nice, France

# Tissue World Nice in 2011 The Big One

Tissue World in Nice is **THE BIG ONE**: The original high-level meeting place for the world's tissue paper business. By putting focus on this important fast moving consumer good (FMCG) from both a market viewpoint as well as a technical development angle, Tissue World has become recognized as the world's best conference for this dynamic sector. In 2009, around 2,000 tissue makers and converters from 83 countries worldwide visited the trade show while the Tissue World Conference drew a crowd of nearly 250 delegates.

For more information, please contact:

#### Europe/America Sales

Finland, Ireland, Norway, Portugal, Spain, Italy, UK, Egypt, Middle East, Brazil and USA (except OH, WA, WI, MI & MA)

#### Paolo Rampetta

Tel : +32 2 6461606  
Fax : +32 2 6538034  
Mobile : +32 497 050755  
Email : paolo.rampetta@ubm.com

#### Europe/America Sales

Austria, Belgium, Denmark, France, Germany, Netherlands, Sweden, Switzerland, Russia, Eastern Europe, Central & South America and USA (mainly OH, WA, WI, MI & MA)

#### Adrian van Beuningen

Tel : +32 2 6443356  
Fax : +32 2 6468326  
Email : adrian.beuningen@ubm.com

#### China Sales

#### Jenny Chen

Tel : 86 20 8666 0158  
Fax : 86 20 8667 2235, 8667 7120  
Email : jenny.chen@ubm.com

#### Asia-Pacific Sales

#### Gwen Ng

Tel : +65 6592 0890 / +65 6592 0893  
Fax : +65 6438 6090  
Email : gwen.ng@ubm.com

#### Conference/Operations

#### Agnes Gehot

Tel : +32 2 6531535  
Fax : +32 2 6538034  
Email : agnes\_gehot@tissueworld.com

Organised By:

Official Publication:



[www.tissueworld.com](http://www.tissueworld.com)

## A World of Ideas . . . . . . and Opportunities!

### FAST FAX REPLY FORM Fax this to us at: (65) 6438 6090

☐ Yes, I want to attend TISSUE WORLD 2011 in Nice, France

☐ Please put me on your mailing list for further updates

I am interested in:

☐ Exhibiting at the Show ☐ Visiting the Show ☐ Attending the Conference

Name

Company Name

Title

Address

Zip/Postal Code  Country

Tel  Fax

Email

Opapel