

# Reutilização de água branca em processo de lavagem de planta de branqueamento de celulose

## *Reuse of white water in washing process of pulp bleaching plant*

**Autores/Authors\*:** Alexandre Augusto de Andrade  
José Vicente Hallak d'Angelo

**Palavras-chave:** água branca, branqueamento, celulose, elementos não processáveis, integração.

### RESUMO

A indústria de celulose e papel é um dos segmentos industriais que mais investe e, conseqüentemente, que mais progride em controle ambiental, aplicando tecnologias inovadoras nos seus processos de polpação e de branqueamento. O alto consumo de água fresca é causa de várias dificuldades em seus projetos de expansão, o que transforma a água em um dos principais insumos a ter planejamento permanente de redução de uso. Este trabalho teve por objetivo estudar a redução do consumo de água na etapa de branqueamento da celulose, visando também a diminuição do volume de efluentes gerados no processo pela avaliação da viabilidade técnica de se promover integração mássica entre a corrente efluente do processo de produção de papel (água branca) e a de água de lavagem nas prensas do branqueamento. Isso foi feito por meio de um balanço de massa com restrições, desenvolvido em uma planilha eletrônica cuja função objetivo visa à minimização do consumo de água fresca, uma planilha que se demonstrou de fácil entendimento, acessibilidade e, principalmente, de fácil manipulação e alteração dos dados. Nesta planilha foram consideradas as restrições do acúmulo de elementos de não-processo (NPE's, non-process elements), sendo analisada a influência tanto dos materiais inertes ao processo como da matéria orgânica na redução do consumo de água fresca na operação de branqueamento. Observou-se uma redução em torno de 13,5% no consumo desta água

**Keywords:** bleaching, process integration, pulp, non-process elements, white water.

### ABSTRACT

*Pulp and paper mills are continuously making efforts to reduce fresh water consumption in their processes employing strategies of closing water circuits and process integration (water pinch), applying systematic methodologies to modify the process. The increase in fresh water consumption is limiting expansion projects and so today reducing waste has become one of the greatest challenges facing pulp and paper mills. The main objective of this work is to study the technical viability of using the effluent produced in paper machines (white water) in the washing press of the bleaching process, reducing fresh water consumption. A mass balance of the bleaching unit was developed in an electronic spreadsheet in order to evaluate the possibility of reducing fresh water consumption, substituting part of it by a fraction of the available white water. The maximum concentration of some non-process elements, that could accumulate in the process, were determined in order to establish some parameters to allow process integration of the streams involved, considering operational constraints. The results obtained have shown that it is possible to reduce approximately 13.5%*

**\*Referências dos Autores / Authors' references:**

Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos – Faculdade de Engenharia Química  
Universidade Estadual de Campinas – Unicamp  
E-mails: alexandreandrade@sengespapel.com.br; dangelo@feq.unicamp.br  
Department of Chemical Systems Engineering – School of Chemical Engineering  
State University of Campinas – Unicamp  
E-mails: alexandreandrade@sengespapel.com.br; dangelo@feq.unicamp.br

industrial e, como consequência, uma redução de aproximadamente 40 t/h de efluente (água branca) a ser tratado, comprovando que essa integração é tecnicamente possível.

## **INTRODUÇÃO**

A indústria de celulose e papel é, dentre as indústrias químicas, a maior consumidora de água fresca, operando com um consumo acima de 70 m<sup>3</sup>/tonelada de celulose (Galloway et al., 1994). Ao longo dos últimos anos tem ocorrido uma mudança de atitude cada vez maior desse segmento industrial relativamente à preocupação com impactos ambientais; e os governos têm aplicado mudanças na legislação estabelecendo limites na captação de água de mananciais. As indústrias de celulose e papel também vêm enfrentando problemas com relação à capacidade de suas plantas de tratamento de efluentes. Estas limitações representam, hoje, uma grande dificuldade na implementação de projetos de expansão do processo, uma vez que grande parte das indústrias já opera perto do limite máximo da licença de captação de água e da capacidade instalada de sua planta de tratamento. Assim, reduzir o volume de efluentes gerados, e também o consumo de água fresca, tem se tornado um dos maiores desafios das indústrias de processo e, em especial, das indústrias de celulose e papel.

Muitos esforços têm sido feitos para tentar reduzir a demanda de água fresca e o volume de efluentes gerados no processo. Um desses esforços, aplicado em muitos estudos nos últimos dez anos, é a técnica de integração de processos, que utiliza um procedimento sistemático para analisar redes de água e identificar projetos capazes de aumentar o uso eficiente da água nas operações industriais (Parthasarathy e Krishnagopalan, 2001). Técnicas de integração de processos têm sido usadas em muitas indústrias químicas para minimização de efluentes e de demanda de água fresca. Wang e Smith (1994) apresentaram uma técnica rigorosa utilizando a water pinch analysis para maximizar a reutilização de água, apresentando estudo de caso de uma refinaria de petróleo. Em seu trabalho, eles comentam que, na impossibilidade de realizar alterações fundamentais no processo para reduzir a demanda de água fresca, existem três possibilidades de se reduzir o volume de efluentes: 1 - reutilização direta do efluente; 2 - regeneração, utilizando um tratamento parcial para remover contaminantes e então reutilizar em processo diferente do anterior; 3 - regeneração com reciclagem, sendo que, no caso, a água pode voltar ao mesmo processo em que foi utilizada anteriormente.

Para o caso específico das indústrias de celulose e papel existem alguns trabalhos, na literatura, que tratam da integração de processos para reduzir o consumo de água fresca e minimizar geração de efluentes. Tripathi

*of the consumption of fresh water, implying in a reduction of 40 t/h in the rate of white water sent for treatment.*

## **INTRODUCTION**

*Pulp and paper mills are among chemical industries the greatest fresh water consumers, using more than 70 m<sup>3</sup>/tonne of pulp (Galloway et al., 1994). Over the past years there has been a change in attitudes related to the environmental impact of industries and governments have introduced new laws establishing limits for the rate of impounding water from rivers. The pulp and paper mills also have problems with the installed capacity of their effluent treatment plants. These limits represent today a great difficulty for the implementation of new expansion projects since these industries are in their legal limit of allowed fresh water demand and at the same time also operating in the limit of their effluents treatment plants. So, reducing the volume of wastewater and fresh water consumption has become one of the greatest challenges facing process industries, especially the pulp and paper ones.*

*Many efforts have been done trying to reduce fresh water demand and also the volume of effluents generated in the process. One of these efforts that has been used in many studies in the past ten years is the process integration approaches, that uses a systematic technique for analyzing water networks and identify projects to increase the efficient use of water in industrial processes (Parthasarathy and Krishnagopalan, 2001). Process integration techniques have been used in many chemical industries for wastewater and fresh water minimization. Wang and Smith (1994) have presented a rigorous technique using water pinch analysis for maximizing water reuse, presenting a case study for an oil refinery. In their work they comment that when it is not possible to make fundamental changes in the processes to reduce their demand for fresh water, there are three possibilities for reducing wastewater: 1 - direct reuse of it; 2 - regeneration by partial treatment to remove contaminants and reuse in a process different from the previously used; 3 - regeneration recycling, in this case water can re-enter processes in which it has previously been used.*

*For the special case of pulp and paper mills there are some works in the literature dealing with process integration for reducing fresh water consumption and for wastewater minimization. Tripathi (1996) presents a case study in Canada using pinch technology for reusing white water in a paper mill, with a reduction of about 30% in*

(1996) apresentou estudo de caso, no Canadá, usando tecnologia pinch para a reutilização de água branca em uma fábrica de papel, com redução de aproximadamente 30% no consumo de água fresca. Savulescu et al. (1999) desenvolveram seu trabalho na fábrica de La Tuque (Canadá) para reduzir o consumo de água aplicando análise pinch juntamente com modelagem e simulação do processo via WinGems© para realizar balanços de massa e energia, propondo um projeto que contemplava economia de 25% no uso de água. Parthasarathy e Krishnagopalan (2001) usaram integração mássica em processo kraft em seu empenho para minimizar uso de água fresca na fábrica Sappi (África do Sul). Devido terem proposto reciclo e reutilização de algumas correntes do processo, acabou ocorrendo acúmulo de elementos de não-processo (NPE's), como cloreto. Sua abordagem consistia em obter uma visão do processo a partir de seu fluxograma por meio de estratégia de solução gráfica, seguida por otimização matemática. Eles comunicaram uma redução de aproximadamente 57% na demanda de água fresca com decréscimo na resultante vazão de efluentes, e também obtendo uma distribuição ótima do cloreto em diferentes correntes por todo o sistema, evitando que sua concentração ultrapassasse os níveis desejáveis. Marino et al. (2000) realizaram estudo de caso numa fábrica em Quebec (Canadá) tratando água branca em processo de filtração, seguida de biotratamento e reciclando uma fração ou toda a água branca para reposição de água fresca.

Um ponto relevante, que pode ser crítico quando consideradas abordagens de fechamento de circuito, é o acúmulo de elementos de não-processo causadores de problemas operacionais. Emunds et al. (2006) estudaram o acúmulo desses elementos na unidade de recuperação química da produção de celulose kraft. Eles apontam as principais fontes desses elementos e os impactos causados por seu acúmulo, discutindo algumas técnicas para remoção destes elementos do processo. Rabelo et al. (2001) analisaram a influência desses acúmulos de NPE's em sistema de branqueamento totalmente livre de cloro - TCF (totally chlorine-free). Nesse processo, os principais problemas operacionais decorrentes da presença de NPE's eram corrosão, incrustações em tubos e entupimentos de telas, o que reduzia a vida útil dos equipamentos além de possivelmente interferir na estequiometria das reações de branqueamento (Freddo et al., 1999). Assim, os efeitos desses elementos - principalmente Ca, Si, Fe e Mn - no processo devem ser considerados quando se realizar estudo de integração de processos. No caso específico de reutilização de água branca na área do branqueamento para reposição de fração de água fresca, este cuidado é muito importante, uma vez que a concentração de Ca na

*fresh water consumption. Savulescu et al. (1999) have developed their work at La Tuque mill (Canada) to reduce water and energy consumption, using pinch analysis together with a modeling and simulation of the process via WinGems© to perform energy and mass balances, proposing a project for saving 25% in water use. Parthasarathy and Krishnagopalan (2001) have used mass integration to a kraft process in an effort to minimize the fresh water usage at Sappi mill (South Africa). As they have proposed the recycle and reuse of some process streams a build-up of non-process elements (or NPEs), like chloride, has occurred. Their approach consisted of gaining process insights from the flow sheet via a graphical solution strategy followed by mathematical optimization. They reported a reduction of approximately 57% in fresh water requirement with a decrease in the net effluent outflow from the process, also obtaining an optimal allocation of chloride in different streams throughout the process, avoiding its concentration in a stream to be over than the desirable levels. Marino et al. (2000) have performed a case study in Quebec (Canada) treating white water through filtration followed by a biotreatment process and recycling a fraction or all of it to replace fresh water.*

*One relevant point that is critical when considering a system closure approach is the accumulation of non-process elements that causes operating problems. Emunds et al. (2006) have studied the accumulation of these elements in the chemical kraft pulp production recovery unit. They have pointed out the sources of these elements and the impacts caused by their accumulation and discussed some techniques applied to remove these elements from the process. Rabelo et al. (2001) analyzed the influence of this accumulation of NPE's in bleaching systems totally chlorine-free (TCF). In this process the main operating problems caused by the presence of NPE's are corrosion and scaling in the tubes and clogging in the screens, reducing life time of the equipments and it may also interfere in the stoichiometry of bleaching chemical reactions (Freddo et al., 1999). So, the effects of these elements (mainly Ca, Si, Fe and Mn) in the process must be considered when performing a process integration approach. In the specific case of reusing white water in the bleaching process to replace a fraction of fresh water, this is very important since white water is two times more concentrated in Ca than fresh water is.*

água branca é duas vezes maior que na água fresca.

Quando se reutiliza água branca no processo, existe também outra opção: tratar esta água antes de ser reciclada, conforme mencionado anteriormente. Costanzi et al. (2000) estudaram a tratabilidade da água branca para adequá-la à reutilização na própria máquina de papel utilizando um processo de flotação com ar seguido de etapa de ozonização. Bolton e Vizotto (2000) propuseram o uso de filtros (com 100 a 200 mesh) para retenção de contaminantes presentes na água branca, principalmente finos e fibras, com vistas a sua reutilização; e McGowan (2002) também apresentou estudo para reuso da água branca aplicando a tecnologia de filtração PETAXTM em fábrica da Stora Enso, em Uetersen, Alemanha. Oliveira et al. (2003) estudaram a recirculação da água branca após processo de ultrafiltração em membrana, avaliando a remoção dos contaminantes e o comportamento do fluxo, concluindo que o tratamento é viável e que a água branca assim tratada seria de bom potencial para reciclagem na planta de branqueamento ou na máquina de papel.

Considerando todos esses casos relativos a integração de processos e reutilização de água branca, este efluente tem demonstrado grande potencial para redução da água fresca. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade técnica de utilizar este efluente nas prensas de lavagem da etapa de branqueamento de processo kraft de produção de polpa, uma vez que esta etapa é uma das maiores consumidoras de água. Para alcançar este objetivo foi realizada análise da etapa de branqueamento de uma planta industrial, analisando também a influência dos elementos de não-processo e da matéria orgânica presentes na água branca.

Este trabalho pretende avaliar a possibilidade de se substituir apenas uma parcela da água fresca (água industrial) por água branca, para redução não só do consumo da primeira, mas também do volume dos efluentes gerados, e tentando estabelecer uma redução ótima sem necessidade de pré-tratamento da água branca, evitando também problemas operacionais conseqüentes da presença de NPE's, que geralmente ocorre quando usada grande quantidade de água branca. Assim, será possível avaliar novas alternativas que representem renovação tecnológica no processo, viável técnica e economicamente, trazendo contribuição concreta para melhorar o processo com alterações mínimas na configuração das condições operacionais existentes. Até o momento não foi encontrado, na literatura, nenhum outro trabalho que avalie o uso de água branca diretamente no estágio de branqueamento sem nenhum tratamento prévio.

De acordo com Fonseca et al. (2003), estima-se que na polpação e no branqueamento de polpas celulósicas sejam gerados diariamente, no mundo, cerca de 62 mi-

*When reusing white water in the process, there is also another option that is to treat this water before recycling it, as mentioned before. Costanzi et al. (2000) have studied the feasibility to treat white water to adequate it for reuse in the paper machine itself, using a flotation process with air followed by an ozonation process. Bolton and Vizotto (2000) have proposed the use of filters (from 100 to 200 mesh) to retain some contaminants, mainly fibers, for reusing this effluent and McGowan (2002) also presents a study for reusing white water applying the PETAXTM filtration technology at Stora Enso Uetersen mill in Germany. Oliveira et al. (2003) have studied the reuse of white water after membrane ultrafiltration, evaluating the contaminant removal and flux behavior, concluding that this treatment was technically feasible and that treated white water has a good potential to be recycled to the bleaching plant or to the paper machine.*

*Considering all these cases involving process integration and reuse of white water, this effluent has demonstrated a great potential for reducing fresh water consumption. So this work aims to study the technical feasibility of using this effluent in the pulp washing presses of the bleaching process in a kraft pulp and paper mill, since this is one of the greatest water consumer stages of the process. To achieve this objective an analysis of the bleaching stage of an industrial plant was performed considering the influence of non-process elements and organic matter, which are present in white water.*

*This work intends to evaluate the possibility of substituting a portion of fresh water (industrial water) by white water, reducing not only the consumption of the first, but also the volume of effluents produced in the process, trying to establish an optimal reduction without the necessity of a pre-treatment of white water and also avoiding operating problems caused by the presence of NPE's, that may arise when a great portion of white water is used. So this will allow the evaluation of new alternatives that represent technological renovations in the process, which must be feasible and economically viable, bringing concrete contributions for improving the process, with minimal changes in the actual operating conditions. No other work evaluating the use of white water directly in the bleaching stage, without any treatment, was found in the literature.*

*According to Fonseca et al. (2003), the daily volume of effluents generated in pulping and bleaching processes all around the world is around*

Ihões de metros cúbicos de efluentes, o que corresponde ao consumo doméstico de 200 milhões de pessoas. Estes dados reforçam a importância do estudo aqui realizado, pois que a água está se tornando um bem cada vez mais escasso e caro.

### MATERIAIS E MÉTODOS

Para melhor compreensão dos objetivos, da metodologia utilizada e dos resultados obtidos nesse trabalho, faz-se necessária uma breve descrição da etapa de branqueamento do processo kraft estudado. O estudo de caso se deu em uma unidade de branqueamento ECF – elemental chlorine free, operando com uma seqüência de três estágios:

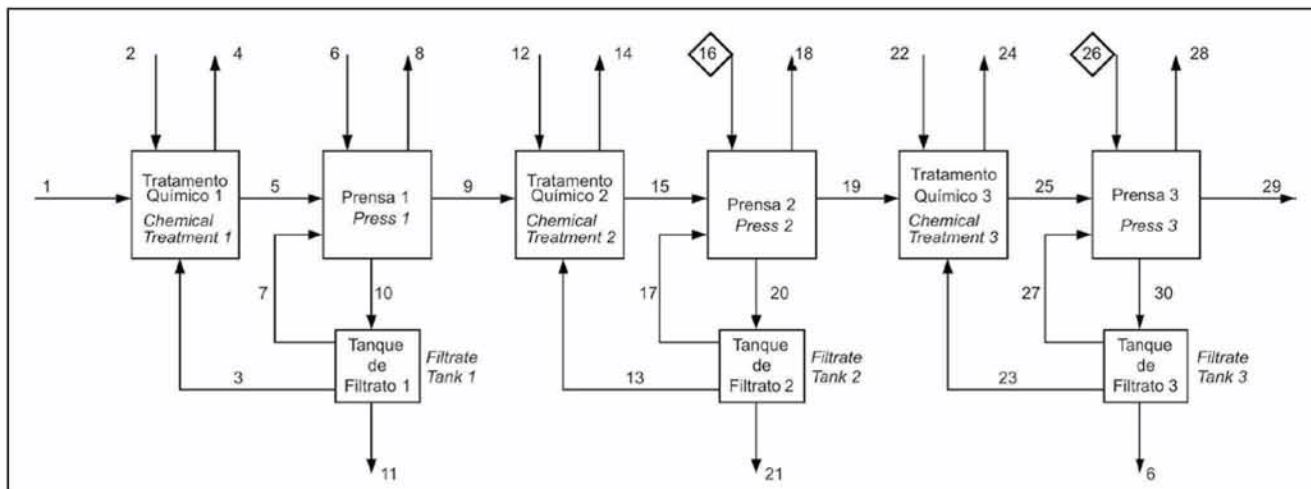
62 million cubic meters, corresponding to a domestic water consumption of 200 million people. This information reinforces the importance of this work, considering that water is becoming day by day a more expensive and rare raw material.

### MATERIALS AND METHODS

For a better comprehension of the objectives, methodology used and results of this work, a brief description of the bleaching stage of the kraft process studied is presented as follows. In our case study the bleaching stage was an ECF (elemental chlorine free) process, with a sequence of three stages: hot chlorine

**Tabela 1 – Descrição das linhas de processo da unidade de branqueamento**  
**Table 1 – Description of streams in bleaching process**

LINHA STREAM	DESCRIÇÃO DESCRIPTION	LINHA STREAM	DESCRIÇÃO DESCRIPTION
01 01	Entrada de polpa no branqueamento Pulp inlet	16 16	Água de lavagem da prensa 2 Washing water for press 2
02 02	Reagentes químicos do estágio 1 Chemical agents inlet – stage 1	17 17	Filtrado para lavagem da tela estágio 2 Filtrate for screen washing in press 2
03 03	Filtrado para a diluição do estágio 1 Filtrate for dilution in stage 1	18 18	Saída de gases prensa 2 Gases outlet from press 2
04 04	Saída de gases do tratamento químico 1 Gases outlet from chemical treatment of stage 1	19 19	Saída de polpa estágio 2 Pulp outlet from stage 2
05 05	Entrada de polpa na prensa 1 Pulp inlet in press 1	20 20	Filtrado prensa 2 Filtrate from press 2
06 06	Filtrado de lavagem da prensa 1 Washing filtrate (recycle) for press 1	21 21	Efluente alcalino Alkaline effluent
07 07	Filtrado para lavagem da tela estágio 1 Filtrate for screen washing in stage 1	22 22	Reagentes químicos do estágio 3 Chemical agents inlet – stage 3
08 08	Saída de gases prensa 1 Gases outlet from press 1	23 23	Filtrado para a diluição do estágio 3 Filtrate for dilution in stage 3
09 09	Saída de polpa estágio 1 Pulp outlet from stage 1	24 24	Saída de gases do tratamento químico 3 Gases outlet from chemical treatment of stage 3
10 10	Filtrado prensa 1 Filtrate from press 1	25 25	Entrada de polpa na prensa 3 Pulp inlet in press 3
11 11	Efluente ácido Acid effluent	26 26	Água de lavagem da prensa 3 Washing water for press 3
12 12	Reagentes químicos do estágio 2 Chemical agents inlet – stage 2	27 27	Filtrado para lavagem da tela estágio 3 Filtrate for screen washing in press 3
13 13	Filtrado para a diluição do estágio 2 Filtrate for dilution in stage 2	28 28	Saída de gases prensa 3 Gases outlet from press 3
14 14	Saída de gases do tratamento químico 2 Gases outlet from chemical treatment of stage 2	29 29	Saída de polpa estágio 3 Pulp outlet from stage 3
15 15	Entrada de polpa na prensa 2 Pulp inlet in press 2	30 30	Filtrado prensa 3 Filtrate from press 3



**Figura 1 – Diagrama de blocos simplificado do processo de branqueamento estudado nesse trabalho**

*Figure 1 – Simplified block diagram of the bleaching process studied in this paper*

dióxido de cloro quente (Dual-D), extração alcalina com oxigênio e peróxido de hidrogênio (EOP) e, por fim, um novo estágio com dióxido de cloro (D). Antes de entrar no estágio Dual-D a polpa é deslignificada com oxigênio, mas esta etapa não é considerada como um estágio nesse caso. Em cada estágio são adicionados produtos químicos específicos e entre um estágio e outro a polpa passa por lavagem para remoção de elementos químicos presentes nas fibras, de modo a não contaminem o estágio posterior. Esta lavagem é feita em prensas que combinam três princípios de lavagem em um único equipamento: desaguamento, deslocamento com água de lavagem e prensagem; do que resulta excelente eficiência de lavagem.

Cada um dos estágios do branqueamento foi dividido em duas etapas para melhor representação do processo: tratamento químico, onde ocorre a adição de todos os reagentes químicos do estágio; e lavagem, etapa onde ocorre a limpeza da polpa para retirar os reagentes não consumidos e os produtos das reações do respectivo estágio. Na prensa do primeiro estágio adiciona-se uma corrente de reciclo (filtrado) para a lavagem da polpa e nas prensas do segundo e terceiro estágios é feita adição de água fresca. Como mencionado antes, o objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade de se reduzir o consumo de água fresca nessas duas prensas, substituindo parte dessa água por água branca efluente da máquina de papel. A Figura 1 apresenta um diagrama de blocos simplificado da planta de branqueamento estudada e a Tabela 1 apresenta a descrição das correntes de processo da Figura 1.

Ao final do terceiro estágio de branqueamento a polpa é descarregada em um tanque de estocagem de polpa branqueada, de onde poderá seguir para dois destinos diferentes: secagem, para produção de folhas de celulose de mercado, ou máquina de papel. O processo de fabricação

*dioxide (Dual-D), alkaline extraction with oxygen and hydrogen peroxide (EOP) and finally another chlorine dioxide stage (D). Before entering in the Dual-D stage the pulp is delignified with oxygen, but this step is not considered as a stage in this case. In each bleaching stage, chemical products are added to the pulp and when going from one stage to another the pulp is washed for removing chemicals in the fibers, avoiding contamination in the next stage. This washing process of the pulp is done in presses that combine three principles in only one equipment: de-watering; washing and pressing; therefrom resulting an excellent washing efficiency.*

*In this work each one of the bleaching stages was divided in two steps for a better simulation of the process: chemical treatment step, where all the chemicals used in the stage are added and washing step, where the pulp is cleaned, removing all chemicals that were not consumed and also the products of the reactions in the respective stage. In the press of the first stage a recycle stream (filtrate) is added to wash the pulp and in the presses of the second and third stages an addition of industrial (fresh) water is done. As mentioned before, the main objective of this work is to evaluate the feasibility of reducing fresh water consumption in these two presses (streams 16 and 26 in Figure 1), replacing a fraction of this water by white water from the paper machine. Figure 1 shows a simplified block diagram of the bleaching unit studied in this work, and a description of the process streams in this diagram is presented in Table 1.*

*When the pulp leaves the third stage it is discharged in a storage tower of bleached pulp from where it may follow two different paths: drying machine to produce market pulp or paper machine to*

de papel tem basicamente duas etapas: preparação das fibras e formação e secagem da folha. A polpa celulósica bombeada para as máquinas de papel passa por fases de refino, depuração e adição de produtos químicos, inclusive pigmentos minerais que conferem carga mineral ao papel. Carbonato de cálcio e caulim são os principais produtos desta carga mineral. São adicionados ainda outros agentes químicos no processo de fabricação de papel, cuja finalidade é assegurar maior estabilidade do processo, limpeza e adequação da qualidade.

A massa de papel, depois de seu processamento, é encaminhada para a caixa de entrada da máquina de onde segue para a seção de formação da folha. Depois de formada, a folha passa por prensas e seção secadora onde é removido o excesso de água. Em seqüência, a folha é calandrada e enrolada na forma de bobina. A diferença entre o teor de água da suspensão fibrosa na entrada da máquina e aquele do papel faz entender a grande quantidade de efluente hídrico - água branca - que é gerado neste processo. Isto representa aproximadamente 20% do total da fábrica, ou seja, cerca de 700 m<sup>3</sup>/h. Daí o grande potencial de reutilização deste efluente, que poderá contribuir tanto para redução do consumo de água fresca como para redução do volume de efluente gerado.

### AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

Durante um período de 4 meses foram coletados dados de vazões de fluxos do processo de branqueamento, disponíveis de hora em hora, totalizando um conjunto de mais de 3000 medições para cada fluxo. Foi feito

*produce different kinds of papers. Pulp pumped to the paper machine passes through a cleaning process to remove impurities and then chemical products are added to it, including mineral pigments for improving some paper characteristics. Calcium carbonate and kaolin are the main mineral pigment applied. Other chemicals are also used in paper production process to accomplish with requested product properties.*

*After the addition of the chemical agents, the pulp proceeds to the paper machine head box and from there to the sheet formation section where paper production, as such, begins. This wet sheet passes through a series of presses and a steam heated dryer section for the final water removal. The variation in water content of the furnish supplied to the paper machine and that in the final paper at the output of this machine, gives an idea of the great volume of effluent (white water) produced in this process. In the case of the process studied in this work the volume of this effluent corresponds to approximately 700 m<sup>3</sup>/h, which is more or less 20% of the total effluent produced in the whole process. So, this gives an overview of the great potential to reuse white water, contributing not only in the reduction of fresh water consumption but also to reduce the volume of effluents that must be treated.*

### DATA ACQUISITION AND TREATMENT

*Data of the process streams involved, such as flow rates and pulp consistencies, necessary for a complete mass balance of the unit, were taken from a period of four months of operation. These data,*

**Tabela 2 – Dados de algumas correntes de processo do estágio 1 da unidade de branqueamento, usados para obter correlações para o balanço de massa em planilha eletrônica**

*Table 2 – Data of some process streams of bleaching plant stage 1 used to perform correlations for a mass balance by use of electronic spreadsheet*

CORRENTE 1 (kg/h) STREAM 1 (kg/h)	CORRENTE 2 (kg/h) STREAM 2 (kg/h)	CORRENTE 3 (kg/h) STREAM 3 (kg/h)	CORRENTE 6 (kg/h) STREAM 6 (kg/h)	CORRENTE 7 (kg/h) STREAM 7 (kg/h)
42.109	60.092	35.3426	17.6264	71.299
42.114	60.095	35.3430	17.6267	71.317
42.119	60.095	35.3440	17.6271	71.326
42.121	60.106	35.3444	17.6274	71.337
42.122	60.110	35.3511	17.6307	71.355
42.125	60.115	35.3575	17.6339	71.357
42.127	60.134	35.3601	17.6352	71.363
42.128	60.139	35.3652	17.6377	71.402
42.131	60.140	35.3655	17.6379	71.419
42.132	60.146	35.3697	17.6400	71.420

**Tabela 3 – Propriedades de algumas correntes de processo em etapas de branqueamento**

*Table 3 – Properties of some process streams in bleaching stages*

<b>CORRENTES STREAM</b>	<b>DESCRIÇÃO DESCRIPTION</b>	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\tau$ (K) $\tau$ (K)	<b>CONDUTIVIDADE (mS) ELECTRIC CONDUCTIVITY (mS)</b>
01 01	Entrada de polpa no estágio Dual-D <i>Pulp inlet in Dual D stage</i>	1009 1009	325 325	9,540 9.540
09 09	Entrada de polpa no estágio OP <i>Pulp inlet in EOP stage</i>	939 939	325 325	5,823 5.823
19 19	Entrada de polpa no estágio D <i>Pulp inlet in D stage</i>	1046 1046	325 325	7,260 7.260
06 06	Filtrado do estágio D <i>Filtrate from D stage</i>	982 982	341 341	3,094 3.094
29 29	Saída polpa do estágio D <i>Pulp outlet from D stage</i>	952 952	318 318	3,094 3.094
11 11	Efluente Dual D <i>Dual D effluent</i>	986 986	338 338	5,823 5.823
21 21	Efluente OP <i>EOP effluent</i>	986 986	334 334	7,260 7.260
- 32	Água branca <i>White water</i>	979 979	325 325	0,678 0.678
16 e 26 16 and 26	Água industrial <i>Industrial water</i>	987 987	327 327	0,198 0.198

um tratamento destes dados, desprezando aqueles relativos às variações na produção por paradas e partidas da planta, problemas operacionais, etc. Foram eliminados todos os dados pertinentes a produção inferior a 40 adt/h (adt = air dry ton, tonelada seca ao ar, que possui 10% de umidade), por ser este o valor mínimo indicador de que o processo estaria operando de forma estável. Após aplicar esse critério de seleção, o conjunto de dados ficou reduzido a 2000 medições. Além das vazões (volumétricas) dos fluxos do processo, também foram medidas suas temperaturas, condutividade elétrica, densidade (necessária para obter as vazões mássicas dos fluxos) e consistência do fluxo, dada pela relação entre a massa de fibras secas e a massa total de uma amostra de suspensão fibrosa. As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam alguns valores típicos dos fluxos do processo

**Tabela 4 – Consistência média das polpas de algumas correntes do processo**

*Table 4 – Pulps average consistencies of some process streams*

<b>CORRENTES DE POLPA PULP STREAMS</b>	<b>CONSISTÊNCIA (%) CONSISTENCY (%)</b>
Entrada de polpa no estágio Dual-D <i>Pulp inlet in Dual D stage</i>	27,8 27.8
Entrada de polpa no estágio OP <i>Pulp inlet in EOP stage</i>	29,3 29.3
Entrada de polpa no estágio D <i>Pulp inlet in D stage</i>	30,3 30.3
Saída de polpa do estágio D <i>Pulp outlet from D stage</i>	29,5 29.5

a set of more than 3000 measurements, were treated, eliminating those related with startups and shut downs of the plant and also those in which the pulp production capacity was lower than the usual plant capacity, considered to be equal to 40 adt/h. The remaining data after applying these filters consisted of a set of approximately 2000 measurements. Besides volumetric flow rates of the process streams, others variables like temperatures, electric conductivity, density (necessary to calculate mass flow rates) and pulp consistency of each stream (determined by the dry matter mass divided by total mass of the stock, in other words, the solid content of the fiber suspension) were also taken. Tables 2, 3 and 4 present some typical values of bleaching process streams.

de branqueamento.

Nesta fase do trabalho foram determinadas, em laboratório, algumas características físico-químicas dos fluxos necessárias para um balanço de massa adequado, tais como: pH, concentração de matéria orgânica, dureza, concentração de NPE's e poder de incrustação. Utilizando estes dados, uma planilha eletrônica foi usada para realizar o balanço de massa da unidade de branqueamento.

### BALANÇO DE MASSA DA PLANTA DE BRANQUEAMENTO

Para realizar o balanço de massa da unidade de branqueamento estudada neste trabalho, tentou-se inicialmente estabelecer um modelo fenomenológico que abordasse a estequiometria das reações químicas que ocorrem em cada de seus estágios. Entretanto, isso não foi possível, dada a dificuldade de se obter as informações necessárias sobre esta estequiometria, bem como levantar todas as reações que ocorrem no processo. Em função dessa dificuldade optou-

*During this part of the work, some physico-chemical properties of the streams, needed for a satisfactory mass balance, such as: pH, organic matter content, hardness, concentration of NPE's and scaling potential were determined in the laboratory. With these process data an electronic spreadsheet was used to perform a mass balance of the bleaching unit.*

### MASS BALANCE OF THE BLEACHING PLANT

*Since it was not possible to perform a phenomenological model considering the stoichiometry of reactions involved in each one of the bleaching stages due to inherent difficulties, the remaining data, after treatment, were then used to obtain correlations to perform a mass balance of the bleaching unit. These correlations allow the description of the process streams (inputs and outputs) from a basis of calculation taken as being the output*

**Tabela 5 – Restrições usadas nas simulações com a planilha eletrônica**  
*Table 5 – Constraints adopted for simulations with electronic spreadsheet*

	NPE's NPE's				MATÉRIA ORGÂNICA ORGANIC MATTER
	Fe	Ca	Si	Mn	
Concentração(mg/L)	1,5	15,0	40,0	2,7	15,0
<i>Concentration(mg/L)</i>	<i>1.5</i>	<i>15.0</i>	<i>40.0</i>	<i>2.7</i>	<i>15.0</i>

**Tabela 6 – Propriedades da água branca, água industrial e das principais correntes da planta de branqueamento**

*Table 6 – Properties of white water, industrial water and main streams of the bleaching plant*

CORRENTES DO BRANQUEAMENTO <i>BLEACHING PLANT STREAMS</i>	DUREZA <i>HARDNESS</i> (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	MATÉRIA ORGÂNICA <i>ORGANIC MATTER</i> (mg KMnO <sub>4</sub> /L)	PODER DE INCRUSTAÇÃO <i>FOULING POWER</i> (µg/cm <sup>2</sup> )
Entrada de polpa no estágio Dual-D <i>Pulp inlet in Dual-D stage</i>	53,7 <i>53.7</i>	1.374,3 <i>1374.3</i>	5,9 <i>5.9</i>
Entrada de polpa no estágio OP <i>Pulp inlet in EOP stage</i>	144,9 <i>144.9</i>	1.328,8 <i>1328.8</i>	6,2 <i>6.2</i>
Entrada de polpa no estágio D <i>Pulp inlet in D stage</i>	19,6 <i>19.6</i>	788,7 <i>788.7</i>	7,9 <i>7.9</i>
Filtrado do estágio D <i>Filtrate from D stage</i>	56,1 <i>56.1</i>	341,8 <i>341.8</i>	10,5 <i>10.5</i>
Saída de polpa do estágio D <i>Pulp outlet from D stage</i>	54,9 <i>54.9</i>	319,7 <i>319.7</i>	5,6 <i>5.6</i>
Efluente Dual-D <i>Dual D effluent</i>	120,0 <i>120.0</i>	1.328,8 <i>1328.8</i>	6,2 <i>6.2</i>
Efluente OP <i>EOP effluent</i>	19,4 <i>19.4</i>	788,7 <i>788.7</i>	7,9 <i>7.9</i>
Água branca <i>White water</i>	93,3 <i>93.3</i>	84,9 <i>84.9</i>	39,1 <i>39.1</i>
Água industrial de lavagem <i>Industrial water</i>	35,0 <i>35.0</i>	3,7 <i>3.7</i>	7,8 <i>7.8</i>

se por correlacionar todas as correntes de processo usando o conjunto de dados industriais obtidos, tendo como base de cálculo a vazão de fibras que sai do estágio de deslignificação (corrente 1 da Figura 1). As correlações obtidas - a maioria da forma polinomial de terceiro grau - apresentaram um excelente coeficiente de determinação ( $R^2$ ), sendo 0,951 o menor valor. Estas correlações foram então implementadas na planilha eletrônica e, juntamente com algumas considerações, foram capazes de representar muito bem os dados reais do processo. As considerações adotadas na realização deste balanço foram: estudo do processo em regime permanente, para tanto se definiu uma faixa de produção do fluxo 1 como sendo uma produção igual ou superior a 40 adt/h, como já citado; as vazões mássicas de gases gerados durante o processo de branqueamento (linhas 4, 8, 14, 18, 24 e 28) foram estipuladas como sendo 0,5% do valor da soma de todas as vazões das correntes de entrada em cada etapa de cada estágio, pois os valores destas correntes não puderam ser medidos no processo; o balanço foi desenvolvido dividindo-se cada corrente em dois componentes básicos: fibras e solução, tendo-se ainda a vazão total que nada mais é que a soma destes dois componentes e a consistência, que é um parâmetro do processo já descrito; em cada prensa de lavagem estipulou-se uma perda de aproximadamente 1,5% de fibras do fluxo de alimentação devido a perdas químicas (degradação) e ao equipamento de lavagem; em cada estágio tem-se a adição de vários produtos químicos e vapor de média e baixa pressão, todos eles foram reunidos em uma única corrente em cada estágio, denominada corrente de reagentes químicos (linhas 2, 12 e 22). Com estas simplificações pôde-se desenvolver o balanço de massa da unidade, o qual demonstrou estar de acordo com os dados industriais reais. Além dessas considerações foram introduzidas também as restrições referentes aos NPE's - Ca, Si, Mn e Fe - e também restrições quanto à matéria orgânica (Jemaa et al, 1999). Isso se faz necessário por não ser possível utilizar um volume indiscriminado de água branca que contém essa matéria orgânica e os NPE's, pois que estes, se em grandes concentrações, causam sérios danos ao processo.

A Tabela 5 apresenta as restrições adotadas para os NPE's e a matéria orgânica, referidas às concentrações máximas aceitáveis em qualquer das correntes do processo de branqueamento. Estas restrições foram adotadas com base em informações obtidas junto à empresa em que se realizou o estudo e foram baseadas em dados experimentais obtidos no processo.

A Tabela 6 apresenta alguns dados importantes sobre as principais correntes do processo. Nesta tabela, o poder de incrustação, medido em mg/cm<sup>2</sup>, foi obtido utilizando-se equipamento desenvolvido pela Nalco Brasil Ltda. Este equipamento se baseia na deposição eletrolítica de íons responsáveis pelas incrustações, sendo que a deposição da massa

*stream from the delignification stage (stream 1 in Figure 1). The correlations have presented a good coefficient of determination ( $R^2$ ), being 0.951 the minimal obtained value. Then, these correlations were implemented in an electronic spreadsheet and considering some assumptions it was possible to obtain a good model for the mass balance of the real process.*

*These assumptions are stated as follows (streams numbers refer to Figure 1): process is in steady state with a flow rate of 40 adt/h or more in stream 1; mass flow rate of gases (streams 4, 8, 14, 18, 24 and 28) were considered to be 0.5% of the sum of input streams in each stage, because these flow rates could not be measured directly in the process; mass balance was performed dividing each stream in two basic components - fibers and solution (that contains all the dissolved chemicals); in each washing press it was considered a material loss of 1.5% of fibers existing in the feed stream due to chemical losses (degradation) and the washing process itself; in each stage all the chemical products were assembled in only one stream named chemical reactants (streams 2, 12 and 22). With these assumptions it was possible to perform a mass balance of the unit, which has proven to be in good agreement with industrial data. Besides these assumptions, some constraints related to the maximum concentration allowed for NPE's (Ca, Si, Mn and Fe) and constraints related to organic matter content (Jemaa et al., 1999) were introduced in the model. They are necessary because it is not possible to use white water indiscriminately, since NPE's and organic matter in high concentrations are to cause serious operating problems in the process.*

*Table 5 shows the constraints used for each NPE and also for organic matter. These values were determined from industrial previous studies developed by process engineers that work in the pulp and paper mill analyzed in this work, based on experimental data obtained from the process behavior.*

*Table 6 shows some important data of the main process streams. In this table, scaling power, measured in mg/cm<sup>2</sup>, was obtained using an equipment developed by Nalco Brasil Ltda., based on the electrolytic deposition of ions responsible for fouling, thus weighing the mass of these deposited ions by the area in square centimeter of the equipment filter. This value is*

desses íons por centímetro quadrado de filtro do aparelho define o poder de incrustação de cada fluxo. Valores de 5 a 10 mg/cm<sup>2</sup> indicam necessidade de monitoramento do fluxo e valores superiores a 10 mg/cm<sup>2</sup> indicam alto potencial de incrustação.

Como pode-se observar dos dados da Tabela 6, a maioria das correntes ainda possui um poder de incrustação

tolerável. Há, contudo, necessidade de monitoramento constante, principalmente em função do que se pretende neste trabalho, que é integrar a corrente de água branca (com altíssimo poder de incrustação) à corrente de água industrial, o que pode elevar, de forma geral, o poder de incrustação das demais correntes do processo.

Uma outra suposição adotada no desenvolvimento do balanço de massa foi que as correntes de reagentes químicos e as correntes de gases não contêm NPE's em quantidades significativas e que os NPE's sempre estão presentes na solução (lembrando que as correntes foram divididas em duas

**Tabela 7 – Concentração média de NPE's nas correntes de processo da planta de branqueamento**

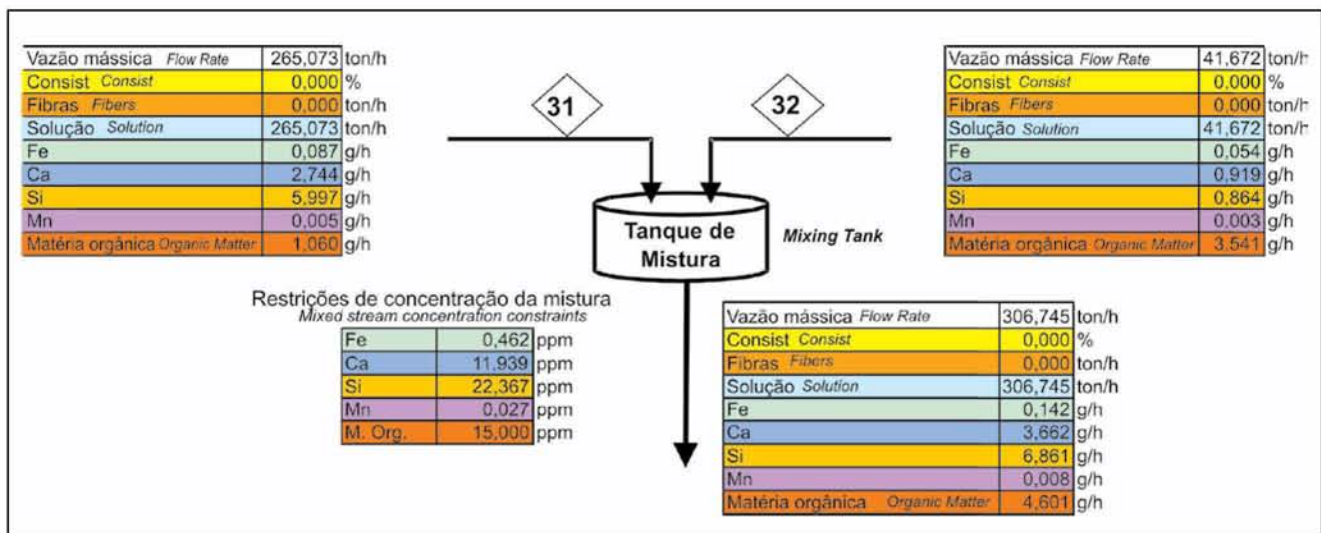
*Table 7 – Average concentration of NPE's in process streams of the bleaching plant*

CORRENTES DO PROCESSO <i>PROCESS STREAMS</i>	CONCENTRAÇÃO DE NPE (mg/L) <i>NPE'S CONCENTRATION (mg/L)</i>			
	Fe	Ca	Si	Mn
Entrada de polpa no estágio Dual-D <i>Pulp inlet at Dual-D stage</i>	< 1,3 <i>&lt; 1.3</i>	24,375 <i>24.375</i>	18,767 <i>18.767</i>	0,566 <i>0.566</i>
Água industrial <i>Industrial water</i>	0,330 <i>0.330</i>	10,350 <i>10.350</i>	22,625 <i>22.625</i>	0,022 <i>0.022</i>
Água branca <i>White water</i>	< 1,3 <i>&lt; 1.3</i>	24,014 <i>24.014</i>	18,814 <i>18.814</i>	0,070 <i>0.070</i>
Efluente ácido <i>Acid effluent</i>	< 1,3 <i>&lt; 1.3</i>	56,575 <i>56.575</i>	24,225 <i>24.225</i>	0,982 <i>0.982</i>
Efluente alcalino <i>Alkaline effluent</i>	< 1,3 <i>&lt; 1.3</i>	30,825 <i>30.825</i>	26,950 <i>26.950</i>	0,240 <i>0.240</i>
Filtrado da prensa do estágio D <i>Filtrate from D stage press</i>	< 1,3 <i>&lt; 1.3</i>	33,100 <i>33.100</i>	18,400 <i>18.400</i>	0,263 <i>0.263</i>

called *fouling*, or *scaling*, or *scaling*, power. When values are in the range of 5 to 10 mg/cm<sup>2</sup> they indicate the necessity to monitor the process stream but, when higher than 10 mg/cm<sup>2</sup>, they are pointing to a great risk of *fouling*.

Another assumption made in this work is that chemical products streams and gases streams do not contain NPE's and that they are always present in the considered stream solution. The average concentrations of NPE's in some main streams of the process were measured via ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, Perkin Elmer, model 300 DV), determinations of concentrations in other streams were performed through mass balances. Table 7 shows these average concentrations in some streams.

Another assumption made in this work is that chemical products streams and gases streams do not contain NPE's and that they are always present in the considered stream solution. The average concentrations of NPE's in some main streams of the process were measured via ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, Perkin Elmer, model 300 DV), determinations of concentrations in other streams were performed through mass balances. Table 7 shows these average concentrations in some streams.



**Figura 2 – Integração de processo com as correntes de água branca e água industrial (fresca)**

*Figure 2 – Process integration of white water and industrial (fresh) water streams*

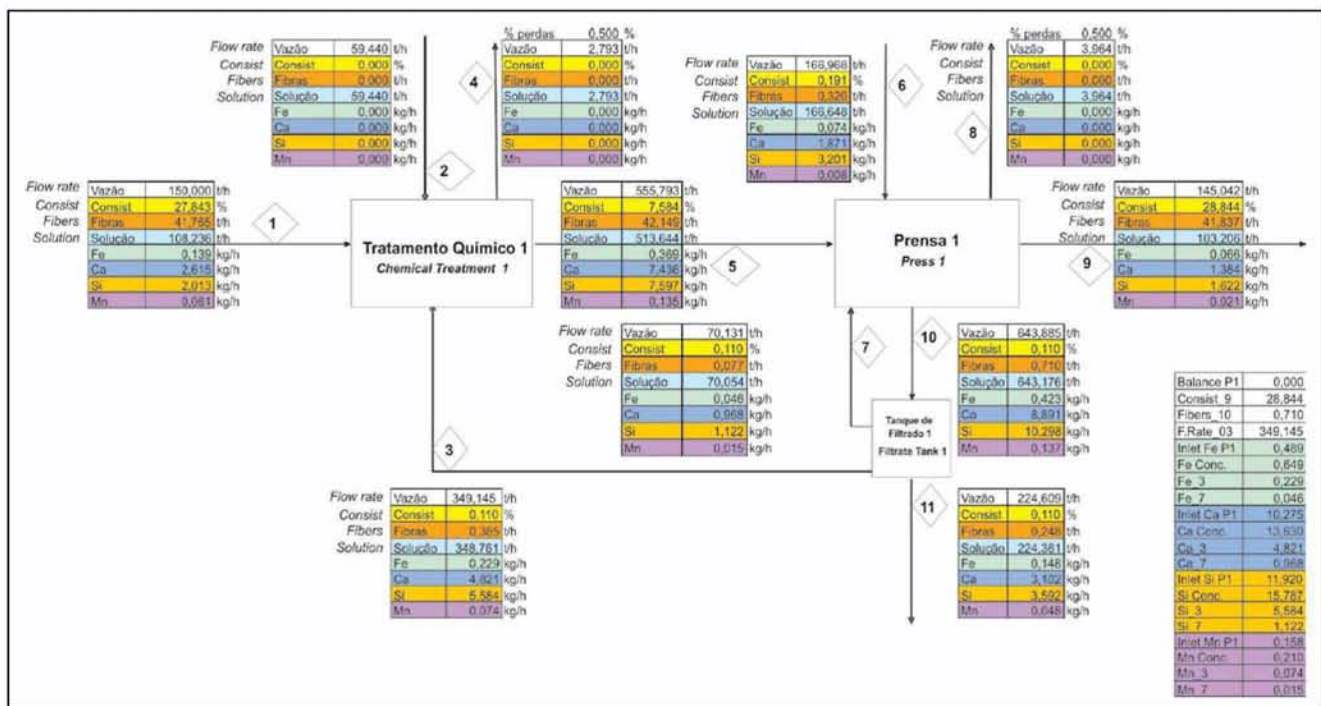


Figura 3 – Balanço de massa em planilha eletrônica com restrições de NPE's e matéria orgânica para o primeiro estágio do branqueamento

Figure 3 – Mass balance in spreadsheet with NPE's and organic matter constraints of the first bleaching stage

partes: fibras e solução). A partir disso, foram analisadas as concentrações de NPE's em algumas correntes do processo, e suas concentrações nas demais correntes foram obtidas pelo balanço de massa na planilha eletrônica. A Tabela 7 apresenta os valores médios das concentrações dos NPE's nas correntes de processo, obtidos via instrumental pelo método ICP-OES (Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Indutivamente Acoplado – Equipamento: Perkin Elmer, modelo 300 DV).

## RESULTADOS

Utilizando uma planilha eletrônica em que foi implementado o balanço de massa com as restrições, suposições e correlações descritas no item anterior, foi possível avaliar a redução do consumo de água industrial resolvendo o sistema de equações e inequações de balanço, no qual a função objetivo adotada foi a minimização da vazão da corrente de água industrial, a corrente 31 (vide Figura 2), que é misturada com a corrente 32 de água branca vinda da máquina de papel.

A corrente resultante dessa mistura é dividida em duas correntes: 16 e 26, usadas nas prensas de lavagem dos estágios 2 e 3 do branqueamento. Nesta avaliação foi possível identificar também a influência dos NPE's e da matéria orgânica. A Figura 3 apresenta o balanço de massa com as restrições dos NPE's e matéria orgânica para o primeiro estágio de branqueamento.

De se ressaltar que este balanço de massa implementado na planilha não é capaz de prever alguns fenômenos que ocor-

## RESULTS

Using the electronic spreadsheet in which a mass balance with the constraints, the assumptions made and the correlations used were implemented, it was possible to evaluate the reduction in the consumption of industrial fresh water, by solving a set of equations and inequations, considering as main objective function to minimize the flow rate of fresh water (stream 31, see Figure 2) mixed with the white water stream 32 from the paper machine.

The resulting stream of this mixture is divided into streams: 16 and 26, which are used in the washing presses of stages 2 and 3 of the bleaching process. In this evaluation of fresh water consumption it was also possible to identify the influence of NPE's and organic matter concentrations. Figure 3 shows the mass balance with NPE's and organic matter constraints for the first bleaching stage.

It is important to say that this mass balance is not able to predict some well known phenomena that usually occur during the bleaching process, for instance: pH disturbances, which may cause precipitation of some ions, like Ca, from where operating problems arise. Energy balance was also not considered in this work, since the temperatures of the streams do not present a signifi-

rem durante o branqueamento, como, por exemplo, o efeito de um choque de pH entre correntes do processo. Esse efeito causa a precipitação de alguns íons, como o Ca, por exemplo, que poderá resultar em problemas operacionais.

Com a planilha eletrônica foram realizadas diversas simulações para avaliar as incertezas de duas variáveis: restrições da concentração de NPE's e matéria orgânica (Tabela 5) e concentrações médias dos NPE's e matéria orgânica na corrente de água branca (Tabela 7). Foram consideradas incertezas de até  $\pm 50\%$  nos valores. Essa análise foi feita para sistemas com e sem presença de matéria orgânica. Os resultados para o cálcio são apresentados nos gráficos das Figuras 4 e 5. Simulações com outros NPE's também foram realizadas, mas sem que apresentassem resultados significativos quanto a sua influência na redução do consumo de água fresca. Seus gráficos não são representativos, razão por que não são apresentados aqui.

## DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 4 e 5 foi possível concluir que a matéria orgânica é de grande influência na redução do consumo de água industrial e que representa a principal restrição a ser trabalhada no caso de eventual alteração para reutilização de água branca. Quando a restrição da matéria orgânica é respeitada, todos os NPE's acabam não tendo influência na redução do consumo de água industrial. Analisando-se apenas a influência dos NPE's sem

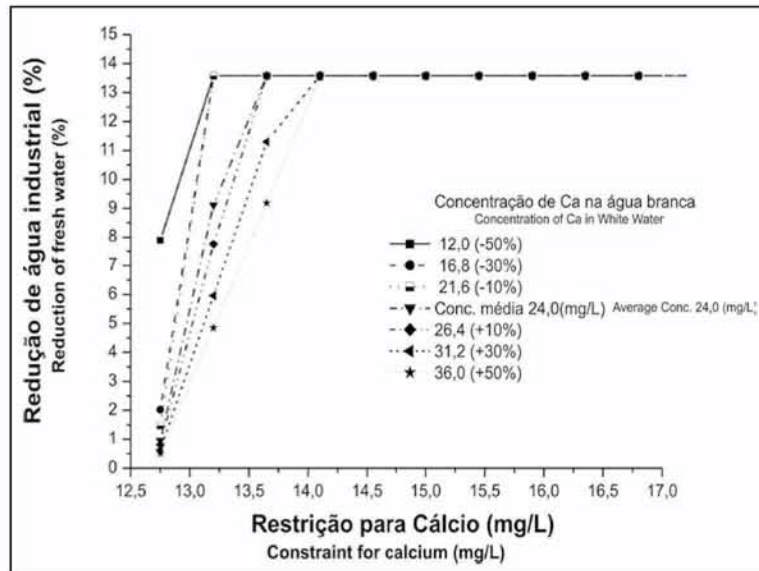


Figura 4 – Influência do cálcio na redução do consumo de água industrial com a restrição de matéria orgânica

Figure 4 – Influence of Ca in reduction of industrial water consumption with organic matter constraint

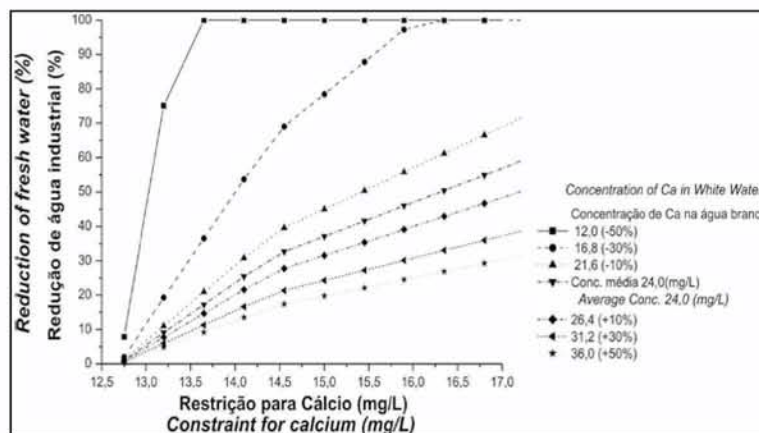


Figura 5 – Influência do cálcio na redução do consumo de água industrial sem a restrição de matéria orgânica

Figure 5 – Influence of Ca in reduction of industrial water consumption without organic matter constraint

cant temperature gradient.

Some simulations were done with the electronic spreadsheet evaluating the uncertainty of two variables: constraints of NPE's and organic matter concentrations (Table 5) and average concentration of NPE's and organic matter in white water stream (Table 7). Uncertainties were considered in the range of  $\pm 50\%$  of these values. This analysis was done for systems with and without organic matter in order to separately evaluate their effects. The results of these simulations are presented in Figures 4 and 5 for calcium. Simulations for the others NPE's were done, but they have shown no significant results in reducing fresh water consumption,

so their graphics are not meaningful and are not presented here.

## DISCUSSION AND CONCLUSIONS

From the results presented in Figures 4 and 5 it is possible to conclude that organic matter greatly interferes on reduction of fresh water consumption possibilities, and that it is the most important constraint to be analyzed in case of an eventual change in the process or amount of white water recycling. When the constraint of organic matter is considered, all NPE's do not influence in fresh water consumption. Analyzing only the influence of

**Tabela 8 – Porcentagem de redução no consumo de água fresca em condições críticas***Table 8 – Percentage reduction of fresh water consumption in critical conditions*

CASOS CASES		REDUÇÃO (%) REDUCTION (%)
1 – Com matéria orgânica	Restrições para todos os NPE's – limite inferior	0,96
	Concentrações para todos os NPE's – limite superior	13,58
1 – <i>With organic matter</i>	<i>Constraints for all NPE's – lower limit</i>	<i>0.96</i>
	<i>Concentration for all NPE's – upper limit</i>	<i>13.58</i>
2 – Sem matéria orgânica	Restrições para todos os NPE's – limite inferior	0,96
	Concentrações para todos os NPE's – limite superior	19,74
2 – <i>Without organic matter</i>	<i>Constraints for all NPE's – lower limit</i>	<i>0.96</i>
	<i>Concentration for all NPE's – upper limit</i>	<i>19.74</i>

a restrição da matéria orgânica, os resultados mostraram ser o Ca o NPE mais influente.

Na análise das incertezas (sensibilidade) da restrição do cálcio foi adotada uma faixa de  $\pm 17\%$ , uma vez que os resultados obtidos nas simulações além desses limites não apresentaram diferenças significativas. Para a incerteza no valor da concentração de cálcio na corrente de água branca, como mencionado antes, foi aplicada uma faixa de  $\pm 50\%$ , pois que esta é a incerteza do método de análise química empregado.

As restrições relacionadas aos NPE's e matéria orgânica são muito importantes, uma vez que Ca e Si podem causar incrustações nos tubos e prensas, e Fe e Mn promovem reversão de alvura da polpa. Além disso, quando há matéria orgânica em excesso nos estágios de branqueamento, ela causa consumo maior de químicos e aumento na DBO - demanda bioquímica de oxigênio - e na DQO - demanda química de oxigênio - dos efluentes. Dessa forma, os valores corretos dessas restrições podem definir a viabilidade ou não da reutilização de água branca no branqueamento para redução da água fresca. A Tabela 8 mostra dois casos em que os valores extremos dessas restrições são combinados de forma a avaliar o efeito da redução do consumo de água fresca.

#### Algumas conclusões obtidas com este trabalho são:

- o balanço de massa usando planilha eletrônica se mostrou uma boa ferramenta para modelar o comportamento da unidade de branqueamento e foi desenvolvido da forma mas clara possível, de modo a facilitar alterações eventualmente necessárias no caso de alguma modificação no processo original. Com esta ferramenta é possível realizar uma análise sistemática do processo de branqueamento na indústria de papel e celulose e ficou demonstrado que parte do efluente das máquinas de papel (água branca)

*the NPE's, without organic matter constraint, the results have shown that Ca is the most important NPE to be accounted for.*

*In the analysis of the uncertainty (sensitivity) of calcium constraint, a range of  $\pm 17\%$  was adopted, since the results obtained with the simulations beyond these limits have presented no significant differences. For the uncertainty in the value of calcium concentration in white water stream, as mentioned before, a range of  $\pm 50\%$  was adopted, since this is the uncertainty due to the practiced chemical analysis method.*

*The constraints related to the NPE's and organic matter are very important since Ca and Si may cause fouling in tubes and presses and Fe and Mn promote whiteness reversion of the pulp. Besides that, when organic material is present in excess in bleaching stages, it causes a greater consumption of chemicals and a rise in BOD (biochemical oxygen demand) and COD (chemical oxygen demand) in the effluents. So the correct values for these constraints may define the feasibility of reusing white water in the bleaching process to reduce fresh water consumption. Table 8 shows two cases in which the extremes of the variables were combined in order to evaluate the effect on the reduction of fresh water.*

#### *Some conclusions of this work are:*

- the mass balance by use of an electronic spreadsheet has proven to be a good tool for modeling the behavior of the bleaching plant and it was build as simple as possible in order to ease any necessary changes in the future, in case of modifications in the process. With this tool it was possible to carry out a systematic analysis of*

pode ser usada nas prensas de lavagem do branqueamento, junto com água fresca, reduzindo o consumo desta, com conseqüente diminuição dos efluentes do processo;

- os resultados obtidos mostraram que é possível reduzir água fresca em aproximadamente 13,5%, quando considerada a restrição da matéria orgânica, e em mais de 30% quando esta restrição não for considerada (considerando-se os valores médios das restrições e concentrações). Neste caso, o cálcio transforma-se no NPE limitante;

- essa economia no consumo de água industrial, no estudo de caso realizado, corresponde a uma redução de aproximadamente 40 t/h de efluentes das máquinas de papel, correspondendo a 6% do total produzido que seria enviado para tratamento, isso quando se tem a condição estipulada para as restrições e as concentrações médias para os NPE's. Considerando-se algumas incertezas sobre estes valores médios, para a hipótese sem a restrição da matéria orgânica, passa-se a ter uma redução de aproximadamente 15% no envio de água branca ao tratamento, ou seja, uma quantidade de aproximadamente 100 t/h de água branca a menos na estação de tratamento de efluentes;

- estas conclusões estão sinalizando como possível o uso de água branca nas prensas de lavagem do branqueamento, pois é tecnicamente viável, e com tratamento especial para reduzir ou remover matéria orgânica dissolvida e cálcio deste efluente, a redução do consumo de água fresca poderá alcançar porcentagens muito mais elevadas. Não obstante, esta opção deve necessariamente passar por análise econômica a fim de assegurar a viabilidade do processo.

Levando-se em conta que a indústria de celulose e papel é a maior consumidora de água dentre as indústrias químicas, o desenvolvimento de trabalhos que busquem minimizar o consumo deste insumo, essencial a este tipo de indústria, se faz cada vez mais importante. O trabalho aqui apresentado, que realizou estudo de um processo industrial de branqueamento de celulose visando a reutilização de um efluente industrial, busca dar importante contribuição, pois a reutilização da água branca tanto reduz o consumo de água fresca como, paralelamente, a carga de efluentes tratada pela indústria, facilitando futuras expansões do processo mantendo assegurado o respeito às normas da legislação.

### **AGRADECIMENTOS**

Os autores desejam expressar sinceros agradecimentos às seguintes pessoas: Israel Trovó, Danyella Oliveira Perissotto e Rui Aureliano Lima por sua importante contribuição no desenvolvimento deste trabalho e à RIPASA S.A. Celulose e Papel, por seu fundamental apoio. ▲

*the bleaching process, showing that it is feasible to recycle a fraction of the effluent from paper machines (white water) to the washing presses together with fresh water, reducing its consumption with a consequent reduction in the effluents volume generated in the process;*

- *the results obtained have shown that it is possible to reduce approximately 13.5% of fresh water consumed when considering organic matter constraint and more than 30% when this constraint is not considered (taking average values of constraints and concentrations). In this case, Ca becomes the limiting NPE;*

- *reduction in fresh water consumption was attained using approximately 40 t/h of white water, which means 6% of the total white water stream sent to the treatment plant, this, when average values of constraints and concentrations were considered. For cases were presence of organic matter is not considered, depending on the uncertainties, the volume of white water used in the bleaching process may reach 100 t/h, corresponding to a reduction of 15% of the total effluent volume sent to treatment;*

- *the conclusions of this work are pointing out for a feasible reuse of white water in the presses of the bleaching stage without any necessary previous treatment of this effluent. When a special treatment is applied, for example, to remove or reduce organic matter or calcium, the reduction of fresh water consumption may reach higher proportions. Of course an economic analysis should always be done before modifying the process, to ensure the feasibility of the white water application in the process.*

*Taking into consideration that pulp and paper mills are the greatest water consumer among chemical industries, the development of researches aiming at the reduction of this important raw material are becoming more and more important. This work intends to pose a contribution for the reduction of fresh water consumption and also for the reduction of effluents volume produced in the process, trying to contribute with an alternative for allowing future expansions of the industrial plant.*

### **ACKNOWLEDGEMENTS**

*The authors would like to thank Israel Trovó, Danyella Oliveira Perissotto and Rui Aureliano Lima for their contribution to the development of this work and to RIPASA S.A. Celulose e Papel for its support in this project.* ▲

## REFERÊNCIAS / REFERENCES

- Bolton, A. J.; Vizotto, R. (2000): Systems approach to reusing white water on pulp & paper machines. 33rd Annual Pulp and Paper Meeting – ABTCP (Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel), São Paulo.
- Constanzi, R. N.; Daniel, L. A.; Reali, M. A. P. (2000): Tratamento de efluentes de fábrica de papel por processos físico-químicos empregando flotação por ar dissolvido e ozônio. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Lima.
- Emunds, R. L.; Cardoso, M.; Mendes, M. D. (2006): Elementos não processáveis na unidade de recuperação química da produção de celulose kraft. *O Papel*, August, 53-69.
- Fonseca, J. A. V. M.; Barbosa, M.; Pinto, N.; Salan, R. S.; Sobrinho, G. D.; Brito, N. N.; Coneglian, C. M. R.; Tonso, S.; Pelegrini, R. (2003): Tratamento de efluentes na indústria de papel e celulose. III Fórum de Estudos Contábeis, Faculdades Integradas Claretianas, Rio Claro.
- Freddo, A.; Foelkel, C. E. B.; Frizzo, S. M. B.; Silva, M. C. M. (1999): Mineral elements in woods of eucalyptus and black wattle and its influence in a bleached kraft pulp mill. *Ciência Florestal*, 9 (1) 193-209.
- Galloway, L.; Gleadow, P.; Hastings, C.; Lownertz, P. (1994): Closed-cycle Technologies for Bleached Kraft Pulp Mills. National Pulp Mills Research Program, Technical Report n° 7, CSIRO, Canberra.
- Jemaa, N.; Thompsom, R.; Paleologou, M.; Berry, R. M. (1999): Non-process elements the Kraft cycle, Part I: sources, levels and process effects. *Pulp & Paper Canada*. 100 (9).
- Marino, S.; Braker, J.; Carrière, M.; Paris, J. (2000): Recirculation of process and non-process water in an integrated newsprint mill: a case study. 33rd Annual Pulp and Paper Meeting – ABTCP (Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel), São Paulo.
- McGowan, D. R. (2002): Closing the loop at Stora Enso Uetersen. *Solutions! for People, Processes and Paper*. June, 74-75.
- Oliveira, C. R.; Silva, C. M.; Rabelo, M. D.; Milanez, A. F. (2003): Reutilização de água branca de fábrica de papel integrada por meio de ultrafiltração. 363th Annual Pulp and Paper Meeting – ABTCP (Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel), São Paulo.
- Parthasarathy, G.; Krishanagopalan, P. (2001): Systematic Reallocation of Aqueous Resources using Mass Integration in Typical Pulp Mill. *Advances in Environmental Research*. 5, 61-79.
- Rabelo, M. S.; Morgado, A. F.; Neves, J. M. (2001): Análise da influência e do acúmulo dos elementos não processuais (NPEs) em sistemas de branqueamento totalmente livre de cloro (TCF): estudo de caso com fechamento de circuito. 34th Annual Pulp and Paper Meeting – ABTCP (Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel), São Paulo.
- Savulescu L.; Poulin, B.; Hammache, A.; Bédard, S. (1999): Water and energy savings at a Kraft paperboard mill using process integration. Internet site: <http://cetc-vareennes.nrcan.gc.ca/fichier.php/codectec/En/2000-95/2000-95e.pdf> (accessed at november/2006).
- Tripathi, P. (1996): Pinch Technology Reduces Wastewater. *Chem. Engineering*. 8, 87-90.
- Wang, Y. P.; Smith, R. (1994): Wastewater Minimisation. *Chem. Eng. Science*. 49 (7) 981-1006.