

# Avaliação da operação de filtros rotativos a vácuo na lavagem de polpa marrom através dos parâmetros de filtração

*Operational Evaluation of Rotary Drum Vacuum Filters for Brownstock Washing using Basic Filtration Parameters.*

**Autores:** Pacheco, C. R. F.; de Paiva, J.L.; Reynol, A. S.

**Palavras-chave:** Lavagem, Filtração, Polpa Marrom, Filtro Rotativo à Vácuo.

## RESUMO

Neste artigo apresenta-se o uso da estrutura modular na modelagem e no cálculo da operação de lavagem por filtro cilíndrico rotativo a vácuo. Elaborou-se para cada módulo um modelo matemático baseado na teoria fundamental de filtração (a pressão constante) a partir de parâmetros empíricos. Desenvolveu-se um algoritmo, a partir da metodologia "System Engineering Analysis", para o diagnóstico da operação de lavagem do filtro cilíndrico rotativo a vácuo. Os resultados obtidos e a metodologia proposta são consideradas ferramentas importantes no gerenciamento da operação de lavagem de polpa marrom.

## INTRODUÇÃO

### A lavagem da polpa marrom

A lavagem de polpa marrom é a operação em que material orgânico e substâncias químicas inorgânicas dissolvidas são separadas das fibras ce-

## ABSTRACT

*In this article the use of modular structures in modeling and calculation in the washing operation by rotary drum vacuum filters is presented. For each module a mathematical model based on the fundamental theory of filtration (constant pressure) from empiric parameters was elaborated. An algorithm was developed using the methodology of System Engineering Analysis, to diagnose the operation of rotary drum vacuum filters. The results obtained and the proposed methodology are considered important tools in the management of brown stock washing operation.*

**Keywords:** *Washing, Filtration, Brown Stock Washing, Rotary Drum Vacuum Filter.*

lulósicas. Um dos propósitos da lavagem é remover o licor residual que poderia contaminar a pasta durante etapas subsequentes do processo. Outro objetivo é recuperar substâncias dissolvidas de valor, como o material orgânico do licor negro utilizado como combustível na caldeira de recuperação e substâncias químicas inorgânicas para a regeneração do licor branco para o cozimento.

Segundo ROGERS *et al.* (1996), a lavagem da polpa marrom é uma das mais importantes operações unitárias no processo de produção de

polpa celulósica. Uma lavagem eficiente exige o controle do volume do fluido de lavagem adicionada ao sistema. Empregando-se grandes quantidades de fluido de lavagem, obtém-se uma polpa mais limpa, porém, para uma eficiente operação do sistema de recuperação, necessita-se de uma diluição mínima do licor negro, de modo a minimizar o gasto de energia no processo de evaporação. Por outro lado, no caso de uma lavagem insuficiente, tem-se excessiva perda de licor negro, afetando o balanço térmico da linha e de produtos qui-

micos do setor de recuperação, além de maior consumo de agentes oxidantes no branqueamento, gerando uma maior carga poluidora.

Portanto, a execução de uma lavagem eficiente contribui significativamente para um melhor balanço energético, um menor consumo de água e de produtos químicos, bem como para a diminuição da geração de efluentes poluidores.

### O filtro rotativo a vácuo

O primeiro equipamento utilizado em operações contínuas para lavar a polpa marrom foi o filtro cilíndrico rotativo a vácuo, ainda hoje empregado. O filtro consiste num tambor perfurado recoberto por um meio filtrante, geralmente uma malha sintética ou de metal. Durante a operação, o tambor é parcialmente imerso numa tina que é alimentada com uma suspensão diluída geralmente com consistência entre 1% e 4%. O vácuo aplicado através do tambor do filtro extrai parte do licor negro da suspensão de polpa marrom, formando uma torta na superfície do meio filtrante. Conforme o tambor gira, os chuveiros espalham o fluido de lavagem por sobre a torta de polpa, deslocando o licor presente na torta por um licor com menor concentração de sólidos. A torta é, então, separada da superfície do meio filtrante pela interrupção do vácuo.

Um sistema de lavagem usa um número de filtros, idênticos ou diferentes, em série, com o filtrado escoando em contra-corrente em relação à polpa marrom a ser lavada.

### O gerenciamento da operação de lavagem da polpa marrom

Observa-se, por um lado, muitas publicações a respeito dos fundamentos científicos do processo de lavagem da polpa marrom: KOVASIN (2002), KUKREJA *et al.* (1994), HAGEN e BERG (1989), TRINH *et al.* (1989), KOVASIN *et al.* (1988), CULLINAN (1986), EDWARDS *et al.* (1986) HAKAMÄMKI e KOVASIN (1985) são exemplos de trabalhos, entre outros, em que o conhecimento gerado permite aperfeiçoar os diferentes equipamentos existentes para esta operação. Por outro lado, são quase inexistentes publicações que objetivem fornecer ferramentas para auxiliar o gerente de processos em suas decisões. No Brasil, produtor de destaque em papel e celulose, este tipo de conhecimento gerencial é fundamental para a melhoria da eficiência operacional que mantenha a competitividade da nossa indústria através da redução de custos operacionais com aumento de produtividade.

Por isso, a EPUSP, em conjunto com o CNPq, iniciaram em 2003 uma linha de pesquisa com este enfoque, cujos resultados iniciais são aqui publicados.

O objetivo desta particular pesquisa é gerar um procedimento de cálculo prático para o gerente de processo ter em seu PC e contar com informações complementares àquelas de que ele dispõe no painel de controle e por análises químicas usuais feitas no sistema filtro lavador. Com isso, permitir-se-á a esse profissional um suporte de dados mais abrangente para suas decisões.

Nas publicações de EDWARDS *et al.* (1986), CULLINAN (1986) e HAKAMÄMKI E KOVASIN (1985) destinadas ao aprendizado da operação de lavagem da polpa marrom, a descrição das variáveis intervenientes neste processo são relacionadas através de balanços de massa – o que, de certa forma, vem sendo utilizado em termos operacionais nas instalações brasileiras.

Com os recursos disponíveis para este trabalho, optou-se pelo enfoque no filtro cilíndrico rotativo a vácuo em razão do grande número de instalações existentes no país e da inclusão, neste momento, apenas das variáveis macroscópicas que descrevem o comportamento do filtro cilíndrico rotativo a vácuo acrescido dos usuais balanços materiais. Depois de consolidados estes primeiros passos, aspectos microscópicos, como proposto por CULLINAN (1986) dos fenômenos de transporte de massa, poderão ser incluídos.

O filtro cilíndrico rotativo a vácuo foi decomposto em operações unitárias, e sobre este modelo foi aplicada a técnica do “System Engineering Analysis”, conforme BARTON (1998) e BARTON (1995), de maneira a se terem disponíveis os valores das variáveis operacionais em todas as seções de entrada e saída das operações unitárias que compõem o filtro cilíndrico rotativo a vácuo, permitindo, nesta descrição, um diagnóstico de operação. Em uma fase futura, com a introdução de aspectos microscópicos de fenômenos de transporte de massa, uma versão mais complexa do roteiro de cálculo possibilitará uma previsão de tendência operacional devido a uma alteração de variável de processo.

### METODOLOGIA

Considere um filtro lavador de polpa. Esse equipamento é uma máquina onde substâncias solúveis são separadas das fibras celulósicas. A descrição mais simples desta operação pelo filtro cilíndrico rotativo a vácuo é mostrada na Figura 1. Uma suspensão de polpa com determinada consistência e nível de impureza é alimentada no equipamento para lavar, onde parte do material contaminante passa para o fluido de lavagem, sendo, então, a polpa suspensa engrossada até determinada consistência e descarregada para a próxima operação.



Figura 1. A operação da lavagem da polpa marrom pelo filtro cilíndrico rotativo a vácuo.

Esse mesmo filtro lavador executa várias operações. Podemos separar o filtro cilíndrico rotativo a vácuo em módulos de operações unitárias conforme mostrado na Figura 2. Segundo EDWARDS *et al.* (1986), é importante dividir o filtro nas suas operações para melhor compreensão do processo de lavagem. A suspensão de alimentação (1) é diluída em um tanque agitado, que alimenta a tina de filtração com uma suspensão a determinada consistência. A pol-

pa diluída (2) é transferida para a tina de filtração, onde a água é drenada através de filtração para a formação da torta em um tambor de sucção. Quando a região do tambor entra no setor de lavagem (4), o fluido lavador (7) desloca o fluido presente na torta (8), e a torta (6) sofre uma última drenagem onde é engrossada (9) para ser descarregada para o próximo equipamento da linha de operação. Neste nosso caso em particular, os filtrados provenientes da filtração (5), da lavagem (8) e da drenagem (10) são misturados num tanque do qual uma fração da vazão (11) é dividida retornando uma parte (3) para o módulo de diluição, enquanto a outra parte (12) segue para outras operações da linha.

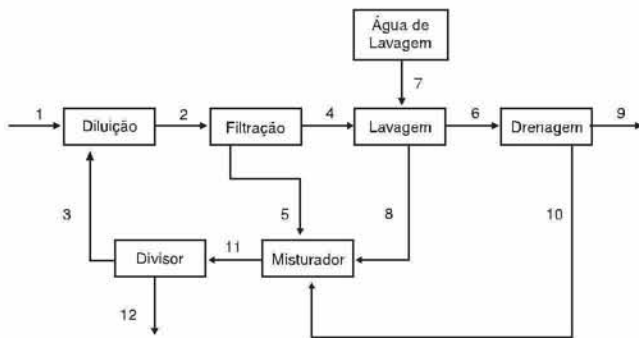


Figura 2. Fluxograma de funcionamento do filtro rotativo a vácuo.

O modelo matemático foi desenvolvido para cada um dos módulos da Figura 2, a partir de variáveis específicas. No estado estacionário, as equações abaixo descrevem a operação de lavagem.

O balanço de massa total para a diluição:

$$M_{P1} [1 + W_{P1} (1 + X_{S1})] + M_{W3} (1 + X_{S3}) = M_{P2} [1 + W_{P2} (1 + X_{S2})] \quad (1)$$

O balanço de massa total para a filtração:

$$M_{P2} [1 + W_{P2} (1 + X_{S2})] = M_{P4} [1 + W_{P4} (1 + X_{S4})] + M_{W5} (1 + X_{S5}) \quad (2)$$

O balanço de massa total para a lavagem:

$$M_{P4} [1 + W_{P4} (1 + X_{S4})] + M_{W7} (1 + X_{S7}) = M_{P5} [1 + W_{P5} (1 + X_{S5})] + M_{W8} (1 + X_{S8}) \quad (3)$$

O balanço de massa total para a drenagem da torta:

$$M_{P5} [1 + W_{P5} (1 + X_{S5})] = M_{P9} [1 + W_{P9} (1 + X_{S9})] + M_{W10} (1 + X_{S10}) \quad (4)$$

O balanço de massa total para o tanque de mistura:

$$M_{W5} (1 + X_{S5}) + M_{W8} (1 + X_{S8}) + M_{W10} (1 + X_{S10}) = M_{W11} (1 + X_{S11}) \quad (5)$$

O balanço de massa total para o tanque divisor:

$$M_{W11} (1 + X_{S11}) = M_{W3} (1 + X_{S3}) + M_{W12} (1 + X_{S12}) \quad (6)$$

Para filtrações a pressão constante, o tempo de filtração é descrito pela equação 7.

$$t_f = \frac{K_C V_F^2}{2 \Delta P_F} + \frac{K_{MF} V_F}{\Delta P_F} \quad (7)$$

onde:

$$K_C = \frac{\alpha_{CM} S_{SP} \rho_S \mu}{(1 - S_{SP} F_{WS}) A_F^2} \quad (8)$$

e

$$K_{MF} = \frac{R_{MF} \mu}{A_F} \quad (9)$$

Expressa-se o tempo de filtração pela divisão do ângulo do setor de filtração pela velocidade angular do tambor do filtro.

$$t_f = \frac{\theta_f}{\omega} \quad (10)$$

As equações 11 e 12 relacionam as variáveis do módulo de filtração com as variáveis do escoamento dentro do filtro lavador.

$$M_{W5} (1 + X_{S5}) = \rho_5 \frac{V_F}{t_f} \quad (11)$$

$$M_{P4} (1 + W_{P4} X_{S4}) = \frac{\rho_5 (S_{SP} - X_{S5}) V_F}{(1 - S_{SP} F_{WS}) t_f} \quad (12)$$

A lavagem de uma torta depois da etapa de filtração ocorre por deslocamento e difusão. Para calcular o tempo de lavagem, assume-se por hipótese que as condições de escoamento são as mesmas que as existentes ao final da filtração, ou seja, a estrutura da torta não é afetada quando o líquido de lavagem desloca o líquido presente na torta proveniente da filtração.

Semelhante à equação 10, obtém-se o tempo de lavagem dividindo-se o ângulo do setor de lavagem pela velocidade angular do tambor do filtro.

$$t_l = \frac{\theta_l}{\omega} \quad (13)$$

Em filtros onde o líquido de lavagem flui em uma só direção e operando a pressão constante, tem-se para o tempo de lavagem:

$$t_l = \frac{V_L (K_C V_F + K_{MF})}{\Delta P_L} \quad (14)$$

A equação 15 relaciona o tempo e o volume de lavagem com o balanço de massa da etapa de lavagem.

$$M_{W5} (1 + X_{S5}) = \rho_5 \frac{V_L}{t_l} \quad (15)$$

Por último, após a etapa de lavagem, a torta sofre uma drenagem antes de ser descarregada para o próximo equipamento da linha de operação.

Analogamente às equações 10 e 13, tem-se para o tempo de drenagem, referente ao ângulo do setor de drenagem:

$$t_d = \frac{\theta_d}{\omega} \quad (16)$$

Neste módulo de drenagem são assumidas as mesmas hipóteses adotadas para o módulo de lavagem. Assim, o tempo de drenagem pode ser expresso por:

$$t_d = \frac{V_D (K_C V_F + K_{MF})}{\Delta P_D} \quad (17)$$

A equação 18 relaciona o tempo de drenagem e o volume drenado com o balanço de massa da etapa de drenagem.

$$M_{W10} (1 + X_{S10}) = \rho_{10} \frac{V_D}{t_d} \quad (18)$$

A partir dessas equações seguem-se os seguintes passos:

a) Avaliação dos Graus de Liberdade:

Número de variáveis:  $N = 53$

Número de equações:  $M = 18$

Graus de liberdade:  $GL = N - M = 35$



Reciclo	Variáveis								
	$M_{W5}$	$M_{W8}$	$M_{W10}$	$W_{P4}$	$W_{P6}$	$X_{S5}$	$X_{S8}$	$X_{S10}$	
1A			X					X	
1B					X		X	X	
1C		X			X		X	X	
1D			X		X		X	X	
1E		X	X		X		X	X	
2		X					X		
3	X					X			
4				X		X			

Tabela 2. Tabela de Reciclos.

f) Escolha das Variáveis de Reiteração:

A observação da Tabela de Reciclos permite escolher as variáveis que cobrem todos os reciclos, podendo ser necessário escolher mais de uma variável para se conseguir fechar todos os reciclos.

No presente estudo, as variáveis  $X_{S5}$ ,  $X_{S8}$  e  $X_{S10}$  cobrem todos os reciclos.

O Diagrama dos Reciclos está mostrado na Figura 4.

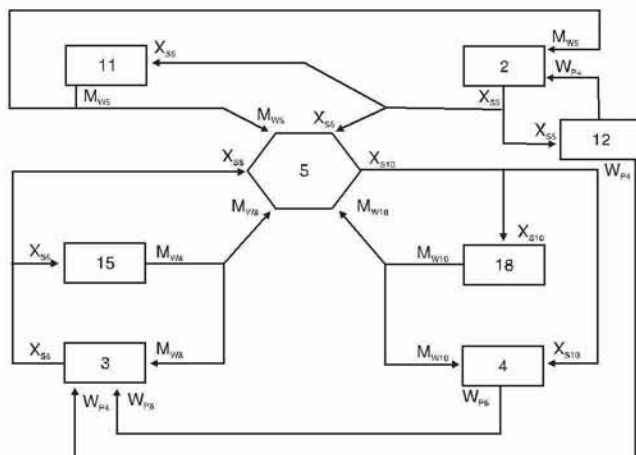


Figura 4. Diagrama dos Reciclos.

Estrutura do algoritmo de cálculo das variáveis de estado

O modelo matemático desenvolvido permite o cálculo de diferentes variáveis. Apresenta-se um algoritmo que calcula, entre outras variáveis, as vazões das corrente líquidas residuais das diferentes etapas do processo da lavagem de polpa marrom, a partir das especificações das frações de sólidos na suspensão.

No presente estudo foram admitidos como conhecidas as seguintes variáveis de projeto:

- Para as correntes de escoamento:
  - Vazão mássica de polpa celulósica:  $M_{P1}$ .
  - Vazão mássica de água:  $M_{W7}$ ,  $M_{W12}$ .
  - Teor de água na suspensão:  $W_{P1}$ ,  $W_{P2}$ ,  $W_{P9}$ .
  - Fração de sólidos solúveis na suspensão:  $X_{S1}$ ,  $X_{S2}$ ,  $X_{S4}$ ,  $X_{S8}$ ,  $X_{S7}$ ,  $X_{S9}$ ,  $X_{S12}$ .

- Para o módulo de filtração:
  - Umidade da torta:  $F_{WC}$ .
  - Perda de carga durante a filtração:  $\Delta P_F$ .
  - Resistência do meio filtrante:  $R_{MF}$ .
  - Consistência da suspensão de celulose na tina do filtro:  $S_{SP}$ .
  - Resistência média específica da torta:  $\alpha_{CM}$ .
  - Viscosidade dinâmica do filtrado na corrente de saída 5:  $\mu_5$ .
  - Densidade do filtrado na corrente de saída 5:  $\rho_5$ .
- Para o módulo de lavagem:
  - Densidade do filtrado na corrente de saída 8:  $\rho_8$ .
- Para o módulo de drenagem:
  - Densidade do filtrado na corrente de saída 10:  $\rho_{10}$ .
- Para as características do filtro:
  - Área de filtração:  $A_F$ .
  - Ângulo do setor de filtração:  $\theta_F$ .
  - Ângulo do setor de lavagem:  $\theta_L$ .
  - Ângulo do setor de drenagem:  $\theta_D$ .
  - Velocidade angular do cilindro do filtro:  $\omega$ .

Descreve-se a seguir o algoritmo para o cálculo das variáveis de estado.

1. Denomina-se conjunto I de equações aquele formado pelas equações que são alimentadas com dados, ou seja, com as variáveis de projeto. O cálculo, então, ocorre da seguinte maneira:

- assume-se, por hipótese do modelo, que  $M_{P2} = M_{P1}$ ;
- assume-se que  $X_{S11} = X_{S12} = X_{S3}$ ;
- $M_{W3}$  é calculado pela equação 1;
- $K_C$  é calculado pela equação 8;
- $K_{MF}$  é calculado pela equação 9;
- $t_F$  é calculado pela equação 10;
- $t_L$  é calculado pela equação 13;
- $t_D$  é calculado pela equação 16.

2. O conjunto II de equações utiliza as variáveis de projetos e as variáveis calculadas pelo conjunto I de equações. A partir do conjunto II, calcula-se:

- $M_{W11}$  com a equação 6 e  $M_{W3}$  (1);
- assume-se, por hipótese do modelo, que  $\Delta P_F = \Delta P_L = \Delta P_D$ ;
- com  $K_C$  (8),  $K_{MF}$  (9),  $t_F$  (10) e, a partir da equação 7, obtém-se  $V_F$ .

3. O conjunto III de equações utiliza as variáveis de projetos e as variáveis calculadas pelos conjuntos I e II de equações. A partir do conjunto III, calcula-se:

- $V_L$  com a equação 14 e  $K_C$  (8),  $K_{MF}$  (9),  $t_L$  (13),  $V_F$  (7);
- $V_D$  com a equação 17 e  $K_C$  (8),  $K_{MF}$  (9),  $t_D$  (16),  $V_F$  (7).

4. Assume-se o valor inicial para  $X_{S5}$ .

5. Com o valor inicial de  $X_{S5}$ , calcula-se:

- $M_{w5}$  pela equação 11;
- $W_{p4}$  pela equação 12.

6. Usando-se  $M_{w5}$  (11) e  $W_{p4}$  (12), recalcula-se o valor de  $X_{SSC}$  pela equação 2.

7. Usando-se o valor de  $X_{SS}$  e  $X_{SSC}$ , calcula-se um novo valor de  $X_{SS}$ , retornando ao passo 4 até atingir a convergência.

8. Assume-se o valor inicial de  $X_{S8}$  e  $X_{S10}$ .

9. A partir do valor inicial de  $X_{S8}$  e  $X_{S10}$ , calcula-se:

- $M_{w10}$  a partir de  $X_{S10}$  e a equação 18;
- $W_{p6}$  com  $M_{w10}$  (18),  $X_{S10}$  e a equação 4;
- $M_{w8}$  a partir de  $X_{S8}$  e a equação 15;
- com  $W_{p4}$  (12),  $W_{p6}$  (4) e  $M_{w8}$  (15), recalcula-se o valor de  $X_{SSC}$  pela equação 3.

10. Usando-se o valor de  $X_{S8}$  e  $X_{SSC}$ , calcula-se um novo valor de  $X_{S8}$  e retorna-se ao passo 8 até atingir a convergência.

11. Usando-se o valor de  $M_{w5}$  (11),  $X_{S5}$  (2),  $M_{w8}$  (16),  $X_{S8}$  (3) e  $M_{w10}$  (18), calcula-se  $X_{S10C}$  pela equação 5.

12. Usando-se o valor de  $X_{S10}$  e  $X_{S10C}$ , calcula-se um novo valor de  $X_{S10}$  e retorna-se ao passo 8 até atingir a convergência.

## DISCUSSÃO

No processo de filtração e lavagem da polpa marrom, o objetivo é maximizar a remoção dos solutos presentes na suspensão, empregando-se a menor quantidade possível de água.

No caso da lavagem por deslocamento, para uma situação ideal, considera-se que o volume de água empregado é igual ao volume de solução presente na torta. No entanto, mesmo para os processos mais eficientes, os volumes de líquido de lavagem empregados são significativamente superiores ao da situação ideal.

Explica-se tal desempenho devido ao escoamento pelo leito fibroso e ao mecanismo de difusão e mistura do soluto por entre as fibras, assim como às etapas de adsorção/dessorção deste nas fibras.

A avaliação da eficiência de lavagem de um filtro cilíndrico rotativo a vácuo, em operação, pressupõe, numa etapa preliminar, pleno conhecimento das vazões e concentrações das correntes referentes às diferentes etapas do processo.

O presente estudo representa importante ferramenta para o diagnóstico do sistema de lavagem e, conseqüentemente, da sua eficiência.

## CONCLUSÃO

A divisão da operação do filtro cilíndrico rotativo a vácuo numa estrutura modular mostrou-se importante no entendimento de cada uma das operações unitárias desempenhadas.

A combinação das variáveis do balanço de massa do filtro cilíndrico rotativo a vácuo com as variáveis fundamentais de filtração a pressão constante permitiu a criação de um modelo de lavagem que descreve os fenômenos físicos em cada um dos módulos e são bastante úteis no entendimento da operação de lavagem.

A metodologia proposta configura-se como importante ferramenta no gerenciamento da operação de lavagem da polpa.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os auxílios financeiros recebidos do CNPq (Processo 131359/03-7) e a Indústria de Celulose e Papel Ripasa S.A. pela oportunidade da visita às suas instalações, contribuindo para a presente análise do sistema de lavagem.

## BIBLIOGRAFIA

BARTON, P. I., Modeling and analysis of systems from physical principles. Lectures Notes. Department of Chemical Engineering – Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, 1998.

BARTON, P.I., Structural analysis of systems of equations. Lectures Notes. Department of Chemical Engineering – Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, 1995.

CULLINAN, H. T., A unified treatment of brownstock washing on rotary filters. Tappi Journal, v. 69, n. 8, p. 90 – 94, 1986.

EDWARDS, L., PEYRON, M., MINTON, M., Models for cross-flow pulp washing calculations. Pulp and Paper Magazine of Canada, v. 87, n.1, p. T17 – T21, 1986.

KOVASIN, K., Modeling ultrafiltration and filtration phenomena applied in chemical pulping processes. 2002. 52p. Tese (Doutorado) – Department of Chemical Technology, Helsinki University of Technology. Helsinki, 2003.

KOVASIN, K., NORDÉN, H.V., AHONEN, L., Modeling the filtration stage of a pulp washer. Filtration & Separation, v. 25, n. 1, p. 42 – 45, 1988.

KUKREJA, V. K., RAY, A.K., SINGH, V. P., RAO, N. J., Evaluation of filtration rates of continuous filters. IPPTA Convention Issue, p. 41 – 45, 1994.

HAGEN, N., BERG, J-E., Filtration theory as applied to the dimensioning of flat band washers. Tappi Journal, v. 72, n. 6, p. 93 – 96, 1989.

HAKAMÄKI, H., KOVASIN, K., The effect of some parameters on brown stock washing: A study made with a pulp tester. Pulp & Paper Canada, v. 86, n. 9, p. T243 – T249, 1985.

TRINH, D.T., POIRIER, N.A., CROTOGINO, R.H., DOUGLAS, W.J.M., Displacement washing of wood pulp – An experimental study. Journal of Pulp and Paper Science, v. 15, n. 1, p. J28 – J35, 1989.

