

Otimização do controle de velocidade em bomba de mistura na caixa de entrada para processo de fabricação de papel

Cícero Couto de Moraes

Paulo Henrique Pescio

Departamento de Eng. de Energia e Automação Elétricas – PEA
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP
Av. Prof. Luciano Gualberto, trav. 3, n.º. 158 –
Cidade Universitária – 05508-900 – São Paulo, SP
E-mail: cicero@pea.usp.br

Departamento de Engenharia de Automação – PET
Voith Paper Máquinas e Equipamentos Ltda
Rua Friedrich von Voith, n.º. 825 – Jaraguá –
02995-000 – São Paulo, SP
E-mail: paulo.pescio@voith.com paulo.prgf@gmail.com

Abstract- This paper intends to present a mathematic model of operation of a headbox designed for papermaking, analyzing possible setups of the productive process through stock jet speed, as well as the variables of lip opening and jet-to-wire ratio.

On the progress of this work are simulated the control regulators of pressure and jet speed, permitting its optimization in amplitude, and performance evaluation of the system through their behavior during transitory and permanent states.

Keywords- headbox, process control, optimization.

I. INTRODUÇÃO

Devido ao constante aumento da demanda no mercado e a exigência por produtos de alta qualidade, a indústria papelreira necessita cada vez mais de máquinas modernas, com alta velocidade de produção, e consequentemente, dotada de um controle capaz de responder rapidamente às necessidades do processo produtivo [1].

Um dos sistemas mais importantes a serem controlados na fabricação de papel é a caixa de entrada. Sua função é distribuir a massa fibrosa em suspensão ao longo de toda largura da máquina, sendo responsável, em grande medida, na qualidade do papel [2].

É necessário que a velocidade do jato de saída da caixa de entrada seja controlada para manter um fluxo com volume constante, quanto ao tempo, ao ponto de incidência do jato na zona de formação da folha e com concentração uniforme do material fibroso.

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um modelo do sistema da caixa de entrada, com o controle da velocidade do jato para o processo de fabricação do papel e os possíveis ajustes do processo produtivo nas variáveis de velocidade de operação da máquina, abertura do lábio e na relação jato/tela.

O objetivo é desenvolver as malhas de controle de pressão e velocidade do jato da caixa de entrada, com a introdução de seus reguladores e através da otimização em amplitude, os índices de desempenho do processo nos regimes transitório e permanente serão minimizados, como o tempo de acomodação, o tempo de subida e o sobre sinal.

II. A MÁQUINA DE FABRICAÇÃO DE PAPEL

A fabricação do papel inicia-se na diluição do fluxo da massa grossa com o sistema *approach-flow* apresentado na Fig.1. O sistema *approach-flow* é uma subdivisão da etapa de preparação da massa, e refere-se ao sistema desde o tanque de água branca, incluindo a caixa de nível até a caixa de entrada. A principal função deste sistema é a de medir, diluir a massa, incluindo a misturas de químicos e aditivos, onde a massa com baixa consistência é bombeada para a caixa de entrada através da bomba de mistura, sendo descarregada na tela formadora da máquina.

A máquina para fabricação de papel tem como principal função dar formação à folha e remover a água. Este processo de fabricação consiste essencialmente em quatro etapas principais [3]:

Formação da folha: as fibras de celulose são suspensas em água e colocadas ao longo da tela formadora através do jato proveniente da caixa de entrada. Enquanto viaja pela tela formadora, parte da água escoar por forças gravitacionais e parte é sugada pela ação de vácuo nas caixas de sucção.

Prensagem: a folha é submetida a pressões hidráulicas dos rolos prensas, e devido à ação de prensagem a água acaba sendo deslocada para o feltro da prensa, tornando-se assim mais resistente.

Secagem: a folha passa por cilindros secadores, nos quais é submetida à superfície aquecida dos cilindros e assim a água é evaporada.

Enrolamento: a folha é enrolada em bobinas e removida da máquina de papel.

A. A Caixa de Entrada

A Caixa de Entrada tem como função criar uma turbulência controlada para eliminar floculação de fibras, descarregar a suspensão sobre a tela formadora com ângulo de incidência e localização correta ao longo de toda a largura da máquina, evitar variação de fluxo e consistência, manter a velocidade do jato constante e livre de gradientes [3].

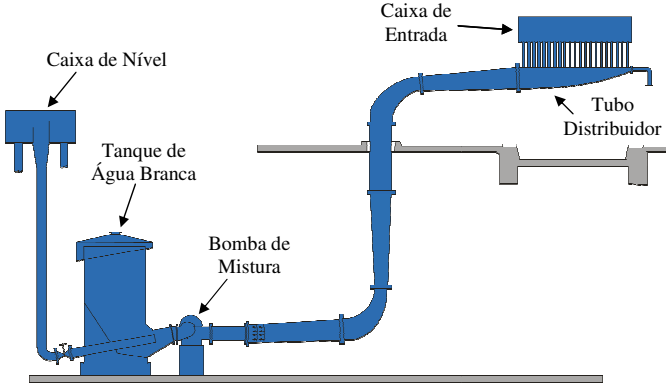


Fig. 1. Sistema Approach-flow [1].

A estratégia utilizada para o controle de velocidade do jato de saída da caixa de entrada é atuar na pressão interna da caixa de entrada através da variação de velocidade na bomba de mistura do sistema approach-flow [4].

A Fig. 2 apresenta os detalhes do lábio da caixa de entrada, o movimento vertical h_0 do lábio superior ajusta a abertura do lábio (S), em função da gramatura a ser produzida. O movimento horizontal X controla o ângulo α e a posição de lançamento do jato de massa na seção da tela. Isto é decisivo para a introdução ideal do desaguamento e formação do papel [3].

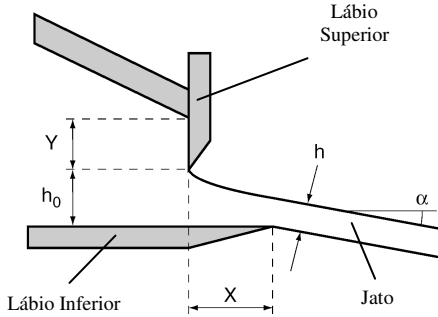


Fig. 2. Detalhes do lábio da caixa de entrada

III. OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE E MODELAGEM DO SISTEMA DA CAIXA DE ENTRADA

O critério para determinação dos parâmetros dos reguladores é baseado na otimização em amplitude [5].

Seja a malha de controle a ser otimizada em amplitude, onde a função de transferência do regulador $G_c(s)$ é dada por:

$$G_c(s) = \frac{a_0 + a_1s + \dots + a_ms}{2s} = \frac{\alpha(s)}{2s} \quad (1)$$

Supondo a função do processo:

$$G(s) = \frac{1}{b_0 + b_1s + \dots + b_ns^n} = \frac{1}{\beta(s)} \quad (2)$$

Teremos para as funções típicas do regulador $G_c(s)$.

a) Integrador

$$a_0 \neq 0 \quad G_c(s) = \frac{a_0}{2s} \quad (3)$$

b) Proporcional + Integrador

$$a_0 \neq 0 \text{ e } a_1 \neq 0 \quad G_c(s) = \frac{a_0 + a_1s}{2s} \quad (4)$$

c) Proporcional + Integrador + Derivador

$$a_0 \neq 0; a_1 \neq 0; a_2 \neq 0 \quad G_c(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2}{2s} \quad (5)$$

Assim sendo:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + 2s \beta(s)/\alpha(s)} \quad (6)$$

Analisando no domínio da frequência:

$$\frac{C(j\omega)}{R(j\omega)} = \frac{1}{1 + 2j\omega \beta(j\omega)/\alpha(j\omega)} \quad (7)$$

Com:

$$|F(j\omega)|^2 = \left[\frac{C(j\omega)}{R(j\omega)} \right]^2$$

Logo:

$$|F(j\omega)|^2 = \left[\frac{1}{\frac{1 + 2j\omega \beta(j\omega)}{\alpha(j\omega)}} \right] \left[\frac{1}{\frac{1 + 2(-j\omega) \beta(-j\omega)}{\alpha(-j\omega)}} \right] \quad (8)$$

Tomando-se as $2n$ derivadas para $|F(j\omega)|^2$ $\omega = 0$ resulta:

$$-2 \sum_{i=0}^k (-1)^i \cdot b_i b_{k-i} + \sum_{i=0}^{k+1} (-1)^i [a_i b_{k+1-i} - b_i a_{k+1-i}] = 0 \quad (9)$$

$$k = 0; 2; 4 \dots 2m$$

Sendo m a ordem do controlador; isto é, $a_i = 0, i > m$.

Para um regulador PI: $m = 1 \quad 2m = 2$

$$k = 0$$

$$-2 \sum_{i=0}^0 b_i \cdot b_{k-i} + \sum_{i=0}^1 (-1)^i [a_i b_{k+1-i} - b_i a_{k+1-i}] = 0 \quad (10)$$

$$-2b_0^2 + (a_0 \cdot b_1 - b_{0a1}) - (a_1 \cdot b_0 - b_{1a0}) = 0$$

$$a_0 b_1 = b_{0a1} = b_0^2$$

$$k = 2$$

$$-2[b_0 \cdot b_2 - b_1^2 + b_2 b_0] + [a_0 b_3 - b_{0a3}] - [a_1 b_2 - b_1 a_2] + [a_2 b_2 - a_2 b_1] - [a_3 b_0 + b_3 a_0] = 0 \quad (11)$$

$$\text{onde } a_2 = a_3 = 0$$

$$b_1^2 + a_0 b_3 - a_1 b_2 = 2b_0 b_2 \quad (12)$$

Como o sistema a ser otimizado tem a função de transferência em malha aberta:

$$G(s) = \frac{1}{(1+sTa)} \cdot \frac{1}{(1+sTc)} \quad (13)$$

O regulador PI da malha de velocidade terá função de transferência:

$$G_T(s) = \frac{1+sTa}{2sTc} \quad (14)$$

Para o regulador de pressão do tipo PID a função será:

$$G_T(s) = \frac{(1+sTb)(1+sT1)}{2sTd(1+sT2)} \quad (15)$$

Para o desenvolvimento do modelo do sistema e sua simulação foram considerados os seguintes dados e hipóteses:

- Temperatura (T) do sistema, estabilizada em 40°C.
- Massa específica (ρ) da massa constante.
- Coeficiente de contração (cK) constante.
- Consistência da mistura constante.
- As perdas de carga do sistema são desconsideradas.
- Os dados de entrada são coletados do processo considerando que o sistema esteja estabilizado e em condições estáveis de operação.

O sistema de controle de velocidade do jato da massa é representado no fluxograma P&ID da Fig. 3.

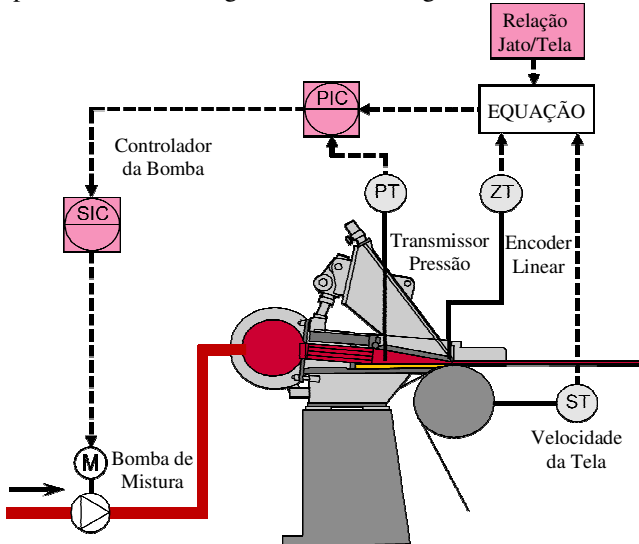


Fig. 3. P&ID da malha de controle [1].

A mistura de água e massa deve fluir com velocidade constante do lábio da caixa de entrada sobre a seção da tela

formadora. Para isso, é necessária uma pressão constante e controlada que é medida no centro da caixa de entrada. A altura manométrica da pressão depende da velocidade de adução e da abertura da fenda do bocal. A referência de pressão geral da caixa de entrada é obtida pelo cálculo efetuado no sistema de controle PY entre as variáveis de entrada, relação Jato/Tela (ΔV_{jet}), velocidade da tela (V_{wire}) e o valor de abertura do lábio (S).

O controle de pressão compõe-se do transmissor de pressão PT, o qual faz a medição efetiva interna da caixa de entrada, que é comparada com o valor de referência calculado na lógica de controle PIC (Controlador da malha de Pressão), e através do sinal resultante do controlador atua diretamente na referência do controle de velocidade SIC (Controlador da malha de Velocidade) do motor da bomba de mistura de velocidade variável. Com a variação da velocidade do motor da bomba de mistura, altera-se a vazão de água e massa entregue à caixa de entrada e consequentemente altera-se a pressão interna na caixa de entrada.

A velocidade de escoamento do líquido em um reservatório com diferença de pressão, é dada pela equação:

$$v = \sqrt{2gh + \frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (16)$$

onde:

- v velocidade de escoamento do líquido [m/min]
- g aceleração da gravidade [m/s²]
- h altura manométrica [m]
- Δp pressão no reservatório [kPa]
- ρ massa específica do líquido [Kg/m³]

A vazão volumétrica da massa descarregada na tela é caracterizada pela equação:

$$Q = v \cdot A \quad (17)$$

onde:

- Q fluxo de descarga [l/min]
- v velocidade de escoamento do líquido [m/min]
- A Área do orifício de escoamento [m²]

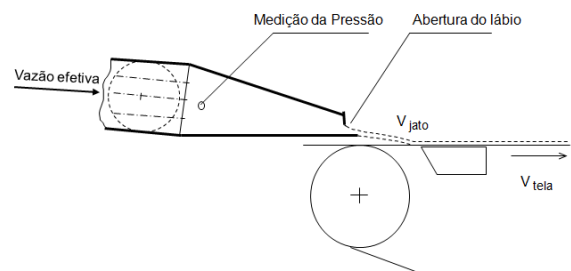


Fig. 4. Variáveis da caixa de entrada [1].

Na malha de controle do regulador de pressão foi utilizada à combinação da ação derivativa com a ação proporcional e a ação integral para formar o tradicional controlador PID. Como estratégia de controle da malha do regulador de velocidade do processo modelado foi utilizada a combinação da ação do controle integral em conjunto com a ação do controlador proporcional formando o controlador PI. Esta combinação foi escolhida com a idéia básica de se definir um

controlador tal que sua saída permaneça constante quando o sinal de erro é nulo.

Para o transmissor de pressão e transmissor de velocidade foi utilizado a função de transferência de 1ª ordem com constante de tempo característica do fabricante:

$$G_T(s) = \frac{K_T}{\tau s + 1} \quad (18)$$

Para o sistema eletromecânico motor e carga, foi utilizada a seguinte função de transferência do tipo [6]:

$$\frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_a}{[b_2 s^2 + b_1 s + b_0]} \quad (19)$$

Para a relação vazão em função da rotação da bomba de mistura foi utilizada a seguinte função de transferência:

$$G_v(s) = K_x \quad (20)$$

Sendo K_x a relação vazão/velocidade da bomba.

Para a relação de pressão em função da vazão foi utilizada a seguinte função de transferência:

$$G_{vp}(s) = \frac{\left[Q^2 \left(\frac{C_{k1}}{C_{k2} S} \right)^2 \cdot \left(1 - \left(\frac{S C_{k3}}{C_{k4}} \right)^2 \right) \right] - C_{k6}}{C_{k5}} \quad (21)$$

Onde:

- C_{kx} Características construtivas da caixa;
- Q Fluxo de Vazão [l/min];
- S Abertura do lábio [m];

A Fig. 5 representa o diagrama de blocos do sistema.

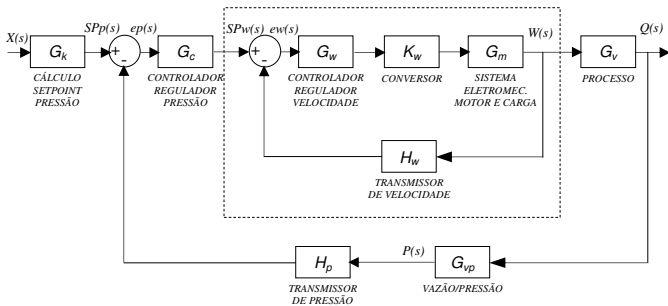


Fig. 5. Diagrama de blocos do sistema

Resultando para o sistema completo a função de transferência:

$$\frac{Q(s)}{X(s)} = \frac{G_k \cdot G_c \cdot G_w \cdot K_w \cdot G_m \cdot G_v}{1 + H_w \cdot G_w \cdot K_w \cdot G_m + G_{vp} \cdot H_p \cdot G_c \cdot G_w \cdot K_w \cdot G_m \cdot G_v} \quad (22)$$

Onde:

- G_k Cálculo de Pset
- G_c Controlador PID da malha de pressão
- G_w Controlador PI da malha de velocidade
- K_w Função de transferência do conversor

- G_m Sistema eletromecânico
- G_v Função de transferência do Processo
- G_{vp} Função de transferência do pressão/vazão
- H_w Transmissor de velocidade
- H_p Transmissor de pressão

IV. ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA

Serão apresentadas as simulações relativas à modelagem do sistema, bem como os resultados obtidos durante a simulação na partida, operação e a resposta do sistema com as variações de entrada, velocidade da tela (V_{wire}), relação jato/tela (V_{jet}) e abertura do lábio (S).

O objetivo da simulação no controle de velocidade da bomba de mistura consiste em analisar o comportamento da vazão e da velocidade do jato entregue a tela formadora, a pressão interna é utilizada somente como instrumento de controle.

A relação jato/tela e abertura do lábio são entradas do sistema definidas pelo processo produtivo em função do tipo de papel a ser fabricado, e a velocidade da tela em função da eficiência da máquina, limitação do equipamento e da qualidade do papel produzido.

Por se tratar de um processo contínuo, a vazão deve ter comportamento instantâneo para qualquer ajuste (*set point*) na entrada do sistema, quando solicitado pelo processo, seja pela velocidade da tela, relação jato/tela ou abertura do lábio, evitando assim perda de produção.

O gráfico da Fig. 6 apresenta a resposta da vazão (Q_{eff}) da caixa de entrada na partida da máquina com as variações de velocidade da tela (V_{wire}) e as constantes de entrada, relação jato/tela $V_{jet}=2$ e a abertura do lábio $S=2$.

O gráfico da Fig. 7 apresenta a resposta da vazão (Q_{eff}) da caixa de entrada na partida da máquina com as variações de abertura do lábio (S) e as constantes de entrada, relação jato/tela $V_{jet}=2$ e a velocidade da tela $V_{wire} = 1800$.

Comparando os valores obtidos nos gráficos da Fig. 6 e Fig. 7, na partida da máquina com os valores da Tabela 1, verifica-se que a vazão atinge o valor nominal de operação num tempo de aproximadamente 6s.

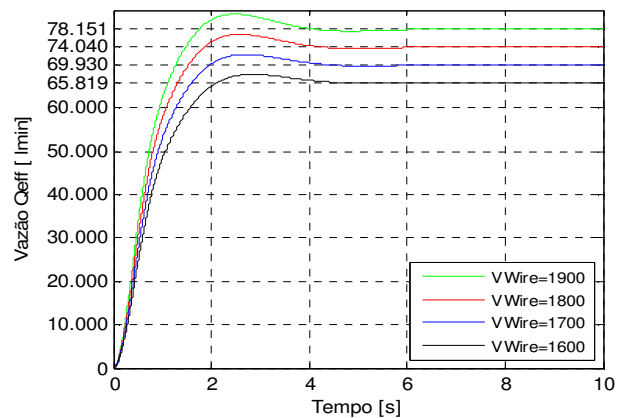


Fig. 6. Vazão na partida da máquina para V_{wire} .

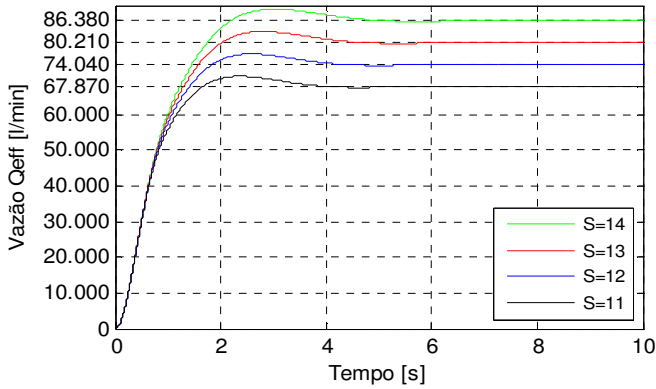


Fig. 7. Vazão na partida da máquina para S.

O gráfico da Fig. 8 apresenta a resposta da vazão (Q_{eff}) da caixa de entrada na partida da máquina com as variações de relação jato/tela V_{jet} e as constantes de entrada, velocidade da tela $V_{wire}=1800$ e a abertura do lábio $S=2$.

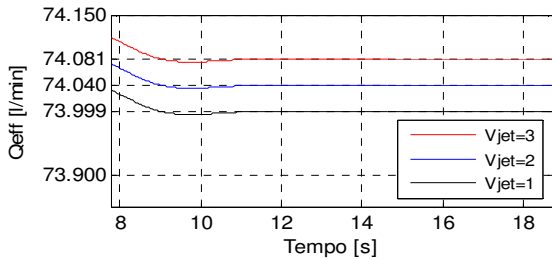


Fig. 8. Vazão na partida da máquina para V_{jet} .

O gráfico da Fig. 9 apresenta a resposta do sistema operando em condição inicial de processo com velocidade da tela $V_{wire}=1800$, relação jato/tela $V_{jet}=2$ e abertura do lábio $S=12$, onde no instante 15s aplicou-se um aumento de V_{wire} de 1800 para 1900m/min e no instante 25s uma redução de V_{wire} de 1900 para 1800 m/min.

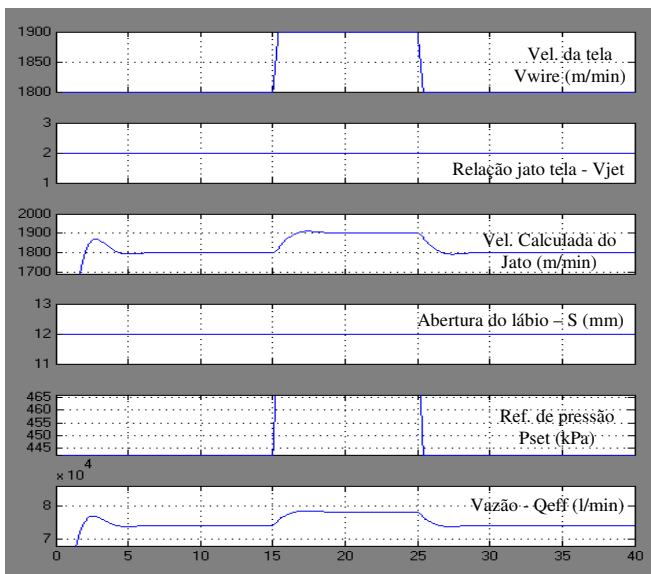


Fig. 9. Sistema em operação com variações nas entradas

O valor de referência P_{set} de 442,23 kPa é o valor obtido através do cálculo da lógica de controle que atua diretamente na referência da velocidade da bomba de mistura fornecendo a vazão de 74.040 l/min para caixa de entrada.

Em seguida, aplica-se no instante 15s um aumento na velocidade da tela V_{wire} de 1800m/min para 1900m/min, durante a operação, os valores de relação jato/tela e abertura do lábio permanecem inalterados. O gráfico da Fig. 10 apresenta o aumento da velocidade da tela, a Fig. 11 apresenta o novo valor de P_{set} de 492,76 kPa calculado pela lógica para nova referência de velocidade da bomba de mistura.

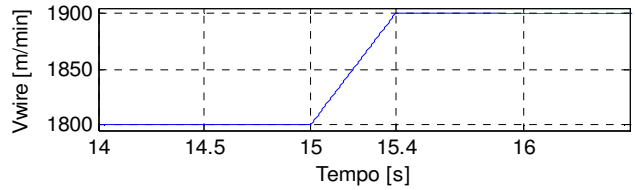


Fig. 10. Aumento velocidade da tela.

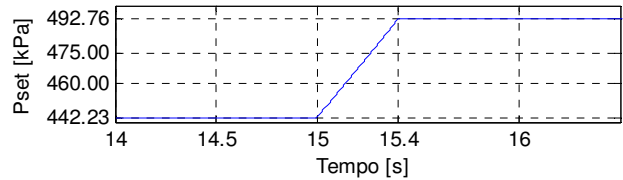


Fig. 11. P_{set} com aumento da velocidade da tela.

O gráfico da Fig. 12 apresenta a resposta da vazão para um novo *set point* de velocidade da tela cuja variação imposta é de 74.040 l/min para 78.151 l/min, com tempo de estabilização de 3.8s, a Fig. 13 apresenta a velocidade calculada do jato na saída da caixa de entrada.

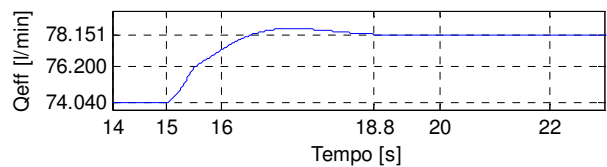


Fig. 12. Vazão na caixa de entrada com Aumento V_{wire}

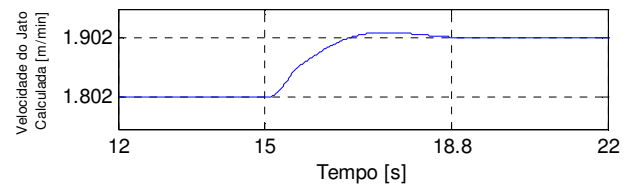


Fig. 13. Velocidade calculada do Jato com Aumento V_{wire}

Com a nova condição em regime permanente, aplica-se no instante 25s uma redução na velocidade da tela V_{wire} de 1900m/min para 1800m/min, os valores de relação jato/tela e abertura do lábio permanecem inalterados. O gráfico da Fig. 14 apresenta a redução da velocidade da tela, a da Fig. 15 apresenta o novo valor de P_{set} de 442,23 kPa calculado na

lógica para nova referência de velocidade da bomba de mistura.

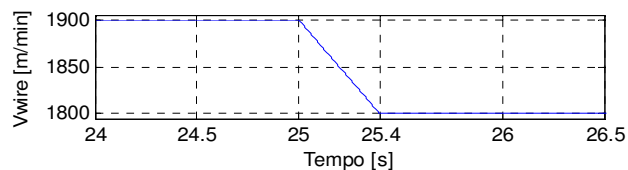


Fig. 14. Redução velocidade da tela.

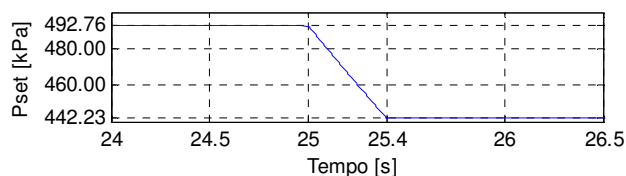


Fig. 15. Pset com redução da velocidade da tela.

O gráfico da Fig. 16 apresenta a resposta da vazão para a redução de velocidade da tela que foi de 78.151 l/min para 74.040 l/min, com tempo de estabilização de 3.7s, a Fig. 17 apresenta a velocidade calculada do jato na saída da caixa de entrada.

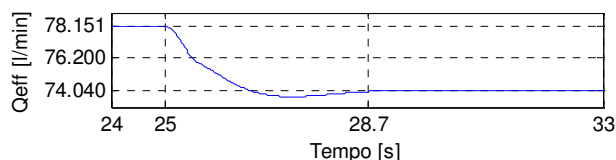


Fig. 16. Redução da vazão na caixa de entrada

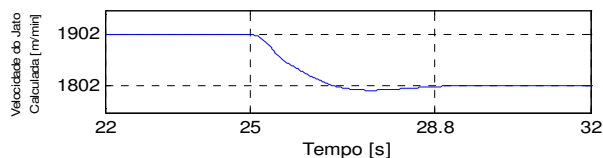


Fig. 17. Redução velocidade calculada do Jato

A tabela 1, denominada tabela estática da caixa de entrada apresenta os valores utilizados para validação da pressão interna (Pset), vazão (Qeff), dados de processo e a consolidação do modelo.

Em todos os casos observou-se que o desempenho do sistema está adequado as suas especificações técnicas, tanto no regime transitório como no permanente, confirmados pelos índices da Tabela 1.

TABELA1 - TABELA DE DADOS ESTÁTICA DA CAIXA DE ENTRADA [1]

Vwire	Vjet	S		S		S		S	
		11		12		13		14	
		p	Qeff	p	Qeff	p	Qeff	p	Qeff
1 600	1 601	349,50	60,296	348,92	65,778	348,30	71,259	347,62	76,741
1 700	1 701	394,62	64,065	393,97	69,889	393,26	75,713	392,50	81,537
1 800	1 801	442,47	67,833	441,74	73,999	440,95	80,166	440,10	86,332
1 900	1 901	493,05	71,601	492,24	78,110	491,36	84,619	490,41	91,128
1 600	1 602	349,93	60,334	349,36	65,819	348,74	71,304	348,06	76,789
1 700	1 702	395,08	64,102	394,43	69,930	393,73	75,757	392,96	81,585
1 800	1 802	442,96	67,870	442,23	74,040	441,44	80,210	440,59	86,380
1 900	1 902	493,57	71,636	492,76	78,151	491,88	84,663	490,93	91,176
1 600	1 603	350,37	60,372	349,80	65,860	349,17	71,348	348,50	76,837
1 700	1 703	395,55	64,140	394,90	69,971	394,19	75,802	393,43	81,633
1 800	1 803	443,45	67,908	442,72	74,081	441,93	80,255	441,08	86,428
1 900	1 903	494,09	71,676	493,28	78,192	492,40	84,708	491,45	91,224

A otimização do controle da velocidade da bomba de mistura contribui diretamente no controle da vazão e na velocidade do jato, na qual tem influência decisiva nas propriedades finais do papel acabado, garantindo a orientação das fibras, o comportamento ideal força-deformação e no aumento da resistência à tração. A implementação do sistema de controle e sua otimização, trás como benefício o controle totalmente automático eliminando possíveis erros de operação, manter a vazão e velocidade do jato constante, proporcionando uma resposta adequada do controle às perturbações de entrada, garantia da qualidade do produto nessa etapa da fabricação.

V. CONCLUSÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através da análise das simulações apresentadas pode-se verificar que a modelagem, aliada ao critério de otimização dos reguladores de velocidade e pressão do sistema, permitiu determinar o comportamento e o desempenho do sistema durante a partida da máquina, e na operação com as devidas alterações da velocidade da tela (Vwire), abertura do lábio (S) e relação do jato/tela (Vjet) durante o processo produtivo.

Ao se analisar os resultados nos gráficos de Pset, Fig. 11 e Fig. 15, os gráficos de vazão (Qeff), Fig. 12 e Fig. 16, e os gráficos de velocidade do Jato calculada, Fig. 13 e Fig. 17, verifica-se que os valores apresentados correspondem aos valores da tabela 1, onde os desvios máximos estão dentro da tolerância de 1%, atendendo às especificações técnicas do sistema, garantindo os índices de desempenho nos regimes transitório e permanente.

Outro dado importante que se pode verificar nos gráficos de simulação, são os tempos de resposta do sistema, onde o tempo de acomodação para a vazão e para a velocidade calculada do jato atende às especificações do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Together Paper Technology Journal, Publicado por Voith Paper Holding GmbH & Co.
- [2] Pulp and Paper Manufacture, Vol. 7, by the Joint Executive of the Vocational Educational Committees of the Pulp and Paper Industry, 1991.
- [3] Tecnologia de Fabricação de Papel, Escola SENAI Theobaldo De Nigris & Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo Centro técnico em Celulose e Papel, 2ªedição, 1988.
- [4] Troubleshooting the Papermaking Process, by Jerome M. Gess and Paul H. Wilson, 2001.
- [5] Werner Leonhard, Control of Electrical Drives, 2nd Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1997.
- [6] Paul C. Krause, Analysis of Electric Machinery, by McGraw-Hill, 1986.