

# OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE REALIMENTADO DE UMA UNIDADE DE REVESTIMENTO DE PAPÉIS ESPECIAIS

**Wendell de Queiróz Lamas**

Universidade de Taubaté – Departamento de Engenharia Mecânica – Rua Daniel Danelli, s/n, Jd. Morumbi, Taubaté, SP, 12060-440 – (12) 222-4005 – wendell@unitau.br.

**Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia**

Universidade de Taubaté – Departamento de Engenharia Mecânica – Rua Daniel Danelli, s/n, Jd. Morumbi, Taubaté, SP, 12060-440 – (12) 222-4005 – giorgio@unitau.br.

**Resumo:** *O presente trabalho tem por objetivo a análise dos setores constituintes de uma das unidades de revestimento de papéis especiais de uma grande indústria do setor de celulose e papel e a proposição de melhorias ao seu sistema de controle. A metodologia do estudo se baseia na análise do sistema de controle atual da unidade de revestimento de papéis especiais, criando assim um padrão de comportamento mínimo quanto à sua estabilidade e à sua qualidade. Então, o sistema é re-desenhado acrescentando-se as propostas de melhorias e a análise dos novos resultados, tendo como referência os dados obtidos com o sistema nas condições atuais. Os modelos matemáticos de cada setor são definidos e analisados por programa aplicativo voltado à computação técnica. Isso possibilita a elaboração das funções de transferência para cada setor. Os resultados do modelo atual e do proposto são comparados e avaliados com relação a melhorias no controle, ao ganho em controle da qualidade e à demanda de energia consumida. Baseando-se em tais resultados, o sistema proposto tem maior estabilidade, maior flexibilidade, menor consumo de energia e a qualidade da tinta e do papel são monitoradas no decorrer das várias etapas do processo.*

**Palavras chave:** *unidade de revestimento, papéis especiais, controle de processos.*

## 1. INTRODUÇÃO

Uma das metas da indústria em todos os setores é melhorar o desempenho com vistas à economia de energia, ao aumento de produtividade e à qualidade dos produtos oferecidos, que são características as quais agregam valor ao produto, aumentando a lucratividade em função da economia obtida no processo.

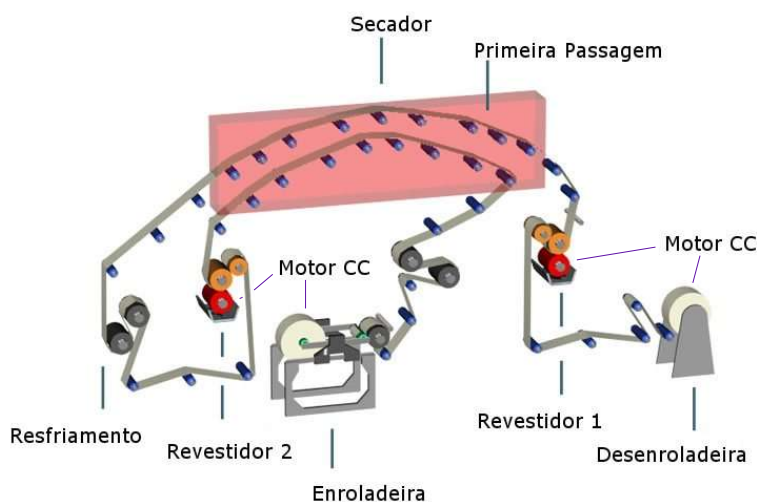
Os processos de revestimento de papéis nas indústrias têm concepção muito parecida, estando as diferenças fundamentais associadas ao tipo de papel e à composição da tinta a ser utilizada.

A metodologia do estudo se baseia na análise do sistema de controle atual de uma unidade de revestimento de papéis especiais, de uma indústria da área de celulose e papel, criando assim um padrão de comportamento mínimo quanto à sua estabilidade e à sua qualidade. O sistema é re-desenhado acrescentando-se as propostas de melhorias e a análise dos novos resultados, tendo como referência os dados obtidos com o sistema nas condições atuais.

Tendo por base esse enfoque, a unidade de revestimento de papéis especiais foi dividida em quatro setores, quais sejam alimentação, revestimento, secagem e armazenagem. A partir daí, cada setor teve suas particularidades observadas e analisadas com relação a possíveis melhorias.

## 2. ANÁLISE DA LINHA DO PROCESSO DE REVESTIMENTO DE PAPÉIS

De forma geral, o processo de revestimento de papéis inicia-se com um cilindro de onde a tira de papel é desenrolada, o qual é a fonte de material a ser revestido. A seguir, um conjunto de rolos guia e um rolo de apoio, que conta com um motor elétrico para tracionar o papel, passam a tira por um recipiente com tinta, onde o papel é propriamente revestido. Após ser revestida, a tira de papel tem o excesso de tinta retirado por uma lâmina colocada no último jogo de cilindros desse setor antes de seguir em direção à secagem, onde a tinta é secada por aplicação indireta de calor, através do insuflamento de ar quente, para que a tinta seque, sendo o papel então enviado a um estágio que funciona como um atraso da tira de papel em relação ao processo para que essa seja resfriada. Então, a tira de papel passa por um segundo estágio de revestimento para que a face do papel ainda virgem seja revestida. Após isso, a tira de papel é novamente passada pelo forno e por um segundo estágio de resfriamento, para assim seguir para o rolo de armazenagem que também dispõe de um motor, da mesma forma que os cilindros principais dos estágios de revestimento. Esse processo pode ser visto na Fig. (1).



**Figura 1 – Esquema de funcionamento de uma unidade de revestimento de papéis.**

Há de se salientar que, segundo os padrões internacionais adotados pela indústria de papel e celulose, o tipo do papel é referenciado por sua densidade, a qual tem valores entre  $65 \text{ g/m}^2$  e  $300 \text{ g/m}^2$ , tendo sua espessura entre 100 mm e 300 mm, proporcionalmente às densidades mencionadas. Por sua vez, seu revestimento, referente ao tipo de papel (sulfite, vergê, glossy, etc.), está entre 2 mm e 5 mm. Com relação à sua composição, o papel é constituído por fibras de celulose com as dimensões de  $1 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ .

Ainda com relação ao papel, em sua condição mais crítica, uma amostra de  $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ , ao ser-lhe imposta uma tensão mecânica de 2 kN, tem uma deformação específica de 0,5 %. Esses valores de referência são os adotados para fins do presente estudo.

## 3. O MODELO ADOTADO

Com base na descrição dos fenômenos físicos que estão relacionados ao processo em estudo, pode-se chegar às variáveis de estado e aos parâmetros do sistema, ou seja, relacionar suas entradas e suas saídas.

Desse modo, são consideradas como entradas a velocidade da tira de papel ( $v_a$ ) e a diferença de potencial aplicada aos terminais de armadura do motor de corrente contínua ( $u_a$ ). Tal escolha decorre do fato de que a tensão elétrica na armadura do motor está diretamente associada à tensão

mecânica de tração do papel nos cilindros (**TT**), que é a variável a ser controlada, ou seja, a resposta desejada pelo sistema. Assim sendo, adotam-se como variáveis de saída do sistema a velocidade angular no motor ( $\omega$ ), pois essa provoca a tensão mecânica de tração do papel, e a sua deformação residual (**x**).

Por sua vez, as variáveis de estado mais convenientes para expressar os fenômenos em estudo no sistema proposto são:  $\omega(t)$ , a velocidade angular do rotor do motor de corrente contínua;  $i_a(t)$ , a intensidade de corrente elétrica na armadura do motor de corrente contínua; e,  $x(t)$ , a deformação do papel.

Por meio dessas variáveis de estado escolhidas para o sistema, é possível se determinar as expressões matemáticas relacionadas aos fenômenos físicos em estudo, obtendo-se as equações de estado: equações dinâmicas e equações de saída, Eqs. (1), (2) e (3) dando origem às matrizes de estado, dadas pelas Eqs. (4) e (5), respectivamente, representativas das equações dinâmicas e das equações de saída do sistema proposto.

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{b}{J} \cdot \omega + \frac{k_t}{J} \cdot i_a \quad (1)$$

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} \cdot i_a - \frac{k_e}{L_a} \cdot \omega + \frac{1}{L_a} \cdot u_a \quad (2)$$

$$\frac{dx}{dt} = v_a - r \cdot \omega \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \underbrace{\begin{bmatrix} \omega \\ i_a \\ x \end{bmatrix}}_x = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{b}{J} & \frac{k_t}{J} & 0 \\ -\frac{k_e}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} & 0 \\ -r & 0 & 0 \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \omega \\ i_a \\ x \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_a} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}}_B \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} v_a \\ u_a \end{bmatrix}}_u \quad (4)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \omega \\ x \end{bmatrix}}_Y = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_C \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \omega \\ x \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_D \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} v_a \\ u_a \end{bmatrix}}_u \quad (5)$$

Afim de se obter o diagrama de blocos equivalente ao sistema em estudo, aplica-se a transformação de Laplace às equações de estado. Assim, são obtidas as relações

$$\Omega(s) = \frac{1}{s} \cdot \left[ \frac{k_t}{J} \cdot I_a(s) - \frac{b}{J} \cdot \Omega(s) \right] \quad (6)$$

$$I_a(s) = \frac{1}{s} \cdot \left[ \frac{1}{L_a} \cdot U_a(s) - \frac{k_e}{L_a} \cdot \Omega(s) - \frac{R_a}{L_a} \cdot I_a(s) \right] \quad (7)$$

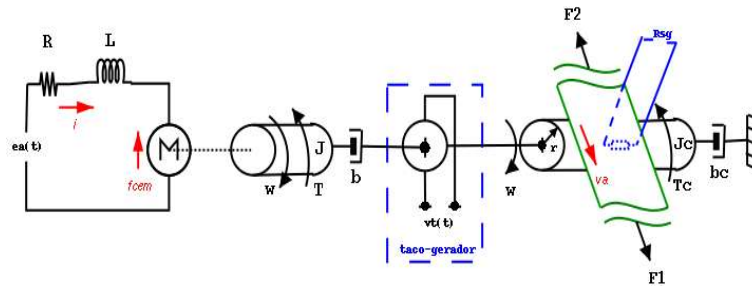
$$X(s) = \frac{1}{s} \cdot [V_a(s) - r \cdot \Omega(s)] \quad (8)$$

Partindo das Eqs. (6), (7) e (8), deduziu-se a seguinte função de transferência do sistema em estudo

$$F(s) = \frac{X(s)}{U_a(s)} = \frac{V_a(s) - r \cdot \Omega(s)}{s^4 + J \cdot L_a \cdot s^3 + (J \cdot R_a + b \cdot L_a) \cdot s^2 + (b \cdot R_a + k_t \cdot k_e) \cdot s} \quad (9)$$

#### 4. ANÁLISE DAS SITUATÇÕES PARA SUGESTÃO DE IMPLEMENTAÇÕES

Após a análise dos setores constituintes do sistema em estudo, pode-se elaborar uma representação básica equivalente aos componentes do sistema estudado, conforme ilustrado na Fig. (2), cuja análise contempla as demais configurações de cilindros da unidade de revestimento de papéis.

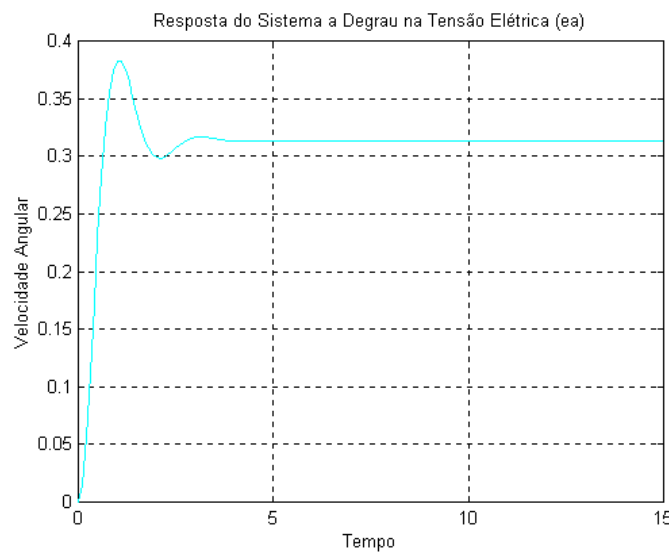


**Figura 2 – Representação do rolo de apoio.**

Em decorrência dessa análise, pode-se elaborar a matriz de espaço de estados para o sistema em estudo, a partir da mencionada adoção de um sistema representativo básico, conforme demonstrada nas Eqs. (4) e (5), onde foram definidas as variáveis de estado  $\omega$ ,  $i_a$  e  $x$ , as entradas  $u_a$  e  $v_a$  e as saídas  $\omega$  e  $x$ .

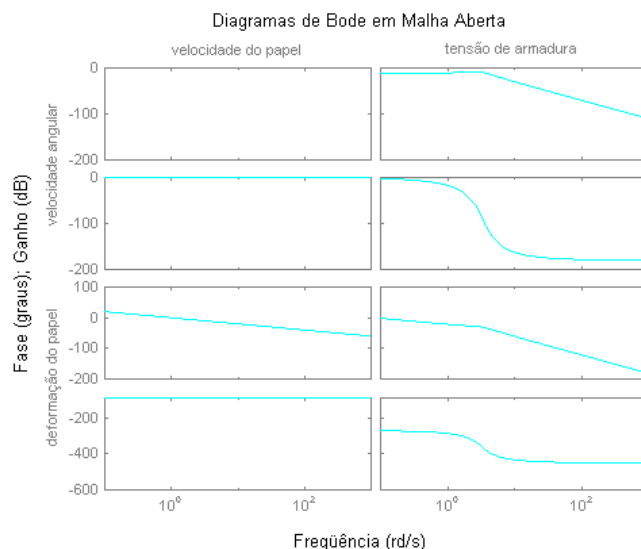
Assim, com o uso de sistemas computacionais especializados, SCILAB e SCICOS, foram traçados os gráficos correspondentes aos pólos do sistema em estudo, as respostas desse sistema para degrau e seus diagramas de Bode.

O sistema em estudo apresentou 2 pólos, em malha aberta, localizado à esquerda do eixo imaginário do plano  $s$ , o que significa dizer que o sistema é estável e contém 2 grandezas físicas que provocam atraso no sistema:  $i_a$  e  $\omega$ .



**Figura 3 – Resposta da velocidade angular a um degrau na tensão elétrica da armadura do motor.**

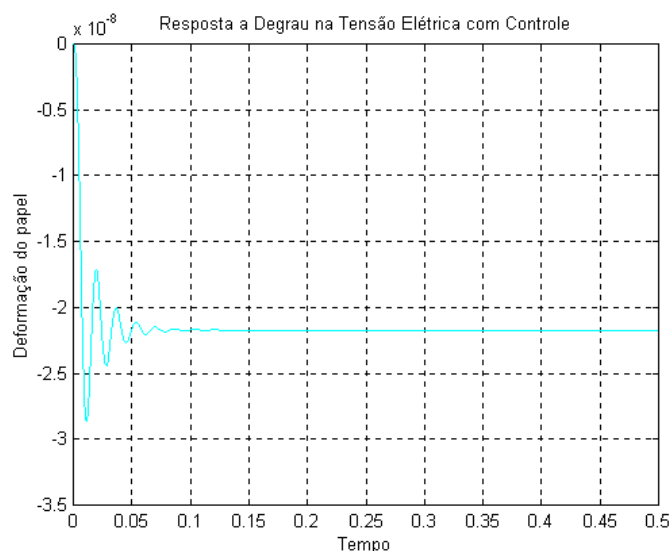
Segundo os critérios de projeto de Messner e Tilbury (1999), um sistema estável deve apresentar em sua resposta a degrau um tempo de acomodação inferior a 2 segundos, um sobre-sinal menor que 5 % e um erro de regime inferior a 1 %, o que o sistema em estudo, na condição de sua malha aberta, não atinge.



**Figura 4 – Resposta em frequência do sistema em malha aberta.**

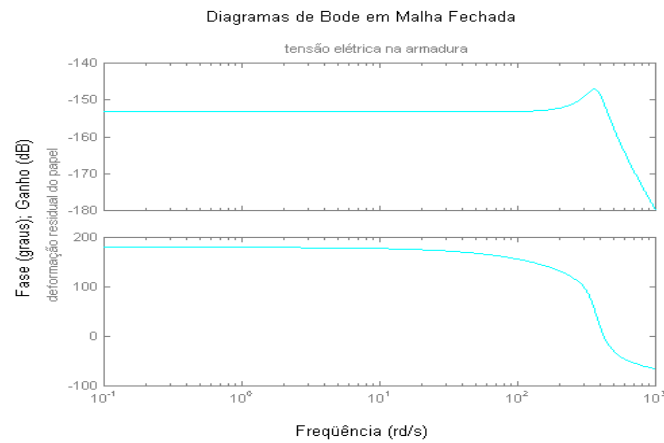
Os mesmos critérios adotados para a análise em malha aberta do sistema em estudo foram utilizados para a sua análise em malha fechada, levando-se em conta os dados referentes à sua realimentação previamente estabelecidos pelos dados oriundos da indústria de celulose e papel.

Ao ser aplicada a ação P-I no sistema, seus pólos mantiveram-se à esquerda do plano  $s$ .



**Figura 5 – Resposta transitória da deformação residual do papel a degrau na tensão elétrica da armadura do motor.**

O gráfico da Fig. (5) ilustra a adequação dos valores de sub e sobre-sinal, de tempo de acomodação e de erro de regime aos critérios de projeto adotados. Observa-se, também, uma diminuta tendência do papel a retrair-se, o que formaria dobras na extensão do papel.



**Figura 6 – Resposta em frequência em malha fechada entre a tensão elétrica da armadura do motor e a deformação residual do papel.**

## 5. SUGESTÕES E MELHORIAS

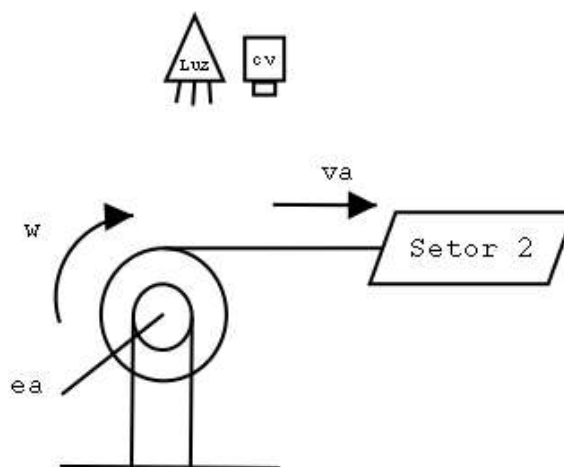
Para inibir as constantes paradas para manutenção, possibilitar economia na demanda de energia pelo sistema e tornar o processo mais flexível, propõe-se a troca do motor de corrente contínua com acionamento estático por um motor de corrente alternada de igual velocidade nominal com acionamento dinâmico, sendo usado um inversor de frequência para tal.

Durante as observações com relação ao processo em estudo, viu-se que a colocação de alguns novos sensores pela linha de processo, em locais estratégicos, possibilitaria um melhor monitoramento no tocante à qualidade.

O primeiro dos setores constituintes da unidade de revestimento, a alimentação, também referido como desenroladeira, é constituído por um cilindro com a tira de papel enrolada, de onde o sistema será alimentado. O cilindro está acoplado a um motor elétrico responsável por mantê-lo na velocidade nominal do sistema, a qual é monitorada por um taco-gerador acoplado ao eixo do motor.

Para esse setor, propõe-se a colocação de uma câmara de vídeo com o intuito de captar a imagem da tira de papel, comparando-se aos padrões armazenados em um banco de dados e imagens, quando o papel estiver passando por esse setor, para que se possa verificar a qualidade do mesmo quanto à estrutura desse papel.

A Figura (7) ilustra a nova configuração proposta para o setor.

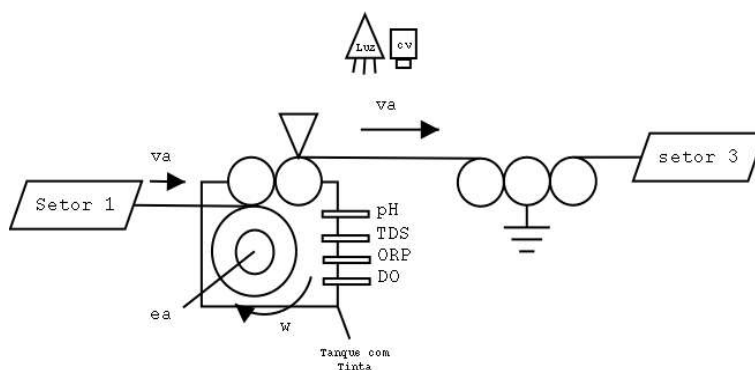


**Figura 7 – Nova configuração do setor de alimentação de papel.**

No setor de revestimento há um cilindro de apoio acoplado a um motor elétrico, que sincroniza a velocidade da tira de papel com os demais setores, monitorado pelo sistema através do taco-gerador colocado em seu eixo. Esse cilindro, mergulhado em um tanque com tinta, está associado a dois rolos de guia e a uma lâmina dispostos de forma que a tira de papel receba o revestimento de tinta e o excesso seja extraído do papel pela lâmina. Na saída do sistema, há um conjunto de 3 rolos guias de papel, onde o central dispõe de uma célula de carga que transfere ao sistema o valor equivalente à tensão mecânica do papel nesse setor.

Para esse setor, propõe-se a colocação de uma câmera de vídeo para que, de forma análoga ao setor anterior, seja feita a verificação de rupturas na tira de papel e de falhas no revestimento. Para monitorar a qualidade da tinta, com relação à sua acidez, ao oxigênio dissolvido, ao potencial de oxi-redução e à quantidade de sólidos dissolvidos, sugere-se a colocação de sensores de pH, DO, ORP e TDS no tanque de tinta, ajustados conforme as características da tira de papel e da própria solução.

A Figura (8) ilustra a nova configuração proposta para o setor.

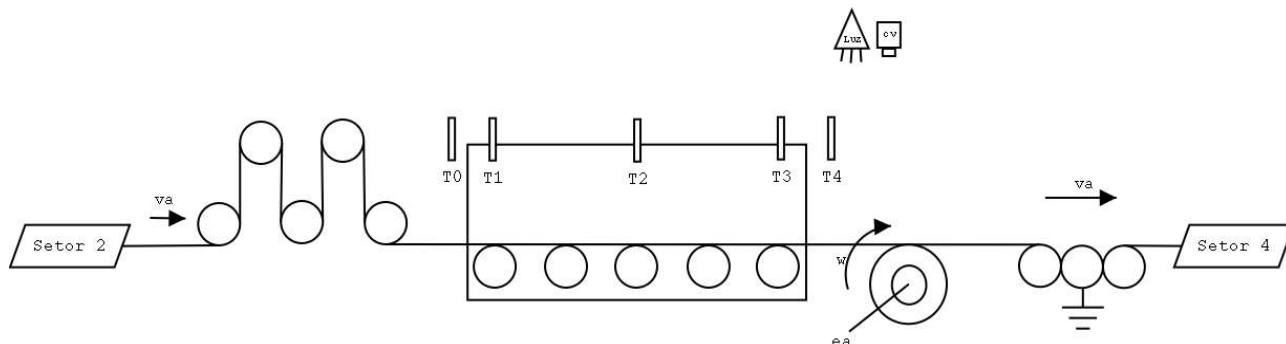


**Figura 8 – Nova configuração do setor de revestimento.**

O setor de secagem é composto por um rolo de apoio acoplado a um motor elétrico que sincroniza a velocidade do papel com os demais setores, re-alimentando o sistema com as informações geradas pelo taco-gerador disposto em seu eixo. Além desses, existem treze rolos guias de papel, estando 5 dispostos na entrada do setor de forma a proporcionar um estágio de secagem mecânica (por ação da gravidade), 5 colocados no forno e 3 na saída, estando o central associado a uma célula de carga que retorna a tensão mecânica no papel.

Para esse setor, propõe-se a colocação de uma câmera de vídeo para que, de forma análoga aos setores anteriores, seja feita a verificação de rupturas na tira de papel e de danos provocados pelo aquecimento no forno. Sugere-se, também, a colocação de 5 sensores de temperatura no forno, sendo 2 externamente, para monitoramento do perfil da temperatura ao longo do duto de secagem.

A Figura (9) ilustra a nova configuração proposta para o setor.



**Figura 9 – Nova configuração do setor de secagem.**

O último setor, armazenagem, também conhecido como enroladeira, é composto por um cilindro acoplado a um motor elétrico, que visa mantê-lo na velocidade nominal da tira de papel, a qual estará sendo armazenada nesse rolo. Ao eixo do motor está acoplado um taco-gerador que alimenta o sistema com a sua velocidade.

Como a tira de papel chega a esse setor com todas as suas características monitoradas, qualquer acréscimo no sensoriamento torna-se redundante.

## 6. CONCLUSÕES

Embora deva ser destacado que, por basear-se em um projeto real, de ante-mão sabia-se que este sistema estaria em conformidade com os quesitos mínimos relativos à qualidade, à estabilidade, à controlabilidade e à observabilidade, sua avaliação através dos conceitos de controle de processos e do uso dos programas aplicativos de computação técnica SCILAB e SCICOS foram plenamente satisfatórios. Contudo, não era sabido se o controlador desenvolvido era o mais adequado, daí a necessidade do estudo, das análises e das simulações.

A partir da análise do sistema em estudo, pode-se observar que a configuração atual do sistema atende às necessidades da unidade de revestimento de papéis especiais. Em particular, a ação de controle PI é suficiente para manter o sistema estável, proporcionando um baixo tempo de subida e eliminando o erro de regime, embora o sobre-sinal e o tempo de acomodação tenham aumentado.

Com relação à estabilidade, o sistema em estudo mostrou-se pleno, porque, além de atender à definição onde pólos negativos implicam na estabilidade do sistema, ao avaliar os gráficos gerados, pode-se observar as respostas adequadas às entradas propostas, apesar de até mesmo serem deslocados os pólos ou alterados os sinais de entrada ou, ainda, ser injetado um sinal de perturbação ao sistema.

## REFERÊNCIAS

- BOULTER, B.T. Analysis of a Printing Line Coating Section. ApICS LLC Training Course Material, Seven Hills, OH, 2000, 82 p. Site visitado em 14 de julho de 2003.
- LAMAS, W.Q. GROH, F. RIBEIRO, G.W. Análise do Sistema de Controle Realimentado de Motor CC Aplicado em Máquina de Revestimento de Papéis Especiais. Taubaté, 2001, 69 p. Monografia – Universidade de Taubaté.
- MESSNER, W.C. TILBURY, D. Control Tutorials for MATLAB and Simulink: A Web-Based Approach. Prentice-Hall, Michigan, 1999, 32 p., 0-201-47700-9.
- OGATA, K. Modern Control Engineering, Third Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, 1997, 997 p., 0-13-227307-1.
- OXFORD UNIVERSITY. Report on Curtain Coating Technology Workshop with Arjo Wiggins. Oxford University, Oxford, s/d, 4 p. Site visitado em 14 de julho de 2003.
- PENNA, M.G. GUIMARÃES, F.M.Q. RUBIÃO, L.E.G. ALMEIDA NETO, F.J de; Incorporação de Funções de Auto-Ajuste a Sistemas de Controle de Processos. In: 32º Congresso Anual de Celulose e Papel. ABTCP, São Paulo, 1999, p. 17-26.
- VALENZUELA, M.A. BENTLEY, J.M. LORENZ, R.D. Sensorless Tension Control in Paper Machines. In Proc. Of IEEE IAS Pulp & Paper Industry Conference. IEEE, Toronto, June 17-20, 2002, 10 p.

## DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso nesse trabalho.



# ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF CLOSED-LOOP CONTROL SYSTEM APPLIED IN SPECIAL PAPERS COATING MACHINE

**Wendell de Queiróz Lamas**

University of Taubaté – Department of Mechanical Engineering – Rua Daniel Danelli, s/n, Jd. Morumbi, Taubaté, SP, 12060-440 – 55 (12) 222-4005 – wendell@unitau.br.

**Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia**

University of Taubaté – Department of Mechanical Engineering – Rua Daniel Danelli, s/n, Jd. Morumbi, Taubaté, SP, 12060-440 – 55 (12) 222-4005 – giorgio@unitau.br.

**Abstract:** *This work deals with the analysis of a coating unit for special papers of a large pulp and paper plant by proposing improvements in its control system. This analysis is justified by a necessary increase in productivity and quality as demanded by the commercial paper market. Moreover, a decrease in energy consumption is an important factor in favor of improved financial performance. In view of the continuous increase in market competition, a constant analysis and reassessment of production processes is an important scope of our study. For analysis purpose, the coating unit was broken into four sectors, paper unwinder, coating, drying and winder. From this point on, each sector is analyzed in view of possible improvements. Our methodology is based on the existing control system, producing a minimum behavioral pattern with respect to stability and coating quality. After this is done, the system is re-designed by adding proposed improvements and analyzing new performance criteria, as compared with the present situation. Mathematical models of each sector are defined and analyzed by specialized software packages. Transfer functions are then obtained for each sector and subjected to a simulation computer software. Results of the existing model and of the proposed model are compared and evaluated with respect to the overall control and to energy consumption. Based on the results the proposed system stability, flexibility and energy consumption are improved and paint as well as paper quality are better monitored along the process.*

**Keywords:** *coating unit, special paper, process control.*