



Novas tecnologias para avaliação de desempenho e auditoria de malhas de controle em plantas de papel e celulose

New technologies for performance evaluation and control loops audit at pulp and paper plants

Autores: Bernardo Soares Torres, M.Sc.¹
Eduardo Shigueo Hori, Dr.²

Palavras-chave: otimização de processos, processo de papel e celulose, malhas de controle, manutenção preditiva.

RESUMO

O presente trabalho visa apresentar, através de exemplos práticos na indústria de celulose e papel, novas ferramentas para avaliação de desempenho e auditoria de malhas de controle. O controle das diversas variáveis de processo disponíveis é fundamental para o bom desempenho da planta e para a qualidade do produto final, resultando numa maior lucratividade. Como as plantas de celulose e papel possuem, em geral, um número elevado de malhas – em muitos casos superior a mil –, torna-se praticamente impossível a avaliação e o diagnóstico de cada uma delas simultaneamente sem ferramentas para tal finalidade. Por esse motivo, o software de avaliação de desempenho pode listar as malhas de acordo com o desempenho e o retorno econômico, tornando pos-

Abstract

This paper presents, through practical examples from pulp and paper industry, new tools for performance evaluation and auditing of control loops. The control of several available process variables is fundamental for a good performance of the plant and for final product quality, resulting in a larger profitability. As pulp and paper plants have, frequently, a high number of loops, several times surpassing 1000 loops, it is almost impossible to evaluate and diagnose each one of them simultaneously without tools designed for this task. So the performance evaluation software lists the loops according to performance and economic return, making possible to prioritize the loops that present the worst performance and can give the best results if optimized. The use of these loop monitoring technologies allows also a continuous improvement of process production because it is possible to actuate in a proactive way when the evaluation indices indicate a performance decrease tendency, avoiding larger losses. Besides diagnosing the priorities for optimization, the software has several automatic diagnosing indexes of control loops. It also has several tools for a detailed auditing and loop tuning. This work will present several examples that use these tools in pulp and paper industrial plants.

Keywords: process optimization, pulp and paper process, control loops, predictive maintenance.

sível priorizar aquelas que apresentam o pior desempenho e que podem trazer melhores resultados se forem oti-

mizadas. O uso dessas tecnologias de monitoramento de malhas permite a melhoria contínua do processo de pro-

Referências dos autores:

- 1 - Departamento de Otimização – Atan Sistemas – Belo Horizonte (MG) – Brasil – E-mail: bernardo.torres@atan.com.br
- 2 - Norwegian University of Science and Technology – E-mail: hori@chemeng.ntnu.no

dução, pois pode-se atuar de forma pró-ativa quando os índices de avaliação já estiverem apontando uma tendência de queda de desempenho, evitando-se perdas maiores. Além de indicar as prioridades para otimização, o software já coloca à disposição dezenas de índices automáticos de diagnóstico das malhas de controle. Possui ainda diversas ferramentas para a realização de uma auditoria detalhada e sintonia das malhas. Este trabalho irá apresentar vários exemplos de utilização dessas ferramentas em plantas industriais de celulose e papel.

INTRODUÇÃO

Plantas de papel e celulose possuem um número elevado de malhas de controle, devido à complexidade do processo produtivo. Nesse tipo de planta, o controle de diversas variáveis, como os valores de kappa (na saída do digestor, na produção de celulose) e da consistência da caixa de alimentação de uma máquina de papel, é fundamental para a qualidade final do produto. A medida e o controle da consistência da polpa é absolutamente crítica à qualidade do produto na indústria de celulose e papel. Variações nesse parâmetro-chave afetam todo o processo, desde a formação da folha até a base mássica e a umidade, a resistência, a opacidade e qualquer outro aspecto importante do produto. Assim, o controle da consistência é um dos fatores fundamentais para garantir a qualidade do produto (Buckbee e Swartz, 2001). Além disso, é necessário que se controlem temperaturas, pressões e níveis, entre outras variáveis, num total aproximado de mil malhas de controle por planta. Dessas malhas, cerca de 20% tipicamente operam em modo manual, aumentando a variabilidade do processo. Além disso, há a presença de fortes acoplamentos entre as malhas, os quais devem ser reduzidos para aumentar o desempenho do processo.

Considerando-se que o custo médio em instrumentação de uma malha de controle é de cerca de US\$ 15 mil,

uma indústria de papel e celulose tem investido cerca de US\$ 15 milhões somente em malhas de controle. Tendo-se isso em vista, percebe-se claramente a necessidade de se otimizar o investimento já realizado, monitorando e avaliando de forma contínua as malhas de controle da planta e fazendo os ajustes necessários para que atuem de forma otimizada.

O procedimento para verificação das malhas era tradicionalmente feito através de inspeção de gráficos de tendência em softwares supervisórios e relatórios fornecidos pelos operadores do sistema. Procurava-se atuar nas malhas de controle apenas quando conseqüências relevantes do baixo desempenho dessas malhas prejudicavam o processo. Contudo, novas tendências para monitoração contínua das malhas de controle, diagnósticos automáticos de problemas e ferramentas para auditoria de malhas podem garantir não só a operação do sistema dentro dos patamares desejáveis de qualidade, como também a redução do consumo de insumos.

A utilização dessas ferramentas permite monitorar continuamente as malhas de controle através de notas individuais para cada malha e também notas globais para as áreas do processo. Assim, a equipe de Manutenção pode agir no momento em que a malha começar a apresentar perda de desempenho, ou seja, antes que isso cause problemas graves na operação do processo.

Além da sintonia dos controladores PID, vários outros problemas podem prejudicar significativamente o desempenho do processo, como não-linearidades, ruídos, oscilações, acoplamentos, histerese e agarramento de válvulas. Assim, é importante também que a ferramenta de monitoramento seja capaz de detectá-los.

Neste trabalho será apresentada uma ferramenta de monitoramento e avaliação de malhas de controle dotada de todas as características citadas anteriormente, como avaliação conti-

nua, sintonia e detecção automática de problemas de malhas. O uso dessa ferramenta pode aumentar significativamente a eficiência dos trabalhos de auditoria de malhas, de modo a reduzir significativamente os gastos com manutenção e consumo de insumos. É possível obter reduções significativas na variabilidade, no desgaste de atuadores e no número de malhas que operam em modo manual, entre outros problemas. Este trabalho irá apresentar vários exemplos reais e resultados já obtidos nas indústrias de papel e celulose.

AVALIADOR DE DESEMPENHO DE MALHAS DE CONTROLE

A comunicação do software de avaliação de desempenho com os sistemas de controle (SDCDs, CLPs, instrumentos, etc.) é realizada através do protocolo OPC, já considerado padrão industrial para conectividade de sistemas. Pode-se fazer a coleta de dados através de OPC DA (em tempo real) ou OPC HDA (dados históricos). Os dados coletados são utilizados pelo software para avaliar e medir o desempenho da planta, processo ou malhas de controle. O desempenho é padronizado de acordo com o período de tempo durante o qual a planta trabalha em seu desempenho ótimo desejado. Um período de avaliação é definido como aquele após o qual os KPIs (Key Performance Indicators) são calculados. Vale informar que mais de 45 KPIs são calculados em cada período de avaliação. Esses KPIs informam a grupos de usuários (gerentes, engenheiros, equipes de Operação e Manutenção) o desempenho dos processos e das malhas de controle, disponibilidade dos equipamentos, presença e fontes de oscilação e condições operacionais dos equipamentos.

Como os KPIs fornecem medidas do desempenho de seus ativos de produção, especificamente malhas de controle neste artigo, os usuários podem focar seus esforços nos pontos em que o impacto na qualidade da produção fornece o maior retorno de investimen-

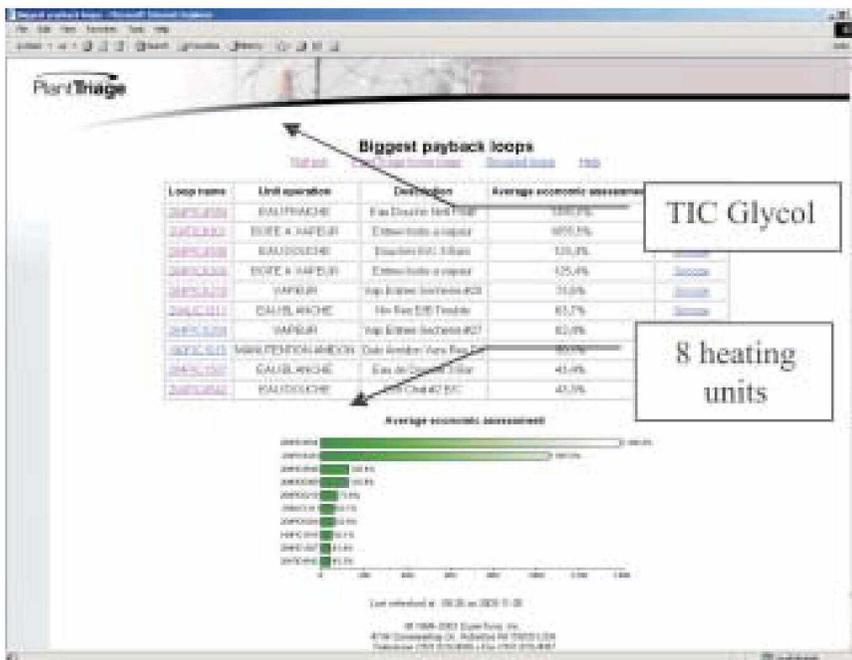


Figura 1. Software de avaliação de desempenho lista, através de relatórios na Web, as malhas com pior desempenho e que podem trazer o melhor retorno econômico (Emond *et al.*, 2004). Quanto maior a nota percentual, maior o potencial de ganho com a otimização.

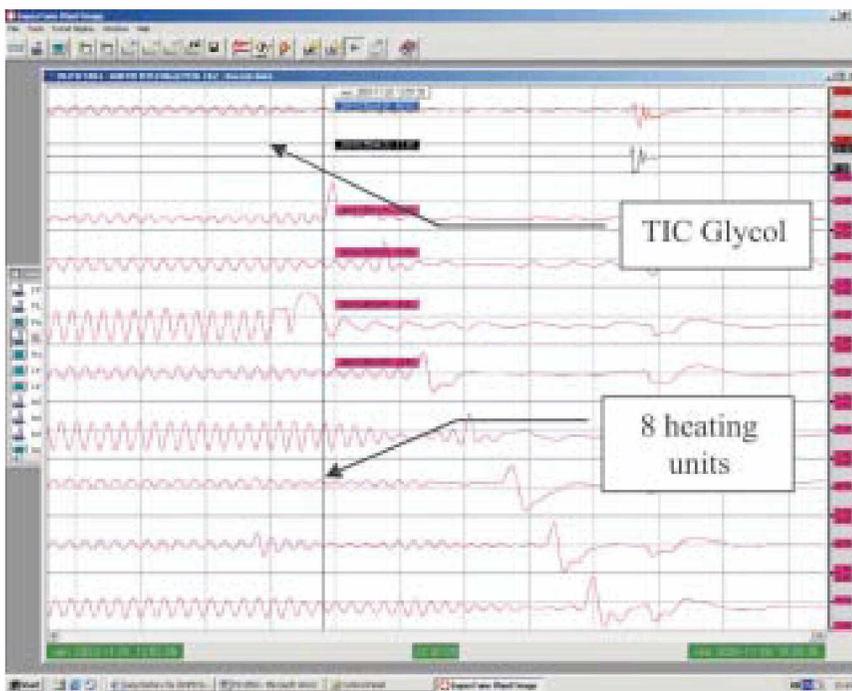


Figura 2. Sintonia agressiva em uma malha de temperatura causava oscilações em várias outras malhas. Através da sintonia adequada das malhas, foi possível eliminar as oscilações (Emond *et al.*, 2004).

to (ROI). A Figura 1 ilustra um exemplo de uma planta canadense de papel (Emond *et al.*, 2004) que lista as dez malhas com o pior desempenho, mas

que podem trazer maiores benefícios financeiros se forem otimizadas.

Além de apresentar uma nota global para as malhas de controle, áreas e

plantas, o software calcula continuamente diversos índices de diagnóstico, como variabilidade, erro médio absoluto, Harris index, modelos da planta, nível de ruído, percentual de tempo que a malha permanece em modalidade manual ou com sua saída saturada, desgaste dos atuadores, entre outros (Fonseca *et al.*, 2004; Torres *et al.*, 2004a; Torres *et al.*, 2004b).

Para análise detalhada, o software de avaliação apresenta várias ferramentas de diagnóstico e análise, como correlação cruzada, autocorrelação, gráfico de robustez, verificação de histerese e agarramento de válvula, identificação de oscilações, suas causas e períodos (determinados através de densidade espectral de potência), histogramas e análises estatísticas, entre outras. Todas as avaliações e o histórico dos dados coletados são armazenados em banco de dados próprio, com capacidade atual de armazenamento para até dois anos.

EXEMPLOS DE APLICAÇÕES

3.1 – Oscilações e sintonia

A Figura 2 ilustra a análise de oscilações em uma máquina de papel. A sintonia agressiva de uma malha de temperatura (TIC Glycol) causava oscilações que afetavam a distribuição de vapor da máquina de papel, levando à oscilação outras oito malhas. Utilizando-se o software de avaliação de desempenho, observou-se que os índices de oscilação das malhas dessa unidade estavam em 100%, ou seja, antes mesmo de observar o gráfico temporal exibido na Figura 2, já foi possível identificar as malhas que estavam oscilando e os períodos de oscilação. Identificam-se os períodos de oscilação através de análise de densidade espectral de potência, que utiliza transformada de Fourier para identificar de forma confiável e eficiente os picos de oscilação e sua potência espectral (Ruel and Gerry, 1998). Ordenando-se pelos períodos de oscilação, foram identificados períodos coincidentes para todas as malhas, com o mesmo período da malha de glicol. Através da sintonia

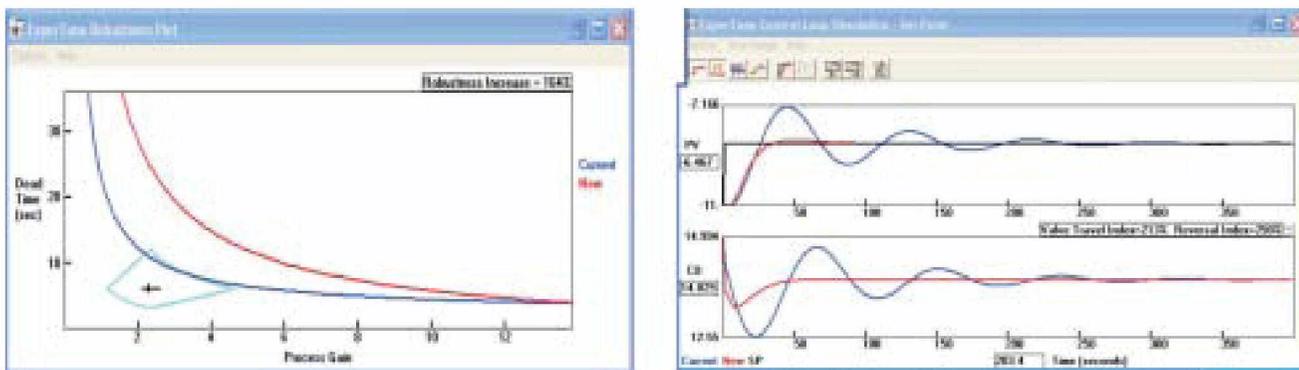


Figura 3. Gráficos de robustez e simulações indicam que os novos parâmetros de sintonia serão mais conservativos, ou seja, mais robustos e com menor probabilidade de levar o sistema a oscilações. A curva em azul apresenta a sintonia atual, e a curva em vermelho, a nova sintonia.

da malha de glicol e das demais malhas, utilizando-se o software de monitoração de desempenho e análise, foram adotados parâmetros mais conservativos, eliminando-se as oscilações e garantindo a operação mais estável do sistema. A verificação da robustez dos parâmetros de sintonia também pode ser feita através do software, conforme se observa na Figura 3. No gráfico de robustez, a cruz representa o modelo identificado da malha, e a área em azul-claro, uma região de instabilidade – ou seja, se o processo mudar e a simulação em malha fechada da sintonia estiver dentro dessa área (curvas em azul e vermelho no gráfico), o sistema pode ser levado à instabilidade. Quanto mais longe estivermos da área azul-clara, maior será a robustez dos parâmetros de sintonia. Nesta figura, por exemplo, a curva vermelha apresenta comportamento mais robusto, estando mais longe da área azul-clara.

3.2 – Aumento de eficiência em uma máquina de papel

Uma fábrica apresentava problemas de eficiência em uma de suas máquinas de papel em comparação às demais (Ruel, 2000). O tempo de uso dessa máquina era de 83%. Simultaneamente, sua variabilidade apresentava-se alta, de 1,4% para a base mássica e de 6,1% para a umidade. A Tabela 1 apresenta os valores de tempo de utilização da máquina antes de sua otimização.

Ano	Tempo de utilização
1997	83,3%
1998	84,3%
1999	83,2%
Média	83,6%

Tabela 1: Tempo de utilização da máquina de papel nos anos anteriores à otimização.

Ano	Tempo de utilização
Nov./1999	90,1%
Dez./1999	83,3% (parada de Natal)
Jan./2000	88,4%
Fev./2000	88,6%
Mar./2000	89,4%
Abr./2000	90,2%
Média	88,3%

Tabela 2: Tempo de utilização da máquina de papel nos meses posteriores à otimização.

Após a otimização, o tempo de utilização da máquina aumentou em 5%, resultando num aumento de lucratividade de US\$ 1,8 milhão ao ano. Além disso, o produto se tornou mais uniforme e de melhor qualidade, com menor variabilidade (0,71% para base mássica e de 2,91% para umidade). A Tabela 2 apresenta os tempos de utilização da máquina nos seis meses seguintes à otimização.

3.2.1 – Benefícios da auditoria da máquina de papel

Uma etapa muito importante na auditoria da máquina de papel foi a de cálculo dos ganhos obtidos. Para isso, foram coletados dados de todas as malhas importantes da máquina de papel, sendo que cada variável foi analisada de forma a detectar as oscilações escondidas (usando correlação e análise de densidade espectral de potência).

Os dados analisados foram os seguintes:

- variabilidade;
- densidade espectral de potência;
- desempenho das válvulas (histerese, agarramento e ganho do processo).

Uma vez resolvidos os principais problemas e ajustadas as malhas corretamente, os dados foram novamente coletados para essas malhas, analisando-se as mesmas variáveis, para que fosse possível calcular o ganho econômico da auditoria.

A Figura 4 apresenta os gráficos temporais antes e após a otimização da máquina de papel, obtidos pelo sistema de monitoramento de qualidade para base mássica, umidade e massa seca. Como os gráficos têm as mesmas escalas, nota-se claramente a redução da variabilidade do processo após a auditoria.

A Figura 5 apresenta a análise de densidade espectral de potência antes e depois da auditoria para a base mássica. Como pode ser visto pelos gráficos de

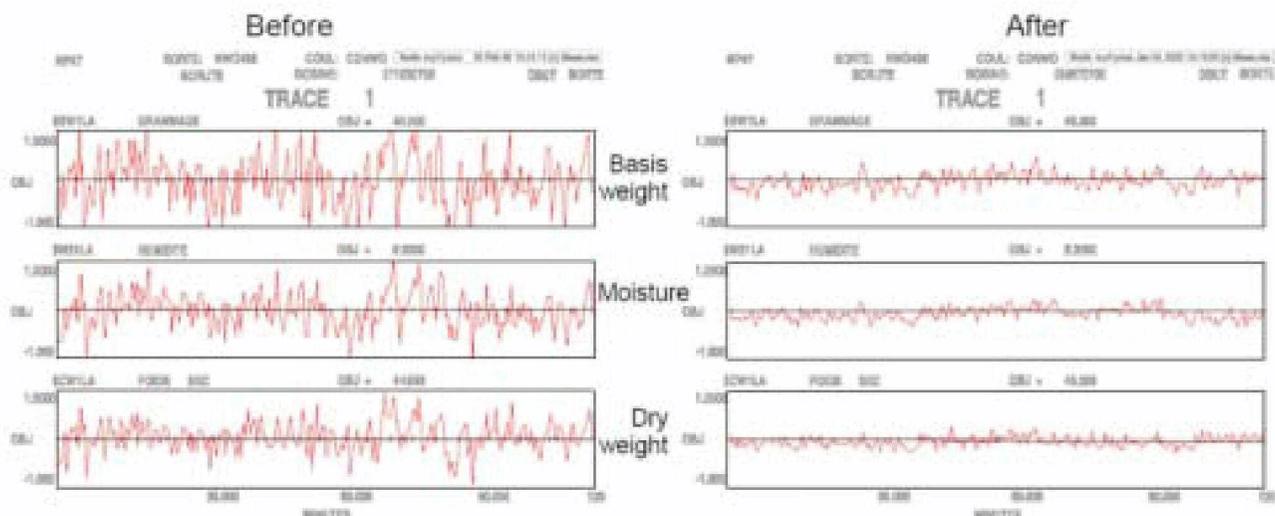


Figura 4. Comparação entre os gráficos temporais antes e após a otimização da máquina de papel. Estes gráficos foram gerados pelo sistema de monitoração da qualidade. Como ambos têm a mesma escala, pode-se observar que a variabilidade se reduziu bastante (Ruel, 2000).

densidade espectral de potência, as oscilações reduziram-se significativamente, sendo que os mesmos resultados foram observados para as demais malhas.

Com os dados obtidos antes e após a auditoria, foi possível calcular os seguintes benefícios:

- melhor desempenho da máquina de papel: a partida é feita mais facilmente após variação na gramatura e quebra com menor frequência;
- maior eficiência;
- aumento da produtividade;
- ganho econômico estimado em US\$ 1,8 milhão.

Além disso, a auditoria gerou outros ganhos que, apesar de não-mensuráveis, são tão importantes quanto os mensuráveis, como:

- melhor conhecimento da máquina de papel;
- melhor operabilidade;
- pessoal mais bem treinado para resolver problemas na máquina;
- melhor qualidade do produto final;
- conhecimento replicável para outras máquinas de papel;
- operação suave;
- menor desgaste dos equipamentos;
- ferramentas e dados disponíveis para manutenção preditiva;
- redução da necessidade de manutenção.

Como os custos estimados da auditoria foram de cerca de US\$ 68 mil, conclui-se que o retorno do investimento ocorre em menos de um mês. Tal resultado mostra que a otimização de processo fornece um dos maiores retornos de investimento em plantas, pois tem o objetivo de otimizar o uso de equipamentos já disponíveis.

3.3 – Identificação de oscilações através de análise espectral

Um problema muito importante na indústria de papel consiste na interação entre as diversas malhas de controle (Ruel and Gerry, 1998). Isso faz que problemas como variabilidade tendam a se espalhar pela máquina de forma oscilatória. As oscilações permanecem como uma das maiores fontes de variabilidade no processo de produção de papel, desde a preparação da polpa até a secagem final. A redução ou a eliminação desse ambiente cíclico pode resultar numa redução expressiva de variabilidade. Em geral, as oscilações são a causa de cerca de 50% da variabilidade da máquina.

Uma máquina de papel estava produzindo papel fora de especificação devido a um ciclo de 16 minutos na base mássica, umidade e massa

seca, que estava causando um aumento inaceitável de variabilidade do produto (Ruel and Gerry, 1998).

A máquina de papel recebe polpa em três formas: kraft, termoquímica (TMP) e reciclada. Essa última polpa é obtida a partir do produto rejeitado, enviado a uma bateadeira, onde ocorria sua mistura com água e, então, diluição. Todas as máquinas de papel são alimentadas com as mesmas polpas kraft e TMP. A polpa reciclada é diferente em cada máquina, pois deriva de seu próprio papel fora de especificação.

O software foi utilizado para calcular a densidade espectral de potência com o uso dos dados obtidos em um ponto localizado antes da máquina de papel. O espectro é apresentado na Figura 6, pela qual se pode notar claramente que a densidade de potência da frequência de 1.000 segundos (16,5 minutos) se destaca das demais, o que corresponde exatamente ao ciclo visto no restante do processo.

Para verificação, coletaram-se dados da saída da máquina de papel e obteve-se a densidade espectral de potência apresentada na Figura 7, na qual se observa que a frequência de 1.000 segundos se destaca das demais.

Esses dois gráficos de densidade

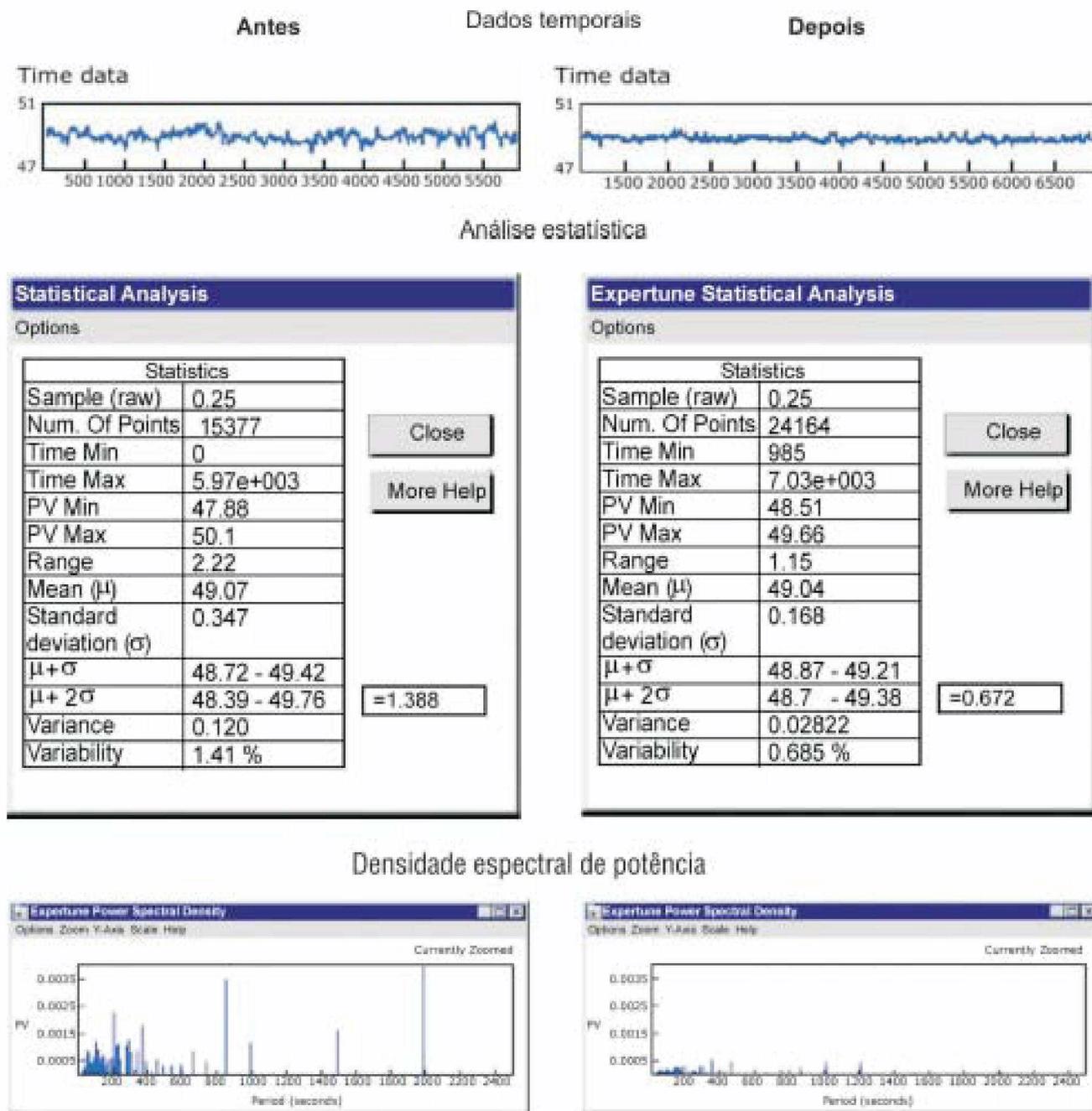


Figura 5. Análise da base mássica pelo software de monitoramento. A variabilidade foi reduzida de 1,41% para 0,685%. Além disso, pelos gráficos de densidade espectral de potência, verifica-se que as oscilações também se reduziram de forma significativa.

espectral de potência mostram claramente um problema de oscilação na frequência de 16 minutos. Além disso, concluiu-se que o problema se encontrava antes da máquina de papel. Sabendo-se disso, decidiu-se verificar se a causa do problema seria o reciclo de polpa, desligando-o temporariamente. Após duas horas, a oscilação

do processo desapareceu, o que significa que a fonte do problema foi encontrada. O produto voltou a estar em conformidade com valores aceitáveis.

Feito isso, o problema foi descobrir do que decorria a oscilação no reciclo de polpa. Em pouco tempo, descobriu-se que a causa era uma bomba de circulação projetada para bombe-

ar fluido com baixa consistência. No entanto, como esse equipamento circulava a polpa, a consistência se tornava mais espessa na sucção e a vazão se reduzia a quase zero. Ao mesmo tempo, na saída da máquina, a polpa se diluía. Ao se misturar a polpa grossa com a fina, a bomba gradualmente voltava a bombear. Esse ci-

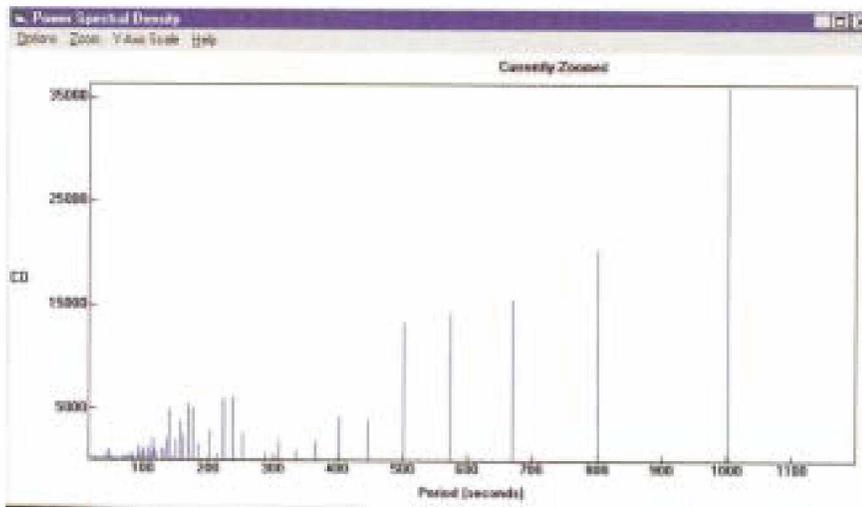


Figura 6. Análise da densidade espectral de potência de dados obtidos num ponto localizado antes da máquina de papel.

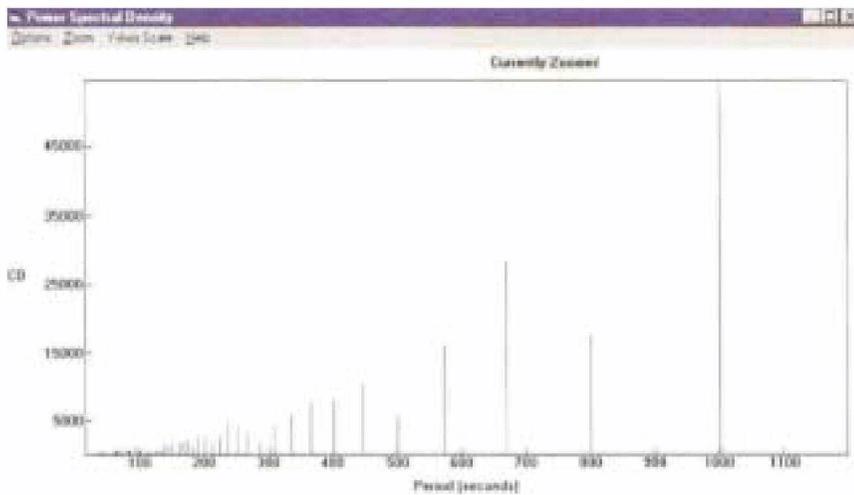


Figura 7. Análise da densidade espectral de potência de dados obtidos num ponto localizado depois da máquina de papel.

clo durava cerca de 16 minutos – parte do tempo bombeando e parte sem bombear. Para confirmar esse resultado, a bomba de circulação foi desligada e introduziu-se novamente a polpa reciclada na máquina de papel. Nessa situação, não havia a presença de oscilação, que, porém, reaparecia quando se religava a bomba.

Esse exemplo mostra como as malhas de controle têm significativo impacto na variabilidade do produto final e como a análise de densidade espectral de potência pode, rapidamente, identificar a fonte dos problemas de oscilação. Conhecendo-se os perío-

dos de oscilação, os problemas relacionados a vibração, ajuste de malhas, interação entre malhas e mecânica são prontamente solucionados.

3.4 – Modelagem e sintonia

Uma ferramenta importante do software de monitoramento e sintonia de malhas é a capacidade de modelar o processo (Gerry and Ruel, 2002). Para se modelar a malha, o software necessita dos dados das variáveis manipuladas e de processo após uma variação feita na malha. No exemplo apresentado pela Figura 8, em um tanque de mistura de polpa, os dados fo-

ram coletados pelo software e o modelo foi calculado (Figura 9).

Com o uso deste modelo, é possível ajustar os parâmetros do controlador que resultam no melhor desempenho do processo. Além disso, também se pode simular a resposta do processo a distúrbios na carga ou no set point, como se vê na Figura 10. Nessa figura, a curva azul representa a resposta do processo quando se usam os valores antigos dos parâmetros de sintonia, enquanto a curva verde apresenta a resposta com a utilização dos novos parâmetros. Verifica-se que o ajuste antigo é muito agressivo, causando oscilação na variável de processo e, conseqüentemente, em toda a máquina de papel. Os novos parâmetros, por outro lado, resultam numa resposta mais amortecida, sem causar oscilação na variável de processo.

Os resultados acima comprovam que a simulação de um bom modelo pode auxiliar na decisão da escolha dos melhores ajustes dos parâmetros do PID.

CONCLUSÕES

A otimização de processo é uma das áreas com maior retorno de investimento em plantas, pois tem por objetivo garantir que o equipamento atual trabalhe em seu melhor patamar, ou seja, sem a necessidade de novas instalações, com todos os custos de engenharia, instalação e manutenção.

Outro ponto de grande retorno é a manutenção preditiva, pois o pessoal de Manutenção possui as ferramentas e as habilidades necessárias para manter os ganhos. Eles são capazes de detectar e consertar os problemas antes mesmo de gerarem impacto sobre a produção. As mesmas técnicas podem ser usadas em outras máquinas de papel e em outras seções.

As malhas de controle têm impactos significativos na variabilidade do produto final. Neste caso, ferramentas como a densidade espectral de potência podem identificar rapidamente

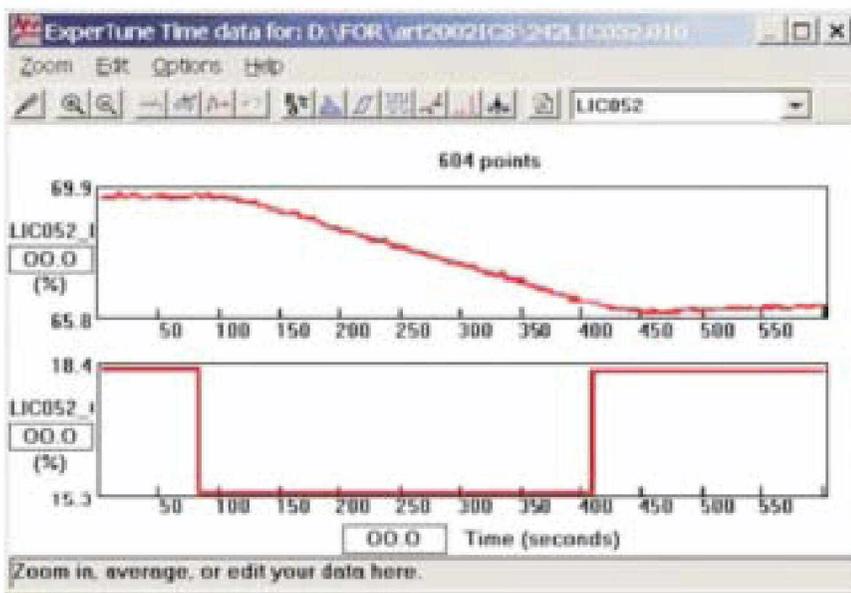


Figura 8. Dados coletados pelo software para obtenção do modelo dinâmico do processo. A curva superior representa a variação da variável de processo, e a inferior, a alteração na saída do controlador.

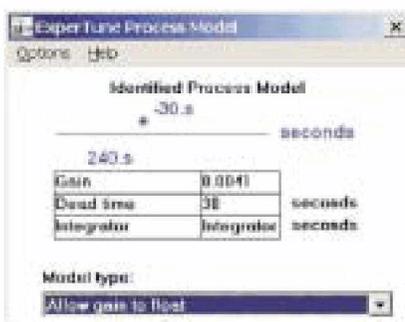


Figura 9. Modelo obtido a partir dos dados obtidos pelo software.

a fonte de problemas de oscilação. Pelo conhecimento dos principais períodos de oscilação, é possível saber se a causa é vibração, ajuste das malhas, interações entre malhas ou problemas mecânicos (histerese, agarramento).

Se o problema identificado for de ajuste nas malhas, o uso de modelos destas malhas permite calcular, em poucos minutos, os ajustes do PID que fornecem os melhores resultados em face de variações tanto na carga quanto no set point, além da possibilidade

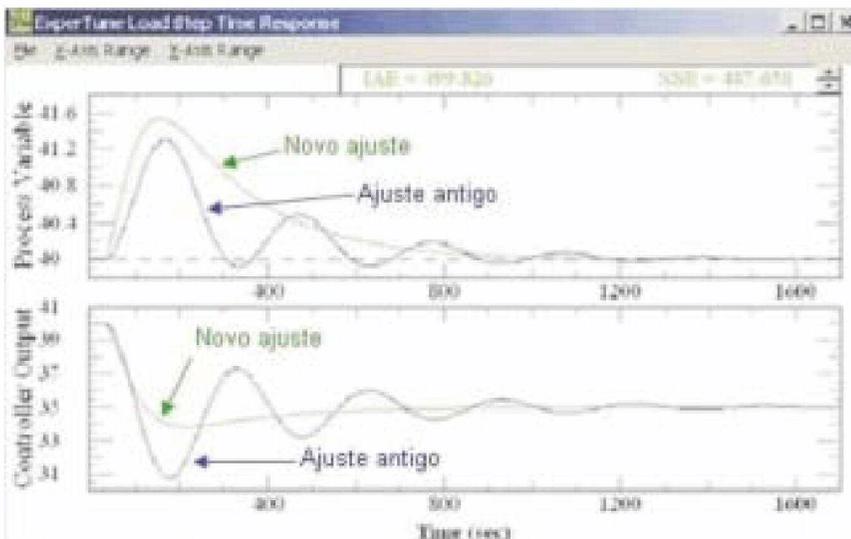


Figura 10. Resposta do sistema à variação na carga e no set point com o uso dos parâmetros antigos (em azul) e novos (em verde).

de simular a resposta do processo diante de tais variações.

Os resultados apresentados comprovam o potencial de ganho econômico no uso do software de monitoramento, avaliação, diagnóstico e sintonia de malhas.

BIBLIOGRAFIA

BUCKBEE, G., SWARTZ, J. *Consistently controlling consistency*. Instrumentation, Systems and Automation Society, 2001

EMOND, M., NAUD, S., LAGACÉ, J. *New Performance Monitoring software cutting edge technologies*. Pulp & Paper Canada, 105:5, Pags. 19 a 23, 2004.

FONSECA, M. O., Seixas Filho, C., TORRES, B. S. *Avaliação de desempenho e auditoria de malhas de controle*. Intech, 63, 32-37, 2004.

GERRY, J., RUEL, M. *Simulation on the road to optimization*. Control Solutions, November, 2002.

RUEL, M. *PID Tuning and Process Optimization Increased Performance and Efficiency of a Paper Machine*. ISA 2000, New Orleans, USA.

RUEL, M., GERRY, J. *Quebec quandary solved by Fourier transform*. Intech, 45: 8, 53-55, 1998.

TORRES, B. S., FONSECA, M. O., AQUINO, R. D., FARIA, D. C. *Aplicação de software dedicado para diagnóstico de malhas de controle, sintonia e redução de variabilidade de processos*. 4º Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação - ISA Show South America, São Paulo/SP, 2004a.

TORRES, B. S., FONSECA, M. O., PASSOS, L. F., FARIA, D. C. *Avaliação de desempenho, diagnóstico automático e sintonia de malhas de controle auxiliados por software dedicado*. Revista Controle & Instrumentação, Ano 10, Número 98, Novembro, Págs. 69-75