

AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE PROJETOS DE CONTROLE AVANÇADO DE PROCESSOS

Autores*: Ronaldo Neves Ribeiro¹
Edson Strugo Muniz²
Rajendra Metha³
Song Won Park⁴

RESUMO

O presente trabalho objetiva fazer uma avaliação econômica dos resultados alcançados com a implementação de Controles Avançados de Processos (APCs) em indústrias de celulose e papel. Para isso, são primeiramente descritos alguns conceitos básicos e em seguida citados casos práticos de aplicações de que se têm dados dos efeitos. As empresas têm investido nesta tecnologia, há muitas aplicações em operação e vale discutir, passada a euforia dos resultados iniciais, quais são efetivamente os benefícios obtidos ao longo dos anos e, ainda, como mantê-las em plena capacidade de controle, isso mediante ações de manutenção para que efeitos alcançados inicialmente sejam melhorados ao longo da utilização. São apresentados resultados de projetos implantados nas empresas Cenibra e Klabin.

Palavras-chave: Celulose e papel, controles avançados de processos, redução de custos, variabilidade

INTRODUÇÃO

O foco em redução de custos de produção tem alavancado investimentos em melhorias, especialmente mediante utilização dos recursos da automação, comentam Figueirêdo *et al.* (2010). Como exemplos, a utilização dos APCs (Advanced Process Control) e a otimização. Nos últimos anos as empresas têm investido milhões de dólares em sistemas com esse foco, objetivando redução dos custos operacionais e maior estabilidade nos processos produtivos. Em alguns países essas tecnologias já são aplicadas há anos, mas no Brasil esta barreira só foi quebrada depois do fim da reserva de mercado de informática, no final dos anos 80.

Justificar melhorias de sistemas de controle é sempre um desafio para profissionais da área de automação. Visto que a implementação

de sistemas de controle é projeto de engenharia, as considerações sobre tal projeto também incluem importantes conceitos como: desempenho, análise de investimento, avaliação de riscos e avaliação econômica, como qualquer outro incremento de negócios. Entretanto, sistemas de controle avançado de processos como projetos de automação, assim como projetos de sistemas de informação, incluem considerações específicas de benefícios e de estratégias que são próprias da área de automação.

Este texto não pretende ser um tutorial ou curso sobre avaliação econômica, e sim um conjunto de considerações que vem de experiências maduras dos autores para possivelmente servir como guia a praticantes do setor. Para tanto serão incluídas, sempre que possível, as referências bibliográficas, e na conclusão do trabalho incluídas descrições resumidas de aplicações e retornos que foram reais na prática industrial dos autores.

Os sistemas APCs têm por finalidade estabilizar os processos, reduzir a variabilidade das variáveis críticas, estabilizar a qualidade dos produtos, incrementar o rendimento e, conseqüentemente, reduzir os custos de produção focando atuações nos consumos específicos de insumos. Para garantir estes objetivos, os projetos APCs devem possuir indicadores de desempenho que estabeleçam os resultados antes e depois da implementação, para isso, a escolha de uma boa empresa parceira é fundamental para construir uma relação com ganhos para fornecedor e usuário.

Os modelos preditivos têm sido utilizados em muitas aplicações de APCs, mas as variáveis dinâmicas (*online*) são essenciais para a composição de um controle avançado. Logo, quando há a decisão de implantação destas ferramentas, os sensores de campo devem apresentar informações confiáveis e os elementos finais de controle (válvulas, por exemplo) devem funcionar adequadamente para que os APCs tenham efetividade.

* Referências dos autores:

1. Cenibra - Rodovia BR 381, km 172, Belo Oriente, MG – CEP 35196-000 – Brasil. Telefone +55-31-3829-5235. E-mail: ronaldo.ribeiro@cenibra.com.br
2. Klabin - Rodovia BR 116, km 218, Correia Pinto, SC – CEP 88535-000 – Brasil. Telefone +55-49 3243-7360. E-mail: emuniz@klabin.com.br
3. Consultant
4. Universidade de São Paulo – USP. Escola Politécnica. Av. Prof. Luciano Gualberto, 380, CEP 05508-010 - São Paulo – Brasil

Autor correspondente: Ronaldo Neves Ribeiro – E-mail: ronaldo.ribeiro@cenibra.com.br

Com foco na redução de custos, este artigo relaciona algumas aplicações práticas de implantações de APCs em indústrias de celulose e papel, demonstrando resultados obtidos nas plantas da Cenibra e da Klabin-Correia Pinto.

MÉTODOS

Os projetos de Instrumentação/automação e uma avaliação econômica

Todo projeto pressupõe um bom gerenciamento, e os projetos industriais não fogem às boas regras de planejar, organizar, sequenciar etapas, controlar a implantação e outros aspectos relevantes de gerenciamento de projetos (ver, por exemplo, *PMBOK - Project Management Book of Knowledge*, ou livro escolar de A. B. Badiru *et al.*, 2008). Mas a complexidade de um projeto de automação industrial vem do fato de que, além de efeitos de tempo e custos, há necessidade de avaliação clara das tecnologias avançadas disponíveis (que sempre são dinamicamente evolventes) e a necessidade de avaliação clara de resultados ou benefícios buscados. Ou seja, para os especialistas que definiram, escolheram e acompanharam esses projetos, após o término do projeto de automação sempre haverá um legado durável de seus efeitos, seja para bem ou para mal, o que faz com que se redobre a atenção sobre investimentos em programas de TI, questões de manutenção e atualização tecnológica de hardware e software, reciprocidade com novas tecnologias e interface e integração com processo produtivo, que também sofrerá mudanças ao longo de tempo.

É por isso que o fator humano interno e externo ao projeto, além de fator ambiental e social dos usuários, tem sempre um peso enorme, quase tanto quanto o fator econômico de um processo produtivo; e é por isso que se investe pesadamente em atualização tecnológica do time de recursos humanos envolvido. Mas isso faz parte de outra abordagem das questões de automação.

Projetos de instrumentação básica e de sistemas de controles básicos de um processo estão razoavelmente integrados ao conhecimento de projetos de processos da indústria química, podendo ser objeto de análise quantitativa de riscos, decisões e escolhas em projetos industriais (ver texto básico de Schuyler, 2001), mas os projetos de controle avançado não são melhores objetos para tais ferramentas. Resumindo: automação, como outros projetos industriais, considera importantes conceitos de desempenho, fluxo de caixa, riscos, estimativa de custos e avaliação técnica do projeto. E, ainda, a identificação de benefícios como: aumento de capacidade produtiva, diminuição de custos de serviços ancilares, aumento de rendimento, redução de resíduos e de poluição, aumento da qualidade e segurança operacional.

Tudo isso requer coleta de informação, avaliação do desempenho atual; levantamento de restrições operacionais; considerações de metas de redução de variabilidade na qualidade; avaliação de escolha de nível de excelência do *hardware* e *software* em relação ao custo dessas qualidades; custos de treinamento, operação e suporte; avaliação e estimativa de custos sobre escolha entre a tecnologia nova e a consolidada; com-

plexidade de atuação e vários outros fatores que impactam no projeto. Portanto, quantificar exaustivamente ou confiar na qualidade do analista do projeto é decisão de risco a ser tomada por gerentes de projetos.

Com se vê no livro simples de Friedmann (2006), não existe bala mágica para montar a avaliação econômica e documentar riscos financeiros de um projeto de automação industrial, e vale sim a pena melhorar o entendimento de conceitos que ajudem a explicar as justificativas de um projeto de automação. Mesmo assim, é muito interessante ler e entender os aspectos de avaliação econômica em geral (livro de Khatib, 2003), onde se considera seleção de projeto e a avaliação em fase de pré-investimento, na aprovação do investimento em si, nas fases operacional e pós-operacional.

O investimento e seu risco sempre são uma consideração ao longo do tempo, e são por isso importantes as questões de taxa de desconto de fluxo de caixa, valores presentes líquidos, fator de recuperação de capital, avaliação financeira de projetos e seu *payback*, além de custos e benefícios, passagem de avaliação financeira para avaliação econômica, confiabilidade de processo ligado a atuação de sistema de automação (isto é, o período de improdutividade ou de parada de fábrica caso a automação não estivesse confiável). Estevez-Reyes (2000), em avaliação de riscos e incertezas sobre os projetos.

Repetindo, dificilmente é algo prático administrar todos esses aspectos quantitativamente, mas o conhecimento de seus conceitos favorece o especialista em automação quando negocia projetos com outros gerentes. Dificilmente a automação entrega algum produto físico em um processo químico industrial, portanto, as considerações relativas a precificação, retorno em caixa e rentabilidade anual fazem sentido concreto. As abordagens para mostrar benefícios e custos se aproximam mais dos conceitos utilizados na medição efetiva e gerenciamento de projetos de ICT, como os de Remenyi *et al.* (2007); Liu *et al.* (2008) e Tohidi (2011).

Dado que os aspectos econômicos em projeto de automação são multifacetados, o que fazer em relação ao seu projeto? Reavaliar, reavaliar e sempre reavaliar todas as etapas de gerenciamento, como em Sisbot (2010). Talvez um dos textos conhecidos sobre justificativa econômica de automação seja um *survey* de Fleischer (1985), isso embora haja textos mais antigos sobre o assunto. Depoimentos muito práticos, mas sinceros e úteis, decorrentes de larga experiência em atendimento a usuários de automação, vêm de Blasi e Puig (2002) e de Martin (2004), que merecem serem lidos.

Como já se disse que para projetos de automação é necessário conhecer as tecnologias que evoluem dinamicamente, pode ser lido, por exemplo, Isermann (2011). O que já foi dito aqui pode ser revisitado em trabalhos de Bauer e Craig (2008) e de Craig e Hennings (2000).

OS PROCESSOS DE CELULOSE E PAPEL

Os processos de produção de celulose e papel possuem características especiais, que os diferenciam da grande maioria. Pode-se dizer que é um processo químico, processos esses que geralmente apresentam alto grau de liberdade, o que dificulta soluções únicas para os problemas a tratar pelos sistemas de controle, além de apresentarem muitas não linearidades.

Diante dessas realidades, os algoritmos de controle convencionais, os PIDs (Proporcional-Integral-Derivativo), possuem muitas limitações para realizarem suas funções com perfeição. Para isto, as metodologias APCs são requeridas e têm sido aplicadas com sucesso nas indústrias de celulose e papel.

De acordo com Foelkel (2007), o setor papelero tem como premissas básicas de necessidades: a alta produtividade, a alta eficiência operacional (poucas quebras, poucos problemas, pouco refugo, poucas paradas), o baixo custo de produção e a qualidade uniforme no processo e nos produtos.

É importante reforçar que todos os papeleros encaram essas necessidades fundamentais, não importando qual tipo de máquina ou de papel estejam utilizando ou fabricando. Para alcançar essas metas a matéria-prima deve ser a mais uniforme possível, com características em uma estreita faixa de variação para não causar impactos e indesejáveis surpresas no processo de produção do papel. Para controlar essa variabilidade, os engenheiros papeleros recorrem ao controle de de várias propriedades das polpas que utilizam.

Os métodos de controle

Os sistemas de controle aplicados às indústrias não mudaram muito nos últimos anos, mas as metodologias de obtenção de modelos e as técnicas aplicadas evoluíram muito com o avanço dos sistemas informatizados, e isso trouxe vários benefícios ao controle dos processos industriais. Podem ser citadas algumas ferramentas úteis para o controle dos processos:

- os algoritmos de controles digitais;
- algoritmos de sintonia automática;
- controles adaptativos;
- controles multivariáveis (MVCs);
- controles preditivos (MPCs);
- sistemas especialistas;
- lógica fuzzy (FLC);
- redes neurais artificiais (RNAs) e suas derivações;
- controle estatístico de processos (CEP).

O objetivo desses controles é fornecer uma operação com a menor variabilidade possível. O resultado final, em uma indústria papelera, depende de qualidade uniforme e dentro dos limites especificados, e perdas ao longo do processo devem ser as mínimas possíveis e aceitáveis, afirmam Narcissus *et al.* (2006). Quando isso acontece, muita coisa pode ser uniformizada na fabricação do papel: refinação, adições de produtos químicos, drenagem, consumo de vapor e de energia elétrica, consolidação da folha, propriedades físico-mecânicas e ópticas, etc. Para tanto, a aplicação correta destas metodologias de controle é vital.

Os projetos Klabin

Controle avançado de qualidade na máquina de papel

O objetivo do controle avançado de qualidade na máquina de papel é fazer com que os controles aplicados na refinação da massa para papel e alguns da máquina de papel sejam comandados por um controlador gerencial, isso podendo ser através de controladores

multivariáveis, cujo modelamento é feito por meio de redes neurais. Para este projeto, tem-se:

- o sistema é um software que roda em computador conectado via OPC com o SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído);
- controle de parâmetros fundamentais mais significativos através da medição do *freeness* (grau de drenagem da massa) e da morfologia da fibra;
- redução da variabilidade do processo;
- melhoria da produtividade do processo;
- as malhas de controle dos refinadores controladas através do controlador multivariável;
- redução da dependência de testes de laboratório e de possíveis erros de operação; fornecendo resposta rápida e automática para o controle do processo;
- melhor lucratividade através da otimização de energia, aditivos para condicionamento das fibras e quebras da folha na máquina;
- produção regular de pedidos conforme especificação e redução de produto com desvio de qualidade.

Rede Neural das variáveis da máquina de papel é apresentada na **Figura 1**.

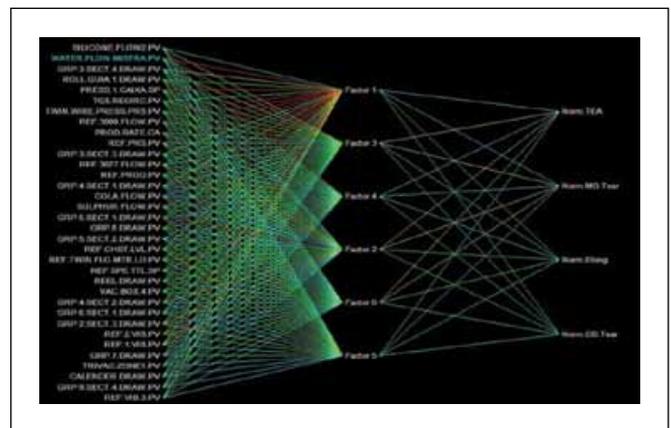


Figura 1. Estrutura do modelo neural para máquina de papel

Fluxograma de controle e pontos de medições de *freeness* e de morfologia da fibra são mostrados na **Figura 2**.

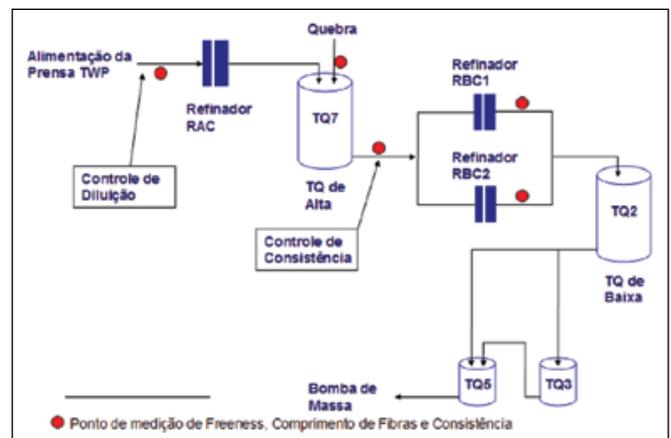


Figura 2. Pontos de medição de *freeness*

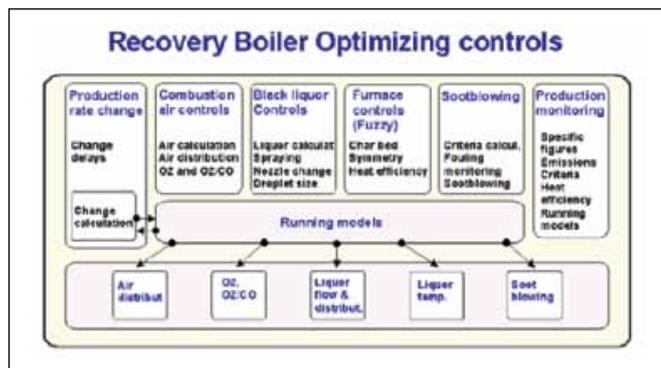


Figura 3. Tela com as variáveis que alimentam o modelo neural

Otimização da caldeira de recuperação

O objetivo da otimização dos controles da caldeira de recuperação é de estabilizar o processo de combustão e igualar as diferenças com o modelo atual.

Mediante inteligência artificial, é utilizado um controle na camada da fornalha responsável pela otimização do tamanho das gotículas. O controle inteligente avalia - baseado no perfil de temperatura da fornalha -, as emissões de gases pela chaminé, o conteúdo de carbono da camada, o tamanho atual das gotículas de licor. Esta inteligência artificial e as medidas correspondentes das gotículas classificadas segundo o tamanho faz com que o controlador aumente ou diminua o *set point* do controlador de estabilização, por exemplo, a diferença de temperatura entre o ponto de ebulição e a medida de temperatura na fornalha (Figura 3).

Como resultado, há melhor desempenho operacional devido à integração dos parâmetros de controle do processo:

- aumento na eficiência da caldeira de recuperação e da planta de evaporação;
- estabilidade do controle de combustão;
- aumento na produção de vapor;
- redução no consumo de óleo na caldeira auxiliar;
- maior estabilidade de controles de processo;
- redução dos custos de manutenções.

Retorno comprovado: US\$ 6,0 milhões/ano (em 2005).

Otimização da evaporação

A função da planta de evaporação é de concentrar o licor negro fraco vindo da linha de lavagem de polpa para sua posterior queima na caldeira de recuperação química. Para a operação da caldeira de recuperação é muito importante manter a concentração do licor negro a mais alta possível.

Os mais importantes benefícios dos controles da planta de evaporação são:

- qualidade estável do licor negro forte;
- alta quantidade de sólidos secos no licor a ser queimado;
- produção adaptada para a disponibilidade de vapor;
- gerenciamento de incrustações;
- uso otimizado do vapor;
- minimização de distúrbios na produção.

Retorno comprovado: US\$ 1,0 milhão/ano (em 2005).

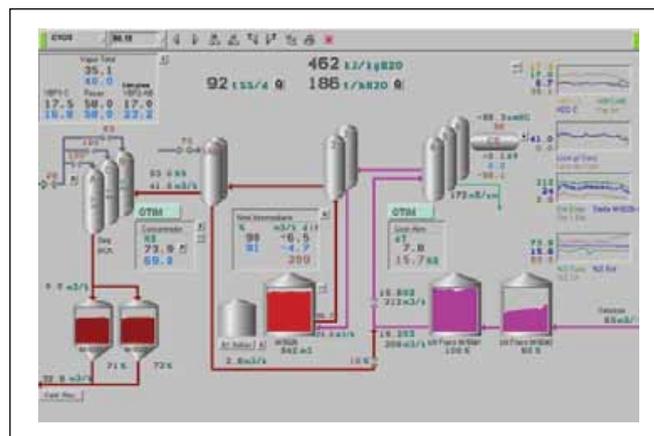


Figura 4. Tela de operação do APC da evaporação (Narcissus et al., 2006)

Tela da otimização da evaporação e apresentada na Figura 4.

Otimização do cozimento

Objetivo da otimização do cozimento é tornar estável e eficiente a remoção de lignina dos cavacos. A estabilização das condições operacionais do digestor reduz a variabilidade do número kappa da polpa produzida, garantindo produto de qualidade. Permite também ajustes de processo que levem à redução do consumo de madeira e/ou produtos químicos, bem como aumento da produção de polpa e redução de vapor.

Destaques do sistema de otimização seriam:

- controle automático da sequência de cozimento;
- controle da qualidade da polpa;
- planejamento da produção.

Retorno comprovado: US\$ 2,0 milhões/ano (em 2002).

Tela de planejamento da produção com controle otimizado (Figura 5).



Figura 5. Tela de planejamento da produção

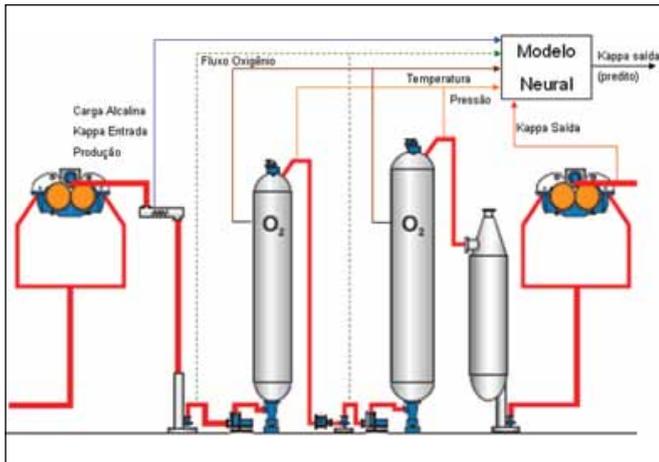


Figura 6. Tela com as variáveis de alimentação do modelo neural (Mine, 2010)

Os projetos na Cenibra

Otimização do pré-branqueamento baseado em redes neurais

Foram desenvolvidas estratégias de controle através da implementação de algoritmos no SDCD com vistas à otimização do sistema mediante utilização do conceito APC, com geração automática de *set points* segundo as variáveis de processo. Foi desenvolvido e implementado um modelo neural para predição do número kappa da polpa na saída e controle das variáveis do processo com base no número kappa predito. A estrutura desta solução pode ser observada na **Figura 6**.

Os resultados foram:

- redução de 41,02% no desvio padrão do pH, com isso melhor controle;
- redução de 3,44 kg/tsa no consumo específico de carga alcalina;
- redução de 1,04 kg/tsa no consumo específico de oxigênio;
- ganho na seletividade da designificação com oxigênio;
- ganho de 2,26 pontos na viscosidade (mPa.s);
- ganho de 1,6 ponto de alvura (ISO);
- manutenção do grau de designificação e alvura;
- diminuição da variabilidade, permitindo maior estabilidade do processo;
- padronização nas dosagens e operação do processo.

Retorno comprovado: US\$ 1,5 milhão/ano (em 2011).

Controle avançado nos processos dos digestores 1 e 2

Utilizando modelos preditivos, dados dinâmicos do processo e ferramentas de controle automático em dois digestores contínuos, este sistema de controle iniciou sua operação em meados de 2009. Diversas malhas de controle foram integradas ao Sistema Digital de Controle Distribuído existente, conectadas através de um link de comunicação OPC.

O teste de performance indicou que após a implementação dos APCs para a linha 1 de cozimento, 69% das análises de número kappa permaneceram dentro da faixa de controle especificada, resultando em melhoria de 93% em termos de variabilidade. Na linha 2, foram 63% os valores contidos na faixa de controle, representando melhoria de 34%. Os ganhos acima possibilitaram benefícios financeiros que justificaram plenamente o projeto.

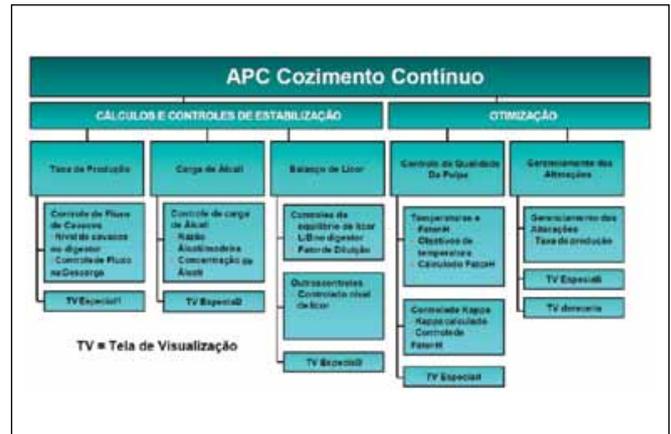


Figura 7. APC para cozimento contínuo – Módulos principais de controle (Figueirêdo et al., 2010)

Para este sistema foram estabelecidas melhorias nos controles como evidenciado na **Figura 7**.

A variabilidade na qualidade dos cavacos foi um dos principais desafios enfrentados pela fábrica, pois a região em que se localiza é bastante montanhosa, resultando em variabilidade natural da qualidade da madeira.

Ribeiro (2007) comenta que uma boa qualidade da celulose, associada a baixos custos de produção, está intimamente correlacionada com os bons resultados no processo de polpação, daí a necessidade de firme conhecimento do processo para bom rendimento do cozimento. Para isto, o número kappa é uma variável de extrema importância para bons resultados operacionais.

Implantação do APC nos digestores 1 e 2 com os objetivos de:

- redução de variabilidade do kappa de saída da polpa;
- aumento no rendimento dos digestores;
- melhoria na qualidade da polpa;
- redução do custo de operação;
- redução no consumo de químicos e de vapor.

Economia anual de US\$ 1,3 milhão/ano no digestor 1 e de US\$ 1,8 milhão/ano no digestor 2 (em 2010).

Modelagem matemática e implantação de APC no processo de caustificação

Um dos objetivos do projeto foi desenvolver um modelo matemático capaz de descrever o processo de caustificação, simular, validar e criticar os resultados obtidos.

O modelo desenvolvido, associado às estratégias de controle preditivo, possibilitou ganhos nesta etapa do processo. Além disso, foi possível a criação de analisadores virtuais, baseados na predição das concentrações de soda e carbonato de sódio no processo.

Para este projeto foi necessária a união de duas tecnologias, a utilização de equipamentos de medição *online* da variável álcali e também das técnicas de controles avançados de processos.

Com a medição *online* é possível controlar o Álcali Total Titulável (ATT) e a Eficiência de Caustificação (EC%) de forma mais eficiente. Assim, é possível chegar a benefícios para a planta como: aumento

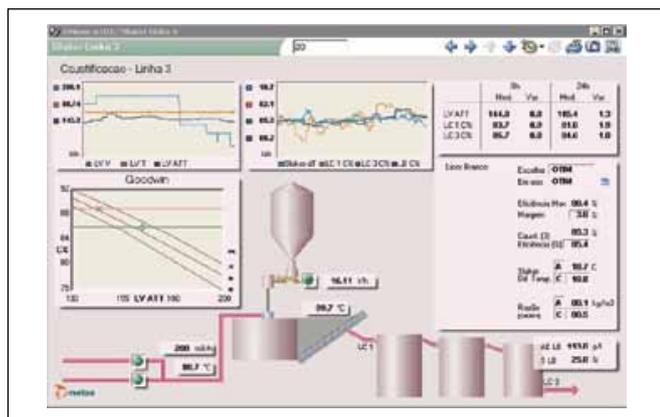


Figura 8. Tela de operação da caustificação (Figueirêdo et al., 2009)

da estabilidade e concentração de Álcali Efetivo (AE) no licor branco, redução do consumo de energia nos digestores, evaporadores, caldeiras e fornos de cal, minimização de dosagem insuficiente (*underliming*) ou sobredosagem (*overliming*) de cal e redução da frequência de lavagem química dos filtros (Figura 8).

Já com o APC é possível atingir estabilidade operacional durante condições de mudança de ritmo de produção, coordenação perfeita entre as medições das variáveis de processo e seus controles associados, melhoria na qualidade do licor branco, operação mais próxima do ponto ótimo de eficiência de caustificação (EC) e sua elevação. O modelo desenvolvido utilizou estratégias de controle preditivo.

A pesquisa sobre o modelo matemático da cinética da reação de caustificação possibilitou o desenvolvimento de uma rotina automática para controle e otimização da dosagem de cal no processo, resultando nos seguintes ganhos:

- redução de 4% na dosagem de cal (kg de cal/m³ de licor);
- redução de 3% no consumo específico de cal fabricada por tonelada de celulose produzida, gerando economia nos fornos de cal de cerca de US\$ 540 mil;
- redução de 14% na compra de cal para *make-up*, gerando economia de cerca de US\$ 190 mil;
- redução de 10% da "carga morta" (Na₂CO₃) do circuito de recuperação.

Eliminação das ocorrências de *overliming*, resultando em:

- maior disponibilidade e eficiência dos filtros de lama de cal, gerando lama com maior teor de sólidos e consequente melhoria na eficiência térmica dos fornos de cal;
- maior estabilidade do álcali efetivo do licor branco, resultando em menor consumo em volume pelo digestor;
- menor teor de sólidos dissolvidos no licor branco, melhorando sua qualidade, reduzindo a carga morta no ciclo de recuperação e diminuindo o grau de incrustações, principalmente nos digestores, evaporadores e caldeiras de recuperação.

Ganhos em torno de US\$ 1,8 milhão/ano (em 2010).

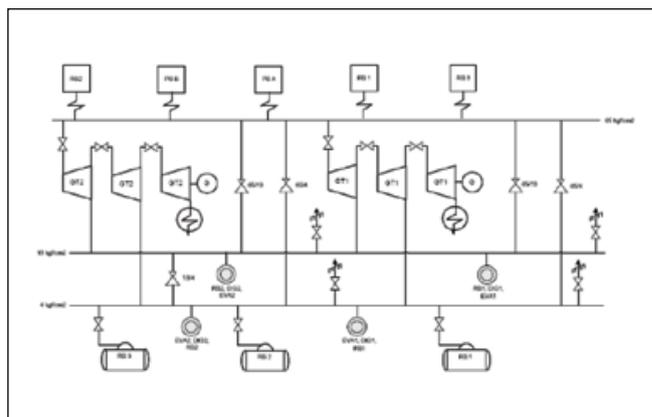


Figura 9. Tela principal de operação do gerenciamento de vapor (Ribeiro et al., 2009)

Controle de gerenciamento de vapor

O Steam Manager é um aplicativo de controle avançado usado para gerenciar a rede de distribuição de vapor. Por meio da supervisão e ajuste de toda a rede, o aplicativo garante que o vapor do processo esteja sempre adequado e disponível para atender a demanda de calor e energia pelos consumidores.

O Steam Manager incorpora controle preditivo baseado em modelo multivariável, na medida em que coordena simultaneamente múltiplas entradas do processo, medições e distúrbios. Este produto é capaz de controlar simultaneamente diversas variáveis da rede de vapor, diagnosticar variáveis primárias e tratar diretamente fatores limitadores. A tela principal de operação pode ser visualizada na

Figura 9.

O início de operação ocorreu sem transtornos operacionais e os resultados puderam ser comprovados desde o primeiro dia de operação. Dois meses após a implementação do projeto foi realizado o teste de performance inicial, e a meta de redução de 90% de descarte de vapor para a atmosfera foi alcançada.

Resultados obtidos:

- melhoria no gerenciamento dos balanços de vapor e energia em ritmo normal de produção;
- melhoria significativa do controle do processo durante perturbações com variações de vapor e energia, consolidando excelentes resultados;
- 90% de redução na perda de vapor de alívio para a atmosfera, equivalente a 10.000 t/mês;
- redução na perda de vapor equivalente a 715 toneladas de óleo por mês. Redução de 2.200 toneladas de emissões de CO₂ por mês.

Ganhos em torno de US\$ 5,1 milhões (em 2009).

Otimização dos fornos de cal utilizando conceito APC e equações de balanços de massa e energia

Calcinação é o processo de conversão da lama de cal (essencialmente CaCO₃) gerada na planta de caustificação em cal (CaO).

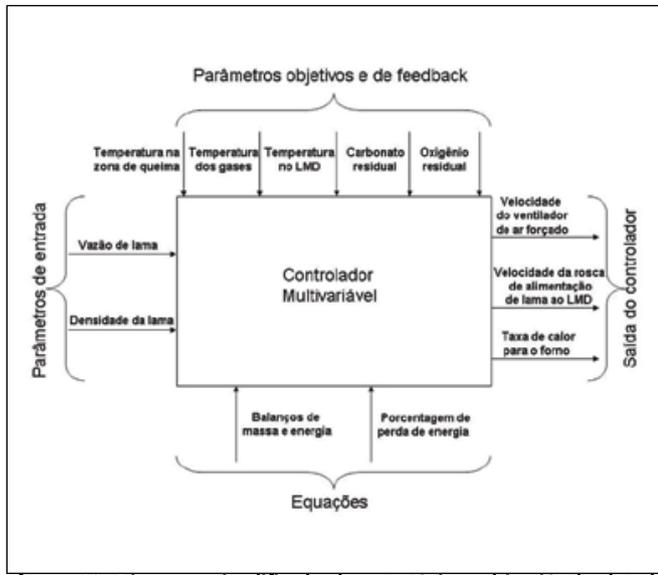


Figura 10. Diagrama simplificado da estratégia multivariável adotada (Castro & Figueirêdo, 2012)

Esta reação ocorre em altas temperaturas em um forno rotativo, que é tanto um reator químico como um dispositivo de transferência de calor. Neste projeto, um controlador multivariável foi desenvolvido para os fornos de cal a fim de reduzir a variabilidade no processo de calcinação e diminuir o consumo específico de combustível.

Este controlador multivariável foi desenvolvido baseado no conceito de APC com geração automática de *set points*, cujos ajustes são automáticos, de acordo com as mudanças nas características do processo. Seu funcionamento é baseado nos princípios termodinâmicos de operação de um forno de cal, bem como na físico-química das reações de combustão e calcinação. Neste projeto o controlador multivariável foi desenvolvido no SDCD, através do qual as principais variáveis de controle do forno de cal são ajustadas automaticamente, sem intervenção do operador.

No passado, o método de controle de calor para os fornos era simples e dependente da ação manual dos operadores. O ponto de ajuste de calor para o forno era definido em mega calorias (Mcal). Algumas estratégias de controle trabalhavam em automático, operando em cascata com algumas variáveis de processo:

- variação da velocidade do ventilador de ar forçado em cascata com o excesso de oxigênio nos gases de combustão na saída do forno;
- variação da velocidade da rosca de alimentação de lama para o LMD (Lime Mud Dryer) em cascata com a temperatura dos gases de combustão do forno e temperatura do LMD.

Embora o principal controle de calor para os fornos fosse totalmente manual, os fornos da Cenibra tinham consumo específico médio de 1,4 Gcal/t de cal, visando um carbonato residual na faixa de 2% a 3%. De acordo com Tran (2011), esse valor já pode ser considerado um bom número para consumo específico de energia em fornos de cal modernos.

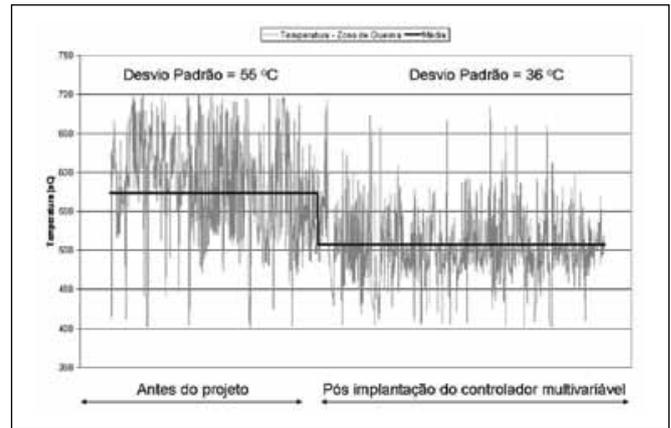


Figura 11. Temperatura da zona de queima. Otimização e redução do desvio padrão (Castro & Figueirêdo, 2012)

Com o objetivo de reduzir ainda mais o consumo específico de combustível dos fornos de cal buscando melhoria na competitividade da fábrica, foi desenvolvido um projeto para melhorar os controles. No diagrama apresentado na **Figura 10** é evidenciado o princípio de funcionamento do controlador multivariável implantado no SDCD.

Os seguintes ganhos foram alcançados após a implantação deste projeto:

- redução acima de 3% no consumo de combustível (economia anual de cerca de US\$ 450.000);
- maior estabilidade nas temperaturas dos fornos;
- manutenção do carbonato residual dentro dos limites desejados;
- melhoria da qualidade da cal para o processo de caustificação.

Além da redução no consumo específico de combustível, outro ganho notável foi a redução de cerca de 65°C da temperatura na zona de queima bem como sua maior estabilidade, com redução de cerca de 35% em sua variabilidade, conforme **Figura 11**. Vale ressaltar que tais fatos favorecem a preservação dos refratários, garantindo uma maior integridade dos fornos de cal.

Ganhos em torno de US\$ 0,45 milhão (em 2009). Para este projeto, vale ressaltar que todos os desenvolvimentos foram com recursos próprios da Cenibra.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os APCs têm permitido, ao longo dos anos, muitas reduções nos custos operacionais em diversos setores industriais. Para os casos das empresas Cenibra e Klabin, as técnicas de controles avançados empregadas evidenciaram redução significativa nos custos de produção, como pode ser observado na **Tabela 1**.

Obviamente, todas essas técnicas e empenhos não são de baixo custo de implantação, contudo, quando é feito estudo adequado dos processos de interesse percebem-se metodologias que auxiliam e facilitam os cálculos dos retornos que cada investimento pode oferecer.

Implantar APCs requer, ainda, adequação na infraestrutura para

Tabela 1. Resultados de projetos de APCs na Cenibra e Klabin

Empresa	Projeto	Resultado US\$ Milhões/ano	ano da medição
Klabin	Controle avançado da qualidade na máquina de papel	N/C	N/C
	Otimização da caldeira de recuperação	6,00	2005
	Otimização da evaporação	1,00	2005
	Otimização do cozimento	2,00	2002
Cenibra	Projeto de otimização do pré-branqueamento baseado em redes neurais	1,50	2011
	Implantação de controle avançado nos processos dos digestores 1 e 2	1,30 + 1,80	2010
	Modelagem matemática do processo de caustificação e implantação de APC	1,80	2010
	Implantação de controle de gerenciamento de vapor	5,10	2009
	Otimização dos fornos de cal utilizando conceito de APC e equações de balanços de massa e energia	0,45	2009

Nota: N/C - Não computado

atender alguns requisitos básicos, como, por exemplo, melhoria nos sensoramentos. Isso inclui melhorar os cuidados básicos do dia a dia; sintonizar adequadamente os controladores PIDs existentes – pois muitas técnicas de APCs os mantêm inseridos na estratégia de controle –, ter um tratamento diferenciado para os elementos finais de controle (válvulas, atuadores e outros), pois esses são os elementos responsáveis por promover as alterações na dinâmica dos processos, e se seu funcionamento não for o adequado toda a estratégia aplicada não dará bons resultados.

Os resultados apresentados foram conseguidos no primeiro ano de operação dos projetos citados. Vale lembrar que, para manter e melhorar estes resultados, é necessária uma ação contínua sobre esses sistemas, sensores e válvulas, e que sintonias dos controles devem ser verificadas periodicamente a fim de buscar resultados ainda melhores. Para isso, é importante ter indicadores de desempenho, e uma equipe adequadamente treinada para promover as melhorias necessárias, seja ela composta de pessoal próprio ou terceirizado.

CONCLUSÕES

Observa-se que os APCs trazem não somente benefícios financeiros aos processos, mas também outros ganhos que não há como mensurar diretamente, mas que possuem relevância considerável na cadeia produtiva. A redução da variabilidade, por si só, reduz a fadiga de equipamentos mecânicos, o que melhora sua disponibilidade.

Para os projetos estudados neste trabalho ficaram evidenciados os importantes resultados financeiros resultantes. Embora a apresentação desses expressivos benefícios, os controles avançados de processos não são investimentos de fácil aprovação, pois, na maioria dos casos, constam como valores elevados no orçamento anual de investimentos. Com este trabalho, os autores apóiam e dão subsídios com casos de usuários reais para favorecer aprovações de possíveis projetos similares.

RECONHECIMENTOS

Agradecimentos especiais aos engenheiros de automação da Cenibra Alessandro S. Castro e Flávio H. Mine, pelos levantamentos dos dados para composição deste trabalho. ■

REFERENCES

- BADIRU, A.; BADIRU, A.; BADIRU, A. - *Industrial Project Management*. CRC Press. 2008.
- BAUER, M.; CRAIG, I.K. - *Economic assessment of advanced process control – A survey and framework*. J. Process Control vol. 18, pp 2-8, 2008
- BLAISI D. A.; PUIG V. F. - *Conditions for successful automation in industrial application - a point of view*. 16th World Congress IFAC, Barcelona 21-26 July 2002.
- CASTRO, A. & FIGUEIRÊDO, L. (2012) - *Projeto de um controlador multivariável para fornos de cal utilizando equações de balanços de massa e energia*. *Controle & Instrumentação*, 36-43.
- CRAIG, I. K.; HENNINGS, R.G.D. - *Evaluation of advanced industrial control projects: a framework for determining economic benefits*. *Control Engineering Practice* vol 8, pp. 769-680. 2000.

6. ESTEVEZ-REYES L. - *Process control reliability: the key to investing in your infrastructure*. ISA Transactions vol.39 pp.115-121. (2000)
7. FIGUEIRÊDO, L. S. - *Modelagem e Simulação do Processo de Caustificação*. Monografia de Conclusão Curso (Pós Graduação Lato Sensu em Tecnologia de Celulose e Papel) – Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, Viçosa, 2006.
8. FIGUEIRÊDO, L. S. - *Modelagem Matemática do Estado Estacionário de um Real Sistema de Caustificação em uma Fábrica de Celulose*. Dissertação (Conclusão do Curso de Pós Graduação Strictu Sensu em Engenharia Industrial) – Centro Universitário do Leste de Minas Gerais – Unileste-MG, Programa de Pós Graduação em Engenharia, Coronel Fabriciano, 2009.
9. FIGUEIRÊDO, L. S., BRANDÃO, H. M.; ONOFRE, R. C.; MAIRIM, M. M.; FURLEY, M. H. & RIBEIRO, R. N. (14 de Outubro de 2010) - *Melhoria na qualidade e redução dos custos operacionais iniciam-se com a utilização de APCs na etapa de cozimento em uma indústria de celulose*. CONGRESSO ANUAL DA ABTCP - SEÇÃO DE AUTOMAÇÃO, p. 13.
10. FOELKEL, C. (15 de Outubro de 2007) - *As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose kraft para a fabricação de papel*. Congresso anual da ABTCP ano 2007.
11. FRIEDMANN, P. - *Automation and control systems economics*. 2nd edition. ISA. 2006
12. ISERMANN, R. - *Perspectives of automatic control*. Control Engineering Practice vol 19, pp. 1999-1407. 2011.
13. KHATIB, H. - *Economic evaluation of projects in the electricity supply industry*. IEE Press.2003.
14. Liu, J.Y-C.; Chen, V.J.; Chan, C-L.; Lie, T. - *The impact of software process standardization on software flexibility and project management performance: Control theory perspective*. Information and Software Technology vol 50 pp. 889-896 (2008)
15. MARTIN, G. - *Improvements in process control through model based techniques- a control system vendor's perspective*. Hydrocarbon Processing 83 (10) 43-46 Oct 2004.
16. MINE, F. H., FIGUEIRÊDO, L. S., TEIXEIRA, R. A. - *Otimização do Processo de Deslignificação com Oxigênio – Estudo de Caso Cenibra*. Revista O Papel, volume 71, número 12, Dezembro 2010.
17. NARCISSUS, A. G.; WALTRICK, C.A.; MUNIZ, E.S.; HOSS, C.P. (2006) - *Otimização do processo de evaporação e da caldeira de recuperação*. Revista O Papel.
18. PORANEN, T., WILLIAMSON, M. - *Variable chips make uniform pulp at Cenibra*. METSO'S Customer Magazine, Fevereiro, 2011.
19. REMENYI, D.; BANNISTER, F.; MONEY, A. - *The effective measurement and management of ICT Costs and Benefits*. Elsevier. 3rd edition. 2007.
20. RIBEIRO, J. C T., ONOFRE, R. C., MÁKILÄ, J., AIRIKKA, P., & RIBEIRO, R. (Outubro de 2009) - *Improvement on the Utilities Area Using Advanced Process Control for Steam Management*. Congresso anual da ABTCP 2009.
21. RIBEIRO, R. N. (2007) - *Utilização de redes neurais artificiais e tecnologia FT-NIR para predição do número kappa em um processo kraft de cozimento de madeira em indústria de celulose*. Coronel Fabriciano: Unileste-MG.
22. SCHUYLER, J. - *Risk and decision analysis in projects*. 2nd edition. PMI 2001
23. Tohidi, H. - *Review the benefits of using Value Engineering in Information Technology Project Management*. Procedia Computer Science vol. 3 pp. 917-924 2011
24. TRAN, H.; VILARROEL, R. - *Challenges in Black Liquor Recovery in Modern Kraft Pulp Mills*. 5th International Colloquium on Eucalyptus Pulp. Porto Seguro, Brazil, May 9-12, 2011.