

VICENTE NUNES CARRILHO

**OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE DE NÍVEL DO SILO DE CAVACOS EM UMA
FÁBRICA DE CELULOSE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2010

VICENTE NUNES CARRILHO

**OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE DE NÍVEL DO SILO DE CAVACOS EM
UMA FÁBRICA DE CELULOSE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título *Magister Scientiae*.

APROVADA: 08 de julho de 2010

Prof. Jorge Luiz Colodette
(Co-Orientador)

Prof. José Lívio Gomide
(Co-Orientador)

Prof. Hélio Garcia Leite
(Orientador)

Dedico primeiramente a Deus, aos meus familiares e amigos que me incentivaram e colaboraram para concretização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Á Lwarcel Celulose Ltda, pelo apoio e disponibilidade de tempo e recursos para a realização deste trabalho.

Á Pedro Wilson Stefanini, pelo apoio e suporte na participação deste curso.

A meus professores e amigos Leandro, Ivan e Marcos Machado pela contribuição.

A todos, que direta ou indiretamente, contribuíram para execução deste trabalho.

BIOGRAFIA

Vicente Nunes Carrilho, filho de Antonio Carrilho e Luiza Artioli Nunes Carrilho, nasceu em 12 de agosto de 1976, em Macatuba, São Paulo.

Em 2001 concluiu o curso de Engenheiro Elétrica, na Universidade Estadual Paulista.

Em 2005 concluiu o curso de MBA Executivo em Gestão Empresarial, na Fundação Getúlio Vargas.

Em 2007 concluiu o curso de pós-graduação em Tecnologia de Celulose e Papel, na Universidade Federal de Viçosa.

Em agosto de 2008, iniciou o curso de pós-graduação no nível de Mestrado Profissionalizante em Tecnologia de Celulose e Papel, na Universidade Federal de Viçosa, sendo o mesmo concluído em julho de 2010.

RESUMO

CARRILHO, Vicente Nunes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2010. **Otimização do controle nível do silo de cavacos em uma fábrica de celulose.** Orientador: Hélio Garcia Leite. Co-orientadores: Jorge Luiz Colodette e José Lívio Gomide.

Este trabalho mostra os resultados da utilização de algoritmo avançado de controle e sensores virtuais para aumentar a eficiência da etapa de pré-vaporização do digestor contínuo no processo de extração de polpa celulósica, através da otimização do nível do silo de cavacos. O sistema de extração de cavacos apresenta vários obstáculos para um controle eficaz, tais como: (1) pontos sem pilha de cavacos durante o movimento de translação das roscas provocando queda repentina do volume de cavacos e conseqüentemente queda repentina do nível de cavacos; (2) compactação e altura da pilha desuniforme provocando alta variabilidade do nível de cavacos; (3) inexistência de informação em tempo real da posição das roscas na tela de operação (4) elevado atraso de medição de vazão e nível de cavacos devido a distância das roscas aos pontos de medições (nível do silo e a balança volumétrica). Para eliminar os pontos sem pilhas de cavacos foram elaboradas oito chaves de fim de curso virtuais, cujo posicionamento é realizado pelo operador na tela de operação para limitar o curso de translação das roscas. Na nova estratégia de controle a medição é realizada por um sensor virtual que prediz já na saída das roscas o volume deslocado, empregando regressão linear múltipla. Com a utilização dos sensores virtuais de volume deslocado, eliminou-se o tempo de retenção do sistema, tornando mais uniforme o volume de cavacos para o silo. A utilização desta nova estratégia de controle aliadas aos sensores virtuais mostrou-se adequada para a resolução do problema, tornou-se o sistema capaz de atender a solicitação do fabricante Andritz (70% do volume de medição +/- 10%). A eficiência do novo algoritmo de controle depende de ajustes, sintonia e de aprendizado com o sistema em operação.

ABSTRACT

CARRILHO, Vicente Nunes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2010. **Optimization of the chip bin level in a pulp mill.** Adviser: Hélio Garcia Leite. Co-advisers: Jorge Luiz Colodette and José Lívio Gomide.

This work shows the results using of advanced control algorithm and soft-sensor to increase the efficiency of the stage of pre-vaporization in the cooking plant process of extracting pulp, by optimizing the level of the Diamondback® chip bin. The extraction system chips presents several obstacles to effective control, such as: (1) points without stack of chips during the transition movement of the extraction system bin in the storage chips and consequently sudden decrease in the volume of chip bin, (2) compaction and uneven stack height causing high variability in the volume of chip bin, (3) without information in real time position of the threads in the operating display (4) high travel time between the extraction system and measurement points (volume of the silo and the balance volume). To eliminating the section without chips were available eight virtual switches limits, positioned by operator, on the operation screen, limiting the transition movement of the extraction system chips. The new control strategy the measurement is performed by a soft-sensor that predicts the volume of chips, using multiple linear regression. Using soft-sensor to measurement volume, so the retention time of the system was eliminate and decrease the variability of volume of chips bin. Using this new control strategy allied with soft-sensor proved to be adequate to solve the problem, the system became able to request of the Andritz company (70% + / - 10% of measurement section), The new control algorithm efficiency depends of the adjustments, tuning and learning with the system in operation.

INTRODUÇÃO

O processo de extração de celulose Kraft utilizado para dissolução da lignina e a liberação das fibras para produção de polpa celulósica, começa pela obtenção de cavacos no pátio de madeira, onde os cavacos são picados, armazenados e enviados para o silo de cavacos, para alimentação de um digestor onde ocorre a dissolução da lignina e a liberação das fibras.

Os cavacos de madeira possuem ar e água em seus interiores, pois a madeira nunca está nas condições ideais de umidade para utilização industrial. O ar é a mais séria barreira à impregnação, muito mais que a umidade dos cavacos. Ele é retirado por diferença de pressão durante a pré-vaporização dos cavacos, realizada em vasos ou silos desenhados para essa finalidade. Em geral, utiliza-se vapor recuperado da expansão ("flash") do licor preto que sai em alta temperatura e sob pressão do digestor. Essa vaporização pode inclusive ser em ambiente não pressurizado, usando vapor saturado a cerca de 105°C. Quanto mais tempo os cavacos receberem esse banho de vapor, melhor ficam: pois são mais aquecidos, umedecidos e perdem ar (FOELKEL, 2009).

O tempo de retenção dentro do vaso ou silo é proporcional ao nível do silo de cavacos. Com isso, a otimização do controle do nível do silo de cavacos reflete diretamente em ganhos de eficiência na pré-vaporização e conseqüentemente ganhos de processo.

Um das formas, por meio de recursos de controle automáticos para melhorar a pré-vaporização, para garantir mínimos teores de ar nos cavacos é a redução da variabilidade e otimização do nível do silo de cavacos. A recomendação do fabricante (ANDRITZ) de silo de cavacos é manter o *setpoint* de nível do volume de medição em 70% com uma variação para cima e para baixo de 10%. A dificuldade de manter o nível nesta faixa se dá pelo elevado tempo morto, ou seja, tempo para o descolamento dos cavacos entre as roscas extratoras e o silo de cavacos.

O volume de cavacos extraído pelas roscas extratoras é proporcional a velocidade e carga do motor. Quando se aplica uma carga ao motor, têm-se a conseqüente diminuição da velocidade do motor, ou um aumento do

escorregamento, o que leva a um aumento da frequência rotórica e de sua reatância. Como consequência, aumenta-se a corrente de estator que produz trabalho. Esta variação está ligada ao fluxo do entreferro. Assim, tem-se diretamente um aumento do torque do motor, equilibrando-se ao torque que se impõem ao eixo do motor, torque resistente (ALAOR, 2009).

Nas roscas extratoras para manter o torque constante são utilizados inversores vetoriais *sensorless*.

O controle *sensorless* tem uma eficiência um pouco menor que um controle por malha fechada, que utiliza um sensor de velocidade (encoder) para realimentação, mas possui melhor desempenho de resposta se comparado a qualquer sistema escalar (ALAOR, 2009).

Quando é possível saber como e porque determinadas situações ocorrem, é possível também antecipar os acontecimentos futuros, então é necessário reconhecer e identificar padrões e regularidades, organizar e representá-los; para estimar e prever o comportamento futuro.

A dificuldade de se encontrar um modelo matemático pode ser, em alguns casos, contornado pela introdução de conhecimento e experiência do projetista de controle ou incorporando a experiência e conhecimento heurístico de um operador humano, que podem controlar um sistema complexo – mesmo que ele não entenda completamente os primeiros princípios da física ao processo que se deseja manipular.

A existência de conhecimento heurístico de especialistas; a concentração de conhecimento inerente no controle de sistemas; e a existência de dados armazenados, são razões para que cada vez mais a utilização de estratégias avançadas e sistemas inteligentes sejam utilizados. O conhecimento heurístico pode estar disponível através da análise de dados operacionais armazenados ou pode ser na forma empírica expresso na forma de regras.

É possível observar na literatura que diversas técnicas são empregadas para a identificação de modelos utilizados pelos Sensores Virtuais (*soft-sensors*). Esses métodos podem ser classificados e divididos em três grandes grupos: (1) Modelos Fenomenológicos – obtidos através de uma abordagem analítica, são os chamados modelos mecanicistas, derivados dos princípios básicos ou

fundamentais; (2) Modelos Empíricos - provenientes de dados obtidos em laboratório; (3) Modelos Caixa-Preta - obtidos de dados operacionais através da aplicação de algoritmos como redes neurais, computação nebulosa e/ou métodos estatísticos, tais como análise multivariável e PLS (*Partial Least Squares*);

As grandezas elétricas dos motores das roscas extratoras podem ser utilizadas em técnicas de regressões para prever o nível do silo, funcionando de modo similar a uma balança integradora instalada logo após a esteira transportadora situada abaixo das roscas, com a vantagem de não ter custo adicional de projeto e de manutenção.

O objetivo deste estudo foi demonstrar o emprego de um algoritmo avançado de controle e sensores virtuais para aumentar a eficiência da etapa de pré-vaporização do digestor contínuo, no processo de extração de polpa celulósica, através da otimização do nível do silo de cavacos.

MATERIAL E MÉTODOS

Metodologia

A estratégia de controle proposta neste estudo tem por objetivo contornar os seguintes problemas: (1) evitar o movimento de translação das roscas extratoras em pontos sem pilha de cavacos; (2) disponibilizar em tempo real através de sensores virtuais a posição das roscas na tela de operação; (3) reduzir o elevado atraso de medição de nível e vazão de cavacos devido a distancia entre as roscas extratoras e pontos de medições reais (nível do silo e a balança volumétrica) com a adoção de sensores virtuais de vazão.

Chaves fim de curso virtuais

A primeira parte do trabalho foi disponibilizar 8 chaves fim de curso virtuais, conforme figura 1, com controle de posição na tela de operação, permitindo o operador ajustar o curso de translação desejado das roscas extratoras na tela de operação, figura 2, eliminando desta forma os pontos vazios do barracão de estocagem e conseqüentemente as quedas repentinas de volume de cavacos e nível no silo de cavacos.

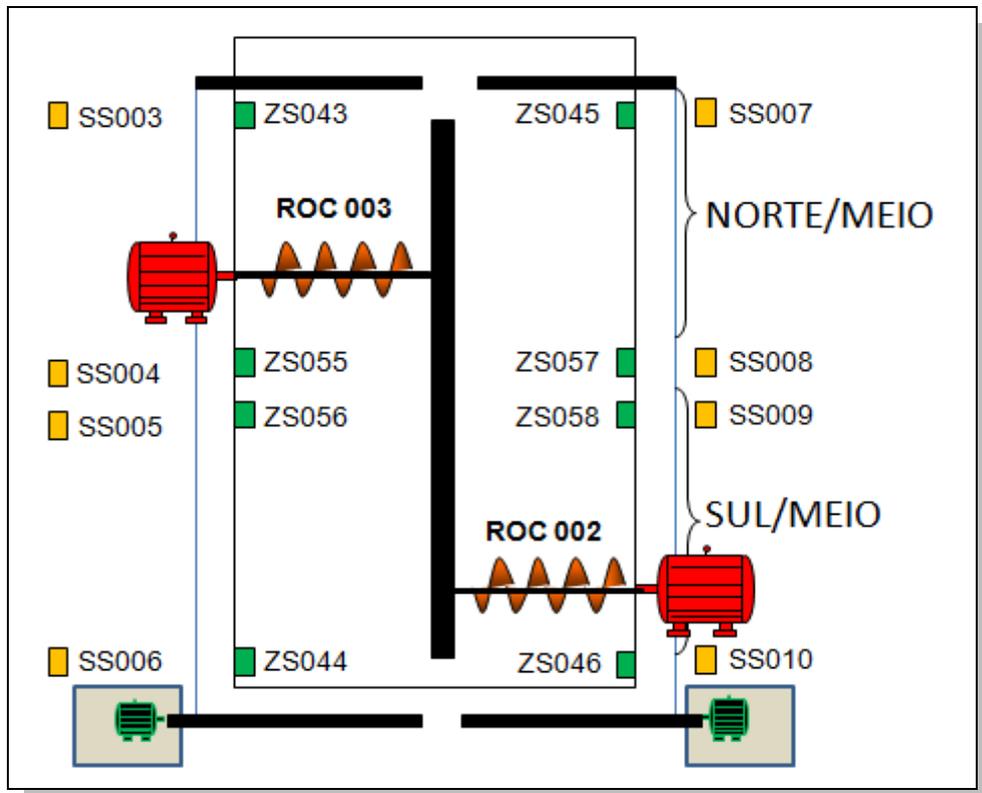


Figura 1: Vista superior do barracão de estocagem e as chaves fim de curso virtuais SS003 ao SS010.

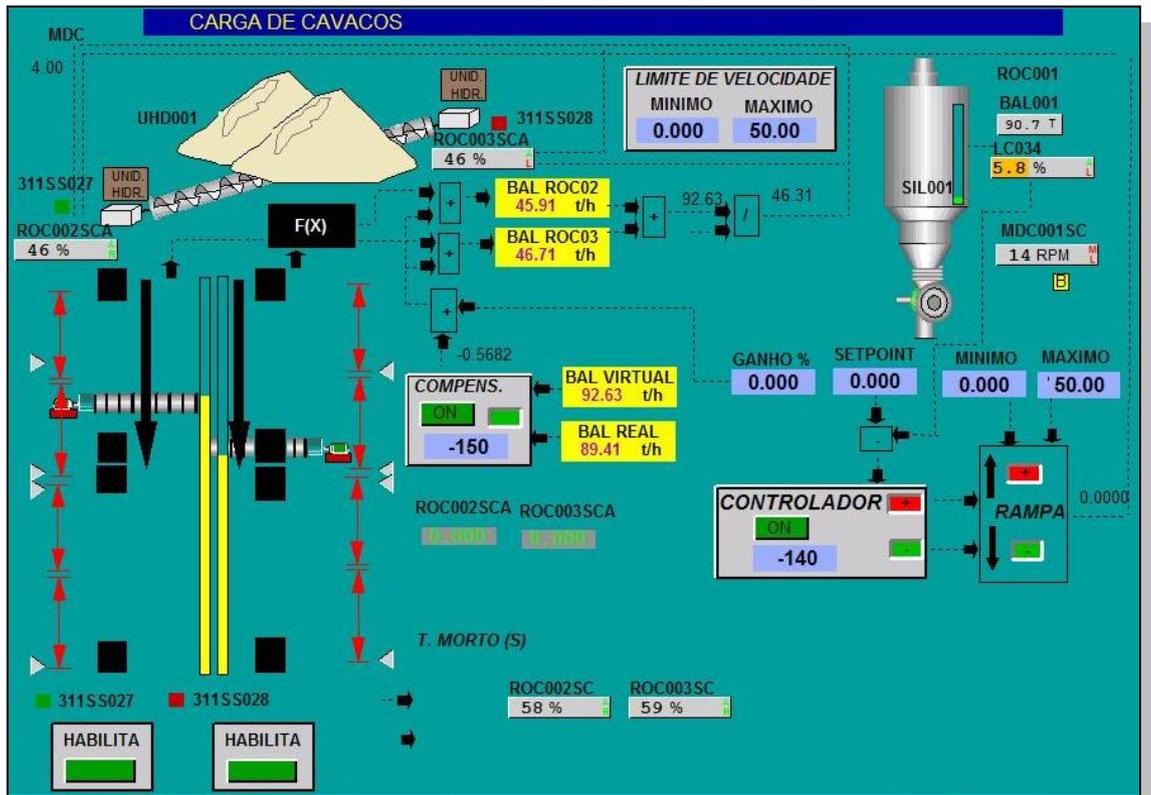


Figura 2: Tela de operação.

Sensor de posição

A partir de sensores de posição e um *encoder* já disponíveis na planta, foi elaborado um sensor de posição que mostra a posição da rosca na tela de operação (Figura 2) durante o movimento de translação (Figura 1), permitindo o correto posicionamento das chaves fim de curso virtuais e o cálculo do tempo morto, ou seja, tempo de deslocamento dos cavacos entre as roscas de extração e o silo de cavacos, utilizado no controle avançado.

Sensores virtuais de vazão de cavacos

Utilizando os softwares comerciais disponíveis na Lwarcel, PI (*Plant Information*) da *Osisoft*® e *Statistica*® da *StatSoft*, foram coletados dados da planta para elaboração de dois sensores virtuais, um para medição virtual de vazão de cavacos e outro para medição virtual de nível para antecipar a medição de nível entre 2 e 3 minutos aproximadamente, através de regressão linear múltipla.

Com o tempo morto, foram refaseadas as variáveis no software PI refaseadas para os dados para utilização na elaboração das funções transferência para o sensor virtual e para futuras calibrações das mesmas no software *Statistica*®.

Os sensores virtuais de vazão e nível de cavacos possuem função preditiva e adaptativa.

Função preditiva: tipo caixa preta, prediz o volume descolado em cada rosca, desenvolvido a partir de regressão linear múltipla a partir de grandezas elétricas dos motores das roscas extratoras (variáveis independentes): (1) Corrente elétrica - MC (2) Tensão Elétrica - MT e (3) Velocidade – MV e sensor de nível do silo de cavacos, refazeados no tempo de acordo com a balança volumétrica (variável dependente).

Função adaptativa: fator de ajuste (FA) para ajustar o “offset” do sinal do sensor virtual em relação ao sensor real (balança volumétrica), devido a limitação no sistema o offset não é corrigido por correlação e sim pela média dos sinais durante o tempo referente ao tempo morto do processo.

Desta forma a equação do sensor virtual de vazão (SS001) e do sensor virtual de nível (SS002) é ficou definidos respectivamente pelas seguintes equações:

$$SS001 = a + b * MV + c * MC + d * MT + FA$$

Onde as constantes *a*, *b*, *c* e *d*, são parâmetros definidos por regressão linear múltipla pelo software *Statistica*.

BLOCO DE REFASEAMENTO

As variáveis independentes foram defasadas em tempo real de acordo com a posição das roscas e disponibilizadas no software PI (OsiSoft, INC, 2010) para elaboração de curvas através de regressão linear múltipla no software *Statistica*® (StatSoft, INC, 2010) e futuras calibrações das mesmas.

O calculo do tempo morto é fundamental para o refaseamento das variáveis e para a precisão do sensor virtual de nível, pois o tempo morto total pode variar entre 116,43 e 176,85 segundos.

ESTRATÉGIA DE CONTROLE

A estratégia de controle foi configurada no sistema de controle SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído) Foxboro I/A do digestor e o controle disponibilizado numa tela de operação, Figura 2.

No diagrama em blocos da Figura 3 mostra a estratégia proposta utilizando algoritmo avançado de controle e sensores virtuais para o controle do nível do silo.

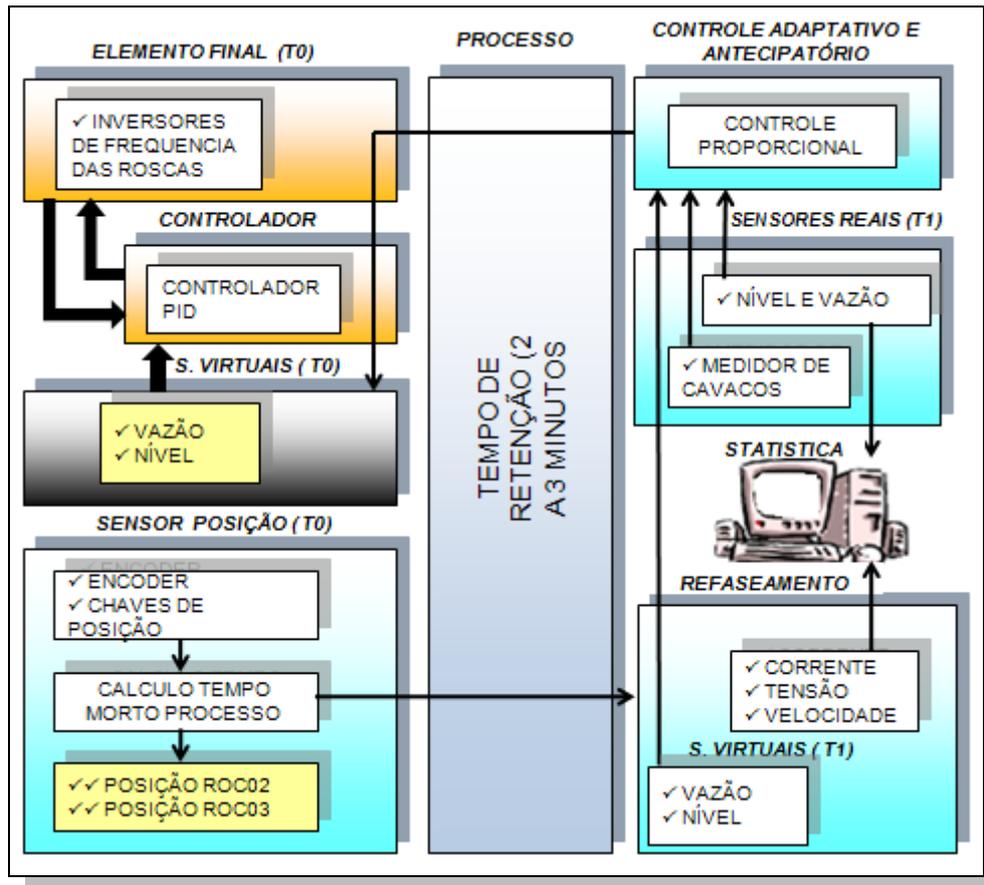


Figura 3: Diagrama em blocos da estratégia de controle.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O objetivo do trabalho foi de manter o nível em 70% (+/- 10%) pelo projeto original da Andritz, onde a altura de medição era 3,2 m, devido a problemas de manutenção esta sonda foi trocada por uma de altura igual a 1,8 m, conquentemente o objetivo passa a ser 47% (+/- 17%).

Na figura 4 pode ser observado o resultado da implementação, nos três primeiros ciclos de translação (ver linha de tendência vinho) com a translação sem limitação (100% de seu curso), pode se observar uma queda repentina do nível de cavacos provoca pela falta de cavados na extremidade norte do barracão de estocagem, nos próximos ciclos com a movimentação limitada em 75% da translação, com as roscas transladando na região onde existem cavacos, não ocorre mais repentina de nível (ver linha de tendência azul).

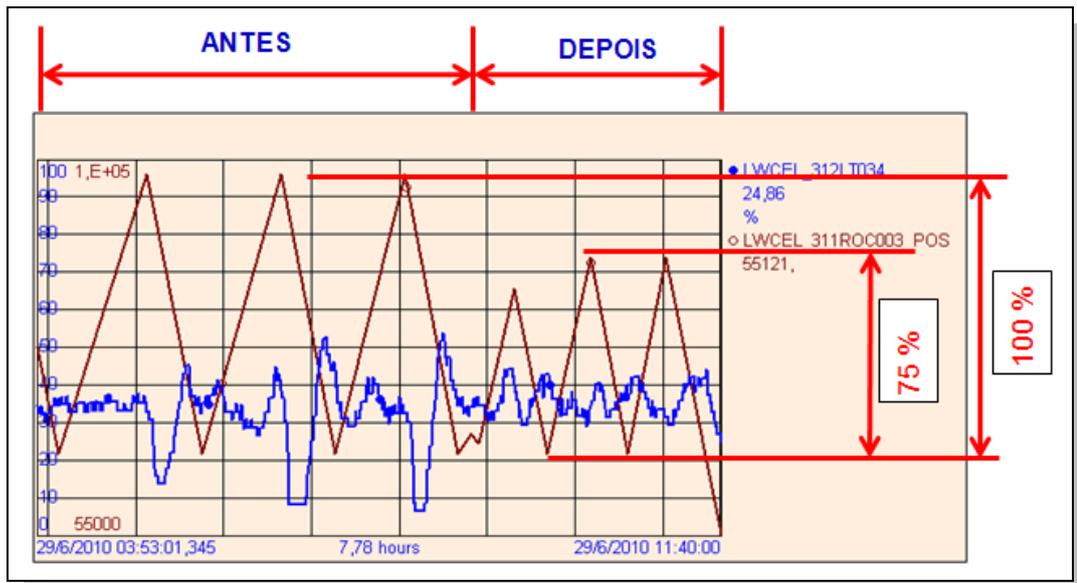


Figura 4: Gráfico de tendência do nível.

Através de análise via aplicativo de controle estatístico de processo desenvolvido internamente, foi ajustado os limites de controles e de especificação para 10% (Figura 5). Foi verificado que durante o período do dia 25/04 a 24/05/2010, o nível ficou aproximadamente 10% do tempo abaixo de 10%, ou seja, sofreu queda repentina devido a pelo menos uma das roscas estarem se transladando por regiões desprovidas de cavacos (Figura 6).

Resumo Estatístico			
TAG:	LWCEL_312LT034		
Valor Méd:	32,159366	DP:	13,24417
Valor Máx:	99,437957	CP:	1,13257
Valor Mín:	3,5911593	CPK:	0,55771
Valores Ideais:		CP \geq 1,33 e CPK \geq 2,0	
		LSE	100
		LSC	100
		META	100
		LIC	10
		LIE	10

Figura 5: Limites de controle e especificação da carta de controle.

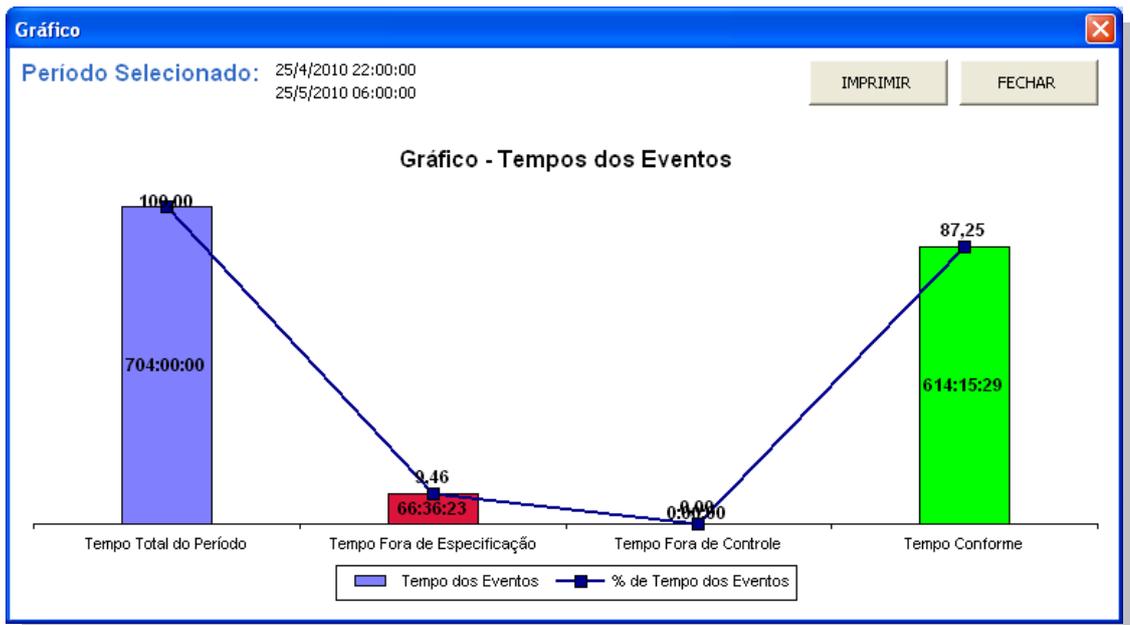


Figura 6: Resultado da carta de controle.

A linha azul do gráfico de tendência da figura 7 mostra o nível do nível após a implementação da nova estratégia de controle. Os sensores virtuais de vazão de cavacos ao detectar queda de corrente elétrica nas roscas, aumentam imediatamente a velocidade das mesmas para manter o fluxo de cavacos constante.

A linha amarela o nível do gráfico de tendência da figura 8, mostra o nível antes da implementação do novo algoritmo de controle.

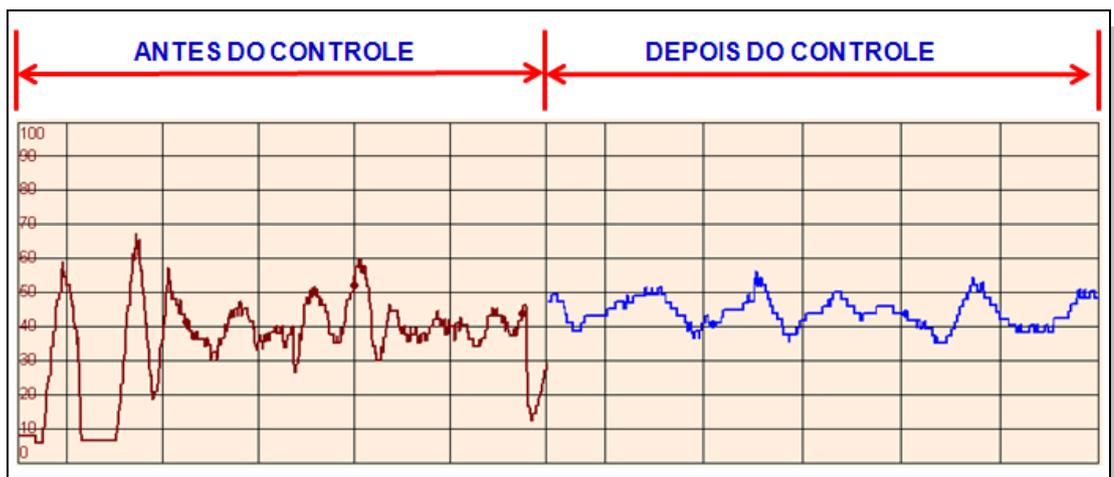


Figura 7: Nível do silo antes e após o controle avançado e sensores virtuais.

A eficiência do controle do nível depende do posicionamento dos fins de cursos virtuais realizado pelo operador, o posicionamento é realizado verificando os pontos de perda de corrente elétrica dos motores que em regime nominal fica em torno de 44%, quando entram em regiões sem cavacos as mesmas caem para um pouco menos de 30%.

O sistema pode utilizar desta informação para fazer a reversão automática do sentido de translação e posicionar automaticamente os fins de cursos virtuais ou enviar um sinal de alarme para o operador e disponibilizar a informação de posição onde há incidência de vazios para que ele faça o posicionamento manualmente.

Na tabela 1 podemos comparar o controle utilizado no trabalho em questão com um convencional com o controlador PID (Proporcional Integral e Derivativo) e um controle avançado fornecido por empresas terceiras..

Característica	PID	C.A.	Trabalho
Controla processos de longo tempo morto	x	✓	✓
Reage antes de sair do objetivo	x	✓	✓
Lida com processos não lineares	x	✓	✓
Ajusta alterações no processo	x	✓	✓
Aprende enquanto a fábrica esta em funcionamento	x	✓	x
Mantém o <i>setpoint</i> em 70% (+/- 10%)	x	✓	✓
Sem custo adicional de Hardware (Servidores)	✓	✓	✓
Utilização de memória do sistema de controle (SDCD e PLC)	✓	x	✓
Depende de sensor real (Balança Integradora)	✓	x	✓
Sem custo de manutenção, licença de software	✓	x	✓

Tabela 1: Comparação entre estratégias de controle

CONCLUSÕES

A utilização de controle avançado aliado com sensores virtuais mostrou-se eficaz e econômica, não foram gastos com equipamentos e sensores, apenas utilizou de memória do SDCD e PLC.

O controle antes totalmente incapaz de manter o volume dentro de uma faixa de medição, após a utilização de sensores virtuais e algoritmos de controle avançado tornou-se capaz.

Dentre os ganhos esperados com o novo sistema de controle podemos citar: (1) Redução da variabilidade do número Kappa; (2) Redução do teor de rejeitos e carga alcalina no digestor contínuo; (3) Segurança e facilidade operacional (Ajuste de posição na tela de operação); (4) Maior disponibilidade/confiabilidade (elimina sistemas mecânicos de medição); (5) Redundância – sensores virtuais substituem temporariamente os sensores reais; (6) Sem custos com equipamentos para implementação do novo sistema de controle, apenas recursos de memória do sistema de controle SDCD (6%) e PLC (desprezível).

Os sensores virtuais e controle avançado mostram eficazes para solução de sistemas complexos e com elevados tempo de retenção, estas técnicas de controle elevam o conceito da instrumentação, exigindo o conhecimento profundo em técnicas de modelagem e identificação e análise de sistemas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o controle ficar mais estável o posicionamento das chaves fim de curso virtuais pode ser feita automaticamente. Também devemos levar em conta futuros ganhos com a melhoria da sintonia do sistema, e ajustes resultante do aprendizado durante o funcionamento do sistema.

Esse tipo de controle avançado e sensores virtuais, utilizando recursos e blocos de configuração do SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído) e do PLC (Programador Lógico Programável), podem ser adotadas em outras partes do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAOR, M. S. Controle de velocidade e torque de motores trifásicos. 2008. Disponível em <<http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/326>>. Acesso em 10 set. 2009;
- ANDRITZ. Manual de instalação, operação e manutenção do digestor contínuo. ANDRITZ manual; 2004;
- FOELKEL, C.E.B. O processo de impregnação dos cavacos de madeira. Eucalyptus on line book & newsletter. 2009. Disponível em <www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT15_ImpregnacaoCavacos.pdf>. Acesso em 13 out. 2009;
- ZANELLA. Manual de operação do pátio de madeira. ZANELLA manual; 2003;
- OSISOFT – Software para aquisição de dados de processo. (OsiSoft, INC, 2010);
- STATISTICA – Software para tratamento estatístico de dados. (StatSoft, INC, 2010);
- ROCKWELL. Manual do inversor de frequência 1336 *plus* II. ROCKWELL manual; 2010;
- STATISTICA – Software para tratamento estatístico de dados. (StatSoft, INC, 2010)

APÊNDICE A

O PÁTIO DE MADEIRA

O pátio de madeira da fábrica de celulose onde foi conduzido o presente estudo abrange o manuseio e a preparação da madeira, a partir do momento em que esta chega à fábrica, até o momento em que é enviada à área de polpação (Figura 9).

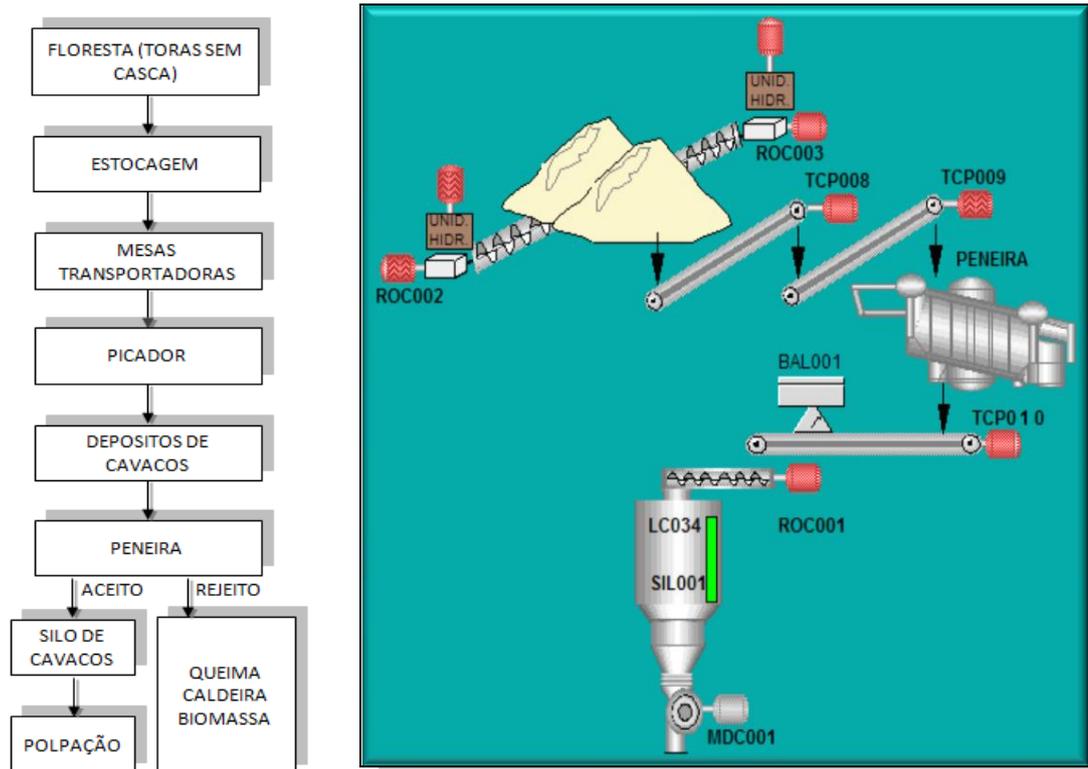


Figura 9: Fluxograma resumido e ilustração do Pátio de Madeira.

Na etapa de extração dos cavacos, o acionamento das roscas extratoras é independente e pode ser feita por uma das seguintes opções de seleção, conforme Figura 10 (ZANELLA, 2003): Sul / Meio (Seção A) ou Norte / Meio (Seção B). As roscas podem operar nas mesmas seções ou em seções diferentes, por exemplo, ROC002 na seção A e ROC003 na seção B.

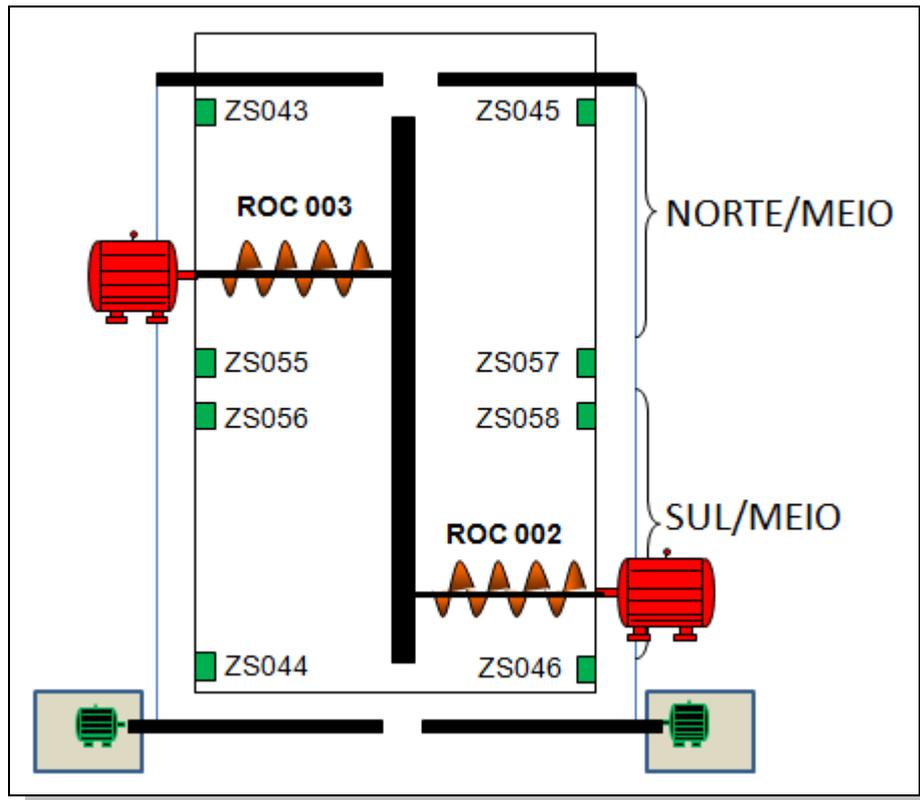


Figura 10: Seções de extrações das roscas.

As roscas de extração assumem a metade da potência necessária para a extração de cavacos, ou seja, 50% na ROC002 e 50% na ROC003, conforme sinal recebido pelo sistema de controle.

Numa fase seguinte, o Transportador TCP008 transporta os cavacos do depósito de cavacos até o transportador TCP009. O tempo de transporte dos cavacos do início ao fim da esteira (Tempo Morto) ROC002 é de 0 a 29,26 s na Seção A e de 29,88 a 60,16 s na Seção B e o Tempo Morto ROC003, nas seções A e B são, respectivamente, de 0 a 30,21 s e de 30,77 a 60,67 s (Figuras 9 e 1-).

Conforme ilustrado na Figura 1, o transportador TCP009 transporta os cavacos do depósito de cavacos até a peneira PEN 001, em um tempo morto de 28.10 s. Após a classificação dos cavacos, por uma peneira vibratória, o transportador TCP010 transporta os cavacos do depósito de cavacos até o silo de cavacos com um tempo morto de 88,33 segundos.

Os cavacos funcionam como um selo entre o silo e a atmosfera e limita a quantidade de ar entrando no silo (ANDRITZ, 2004). Esse processo é conhecido como selagem do silo de cavacos.

O silo de cavacos da indústria onde foi conduzido o presente estudo foi fabricado pela Andritz, sendo um modelo *Diamondback® Chip Bin*, projetado para manter um tempo de retenção de 15 a 20 minutos de a 725 ADMT/D, com o nível do silo em 70% da faixa do medidor radioativo e uma tolerância de +/- 10% (ANDRITZ, 2004) (Figura 11). Devido a sua geometria e por não ter partes móveis, o silo proporciona uma descarga uniforme.

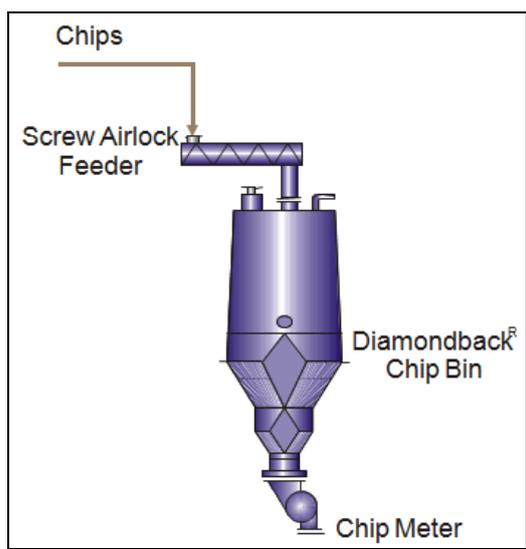


Figura 11: Silo de Cavacos Andritz (ANDRITZ, 2004).

Um alimentador rotativo com sete bolsões permite uma alimentação constante do digestor e a medição da taxa de produção do mesmo (ANDRITZ, 2004). Esse alimentador é conhecido como medidor de cavacos (Figura 12).

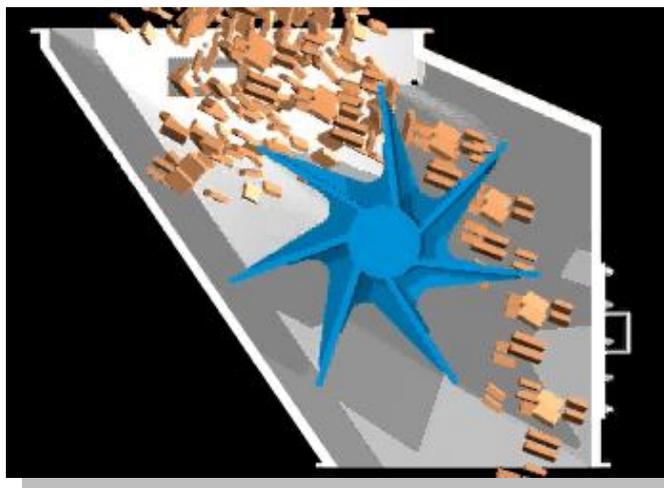


Figura 12: Alimentador rotativo (ANDRITZ, 2004).

APÊNDICE B

CONTROLE DE VELOCIDADE E TORQUE DE MOTORES TRIFÁSICOS

Este controle tem por objetivo manter o torque constante em todas as faixas de velocidade através de um inversor de frequência (Figura 13). Ao aplicar uma carga ao rotor, tem-se uma diminuição da velocidade do motor, ou um aumento do escorregamento, resultando em um aumento da frequência rotórica e de sua reatância. Como consequência, aumenta-se a corrente no estator que produz trabalho. Esta variação está ligada ao fluxo do entreferro. Assim, tem-se diretamente um aumento do torque do motor, equilibrando-se ao torque que se impõem ao eixo do motor, torque resistente (ALAOR, 2009).

Uma das possibilidades de controle vetorial é a aplicação do controle vetorial sem a malha de realimentação (malha aberta). Isto é conhecido como inversor vetorial *sensorless*. Neste caso, o controlador já realiza a auto-sintonia e conhece os parâmetros da máquina. Na instalação deve ser inseridas informações de velocidade máxima, frequência da rede, tensão de alimentação. O trabalho computacional do controlador é de manter os valores do motor dentro dos valores máximos de escorregamento. O controle *sensorless* tem uma eficiência um pouco menor que um controle por malha fechada, que utiliza um sensor de velocidade (*encoder*) para realimentação, porém, mesmo assim possui melhor desempenho de resposta quando comparado a qualquer sistema escalar (ALAOR, 2009).

Aplicações tipicamente vetoriais são encontradas quando se deseja alta regulação de torque por todas as faixas de velocidade.

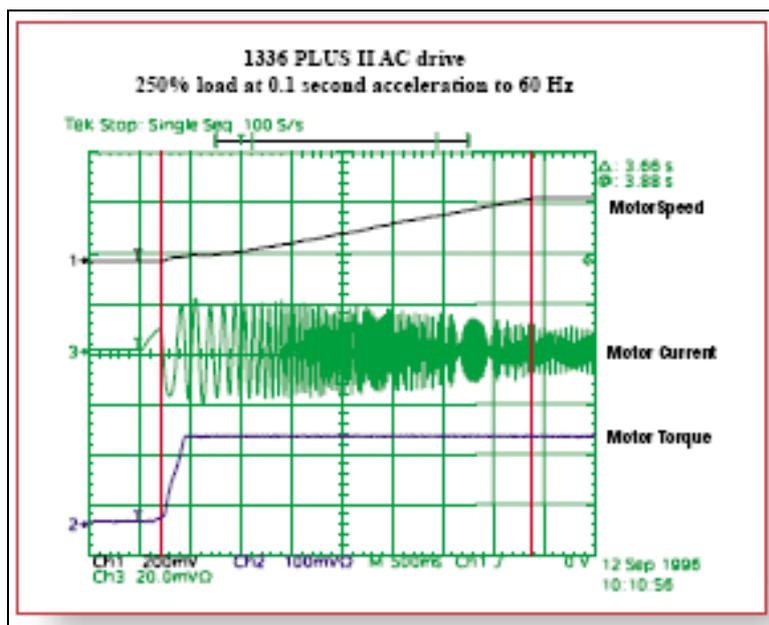


Figura 13: Torque constante em toda a faixa de velocidade (ROCKWELL, 2010)

APÊNDICE C

PRÉ-VAPORIZAÇÃO DOS CAVACOS

A indústria de celulose está sempre a consumir cavacos de madeira que possuem ar e água em seus interiores. Isso porque a madeira nunca está completamente seca ou em condições de umidade que atenda as condições de utilização industrial. O ar é a mais séria barreira à impregnação, muito mais importante do que a umidade dos cavacos. Por diferença de pressão o ar vai gradualmente saindo do interior dos cavacos e sendo substituído pelo líquido.

Nas fábricas existem formas mais práticas e rápidas para se tentar garantir mínimos teores de ar nos cavacos, para que o cozimento kraft ocorra com maior eficiência.

A adequação das operações da colheita florestal, transporte e estocagem da madeira para se ter madeira mais "verde" possível alimentando os digestores é uma dessas alternativas. É relativamente comum essa prática, desde que a empresa esteja localizada próximo de suas florestas, pois elas não querem transportar água dentro de suas madeiras por longas distâncias.

Umedecer os cavacos na pilha de cavacos com um líquido alcalino (em geral, condensado da evaporação), o qual é constantemente irrigado sobre a pilha é uma

segunda alternativa. Nesse caso os objetivos implícitos são: encontrar um uso nobre para o condensado que seria uma poluição industrial; aproveitar sua alcalinidade para ajudar a neutralizar a "acidez" natural da madeira; economizar álcali efetivo na polpação Kraft e umedecer os cavacos para remover parte do ar e facilitar a difusão no processo de impregnação.

Uma terceira alternativa ou forma é a pré-vaporização dos cavacos em vasos ou silos desenhados para essa finalidade. Em geral, utiliza-se vapor recuperado da expansão (flash) do licor preto que sai do digestor em altas temperaturas e sob pressão. Essa vaporização pode inclusive ser em ambiente não pressurizado, usando vapor saturado a cerca de 105°C. Quanto mais tempo os cavacos receberem esse banho de vapor, melhor ficam, pois eles são aquecidos, umedecidos e perdem ar (FOELKEL, 2009).

A pré-vaporização dos cavacos tem os seguintes objetivos (FOELKEL, 2009):

- retirada de ar do interior dos cavacos por expansão térmica do ar e dos cavacos;
- umedecer ligeiramente a madeira pela condensação do vapor;
- aumentar a temperatura dos cavacos, já que eles serão seguidos de uma fase a maior temperatura do que estão na pilha de cavacos;
- expandir e amolecer os cavacos de forma a torná-los mais frágeis e sofrerem algumas micro-fissuras e micro-fraturas no seu manuseio;
- retirar alguma quantidade de extrativos da madeira e componentes voláteis da mesma;
- retirar alguma quantidade de grupamentos acetila e grupos urônicos dos cavacos, já que o condensado dessa operação sai ligeiramente ácido (pH por volta de 4 a 4,5);
- reduzir o teor de álcali efetivo na polpação, já que pela retirada desse condensado se remove alguma da "acidez natural" da madeira;
- facilitar a impregnação dos cavacos pelo licor na operação imediatamente subsequente;
- equalizar as diferenças de penetração de licor entre os diferentes cavacos.

Como a pré-vaporização favorece uma melhor impregnação dos cavacos, atribui-se a ela a alavancagem do processo de polpação e de todos os ganhos que uma

mais eficiente impregnação dos cavacos pode conseguir, tais como (FOELKEL, 2009):

- maior regularidade na qualidade da polpa na saída do digestor;
- redução no consumo de álcali efetivo;
- diminuição do teor de rejeitos;
- menor consumo específico de madeira por t de celulose depurada;
- maior eficiência energética;

A eficiência da pré-vaporização é função da pressão de vapor e do tempo de pré-aquecimento, proporcional ao nível do silo de cavacos. Também deve ser levado em conta as seguintes variáveis: umidade dos cavacos, densidade básica da madeira, dimensões e espessura dos cavacos.

APÊNDICE D

CONTROLE AVANÇADO

A estratégia de controle com realimentação a ser adotada num sistema depende do objetivo a ser alcançado e das limitações do sistema. Na Tabela 2 mostra os tipos e categorias de controle.

TÉCNICA		ESTRATÉGIAS CONVECIONAIS	
		CONV.	
		I	- Manual; - PID; - Cascata; - Feedforward.
CATEGORIA		ESTRATÉGIAS AVANÇADAS	
		II	- <i>Gain-Scheduling</i> ; - Compensação em Atraso; - Compensação com "Tempo-morto"; - Controlador Preditor-Smith.
		III	- Modelo Preditivo; - Controle Estatístico Qualidade; - Controle Adaptativo; - Controle Estatístico Qualidade; - Controle Adaptativo; - Controle Estatístico Qualidade; - Controle Adaptativo;
		IV	- Controle Robusto; - Controle H_{∞} ; - Controle Estatístico Qualidade; - Controle Adaptativo; - Reconhecimento de Padrões. - Estimativas de Estados (Filtro Kalman/Observadores de Estado)
			- Sintese - μ ;

Tabela 2 – Tipos de estratégia de controle

A necessidade de lidar com incertezas nos requisitos operacionais e com dados de projeto resulta em complicações, quando se emprega uma formulação matemática baseada em equações diferenciais, especialmente quando o sistema é pouco conhecido e complexo.

A dificuldade de encontrar um modelo matemático pode ser, em alguns casos, contornada pelo conhecimento e experiência do projetista, ou pelo emprego de um procedimento heurístico. A existência de conhecimento heurístico de especialistas, a concentração de conhecimento inerente no controle de sistemas e a existência de dados armazenados, são razões para o emprego de estratégias avançadas e sistemas inteligentes. Esse conhecimento heurístico pode estar disponível através da análise de dados operacionais armazenados, ou pode ser expresso de forma empírica por meio de regras.

APÊNDICE E

SENSORES VIRTUAIS

Um sensor virtual é um sistema projetado para substituir a indisponibilidade momentânea ou permanente de um sensor em uma planta. Esta substituição pode ser exigida porque o sensor real tenha falhado ou porque ele foi removido para manutenção. Pode também acontecer que o sensor real seja usado em uma forma compartilhada (time-sharing), ou que não exista no mercado um sensor razoável disponível. Na Figura 14 é apresentado um exemplo de diagrama de uma planta na qual a variável y , medida usando um sensor, está para ser substituída pelo sinal y_m fornecido pelo sensor virtual (*soft-sensor*).

Em geral o *soft-sensor* é o modelo de uma parte da planta. As entradas para este modelo são outras variáveis medidas - controles, saídas da planta e distúrbios medidos. O modelo usado pode ser do tipo entrada-saída ou na forma de equações de estado e de saída. Este último caso comumente conduz ao uso de um Filtro de *Kalman* Estendido. Em certos casos pode ser apropriado usar modelos nebulosos (Lógica nebulosa ou *Fuzzy*) ou modelos baseados em redes neurais artificiais, principalmente naqueles casos onde não se podem utilizar informações a respeito do processo, tendo-se como informações apenas os dados medidos na entrada e na saída

do processo. Nesse caso, procura-se utilizar modelos locais ao invés de globais, com o intuito de se obter modelos mais facilmente interpretáveis.

Com referência ainda à Figura 6, quando o sensor real está ativo, a chave está na posição R. Então o modelo do *soft-sensor* é identificado, enquanto a malha de controle usa o sinal y dado pelo sensor real. Quando o sinal do sensor não está mais disponível a chave deve ser virada para a posição V, em cujo caso a malha de controle usa o sinal y_m fornecido pelo *soft-sensor* e a identificação do modelo ou a estimação paramétrica é interrompida.

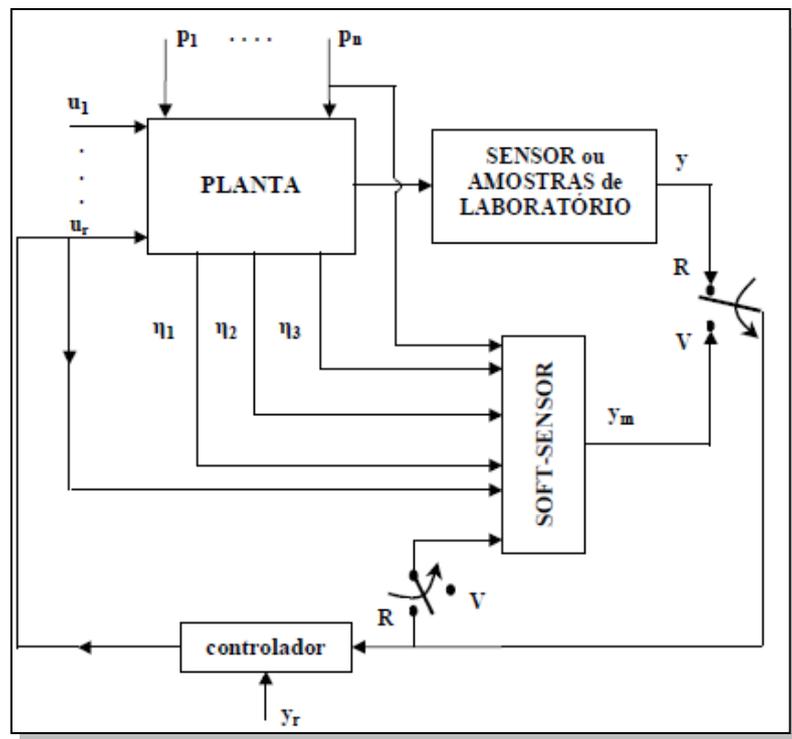


Figura 14: *Soft-sensor* conectado a uma planta

O sensor virtual pode ser dividido em duas partes principais: uma composta pelos sensores propriamente ditos e outra composta pelo modelo. Cada uma dessas partes pode ser projetada de maneira independente e depois integrada entre si.

De forma geral, são usados sensores disponíveis comercialmente e o objetivo final está concentrado no modelo implementado em software. São muitos os métodos usados para estimar variáveis através de outras variáveis medidas. De acordo com Ljung e também Ohshima e Tanigaki esses métodos podem ser classificados e divididos em três grandes grupos:

Depois disso é só acrescentar os slides da apresentação a ser feita no dia da tese e pronto.

Modelos Fenomenológicos – obtidos através de uma abordagem analítica. São os modelos mecanísticos, com fundamentação química, física ou biológica.

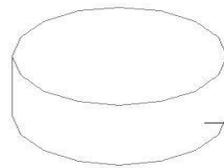
Modelos Empíricos - provenientes de dados obtidos em laboratório;

Modelos Caixa-Preta - obtidos de dados operacionais através da aplicação de algoritmos como redes neurais artificiais, lógicas nebulosa ou análise múltipla e PLS (*Partial Least Squares*).

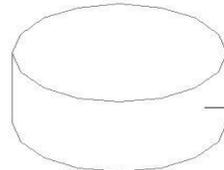
É possível observar na literatura que diversas técnicas são empregadas para a identificação de modelos utilizados pelos sensores. A mais simples de todas essas técnicas é a identificação linear paramétrica que utiliza modelos compostos por somatórias de funções simples ponderadas por parâmetros, sendo esses parâmetros estimados pelo emprego de técnicas de regressão.

APÊNDICE G

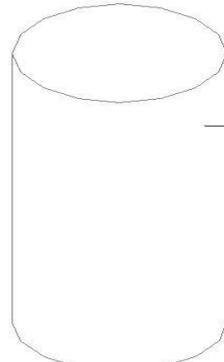
DESENHOS MECÂNICOS - ENCODER



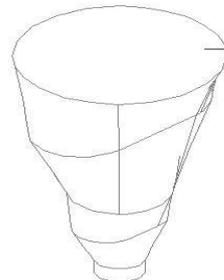
VOLUME = 15,7m³
ACIMA DO MEDIDOR RADIOATIVO.



VOLUME = 18,32m³
SEÇÃO DE MEDIÇÃO DO MEDIDOR RADIOATIVO.



VOLUME = 70,82m³
ABAIXO DO MEDIDOR RADIOATIVO.



VOLUME = 23,08m³
DIAMOND.

DADOS DO SILO	m
ALTURA DO SENSOR RADIOATIVO REAL	1,80
ALTURA DO SENSOR RADIOATIVO PROJETADO	3,23
DIÂMETRO	3,60
RAIO	1,80

VOLUME DE MEDIÇÃO	m ³
PARA LT 034=0%	0
PARA LT 034=100%	18,32

VOLUME TOTAL 127,92m³

Escala: S/ESC.	Solic.	Data	Nome	Folhas	
	Proj.	01/07/10	VICENTE	01/01	
	Des.				
	Aprov.				
Título				Número 312.P.DD.001-00	
				o.s. - c.c. -	

A4

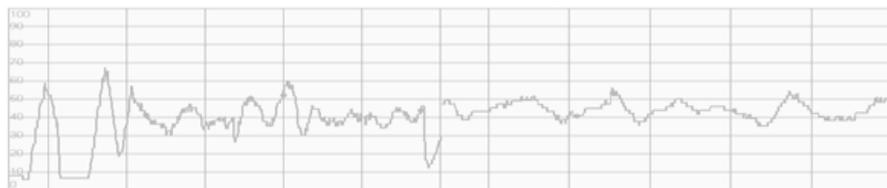
VOLUME DO SILO DE CAVACO DIGESTOR

DESENHO GERADO EM AUTOCAD



Otimização do Controle de Nível do Silo de Cavacos em uma Fábrica de Celulose

Dissertação de Mestrado em Tecnologia de Celulose e Papel



VICENTE NUNES CARRILHO – UFV 2010



Otimização do Controle de Nível de Cavacos

Índice

- ✓ Introdução;
- ✓ Objetivos;
- ✓ Pátio de Madeira;
- ✓ Depósito de Cavacos;
- ✓ Silo de Cavacos;
- ✓ Sensores de Posição das Roscas e Chaves Fim de curso virtuais;
- ✓ Sensores de Vazão e Nível Virtuais;
- ✓ Estratégia de Controle;
- ✓ Tela de operação;
- ✓ Resultados;
- ✓ Conclusão.



Otimização do Controle de Nível de Cavacos

Introdução

- ✓ Cenário atual – controle incapaz de manter o nível do Silo de Cavacos:
 - presença de pontos vazios no Depósito de Cavacos;
 - falta de informações em tempo real;
 - utilização de estratégia de controle convencional.

- ✓ O que influenciou a escolha deste sistema para otimizar?
 - não necessita de gastos com equipamentos;
 - possibilidade de uso de sensores virtuais;
 - problema complexo (elevado tempo de retenção).



Otimização do Controle de Nível de Cavacos

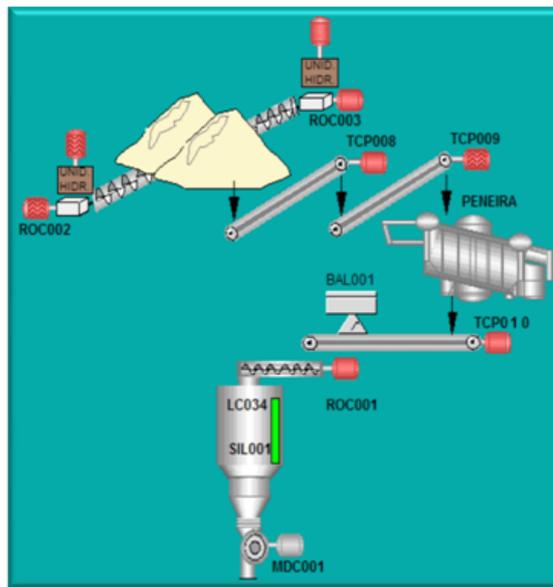
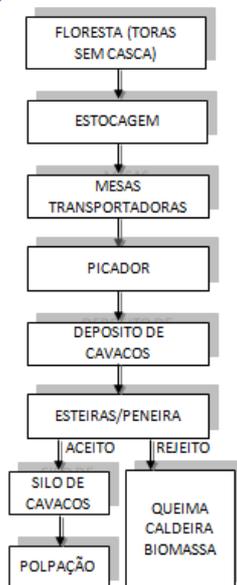
Objetivos

- ✓ Melhorar a eficiência da pré-vaporização no digestor;
- ✓ Eliminar as quedas repentinas de nível do silo de cavacos;
- ✓ Redução de variabilidade do sistema.



Pátio de Madeira

Fluxograma Resumido

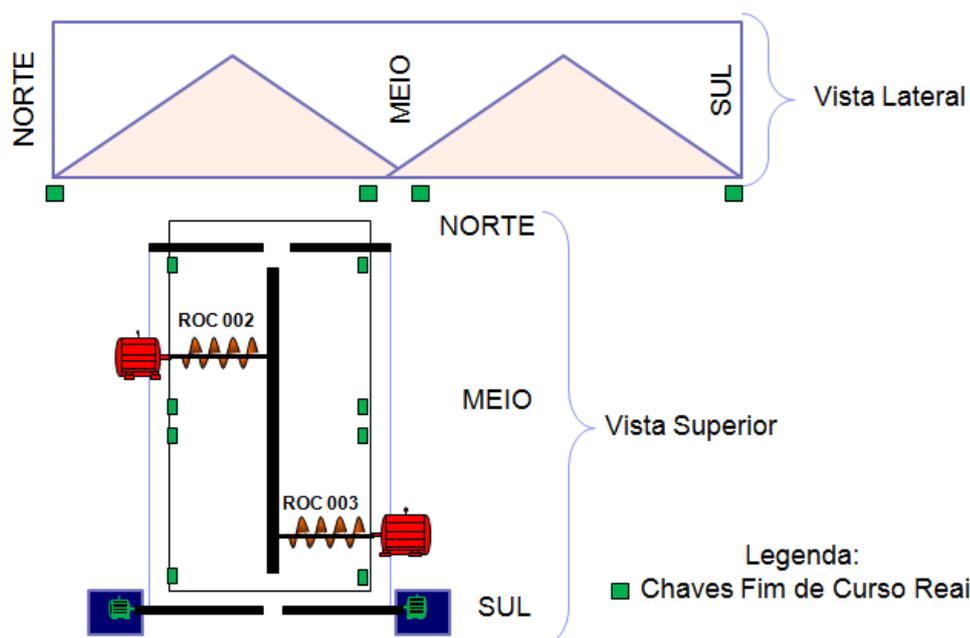


Pátio de Madeira

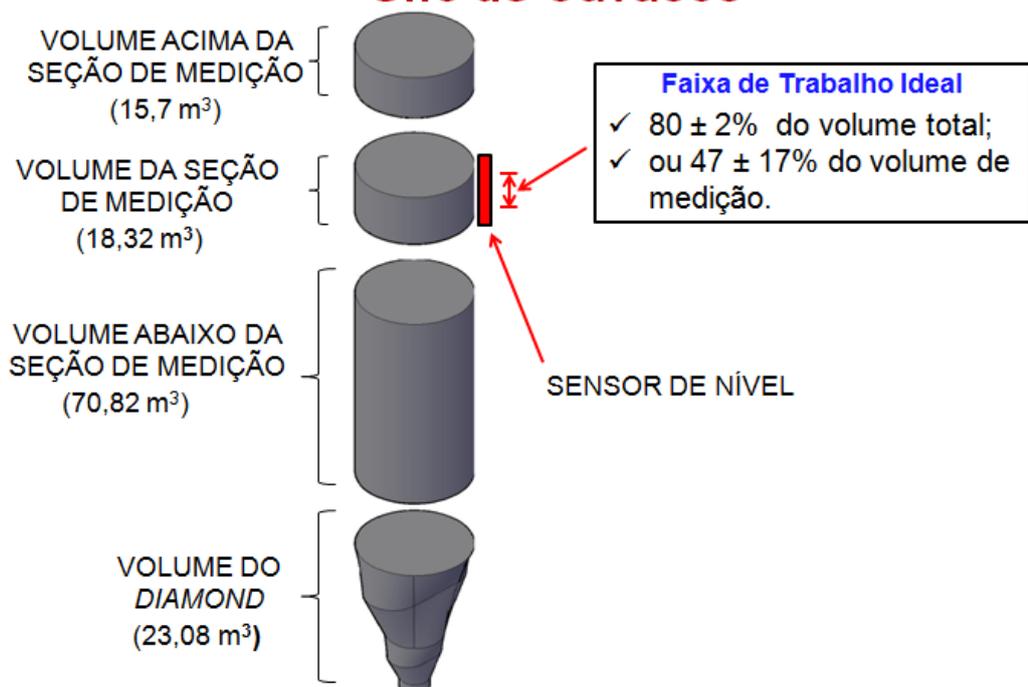




Depósito de Cavacos



Silo de Cavacos





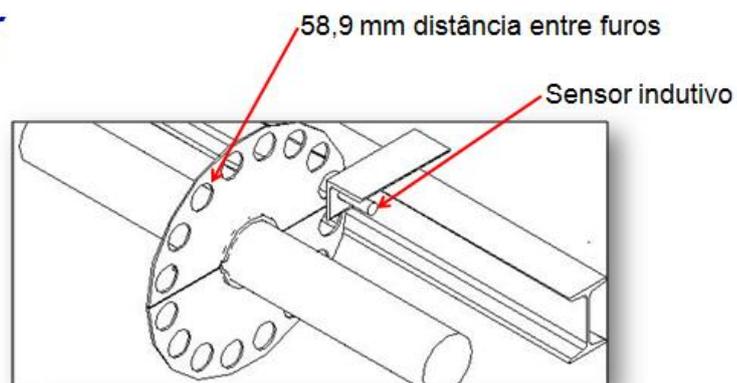
Metodologia

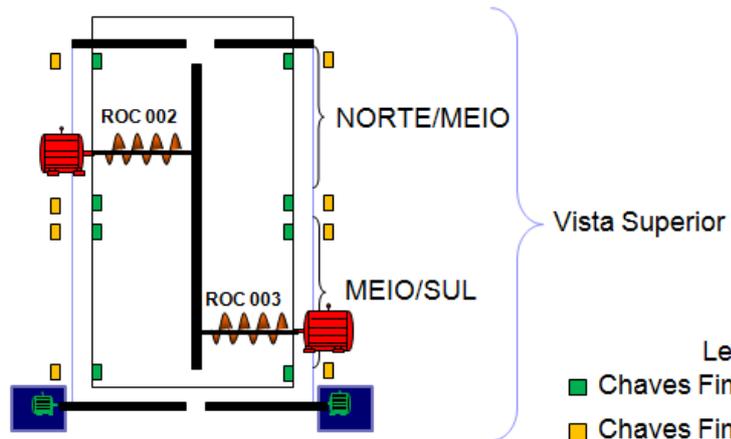
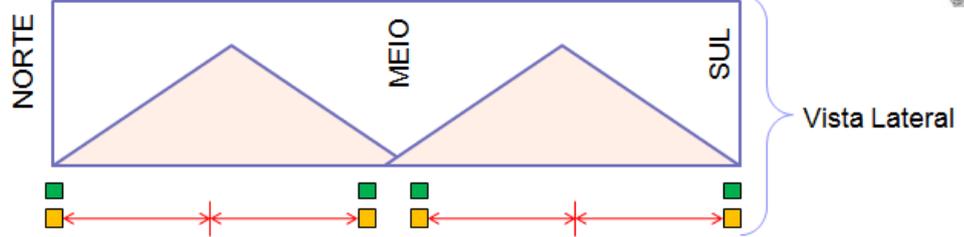
- ✓ Sensores de posição virtuais;
- ✓ Chaves fim de curso virtuais;
- ✓ Sensores de vazão de cavacos e nível do silo virtuais;
- ✓ Nova estratégia de controle.



Sensores de Posição das Roscas e Chaves Fim de Curso Virtuais

Encoder





- Legenda:
- Chaves Fim de Curso Reais
 - Chaves Fim de Curso Virtuais



Sensores de Posição das Roscas

Conceito

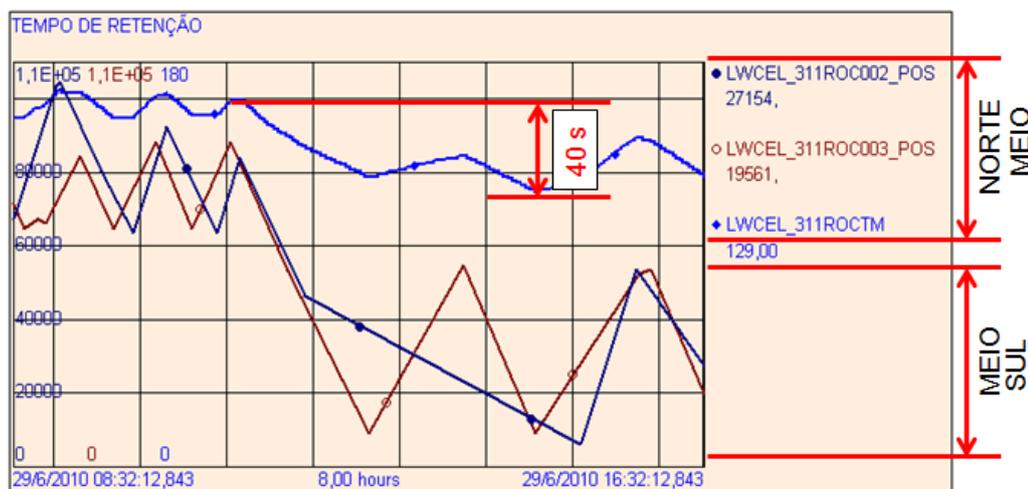
- ✓ Possibilita o monitoramento em tempo real das posições das roscas de extração de cavacos;
- ✓ Permite o ajuste das chaves fim de curso virtuais para eliminar os pontos sem pilha de cavacos no Depósito de cavacos;
- ✓ Em pontos vazios no Depósito de Cavacos ocorre queda de corrente elétrica no motor da rosca;
- ✓ Permite o cálculo do tempo de retenção em tempo real para o sistema de controle;
- ✓ Tempo de retenção – utilizado no refaseamento de dados.



Sensores de Posição das Roscas

Gráfico de Tendências das Roscas

- ✓ Posição das roscas e tempo de retenção em tempo real;





Chaves Fim de Curso Virtuais

Conceito

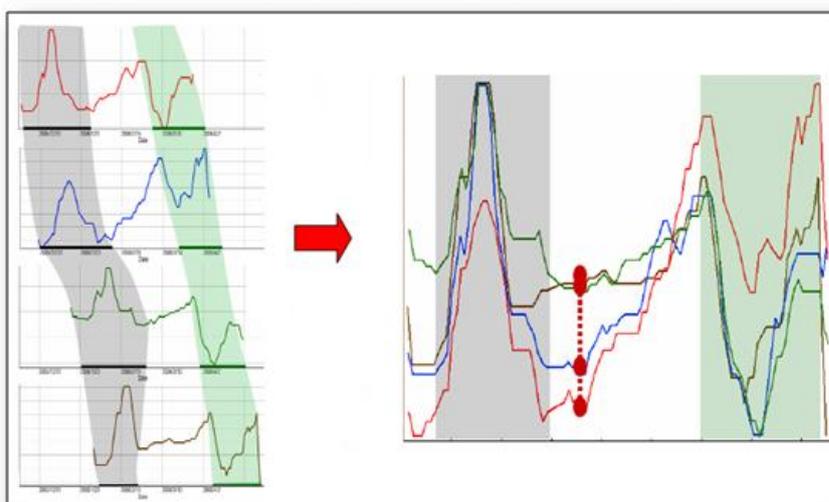
- ✓ O ajuste das chaves fim de curso virtuais permite eliminar os pontos sem pilha de cavacos no Depósito de cavacos;
- ✓ Em pontos vazios no Depósito de cavacos ocorre queda de corrente elétrica no motor da rosca.



Refaseamento

Antes e Depois dos dados Refaseados

- ✓ Com o refaseamento, obtêm-se melhores correlações





Sensores Virtuais de Vazão e Nível

Conceito

- ✓ **Função preditiva:** tipo caixa preta, prediz a vazão/nível de cavacos em cada rosca, desenvolvido a partir de técnicas de regressão linear múltipla com o software Statistica;
- ✓ **Função adaptativa:** finalidade de ajustar o “offset” do sinal do sensor virtual em relação ao sensor real.



Sensor Virtual Vazão

Funções

- ✓ Sensor Virtual de Vazão de Cavacos (SS001)

$$SS001 = a + b * MV + c * MC + d * MT + FA$$

onde:

MV = média das velocidades das roscas

MC = média das correntes das roscas

MT = média das tensões elétrica das roscas

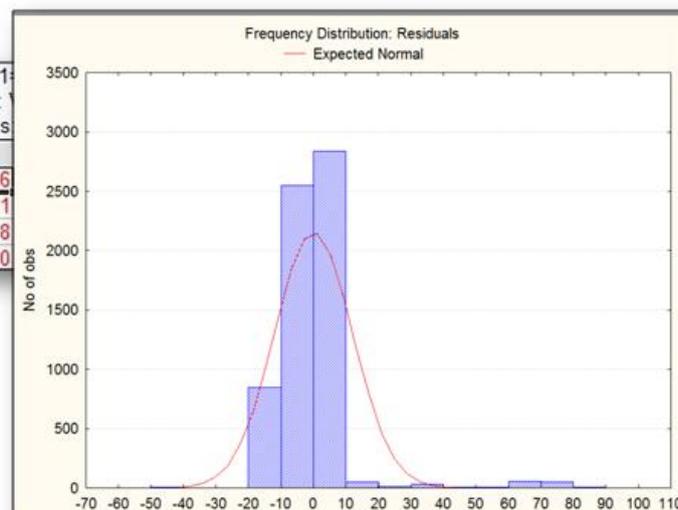
FA = Fator de Adaptativo



Sensor Virtual Vazão

Regressão Linear Múltipla

	Model: v1
	Dep. var:
	Final loss
N=6470	a
Estimate	14.06456
Std.Err.	0.82341
t(6466)	17.08078
p-level	0.00000





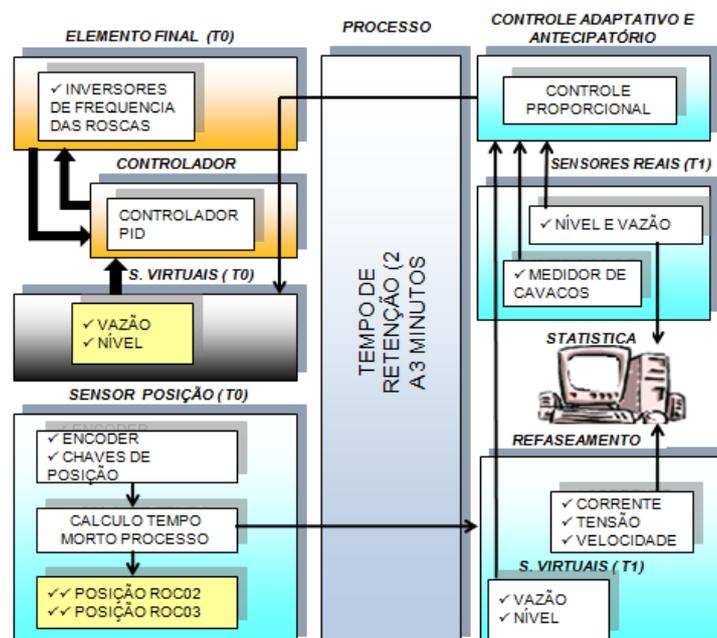
Controle Avançado

Conceito

- ✓ Prediz e prevê alterações antes que o processo saia do objetivo;
- ✓ O PID não pode fazer isto, pois tem que esperar pelo erro;
- ✓ Resolve problemas difíceis de controle de processo.

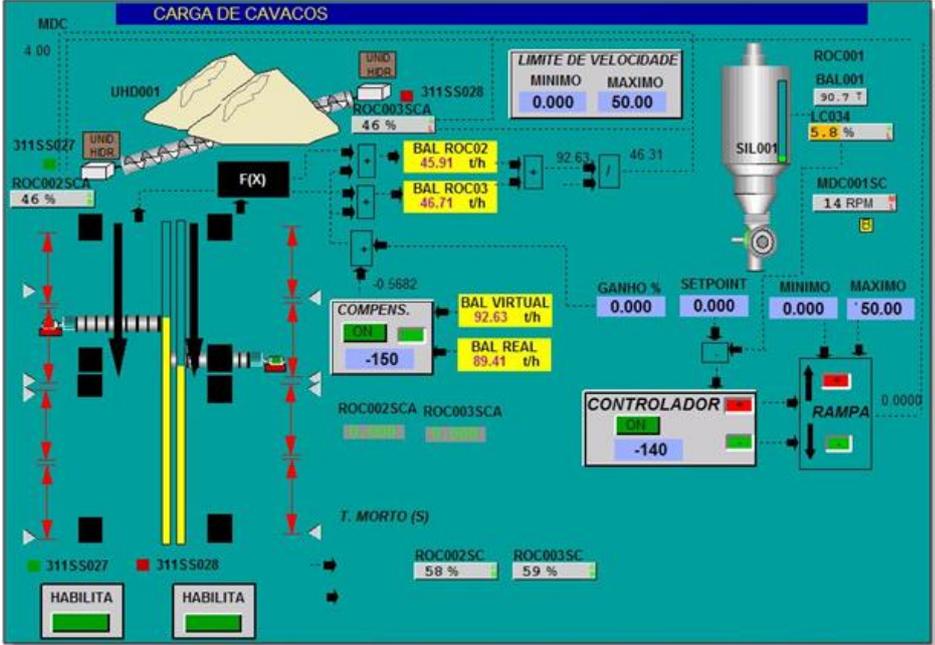


Estratégia de Controle





Tela de Operação

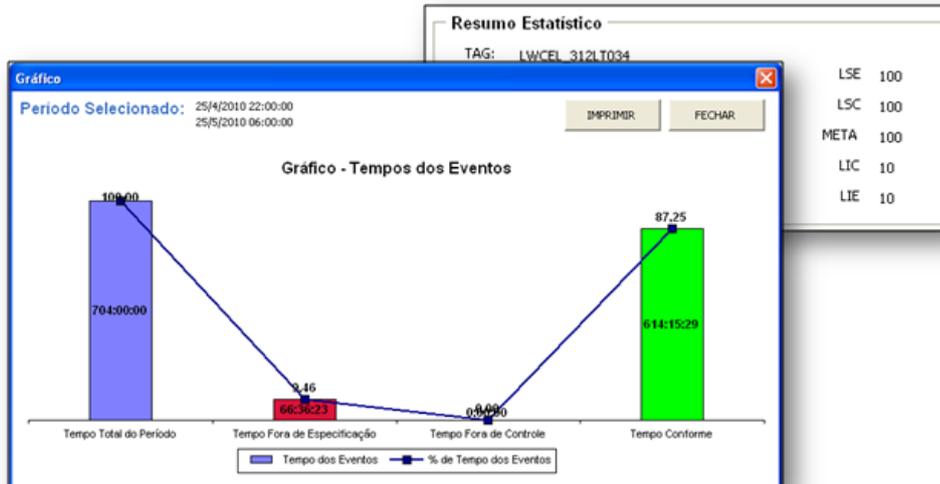




Resultados

Chaves Fim de Curso Virtuais (Antes)

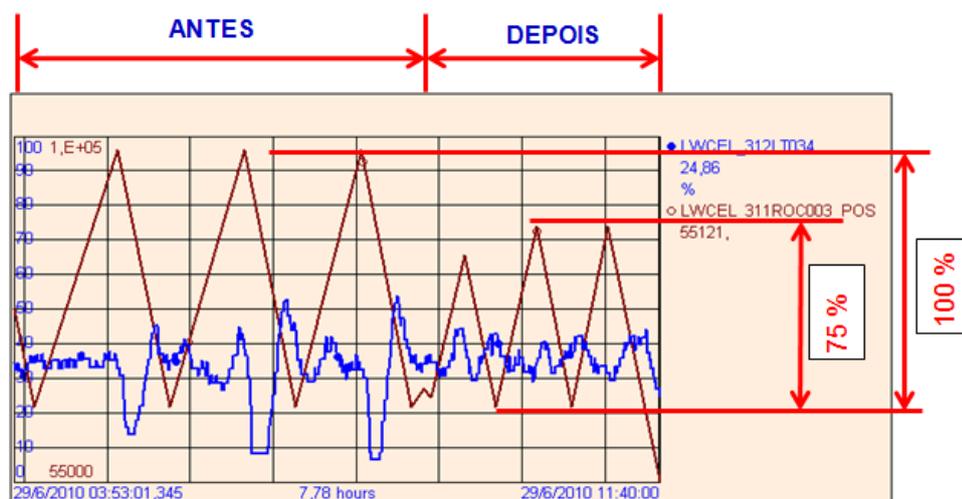
- ✓ 9,46% do período de amostragem (25/04 a 25/05/10) o nível do silo permaneceu abaixo de 10%.



Resultados

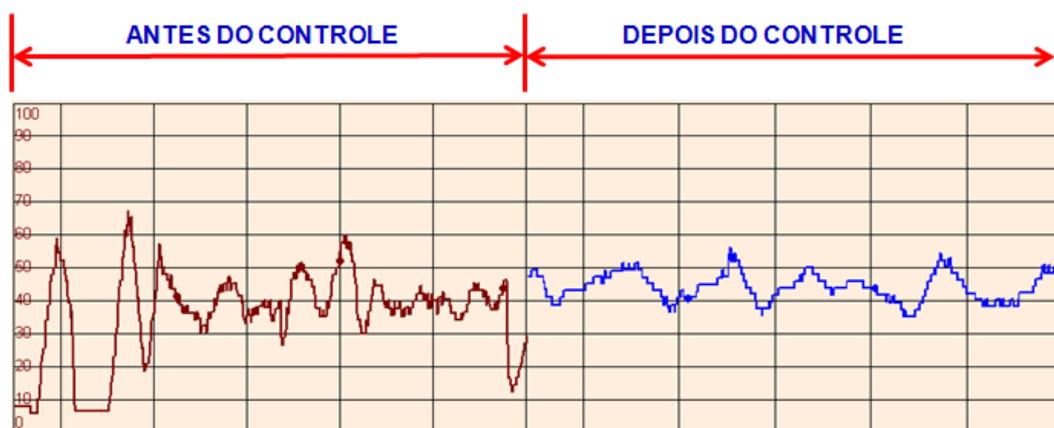
Chaves Fim de Curso Virtuais (Antes e Depois)

- ✓ Fins de curso virtuais desabilitados (3 primeiros ciclos) e habilitados nos próximos ciclos (linha marrom);



Resultados

Gráfico de Tendência – Sensores Virtuais + Controle Avançado (Antes e Depois)



Resultados



Ganhos Esperados

- ✓ Redução de variabilidade do número Kappa;
- ✓ Redução teor de rejeitos no digestor;
- ✓ Redução da carga de álcali no digestor.



Resultados

Ganhos Reais

- ✓ Flexibilidade operacional;
- ✓ Maior disponibilidade/confiabilidade do sistema;
- ✓ Redundância – sensores virtuais substituem temporariamente os sensores reais;
- ✓ Sem custo de equipamentos para Implementação – apenas recursos de memória SDCD (6%) e PLC (desprezível).



Conclusão

- ✓ A utilização de sensores virtuais aliados com técnicas de controle avançada se mostrou totalmente eficaz para o objetivo proposto;
- ✓ A eficiência do controle depende de uma boa sintonia de malha e do aprendizado com o sistema em operação;



Sugestões trabalhos futuros

- ✓ Posicionamento automático das chaves fim de curso virtuais;
- ✓ Indicação automática de pontos com falta de cavacos com alarme para o operador;
- ✓ Utilização da mesma metodologia para otimizar outras etapas do processo;



Perguntas



vcarrilho@lwarcel.com.br