

ESTABILIDADE NA DESLIGNIFICAÇÃO COM OXIGÊNIO COM AUXÍLIO DE CONTROLE MULTIVARIÁVEL

Autor*: Anderson Rodrigo Giacomini¹

RESUMO

A indústria de papel e celulose convive com questões de adequação a oferta e a demanda que influenciam a tomada de decisão em várias etapas da cadeia produtiva. A pressão por baixos custos de produção requer novos investimentos em tecnologia, normalmente associados ao processo e ao produto.

Nesse cenário, o objetivo do presente trabalho envolveu a aplicação de um controle de eficiência na deslignificação com oxigênio de duplo estágio, com controle avançado, para reduzir a variabilidade do kappa de saída e elevar o grau médio de deslignificação.

A metodologia utilizada define faixas de atuação em valores de pH, temperatura e carga de oxigênio aplicadas diretamente na linha da deslignificação com oxigênio da fábrica A da Fibria-Unidade Aracruz. O controle avançado, baseado em modelo de predição Fuzzy, antecipa a ação avaliando o kappa de saída do digestor, tendo um valor de kappa de saída e uma eficiência na deslignificação pré-definidos pelo operador do Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD). A estratégia de controle mantém a deslignificação com oxigênio em regime mais severo em momentos de kappa alto na descarga do digestor, mantendo certa estabilidade no consumo de reagentes químicos no branqueamento. Da mesma forma, o controle torna a deslignificação com oxigênio mais branda em momentos de kappa mais baixo na descarga do digestor, não impactando, assim, propriedades finais da polpa, como a viscosidade.

Os resultados obtidos indicam redução no desvio-padrão do kappa de saída da deslignificação com oxigênio em momentos de distúrbio no digestor na ordem de 26,5%, maior estabilidade nos valores de viscosidade da celulose com redução no desvio-padrão, e aumento médio de 3% no grau de deslignificação.

Palavras-chave: deslignificação, eficiência, número kappa.

INTRODUÇÃO

Deslignificação com oxigênio

Considerada, de certo modo, como uma continuação do processo de polpação e como primeira fase do branqueamento, a deslignificação com oxigênio teve sua primeira aplicação indus-

trial na década de 1970, na África do Sul, e logo se difundiu mundialmente, sendo presença certa em linhas de fibras que utilizam o cozimento kraft para produção de polpas branqueadas (ALLEN *et al.*, 2005).

Pesquisas sobre deslignificação com oxigênio têm como alvos o aumento do rendimento e da intensidade da deslignificação. Todavia, o rendimento tem comportamento comumente oposto à intensidade da deslignificação, pois que reagentes utilizados nesta etapa com oxigênio não são específicos para remover apenas a lignina, vindo a atacar também os carboidratos, contribuindo para a queda do rendimento. Atualmente, em fábricas de polpa kraft de eucalipto modernas a eficiência de deslignificação com oxigênio raramente excede a 30%, sendo que 40%-60% seria o esperado.

As alternativas disponíveis para melhorar a eficiência da deslignificação incluem o uso de alguns aditivos, como, por exemplo, o sulfato de magnésio, potencialmente capaz de reduzir a energia de ativação e a seletividade da reação do oxigênio com a lignina. A eficiência da deslignificação com oxigênio pode ser melhorada também pela adequada otimização das variáveis operacionais do processo, que incluem tempo, temperatura, carga de álcali, carga de oxigênio, consistência, pressão de reação e ainda outras. (VAN HEININGEN *et al.*, 2003).

A deslignificação com oxigênio é o processo pelo qual a polpa, em suspensão numa solução alcalina, é pressurizada com oxigênio no interior de um tanque onde a lignina reage com o oxigênio até ser dissolvida e, na sequência, poder ser removida da polpa com a solução de licor. Utiliza-se a deslignificação com oxigênio para a remoção da lignina remanescente na polpa marrom, remoção que pode chegar até aproximadamente 50%. A maior vantagem da utilização desse processo é a economia de produtos químicos nos estágios seguintes do branqueamento (VIOLETTE, 2003). A deslignificação com oxigênio diminui o impacto ambiental por via da redução da quantidade de DBO, DQO, cor e de material orgânico nos efluentes. Normalmente, a deslignificação com oxigênio ocorre em consistência média, com utilização de hidróxido de sódio como álcali (1% a 4% NaOH por tonelada de polpa a 10% de consistência).

*Referências do autor:

1. Fibria. Aracruz (ES). Brasil

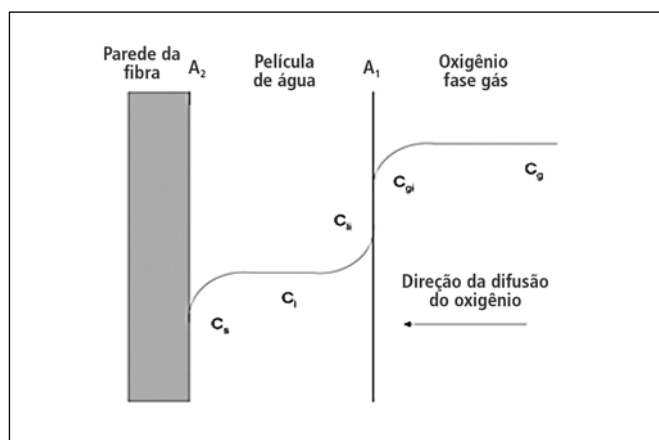
Endereço para correspondência: Anderson Rodrigo Giacomini.

Fibria. Rod. Aracruz-Barra do Riacho, s/n km 25. Cep 29.197-900. Aracruz (ES). Brasil. Telefone: + 55-27-32702303.

E-mail: argiacom@fibria.com.br

Tabela 1. Condições típicas da deslignificação com oxigênio no meio industrial (McDONOUGH, 1996)

Condições Operacionais	Média Consistência	Alta Consistência
Consistência da polpa, %	10-14	25-34
Tempo de reação, min.	50-60	30-45
Temperatura de reação, °C	70-105	100-115
Carga alcalina, kg/t	18-28	18-23
Consumo de oxigênio, kg/t	20-24	15-24

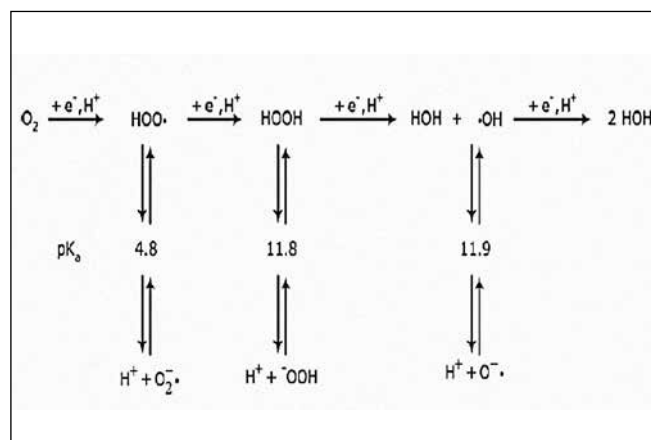
**Figura 1.** Transferência de massa do oxigênio para a parede da fibra (HSU & HSIEH, 1985)

Princípio de funcionamento

O processo de deslignificação é controlado por uma reação heterogênea trifásica em etapas que envolve a reação e o transporte dos reagentes entre as fases existentes no sistema. As três fases no vaso reacional são as fibras da polpa, a fase aquosa ao redor das fibras e entre os poros das fibras e a fase gás das bolhas de oxigênio dispersas na mistura (VIOLETTE, 2003). A primeira etapa é a transferência do oxigênio da fase gás para a fase líquida. O oxigênio é transferido por difusão e convecção do seio da solução aquosa para o filme líquido formado ao redor das fibras. As moléculas de oxigênio e os íons hidroxila (OH⁻) são transportados por difusão através do filme líquido até alcançarem a fibra celulósica.

Na fibra acontece a transferência de massa dos reagentes, e a reação de deslignificação ocorre nos sítios ativos da fibra. Os produtos de reação, fragmentos de lignina e celulose de baixo peso molecular são transportados para fora da fibra por difusão interna, através do filme líquido por convecção e difusão e, por fim, atingem o seio da solução. O transporte físico do oxigênio gasoso através da camada de filme aquoso por difusão é o passo determinante para a deslignificação com oxigênio. Assim, a fluidização da suspensão da polpa é um pré-requisito para uma boa deslignificação (SIXTA, 2006).

Para o oxigênio, segundo DENCE e REEVE (1996), há um processo de quatro etapas em que o oxigênio é reduzido em água e o substrato é oxidado, conforme ilustrado na Figura 2. O produto das etapas de reação gera um íon carregado negativamente chamado de ânion superóxido, que possui maior potencial de oxida-

**Figura 2.** Redução do oxigênio (DENCE e REEVE, 1996)

ção que o oxigênio, e a seguir, na segunda etapa, há formação de peróxido de hidrogênio e hidroperóxido. Com a continuação da degradação do oxigênio há formação de íons de hidróxido e hidroxila, em que finalmente, na última etapa, a hidroxila pode adquirir mais um elétron e formar água ou hidróxido.

De acordo com ZOU *et al.*, (2000), há complexidade na cinética de deslignificação com oxigênio, determinada pela taxa de reação específica de cada espécie de madeira e do processo de polpação aplicado. A velocidade de reação é mais rápida nos primeiros 5 -10 minutos, tornando-se mais lenta com o decorrer da reação. A diminuição da taxa de reação, após 10 minutos, tem sido atribuída a limitações de transferência de oxigênio e álcali para o interior da parede celular, condensação da lignina durante a reação e presença de complexos lignina-carboidrato de baixa reatividade na polpa não branqueada (ZOU *et al.*, 2000).

Objetivando melhorias para a aplicabilidade desse processo, foram feitas numerosas revisões da química da deslignificação com oxigênio, disponíveis na literatura.

Efeito da temperatura e carga de álcali na seletividade da deslignificação com oxigênio

A seletividade e a eficiência do processo de deslignificação com oxigênio são fatores determinantes para sua avaliação. Sabe-se que o estágio de oxigênio apresenta baixa seletividade em relação aos outros processos oxidantes, ocasionando alta degradação da celulose, com conseqüente perda de viscosidade da polpa.

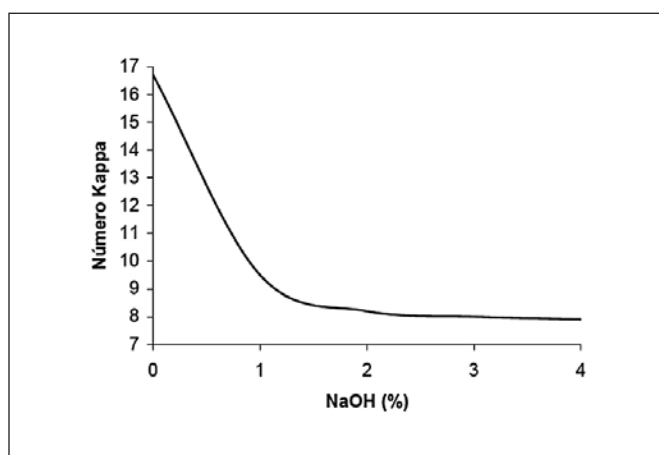


Figura 3. Efeito da carga de NaOH no estágio de deslignificação com oxigênio (condições: 60 min, 100°C, 10% consistência) (IJIJIMA e TANEDA, 1996)

A clivagem oxidativa das cadeias de celulose e hemicelulose na deslignificação com oxigênio ocorre pela ação de intermediários do peróxido de hidrogênio, esse último gerado como subproduto da oxidação da lignina e dos grupos terminais redutores dos carboidratos. A presença de metais de transição no sistema acelera as reações de clivagem oxidativa dos carboidratos (CHEN e LUCIA, 2002).

Aditivos são aplicados na deslignificação com oxigênio para minimizar a clivagem oxidativa dos carboidratos, sendo o mais comum o sulfato de magnésio (THAKORE *et al.*, 2005).

Além do uso de aditivos, a eficiência e a seletividade do estágio de deslignificação com oxigênio podem ser melhoradas pela otimização de parâmetros operacionais, tais como temperatura e carga de álcali. IJIJIMA e TANEDA (1996) observaram, para polpa de folhosas, predominantemente de eucaliptos, que a taxa de deslignificação aumenta com o aumento da carga de álcali até cerca de 2,0% de NaOH, estabilizando-se posteriormente. (Figura 3).

A temperatura apresenta efeito semelhante à variação da carga de álcali. O aumento da temperatura eleva quase que linearmente a taxa de deslignificação. Foi relatado que durante os primeiros 15 minutos de reação a taxa de deslignificação e a alvura aumentaram em 15% e 28%, respectivamente, para uma elevação de temperatura de 90°C para 110°C (COLODETTE *et al.*, 1989).

Na Figura 4 observa-se esse comportamento para deslignificação de polpa kraft de coníferas. O mesmo efeito tem sido observado para polpas de folhosas.

Controle multivariável

A teoria de controle pode ser distribuída em cinco épocas: controle clássico (1930 a 1960), controle moderno (1960 a 1980), controle robusto (a partir de 1980), controle adaptativo (a partir de 1950), controle avançado (a partir de 1990). As três propostas iniciais requerem um modelo matemático da planta, e o controlador necessita

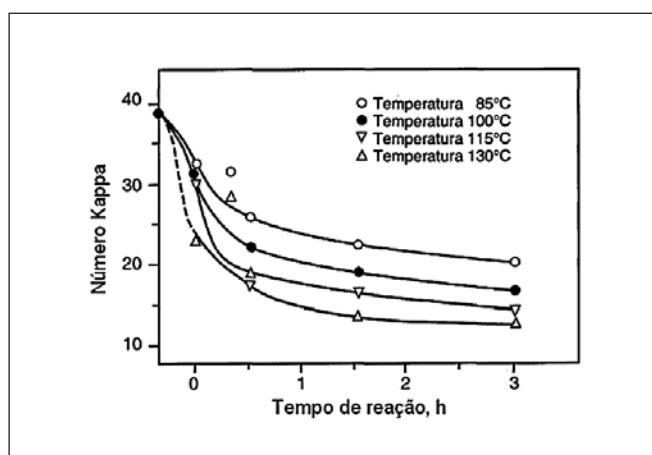


Figura 4. Efeito da temperatura na taxa de deslignificação com oxigênio em polpa kraft de coníferas (DENCE e REEVE, 1996)

de formas estruturadas de representação e lógica clássica. Uma evolução desses modelos é o controle adaptativo, que é a denominação atribuída às ações de controle de sistemas capazes de modificar seus próprios parâmetros em resposta a alterações nas variáveis monitoradas. Essa classe de controle pode ser vista como uma evolução natural dos sistemas realimentados clássicos, buscando projetar controladores com maior grau de autonomia.

Já o controle avançado preza pelo aprendizado automático, pela capacidade de reavaliar estratégias e pelo desenvolvimento de mecanismo de tomada de decisão e extração de informações em ambientes ruidosos. Com tais características, esta proposta apresenta a possibilidade de trabalhar com informações incompletas, detectar alterações da planta e gerar ações apropriadas para eventos inesperados, entre outros (LAKHMI & CLARENCE, 1998). Além disso, é possível extrair o conhecimento dos operadores em linguagem natural e desenvolver um modelo sem ter que estruturar o conhecimento (Controladores Fuzzy) (PEDRYCZ & GOMIDE, 2008), além de técnicas que permitem um aprendizado contínuo do meio (Redes Neurais).

Uma abordagem bem menos comum são os controladores Fuzzy. Essa estratégia tem o objetivo de oferecer um "caminho do meio" entre a modelagem matemática do processo (abordagem simplificada pelo PID, Proporcional – Integral - Derivativa) ou um aprendizado totalmente dos dados (estratégia dos MPCs). Controladores Fuzzy são muito simples conceitualmente.

Controle avançado Fuzzy

Sua concepção ocorreu devido à dificuldade de classificação de conjuntos que não possuíam fronteiras bem definidas, ou seja, a transição entre conjuntos é suave e não abrupta. Ao permitir a participação parcial dos elementos de um conjunto, transições suaves de uma regra para outra são possíveis. Tal propriedade é desejável para modelagem e controle de sistemas (YAGER e FILEV, 1994).

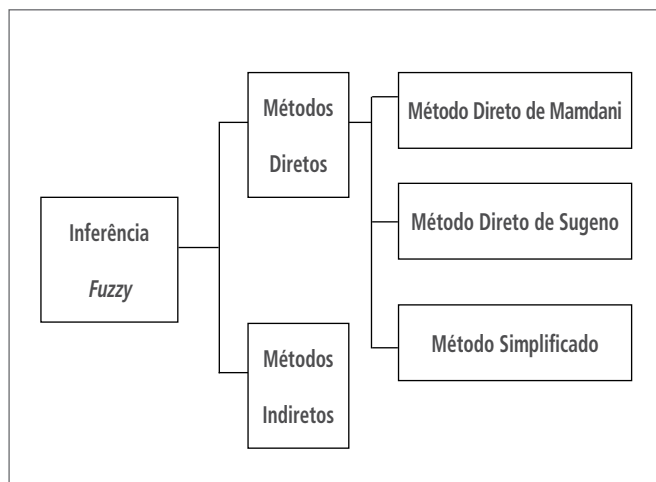


Figura 5. Métodos de Inferência Fuzzy (BALEEIRO, 2007)

O controle avançado fuzzy consiste de um estágio de entrada, um estágio de processamento e um estágio de saída. As entradas podem ser sensores reais de pressão, temperatura, fluxo ou abstratos, como tempo e custo. O estágio de processamento invoca cada regra adequada e gera um resultado para cada uma, combinando, então, os resultados das regras. Finalmente, o estágio de saída converte o resultado combinado para um valor real para a variável de controle de saída (DEL CAMPO *et al.*, 1998).

Inferência

Para a manipulação de bases de conhecimento é utilizada expressão de linguagem do tipo "SE premissa (antecedente); ENTÃO conclusão (conseqüente)", que formam um conjunto de regras de inferência. Esse tipo de expressão é o método mais comum para representar o conhecimento humano (ROSS, 1995). Os métodos de inferência Fuzzy são classificados como diretos ou indiretos. A Figura 5 apresenta os métodos de inferência Fuzzy.

Os métodos diretos usam regras de inferência do seguinte tipo: SE x é A e y é B , ENTÃO z é C , onde A , B e C são conjuntos Fuzzy, os termos posteriores ao SE formam a premissa, os termos posteriores ao ENTÃO formam a parte conseqüente; x e y são as variáveis da premissa, e z é a variável do conseqüente. O método direto mais popular é o de Mamdani, que tem uma estrutura simples de operações de mínimo e máximo e por isso é muito popular em aplicações. Outro método direto de inferência Fuzzy é o Sugeno, que usa funções lineares na parte do conseqüente. As regras são da seguinte forma: SE x é A e y é B , ENTÃO $z = ax + by + c$. Além desses, há outro método que utiliza uma parte do conseqüente simplificada: SE x é A e y é B , ENTÃO $z = c$, onde c é um valor real (TANAKA, 1991).

Na inferência Fuzzy, de maneira geral o primeiro passo é medir a adaptabilidade das premissas das regras para uma entrada de dados, depois inferir a conclusão para cada regra a partir da adaptabilidade obtida e, por fim, agregar as conclusões individuais das regras para obter a conclusão geral (OLIVEIRA, 2007).

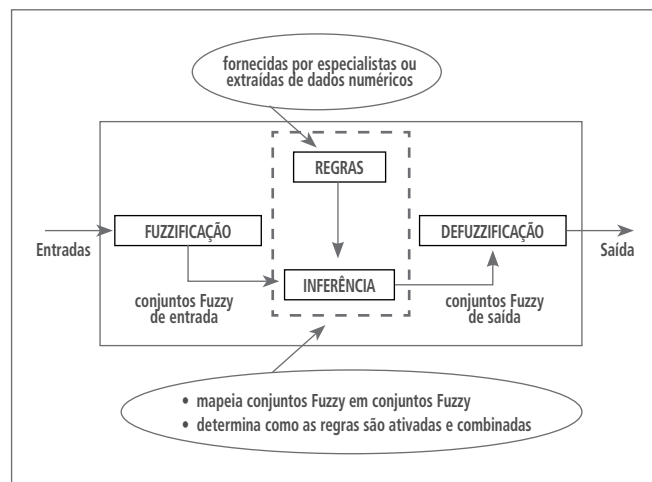


Figura 6. Sistema de Inferência Fuzzy (BALEEIRO, 2007)

Conclui-se então que um sistema de inferência Fuzzy pode ser composto de quatro blocos:

- **Base de conhecimento ou regras:** conjunto de proposições/regras geralmente propostas por um especialista onde as variáveis antecedentes/conseqüentes são variáveis linguística.
- **Base de dados:** define as funções de pertinência dos conjuntos e realiza operações de inferência a partir da base de regras montadas para o sistema.
- **Fuzzificação:** utilizam-se funções de pertinência estabelecidas inicialmente para o mapeamento das entradas em graus de pertinência para os conjuntos fuzzy determinados para a variável.
- **Defuzzificação:** retorna em valores o resultado difuso obtido.

A Figura 6 apresenta o Sistema de Inferência Fuzzy.

METODOLOGIA

Coleta e tratamento dos dados

O conjunto de dados industriais utilizado no presente trabalho foi coletado a partir de janeiro de 2013, mediante um histórico de todas as medições em um software denominado PI, através do qual os dados foram compilados diretamente ou via uma interface de ligação com o programa Microsoft Excel.

Nesse trabalho, os dados foram coletados em medidas médias a cada 2 horas para os diversos instrumentos de campo. Após a coleta de dados foi realizada média móvel de um período de 30 dias, com objetivo de suavizar oscilações, utilizando a Equação 1.

$$\hat{y}_{t+1} = \frac{y_t + y_{t-1} + \dots + y_{t-k+1}}{k} \quad 1$$

\hat{y}_{t+1} : dado futuro estimado

y_t : dado real no período "t"

Foram considerados os valores lidos nos instrumentos, portanto, não foram feitas análises laboratoriais para aferição de tais medidas. Os analisadores de kappa são instrumentos ISO e os demais possuem inspeção periódica pela instrumentação analítica, assim garantindo confiabilidade e descartando necessidade de acompanhamento de análises laboratoriais. Contudo, são conhecidos, pela operação, quais os valores usuais de controle das variáveis.

Regras do controle multivariável

No presente trabalho foi utilizado o controle Decision Making Expert (DME) que se enquadra para aplicação na desdesignificação com oxigênio. O DME é um controle da Sindus Otimização de Performance de Processos (OPP), que é uma ferramenta baseada no modelo de predição Fuzzy.

A estratégia adotada no controle visa o monitoramento do kappa de saída do digestor e de entrada da desdesignificação, onde o DME antecipa sua ação na temperatura, pH e carga de oxigênio na desdesignificação com oxigênio com regras pré-estabelecidas para cada variável. Isso foi possível devido o tempo de retenção entre descarga do digestor e entrada da desdesignificação ser menor que uma hora.

O kappa de saída e o grau de desdesignificação corrente também são monitorados pelo DME. Assim, o resultado de saída para ação em cada controlador envolvido tem considerações do processo como um todo. Para cálculo do grau de desdesignificação foi utilizada a medição do kappa de entrada e o valor médio do kappa de saída, sendo utilizada a Equação 2.

$$G.D = \frac{(Ke - Ks)}{Ks} * 100 [\%] \quad (2)$$

Onde:

G.D – grau de desdesignificação

Ke – kappa de entrada

Ks – kappa de saída

Visando a preservação das propriedades físicas da celulose no produto final, foi inserido no controle o valor mínimo do kappa de saída em 10,5. Assim, mesmo com o grau de desdesignificação abaixo do estimado, o controle enxerga o kappa de saída de 10,5 como limitante, e não atua nos controles. Esse valor de kappa foi determinado com base no melhor resultado de propriedades *versus* consumo de químicos no branqueamento no processo atual.

Controle de temperatura e pH

A temperatura e o pH fazem parte do controle Fuzzy. Foi determinada uma faixa de operação entre 80°C e 100°C para atuação do controle de temperatura, com base na literatura revisada para o presente trabalho. Apesar de valores mais elevados demonstrarem melhores resultados, o processo de aplicação não suporta valores acima de 100°C.

Para o pH intermediário foi determinada uma faixa de operação entre 10,8 e 11,5 para atuação do controle, é garantido, assim, um residual de OH⁻ após reação. Foram considerados três inputs no processo de fuzzificação do controle, sendo:

- erro de kappa do digestor: esse input determina a diferença entre o objetivo de kappa do digestor e o valor real;

- erro de eficiência: esse input determina a diferença entre o objetivo de grau de desdesignificação e o valor corrente do processo;
- kappa mínimo na saída da desdesignificação: esse input determina a diferença entre o objetivo do kappa mínimo e o valor corrente do processo.

O valor encontrado em cada input tem seu grau de pertinência avaliado em relação ao objetivo do controle, podendo ser mínimo, baixo, normal, médio e alto. Posteriormente, é feita a aplicação das regras.

No processo de defuzzificação são determinados os pesos: reduzir, reduzir pouco, variável estável, aumentar pouco e aumentar, com valores específicos para temperatura e pH. Assim, o valor de saída após aplicação das regras entra no cálculo para determinação do valor de atuação final do controle. A Figura 7 mostra o fluxo de atuação e tratamento de dados dentro do controle Fuzzy.



Figura 7. Princípio de operação do DME

Fonte: arquivo pessoal.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estabilidade do número kappa na saída da desdesignificação com oxigênio

A estabilidade do número kappa na saída da desdesignificação com oxigênio é de extrema importância para ajuste no processo seguinte. Quanto menor a variabilidade do kappa, menor será a taxa de variação de carga de produtos químicos, assim melhorando a seletividade de cada estágio.

A Figura 8 mostra o desvio-padrão do kappa na saída da desdesignificação com oxigênio, indicando resultados antes e após aplicação do controle, comparando com o desvio-padrão do kappa do digestor.

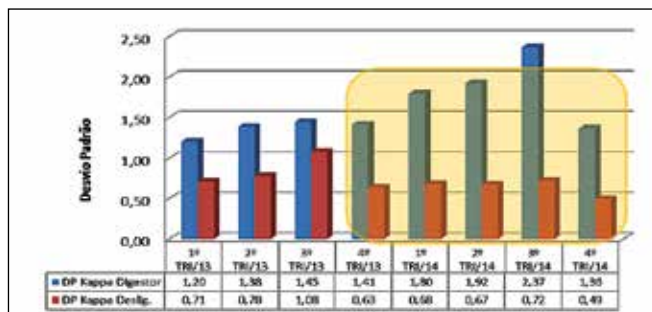


Figura 8. Condição do desvio-padrão do kappa do digestor *versus* kappa da desdesignificação após aplicação do controle

Fonte: arquivo pessoal

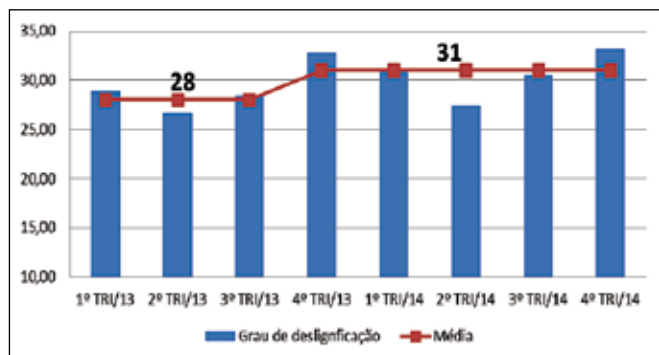


Figura 9. Comportamento do grau de deslignificação após aplicação do controle
Fonte: arquivo pessoal.

Grau de deslignificação

O grau de deslignificação é o meio mais comum de se medir a eficiência do processo de deslignificação com oxigênio nas indústrias de celulose. Os resultados foram analisados relativamente ao valor absoluto do kappa de saída, não sendo assim considerado o impacto do ácido hexenurônico.

O controle multivariável manteve taxa de variação de pH, temperatura e carga de oxigênio oscilando a deslignificação na busca de objetivo de 35% de grau de deslignificação. A Figura 9 mostra a evolução do grau de deslignificação com a aplicação do controle multivariável, que caracteriza um aumento médio de 3%.

A evolução do grau de deslignificação pode também ser explicada pelo aumento do kappa do digestor e manutenção do kappa da deslignificação com oxigênio. A Figura 10 mostra que antes da aplicação do controle multivariável o kappa da deslignificação com oxigênio vinha mantendo tendência de subir no mesmo padrão do kappa do digestor. A partir da aplicação do controle, o kappa da deslignificação com oxigênio reduziu e manteve a tendência de manutenção.

Conforme descrito na literatura utilizada, a elevação da temperatura e do pH favorece o aumento da eficiência da deslignificação com oxigênio, justificando, assim, a manutenção do kappa de saída da deslignificação mesmo com aumento do kappa do digestor. A Figura 11 mostra o comportamento de pH e temperatura após a aplicação

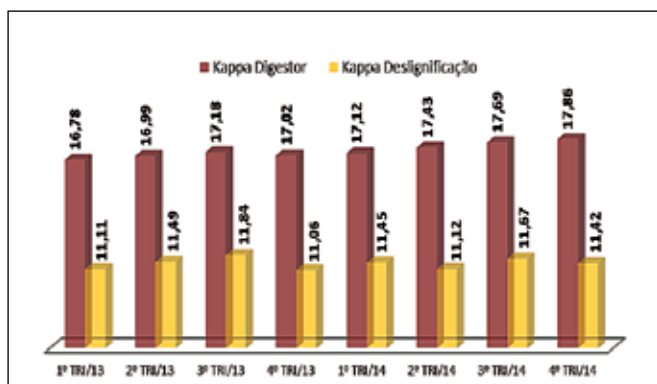


Figura 10. Comparação da evolução do kappa do digestor versus kappa da deslignificação com oxigênio
Fonte: arquivo pessoal.

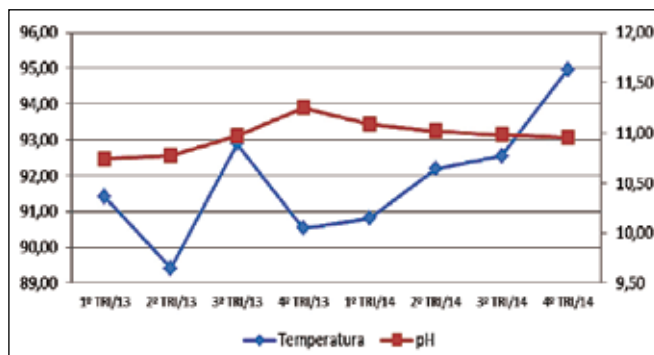


Figura 11. Comportamento de temperatura e pH após aplicação do controle
Fonte: arquivo pessoal.

do controle, que vem se mantendo em valores mais altos. IJIMA e TANEDA (1996) observaram que a taxa de deslignificação é diretamente proporcional ao aumento da carga de álcali e a eficiência de deslignificação cresce linearmente com o aumento da temperatura.

Apesar do consumo de reagentes químicos no branqueamento não ser objetivo deste trabalho, a Figura 12 mostra que a carga de cloro ativo total no estágio DHT do branqueamento obteve uma estabilidade que acompanha o kappa de saída da deslignificação com oxigênio, mesmo com aumento do objetivo de kappa no digestor.

Propriedades físicas no produto final

Na indústria de celulose, as propriedades físicas da polpa são itens de grande importância para os clientes. Dentre essas propriedades um forte indicador de qualidade é o número da viscosidade, uma das propriedades mais discutidas como referência da qualidade de polpas.

A viscosidade indica o grau médio da polimerização da celulose e, conseqüentemente, indica a degradação resultante da ação de aquecimento, luz, ácidos, álcalis e agentes oxidantes, ou seja, dos processos de polpação e/ou branqueamento (D'ALMEIDA, 1988).

A Figura 13 mostra que mesmo com o controle avançado ter elevado o grau de deslignificação, não houve impacto ou redução da viscosidade no produto final e foi mantido aumento na média, seguindo o aumento da viscosidade na saída do digestor.

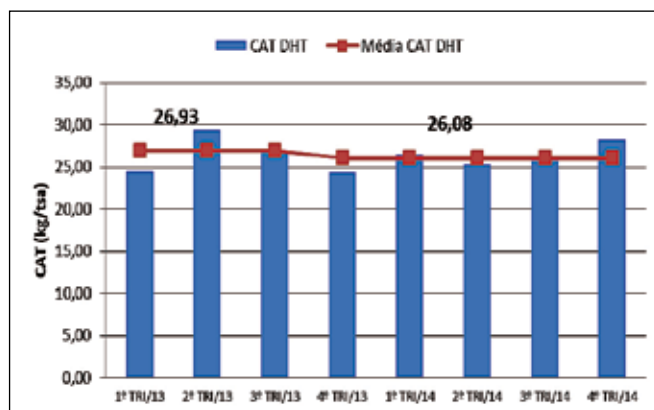


Figura 12. Comportamento do consumo de ClO_2 no estágio DHT
Fonte: arquivo pessoal.

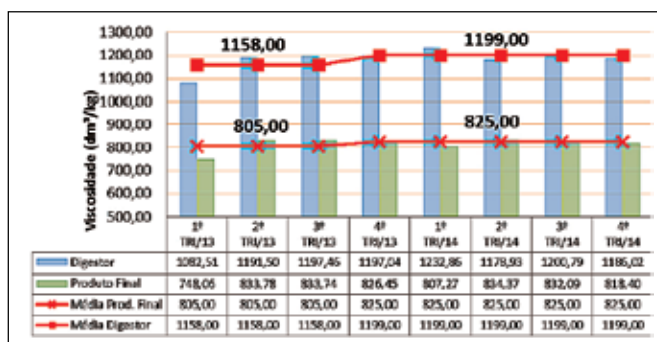


Figura 13. Comportamento da viscosidade no produto final após aplicação do controle

Fonte: arquivo pessoal.

CONCLUSÕES

Com a aplicação do controle multivariável na deslignificação com oxigênio é possível concluir que:

- mesmo com elevação do desvio-padrão do kappa do digestor durante o período analisado, o controle multivariável caracterizou um bom resultado na estabilidade do kappa de saída da deslignificação com oxigênio, resultando em uma redução média de 26,5% no desvio-padrão no kappa de saída da deslignificação;

REFERÊNCIAS

- Allen, L.; Bouchard, J.; Lapointe, C.; Pitz, M., *Improved deresination during oxygen delignification. part ii: Effects of blended surfactant addition*. Pulp & Paper-Canada, Toronto, v. 106, n. 2, p. 41-43, 2005.
- Baleeiro, Gleimar Botelho, *Modelagem neuro-fuzzy na predição no volume de Eucaliptus*. p. 07-11, Graduação em, Ciências da Computação – Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2007.
- Chen, S.; Lucia, L.A., *Fundamental insight into the mechanism of oxygen delignification of kraft pulp: The influence of a novel carbohydrate protective system*. Cellulose Chemistry and Technology, v.36, n.3-4, p. 339-351, 2002
- Colodette, J.L.; Gomide, J. L.; Batista, J. C., *Efeito de aditivos na deslignificação com oxigênio de polpa kraft de eucalipto*, 22º Congresso Anual de Celulose e Papel – ABTCP Anais... São Paulo, Brasil. p. 217-236, 1989.
- Del Campo, I., J. Echanobe and J. Tarela (1998) *Implementation of intelligent controllers on digital signal processors*, Cybernetics and Systems, vol.29, no.3, p.283-301
- Dence, C.W.; Reeve, D., *Pulp bleaching: Principles and Practice*. Atlanta: Tappi Press, 1996. 869 p.
- Gratzl, J., *The chemical principles of pulp bleaching with oxygen, hydrogen- peroxide and ozone - A short review*. Papier, Bingen, v. 46, n. 10A, p. V1-V8, 1992.
- Hsu, C.; Hsieh, J., *Effects of mass-transfer on medium-consistency oxygen bleaching kinetics*. Tappi Journal, Atlanta, v. 68, n. 11, p. 126-130, 1985.
- Iijima, J. F.; Taneda, H., *Effects of several factors on medium consistency oxygen delignification*. International Pulp Bleaching Conference. Proceedings...p. 403-409, 1996.
- Lakhmi Jain, Clarence de Silva (1998), *Intelligent Adaptive Control: Industrial Applications*, CRC Press.
- McDonough, T.J., *Oxygen delignification*. In. Dence, C. W.; Reeve, D. W. Pulp bleaching: Principles and Practice. Atlanta: TAPPI Press, 1996, cap. 6, p. 213-239.
- Oliveira, A.A.S. *Modelagem Fuzzy e Neuro-Fuzzy do processo monocíclico da ferrugem asiática da soja* / Alexandre Arduini da Silva e Oliveira. Lavras – Minas Gerais, 2007. 29p
- Pedrycz W. Gomide F. (2008) *"Fuzzy Systems Engineering: Toward Human-Centric Computing"*. IEEE Press.
- ROSS, T.J. (1995). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. McGraw-Hill International Edition, New York.
- Sixta, H., *Handbook of pulp, Pulp Bleaching*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim, 2006.
- Tanaka, K., *An Introduction to Fuzzy Logic for Practical Applications*. Kanazawa, Japão. Kanazawa University, 1991
- Van Heiningen, A.; Krothapalli D; Genco, J; Justason, A., *A chemical reactor analysis of industrial oxygen delignification*. Pulp and Paper Canada, Pointe-Claire, v.104, n.12, p.96-101, 2003.
- Violette, S. M., *Oxygen delignification kinetics and selectivity improvement*. Tese (Doutorado em Engenharia Química). University of Maine. Orono, 2003.
- Yager, R.R.; Filev, D.P. (1994). *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*, John Wiley & Sons.~
- Zadeh, L. A. 1965. *Fuzzy sets. Information And Control* 8; 338-353
- Zou, H., Liukkonen, A.; Cole, B.; Genco, J.; Miller, W., *Influence of kraft pulping on the kinetics of oxygen delignification*. Tappi Journal, Atlanta, v. 83, n. 2, p. 65-71, 2000.

- mantendo taxa de variação no pH, temperatura e carga de oxigênio conforme regras pré-estabelecidas e pela antecipação do controle, foi obtido aumento médio de 3% no grau de deslignificação. Em momentos de estabilidade no digestor, o grau de deslignificação atingiu valores de 35%;
- não houve impacto na viscosidade do produto final devido à atuação do controle multivariável, mesmo considerando que houve aumento no pH e na temperatura para manter a deslignificação mais severa em momentos de kappa mais elevado na saída do digestor. Isso foi possível devido o controle ter como limitador um kappa mínimo de 10,5 na saída da deslignificação, mesmo com o grau de deslignificação abaixo de seu objetivo;
- não obstante o processo de deslignificação com oxigênio ter parâmetros de controle bem definidos, fica evidenciado que variar esses parâmetros através de um controle multivariável traz um potencial significativo de estabilidade, ganho de eficiência no processo e um novo padrão operacional, onde as ações do controle são padronizadas em função de uma condição de processo. Isso evita a disparidade entre as ações humanas decorrente da diferença de percepção do processo e o tempo de decisão de qual ação a ser tomada. ■