

PREDIÇÃO DO NÚMERO KAPPA DE UM DIGESTOR CONTÍNUO DE CELULOSE KRAFT USANDO ANÁLISE DE REGRESSÃO MÚLTIPLA

F.M. CORREIA¹, S.A. MINGOTI² e J.V.H. D'ANGELO³

¹ CENIBRA – Celulose Nipo Brasileira S.A.

² UFMG – ICEx Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Estatística

³ UNICAMP – FEQ – Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos

e-Mail para contato: flavio.correia@cenibra.com.br

RESUMO – O digestor contínuo de celulose kraft é um reator pressurizado que tem a função de promover as reações de deslignificação das fibras da madeira. Neste equipamento ocorre a dissolução das cadeias de lignina, além das indesejáveis reações de degradação dos carboidratos. A qualidade da celulose produzida é medida pelo número Kappa, que é uma referência do teor de lignina residual e é o item mais importante para o controle das reações, sendo determinante para as etapas subsequentes do processo. Possui impactos significativos nos custos, meio ambiente e na qualidade da celulose final. Sua análise tem defasagem do tempo de retenção (~ 4 horas) quanto às principais variáveis de controle. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi obter um modelo de predição do número kappa, de forma antecipada ao resultado das análises de laboratório. Foram tratados dados de processo obtidos durante dois meses de operação, usando as principais variáveis de processo de um digestor contínuo de celulose kraft de eucalipto, modelo *kamyr*. Na análise de regressão, foi utilizado o método dos mínimos quadrados ordinários, usando dados industriais para produzir modelos *multi-input single-output*. Após ajuste do modelo aos dados observados, realizou-se a validação com um novo conjunto de dados, obtendo erro percentual médio da ordem de 4 %, equivalente às incertezas do próprio método de medição.

1. INTRODUÇÃO

Nas indústrias de celulose uma variável muito importante, utilizada para medir a qualidade da polpa produzida no processo de digestão é o Número Kappa, que é um índice que traduz o grau de deslignificação da celulose. No Brasil, seu método de análise está expresso na norma ABNT NBR ISO 302:2005. Pode também ser analisado em um “medidor *on line*”, que por luz ultravioleta aplicado à amostra, estima o número kappa conforme curva de calibração.

As análises para determinar o número kappa são realizadas com base na corrente de saída do digestor, sobre uma corrente de produtos que já foi processada. Porém, considerando que o tempo de residência no digestor é em torno de 4 horas, tomadas de decisão com base nestas análises, podem não ser as mais adequadas.

Nas modernas indústrias, grandes quantidades de dados do processo estão disponíveis e podem contribuir para identificar e evitar falhas. A análise de regressão múltipla é uma das técnicas estatísticas usadas em conjuntos de dados complexos, possuindo várias aplicações para avaliação dos processos ou como mecanismos de predição de variáveis, mas poucas com foco em aplicações de celulose de fibra de eucalipto. A utilização de modelos de predição, baseados na análise de regressão, pode permitir ações de controle mais rápidas e eficazes.

Neste contexto, o presente trabalho pretende contribuir para um melhor entendimento entre as variáveis de processo do digestor contínuo e o número kappa, utilizando uma análise de regressão de dados industriais, relacionando diversas variáveis de operação importantes do digestor e o número kappa da celulose produzida, de forma a permitir uma predição do processo, e avaliação de possíveis cenários para obtenção de melhores resultados.

2. O DIGESTOR CONTÍNUO E NÚMERO KAPPA

O digestor contínuo é um reator tubular vertical no qual ocorrem reações de deslignificação dos cavacos de madeira, em alta temperatura e pressão. Alimenta-se cavacos e uma solução alcalina (licor branco de cozimento), cujos componentes ativos são o hidróxido de sódio e o sulfeto de sódio (no processo Kraft). Os cavacos se movem em fluxo descendente, sendo deslignificados gradativamente, saindo do equipamento em forma de polpa. No interior do digestor coexistem as fases sólida, líquida e vapor e sua operação adequada está ligada aos fenômenos de transferência de calor e massa, bem como à evolução das reações químicas. De uma forma geral, é constituído de três regiões distintas: zona de impregnação, zona de cozimento (onde ocorrem as reações de deslignificação), zona de lavagem (onde ocorrem as fases de lavagem, resfriamento e remoção da lignina residual), conforme mostrado na Figura 1.

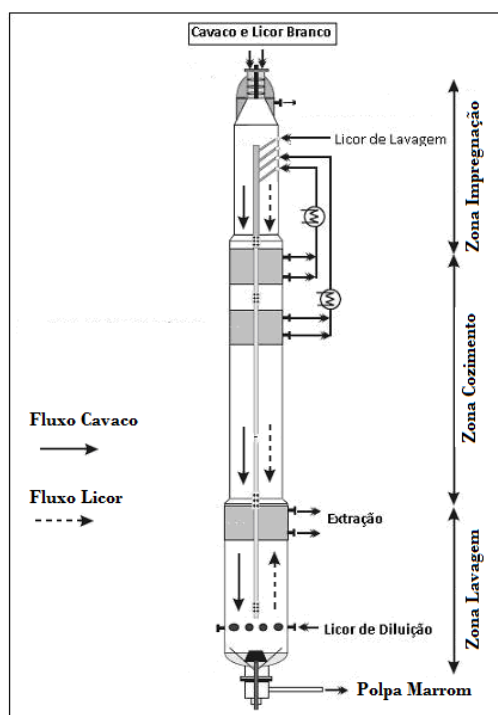


Figura 1 – Esquema típico de um digestor contínuo Kamyry (Smook, 1988).

A principal falha de processo que pode ocorrer em um digestor contínuo é a produção de uma polpa com número kappa elevado. Nestas situações, ocorre a obstrução de equipamentos com perdas significativas de qualidade e produção. Por outro lado, se muito baixo, implica em perda de rendimento, alto consumo de químicos e energia. Esta medição é realizada na descarga do digestor, sendo que as principais variáveis de processo estão localizadas no topo do mesmo. Desta forma, considerando a variável de controle em relação à variável manipulada, existe uma defasagem de aproximadamente 4 horas, que é o tempo de residência do equipamento.

Vários autores estudaram modelos buscando identificar relações entre o número kappa e variáveis de processo. Dayal *et al.* (1994), aplicaram técnicas de redes neurais e a técnica estatística PLS (mínimos quadrados parciais), tendo como objetivo compreender melhor as correlações entre o número kappa e outras variáveis do digestor para coníferas. Registraram as dificuldades do longo tempo de resposta entre a medida do número kappa e as ações corretivas.

Roberts (1997), registrou várias abordagens de modelização utilizadas para controlar um digestor contínuo. O número Kappa é controlado usando uma técnica baseada na cinética da reação. O controle de nível utiliza um modelo de séries temporais. Os pontos fortes e fracos de cada técnica são discutidos. Reportou as dificuldades da não linearidade do sistema. Apesar de não citar números, considerou possível um adequado modelo do número kappa para fibra de madeira *softwood*.

Carvalho (1999) estudou os efeitos das variáveis de cozimento nas características químicas de celulose Kraft de *Eucalyptus globulus*. Após uma minuciosa análise das regressões lineares multivariáveis em experimentos de cozimento laboratorial, concluiu que poderia estimar o número kappa em função do fator H, carga alcalina e sulfidez.

Ahvenlampi e Kortela (2005) apresentaram uma combinação de redes neurais e lógica *fuzzy* para prever o número kappa, e auxiliar na detecção de falhas. Os dados do modelo foram obtidos de uma operação normal de um digestor contínuo de celulose fibra curta. Reportaram que a configuração atingiu bons resultados de desempenho e reduziu os comportamentos anormais.

Halmevaara e Hyotniemi (2006) desenvolveram método usando regressão estatística multivariada para capturar as dependências entre os parâmetros do sistema e das medidas de qualidade. Apresentaram resultados de ajustes de regressão interativa como estudo de caso em simulação em digestor contínuo vaso duplo, para fibra longa, através de seis variáveis operacionais do digestor.

Com exceção dos trabalhos de Carvalho (1990) e Ahvenlampi e Kortela (2005), existem poucas referências de aplicações das técnicas de predição de número kappa em digestor contínuo com madeiras de fibra curta, o que reforça a contribuição deste trabalho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados usados neste estudo, foram oriundos de um digestor contínuo fase vapor, modelo *kamyr* com capacidade de produção de 500.000 tSA/ano de celulose kraft de *eucalyptus grandis* e *urograndis* de uma fábrica localizada no estado de Minas Gerais. Os dados foram coletados em um total de 2.766 observações e foram divididos em dois grupos. O primeiro para construção do modelo, utilizando dados de 2 meses de operação com 1.518 observações e o segundo, com 1.248 observações, para validação do modelo, utilizando dados dos 2 meses subsequentes aos do primeiro grupo. Em ambos os grupos foram excluídos os dados originados de produções inferiores a 50 % da produção normal. Considerando a experiência industrial adquirida ao longo de mais de 20 anos, foram selecionadas algumas variáveis de processo que influenciam no número kappa para realizar a análise de regressão múltipla. A Tabela 1 apresenta a lista dessas variáveis, bem como o *delay* do tempo de retenção de cada uma delas.

Tabela 1 – Variáveis de processo analisadas.

Sigla	Descrição	Unidade	Delay (h)
1. DENS	Densidade a granel do cavaco	kg/m ³	3,5
2. CS	Consistência do cavaco	%	3,5
3. TRET	Tempo de retenção do silo de cavacos	min	3,5
4. TSILO	Temperatura do silo de cavacos	°C	3,5
5. RPM	Rotação rosca dosadora de cavacos	RPM	3,5
6. RLM	Relação licor/madeira	m ³ /t	3,0
7. CA	Carga alcalina total	%	3,0
8. S	Sulfidez	%	3,0
9. TTOPO	Temperatura topo do digestor	°C	3,0
10. P	Pressão no topo do digestor	kg/cm ²	3,0
11. ACCOZ	Álcali efetivo circulação cozimento	g/L	2,5
12. TCCOZ	Temperatura circulação cozimento	°C	2,5
13. ACHOM	Álcali efetivo circulação homogeneização	g/L	1,5
14. TCHOM	Temperatura circulação homogeneização	°C	1,5
15. EXTFUN	Percentual extração de licor peneira inferior	%	0,5
16. LPDFUN	Fluxo Licor Preto Diluido aplicado ao fundo	m ³	0,5
17. LPD/RPM	Relação LPDFUN/RPM	m ³ /RPM	0,5
18. KANT	Número kappa anterior	Un.kappa	0,5
19. KAPPA	Número kappa	Un. Kappa	0,0

As variáveis foram agrupadas e analisadas pelo método dos mínimos quadrados ordinários, com o uso do software *Eviews version 5*. Foi aplicada a regressão linear múltipla, visando obter uma relação entre a variável dependente (número kappa) e as demais variáveis. Inicialmente foram tabuladas as 17 primeiras variáveis indicadas na Tabela 1, visando detectar os principais padrões de similaridade entre as variáveis com a menor perda de informação. Por ter apresentado baixa correlação, posteriormente foi incluído a 18ª variável (número kappa anterior) para a construção do modelo. Para ajuste do modelo foi usado o *método stepwise* com nível α de remoção 0,1.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados do número kappa foram tabulados e graficados, para a função de autocorrelograma do número kappa, conforme Figura 2. Pode-se observar que o número kappa é fortemente correlacionado com o número kappa anterior. Assim, essa variável foi incorporada na dinâmica de modelo da matriz do número kappa.

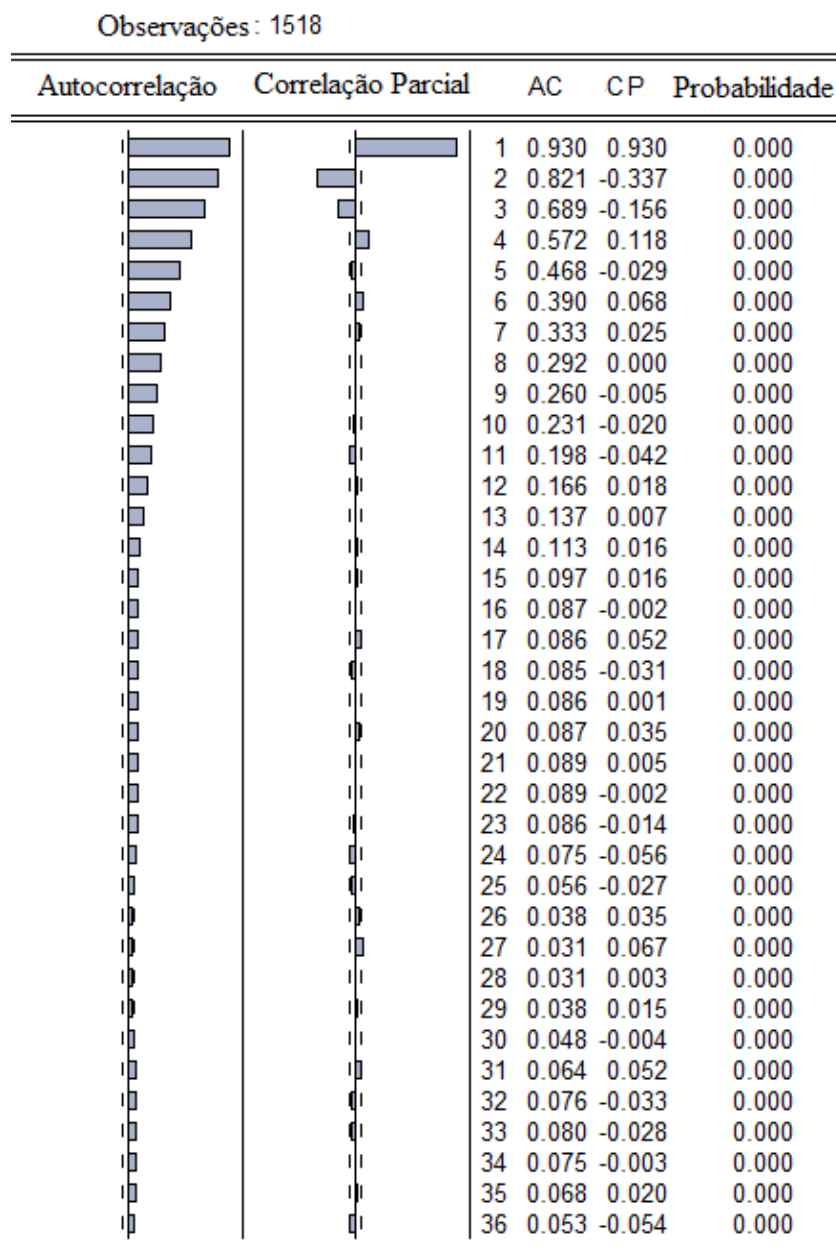


Figura 2 – Função de autocorrelograma do número kappa.

Através do método dos mínimos quadrados ordinários foram encontrados os coeficientes indicados na Tabela 2 (apresentados na forma da Equação 1), que possibilita a predição do número kappa em função das variáveis operacionais selecionadas pelo método *stepwise*.

Tabela 2 – Coeficientes do modelo número kappa.

Variável Dependente : KAPPA

Método : Mínimos Quadrados

Variável	Coefficiente	Desvio Padrão	Estatística t	Probabilidade
TTOPO	-0.030615	0.008194	-3.736077	0.000
TCHOM	-0.040998	0.007724	-5.307966	0.000
TCCOZ	-0.019371	0.007973	-2.429595	0.015
ACCOZ	-0.052396	0.015349	-3.413564	0.000
ACHOM	-0.093956	0.009374	-10.02309	0.000
C	15.72348	1.575070	9.982715	0.000
CA	0.039818	0.016071	2.477672	0.013
EXTFUN	0.009219	0.003186	2.893452	0.003
KANT	0.883248	0.009784	90.27099	0.000
LPDRPM	0.058975	0.025962	2.271620	0.023
RETSILO	-0.017674	0.008349	-2.116985	0.034
RPM	0.012757	0.003851	3.312747	0.000
R^2	0.884612	Média	16.1518	
R^2 ajustado	0.883742	Desvio Padrão	1.64089	
Soma dos Quadrados dos Resíduos	456.7050	Critério Akaike	1.68453	
		Critério Schwarz	1.72771	
		Estatística F	1016.84	
Durbin-Watson	1.594353	Probabilidade (F)	0.00000	

$$\begin{aligned} \text{KAPPA} = & 15,7235 - 0,0306 \text{ TTOPO} - 0,0410 \text{ TCHOM} - 0,0194 \text{ TCCOZ} \\ & - 0,0524 \text{ ACCOZ} - 0,0940 \text{ ACHOM} + 0,0092 \text{ EXTFUN} \\ & + 0,8832 \text{ KANT} + 0,0590 \text{ LPDRPM} - 0,0177 \text{ RETSILO} + 0,0128 \text{ RPM} \end{aligned} \quad (1)$$

A Figura 3, apresenta o histograma dos resíduos (kappa real – kappa estimado), mostrando a distribuição normal dos resíduos e seus dados descritivos.

Ao modelo obtido, dado pela Equação 1, foi aplicado o segundo conjunto de dados, tendo obtido respectivamente (modelo / validação): erro médio absoluto (0,39/0,66); erro percentual médio absoluto (2,35/3,90); raiz do erro quadrado médio (0,56/0,85) e coeficiente de determinação múltipla R^2 (0,88/0,80).

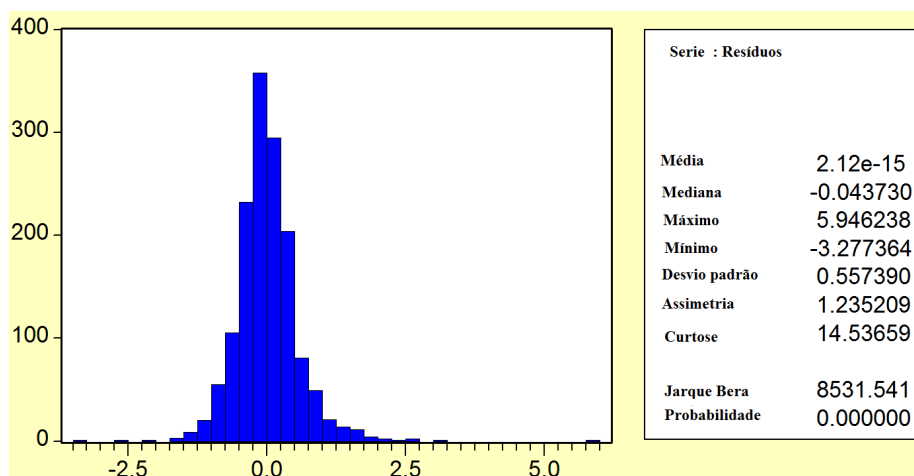


Figura 3 – Histograma dos resíduos.

A Figura 4 apresenta uma comparação entre os dados estimados pelo modelo e os dados reais do segundo grupo.

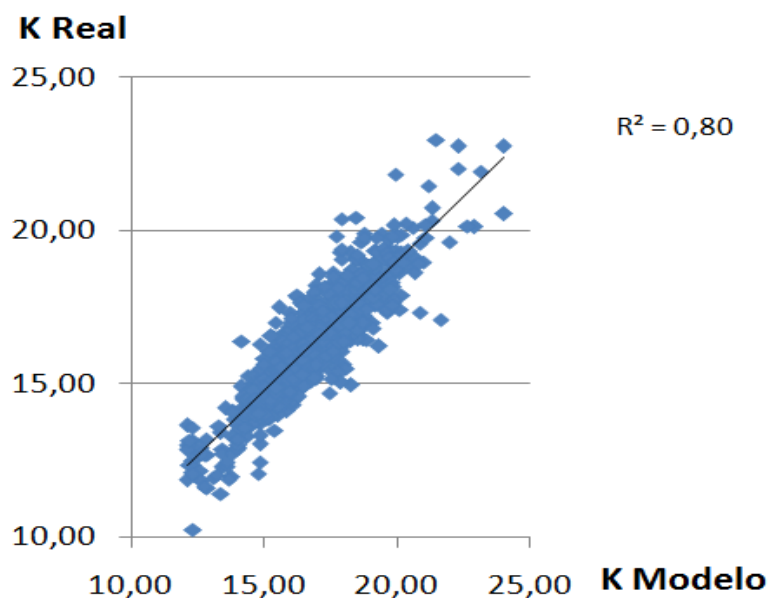


Figura 4 – Número Kappa real x Número kappa predito.

5. CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos, pode-se concluir que a análise de regressão pelo método de mínimos quadrados ordinários permite realizar uma boa predição do número kappa em um digestor contínuo de celulose Kraft de eucalipto. Partindo dos dados históricos de 18 variáveis de processo, foi possível construir um modelo para predição do número kappa envolvendo 12 delas, que representou bem aproximadamente 80% da proporção das variações do número kappa explicada pelas variáveis regressoras indicadas do modelo. A inclusão do “número kappa anterior”, possibilitou um incremento significativo de precisão do modelo.

Com o modelo construído, possibilita-se uma boa predição do número kappa em um digestor industrial contínuo de celulose Kraft de eucalipto, permitindo tomadas de decisão sobre o processo que evitam perdas de produção e de qualidade do produto. Além disso, permite uma melhor avaliação da influência das alterações das variáveis, nos diferentes cenários de modificações na busca de otimização desta importante etapa do processo fabril de celulose.

6. REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma ISO 302:200 Pastas celulósicas - Determinação do número Kappa.

AHVENLAMPI, T.; KORTELA, U. Clustering algorithms in process monitoring and control application to continuous digesters. *Informatica* 29, p.101-109, 2005.

CARVALHO, M. G. V. S. Efeito das Variáveis de Cozimento nas Características Químicas de Pastas Kraft de *Eucalyptus globulus*. *Tese Dr. Sc.*, Universidade de Coimbra, Portugal. 1999.

DAYAL, B.S.; MC GREGOR, J.F.; TAYLOR, P.A.; KILDAW, R.; MARCIKIC, S. Application of feedforward neural networks and partial least squares regression for modeling kappa number in a continuous Kamyr digester. *Pulp&Paper Canada*, 95:1, p.26-32, 1994.

HALMEVAARA, K.; HYOTYNIEMI, H. Managing Complexity In Large Scale Control Systems. In : 17th IFAC The International Federation of Automatic Control, *Proceedings*. 2006.

ROBERTS, C. Modeling and control of a continuous digester. In: Dynamic Modeling Control Applications for Industry Workshop, IEEE Industry Applications Society, p.6-9 1997.

SMOOK, G.A. *Handbook for pulp and paper technologists*. Atlanta, TAPPI, 1988.