



MODELAGEM POR REDES NEURAIIS DA CAUSTIFICAÇÃO EM INDÚSTRIA DE CELULOSE MODELING BY NEURAL NETWORKS OF CAUSTIFICATION IN THE CELLULOSE INDUSTRY

Filipe Oliveira de Magalhães Costa¹

Olivert Soares Pinheiro²

Andrea Oliveira Souza Costa³

Esly Ferreira da Costa Júnior⁴

Resumo: Uma parte importante do processo Kraft de obtenção de celulose é o ciclo de recuperação, que permite o aproveitamento como combustível da matéria orgânica da madeira (principalmente lignina), separada no processo de cozimento, e também o reaproveitamento dos compostos químicos utilizados no digester. Dentro deste ciclo, a caustificação desempenha um importante papel, sendo responsável por transformar o licor verde (proveniente da caldeira de recuperação) em licor de cozimento (licor branco). Sendo assim, este trabalho tem por objetivo gerar modelos empíricos, por redes neurais, para o sistema de caustificação de uma fábrica de celulose. Para tal, dados operacionais do sistema de caustificação desta empresa foram empregados no treinamento e validação das redes. Os modelos obtidos tiveram bons resultados estatísticos, modelos com correlação (R) de aproximadamente 0,9, quando comparados a modelos estáticos da literatura onde R era cerca de 0,78.

Palavras-chave: Caustificação, Processo Kraft, Modelagem por redes neurais

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

²Celulose Nipo-Brasileira S.A (CENIBRA)

³Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

⁴Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Abstract: An important part of the Kraft pulping process is the recovery cycle, which allows the recovery of the organic matter from the wood (mainly lignin), separated in the cooking process, as well as the reuse of the chemical compounds used in the digester. Within this cycle, causticizing plays an important role, being responsible for transforming the green liquor (from the recovery boiler) into cooking liquor (white liquor). Thus, this work aims to generate empirical models, by neural networks, for the causticizing system of a pulp mill. For this, operational data of the causticizing system of this company were used in the training and validation of the networks. The obtained models had good statistical results, models with correlation (R) of approximately 0.9, when compared to static models of the literature where R was about 0.78.

Keywords: Caustification, Kraft Process, Neural Network Modeling

1. Introdução

1.1. O processo Kraft e a caustificação

O processo Kraft de obtenção de celulose, descrito no parágrafo a seguir, é o mais utilizado no processamento da madeira nas indústrias de celulose e papel [1]. Ele é o mais usado em função das vantagens oferecidas, dentre as quais pode-se citar: recuperação eficiente e economicamente viável dos reagentes químicos e produção de pastas de alto rendimento [2].

O processo Kraft tem por finalidade separar a lignina, substância química que dá rigidez à parede celular e é responsável pela ligação entre as fibras da madeira, da celulose e da hemicelulose presentes na madeira, evitando ao máximo a degradação das fibras. O cozimento da madeira no digestor, com o licor branco de cozimento, gera a pasta celulósica a ser branqueada e um subproduto chamado de licor preto. Este licor é rico em lignina e em compostos químicos, produzidos na digestão, a partir dos reagentes químicos do licor branco, a saber, hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S). A recuperação desses produtos químicos e o aproveitamento da matéria orgânica do licor preto como combustível são de vital importância para a indústria de celulose [3]. Green e Hough [4] afirmam que a viabilidade econômica de uma indústria de obtenção de celulose está relacionada à capacidade da caustificação em converter os produtos químicos recuperados em um licor de cozimento (licor branco) de qualidade para atender à demanda da produção.

O ciclo de recuperação Kraft é dividido em várias etapas. Inicialmente o licor preto fraco (licor preto que sai do digestor com baixa concentração de sólidos) passa por um sistema de evaporadores de múltiplo efeito e dá origem ao licor preto forte (com maior teor de sólidos). Este segue para a caldeira de recuperação, onde será queimado e ocorrerá a redução do sulfato de sódio (Na₂SO₄) a sulfeto de sódio, Na₂S (produto químico utilizado na polpação). Os sais fundidos oriundos do processo de queima são denominados *smelt*, que será dissolvido e enviado para última parte do ciclo de recuperação, a caustificação [3].

1.2. Sistema de Caustificação

Na caustificação é formado o licor branco de cozimento por meio da reação da cal, proveniente do forno de cal, com uma solução (licor verde) formada pela diluição dos sais fundidos, provenientes da caldeira de recuperação [3]. O sistema de caustificação é composto por uma série de equipamentos, que serão descritos no parágrafo a seguir,

mas nesse trabalho será dada ênfase no sistema de reatores que o compõe, que são o extintor e os caustificadores dispostos em série após o extintor. Na indústria em análise esse sistema é composto por um extintor e três caustificadores, sendo que a cal adicionada no extintor sofre uma reação de hidratação. A cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reage com o carbonato de sódio (Na_2CO_3) do licor verde, recuperando o hidróxido de sódio (NaOH) e produzindo como subproduto o carbonato de cálcio (CaCO_3), que é calcinado no forno de cal [5].

Para uma melhor compreensão do sistema de caustificação, são descritos os principais equipamentos que o compõe. Segundo Sanchez [6], esses equipamentos são:

Tanque de dissolução de *smelt*: Nele, o *s/melt* fundido proveniente da caldeira de recuperação é dissolvido, com a adição do licor fraco, formando o licor verde bruto.

Tanque de estabilização: É um tanque projetado para reter o licor verde por tempo suficiente para nivelar as variações de temperatura e densidade.

Clarificador de licor verde: Nele são removidas as partículas em suspensão presentes no licor verde (*dregs*). Após a retirada dos *dregs* o licor verde passa a ser denominado licor verde clarificado.

Filtro de *dregs*: Os *dregs* removidos são lavados para remover os produtos químicos residuais e filtrados para aumentar o teor de sólidos do material que será descartado.

Extintor: No extintor a cal e o licor verde são misturados e ocorre a hidratação da cal (reação de extinção). Ainda no extintor, inicia-se a reação de caustificação que possibilitará a produção do licor branco. Esse equipamento é equipado com dispositivo que retira as impurezas insolúveis provenientes da cal, os *grits*.

Caustificadores: São tanques agitados utilizados em série para garantir que a reação de caustificação continue e tenha um maior rendimento.

Há ainda outros equipamentos que compõe o sistema de caustificação dentre os quais pode-se destacar o forno de cal.

Tendo em mente a importância da caustificação no ciclo de recuperação e no processo de obtenção de celulose como um todo, este trabalho tem por finalidade gerar modelos matemáticos empíricos para o sistema de caustificação. Tais modelos foram gerados usando redes neurais, com entradas atrasadas, e tendo o intuito de prever a eficiência de Caustificação pós caustificador, EC.

1.3. Conceito de redes neurais

Há várias definições sobre o que são redes neurais, neste trabalho serão apresentados dois desses conceitos. Uma rede neural artificial (RNA) pode ser definida como um circuito composto por várias unidades de processamento inspiradas no sistema neural.

A outra definição é análoga a primeira e diz que uma RNA é um sistema massivamente paralelo e distribuído, composto por unidades de processamento que possuem capacidade de armazenar e utilizar conhecimento [7].

Quanto aos componentes de uma rede neural, existem dois tipos, os componentes físicos e os não físicos. É possível distinguir pelo menos dois componentes físicos nas RNA'S, as conexões e os elementos de processamento. Os componentes não físicos são os padrões e funções [8].

Padrões são dados de entrada da rede, enquanto as funções são os modelos matemáticos usados no treinamento e reconhecimento de padrões. Sendo assim, conexões, elementos de processamento, padrões e funções são os componentes básicos de qualquer rede neural artificial [8].

2. Materiais e Métodos

Todos os dados empregados na geração dos modelos foram obtidos de uma indústria nacional de celulose. Para gerar os modelos foram utilizadas como variáveis independentes (Variáveis de entrada) a vazão de licor, a dosagem de cal, a porcentagem de cal útil, a quantidade de Na_2CO_3 e NaOH no licor verde, além das temperaturas de entrada e saída do extintor, usando atraso nessas variáveis. Como variável dependente (Variável de saída) foi usada a eficiência de caustificação pós caustificador, EC. Os modelos foram gerados utilizando-se o programa STATISTICA. A tabela 1, a seguir, mostra todas as variáveis usadas na geração dos modelos.

Tabela 1- Variáveis de entrada

Variáveis	Descrição
QL	Vazão de licor
DC	Dosagem de cal
%C	Porcentagem de cal útil
Na ₂ CO ₃	Quantidade de Na ₂ CO ₃ no licor verde
NaOH	Quantidade de NaOH no licor verde
TE	Temperatura de entrada no extintor
TS	Temperatura de saída no extintor

É importante ressaltar que a sigla indica qual é a variável e o número entre parênteses a quantidade de atrasos usados. Por exemplo, QL(-1), a variável é a vazão de licor com 1 atraso de 10 min, ou seja, sendo QL a vazão de licor, QL(-1) é a vazão de licor medida 10 min antes.

3. Resultados e Discussões

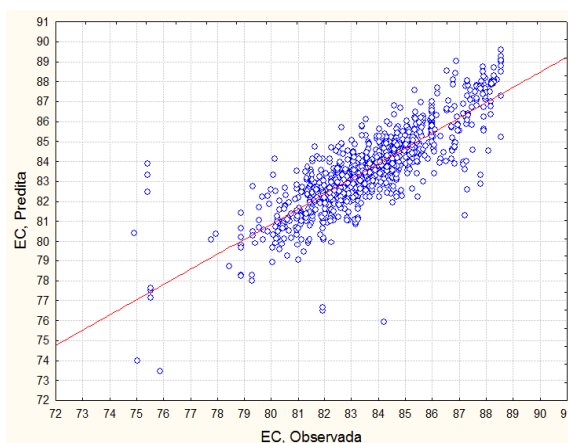
Como ponto de partida, usaram-se atrasos de 10 e 20 minutos em todas variáveis de entrada, com exceção das temperaturas de entrada e saída do extintor, para elas usou-se atraso de 10 minutos. Sendo assim, as variáveis de entrada foram: QL, QL(-1), QL(-2), DC, DC(-1), DC(-2), [...] (análogo para as outras variáveis de entrada, %C, Na₂CO₃, NaOH), TE, TE(-1), TS, TS(-1).

Usando essas variáveis como variáveis independentes e a eficiência de caustificação pós-caustificador, EC, como variável dependente (Variável de saída), gerou-se os modelos e os resultados estatísticos destes, na validação, são apresentados na tabela 2, a seguir:

Tabela 2- Resultados estatísticos, na validação, dos primeiros modelos

Modelo:	1	2	3	4
Média dos erros absolutos:	0,9638	0,8443	1,4376	1,2586
Desvio padrão dos erros:	1,3275	1,2140	1,8756	1,6650
Correlação (R):	0,7859	0,8265	0,4813	0,6279

Para essa primeira análise foram usados 3978 pontos operacionais, sendo que 1998 foram usados para treinar as redes, 990 para validar e 990 para testar. É possível observar que o modelo 2 é o modelo com melhores resultados estatísticos entre os modelos gerados até o momento. A representação gráfica, na validação, da relação EC observada vs Ec predita é mostrada pelo gráfico abaixo:

**Figura 1- EC observada vs EC predita**

Sabendo que o tempo de residência na caustificação é elevado, cerca de 3h [3], aumentou-se o atraso para 40 minutos em todas as variáveis de entrada, com exceção, novamente, das temperaturas de entrada e saída do extintor, para estas utilizou-se atraso de 30 minutos.

Sendo assim, as variáveis de entrada foram: QL, QL(-1), QL(-2), QL(-3), QL(-4), DC, DC(-1), DC(-2), DC(-3), DC(-4),[...] (análogo para as outras variáveis de entrada, %C,

Na_2CO_3 , NaOH), TE, TE(-1), TE(-2), TE(-3), TS, TS(-1), TS(-2), TS(-3).

Com isso, geraram-se novos modelos e o melhor modelo gerado (modelo 5) apresentou, na validação, correlação (R) de 0,85055, a média dos erros absolutos foi de 0,77166 e o desvio padrão dos erros foi de 1,07942. A distribuição dos resíduos do modelo, na validação, é apresentada no histograma (Figura 2) a seguir:

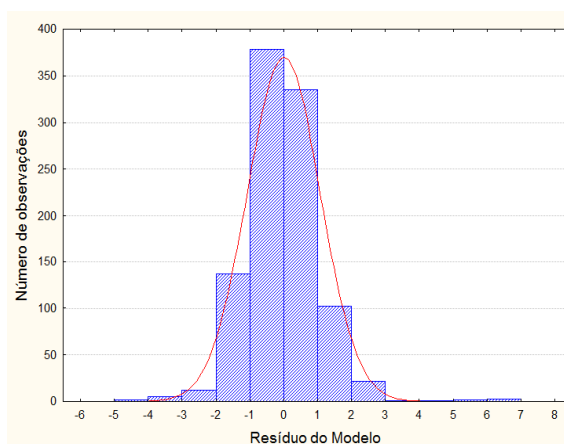


Figura 2- Distribuição dos resíduos do modelo 5

Para essa análise foram usados 3978 pontos operacionais, sendo que 1988 foram usados para treinar as redes, 1000 para validar e 990 para testar.

Notou-se uma melhora nos resultados, comparando o melhor modelo do primeiro tratamento (modelo 2) $R=0,8265$ com o melhor modelo do segundo tratamento (modelo 5) $R=0,85055$, na tentativa de melhorar ainda mais os resultados aumentou-se o atraso para 50 minutos nas variáveis de entrada, com exceção das temperaturas de entrada e saída do extintor para elas manteve-se o atraso de 30 minutos. Em resumo, as variáveis usadas como entrada foram as mesmas da análise anterior, acrescentando-se as variáveis referentes aos atrasos de 50 minutos (QL(-5), DC(-5), assim por diante).

Com isso, novos modelos foram gerados e o melhor modelo (modelo 6) apresentou, na validação, correlação (R) de 0,86996, a média dos erros absolutos foi de 0,80493 e o desvio padrão dos erros foi de 1,05501, melhora razoável, na correlação, quando comparado com os resultados do modelo 5. Os modelos com atrasos de 60 minutos, já não apresentaram uma boa melhora quando comparados com os modelos de 50 minutos.

Tendo como base que os melhores modelos obtidos foram os das redes de base radial, também alterou-se o intervalo do número de neurônios das redes RBF (redes de base radial). Nos modelos gerados até o momento o número de neurônios variou no intervalo

de 1 até cerca de 995 neurônios, a partir de agora as redes RBF terão no mínimo 600 e no máximo 994 neurônios.

Sendo assim, geraram-se novos modelos e os resultados, na validação, são mostrados na tabela 3, a seguir:

Tabela 3- Resultados estatísticos

Modelo:	7	8	9	10
Média dos erros absolutos:	1,0653	0,6489	0,6609	1,7289
Desvio padrão dos erros:	1,3833	0,9514	0,9372	2,2050
Correlação (R):	0,7788	0,9021	0,9052	0,0716

O modelo 9 foi o que apresentou melhor correlação, o gráfico da Eficiência de caustificação predita x Eficiência de caustificação observada nos dados, é mostrado a seguir:

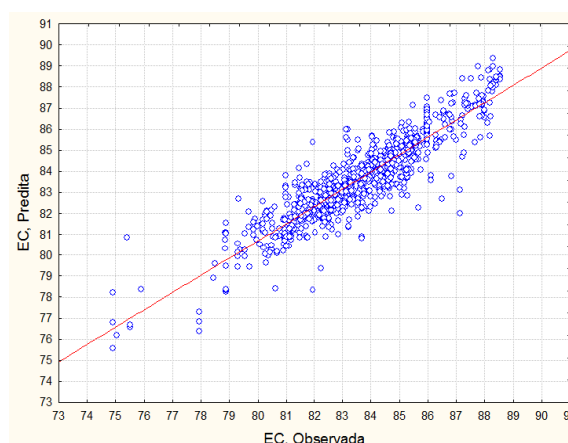


Figura 3- EC, predita x EC, observada

A análise gráfica apresentada na Figura 3 indica que o modelo reproduz satisfatoriamente os dados experimentais. Para complementar a análise do modelo, a distribuição dos resíduos desse modelo é mostrada no histograma abaixo:

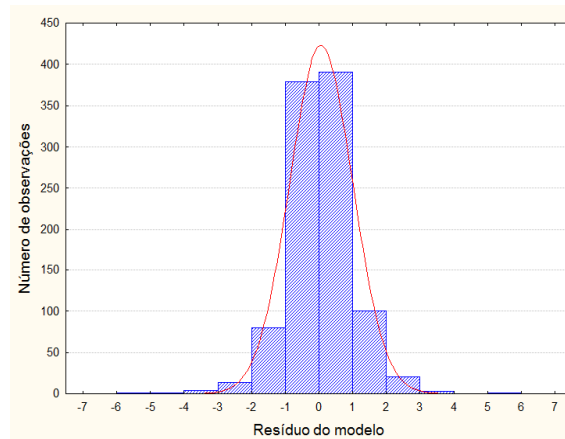


Figura 4- Distribuição dos resíduos do modelo 9

A análise da Figura 4 indica que os erros seguem uma distribuição aproximadamente normal, o que é desejável.

Uma dúvida que pode surgir é como definir qual é a melhor quantidade de atrasos a se usar e como usá-los, e essa dúvida é difícil de ser respondida principalmente por se tratar de modelos empíricos. Isso só será respondido fazendo as análises e gerando os modelos, por tentativa e erro, assim como foi feito no presente trabalho.

4. Conclusão

Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir que foi possível a obtenção de modelos empíricos baseados em redes neurais, com entradas atrasadas, para a descrição do sistema de caustificação.

É importante ressaltar que os dados industriais que foram utilizados para gerar os modelos presentes nesse trabalho, não foram coletados especificamente para gerar modelos, mas sim para acompanhar a rotina de operação da fábrica. Ressalta-se também que para armazenar as variáveis no banco de dados da empresa considera-se uma “banda morta”, isto é, novos valores para a variável só serão registrados se a diferença entre a nova medida e o valor armazenado no banco de dados for superior a certo valor definido previamente (“banda morta”). Isto dificulta o ajuste do modelo aos dados experimentais.

Comparando os resultados deste trabalho com trabalhos prévios do grupo de pesquisa em Modelagem e Otimização de Processos, como o de Costa *et al.* [9] onde foram gerados modelos estáticos para a caustificação e o melhor modelo apresentou, na validação, $R=0,7838$ é possível observar que utilizando entradas atrasadas os resultados

apresentaram significativas melhorias como o modelo 9 que apresentou, na validação, $R=0,9052$.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de IC e de produtividade DTI.

6. Referências bibliográficas

TRAN, H.; VAKKILAINNEN, E. K. *The Kraft Chemical Recovery Process*. TAPPI Short Course- St. Petersburg, 2008.

SILVA JR., F. G. *Conversão do processo kraft em soda-DDA (Sal Di-sódico de 1,4-dihidro-9,10-dihidroxi antraceno) para madeira de eucalipto*. 172 f. Dissertação (Mestrado em Ciências, área de concentração: Ciência e tecnologia de madeiras)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

FIGUEIRÊDO, L. S. *Modelagem Matemática do Estado Estacionário de um Real Sistema de Caustificação em uma Fábrica de Celulose*. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, 2009.

GREEN, R. P.; HOUGH, G. *Chemical Recovery in the Alkaline Pulping Processes*. 3. ed. Tappi Press, 1998.

MENESES, R. F. *Modelagem do sistema de recuperação do licor de cozimento na produção de celulose*. 23 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Química- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

SANCHEZ, D. *Recausticizing: Principles and practice*. TAPPI Kraft Recovery Course Notes, 2009.

CASTRO, L. N.; VON ZUBEN, F. J. *Redes Neurais Artificiais*. Disponível em: <ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia006_03/topico5_03.pdf>. Acesso em 20 de Fevereiro de 2015.

CARDON, André; MULLER, Daniel N. *Introdução às Redes Neurais Artificiais*. Porto Alegre, 1994. Disponível em: <http://www.inf.ufrgs.br/~danielnm/docs/intro_rna.pdf>. Acesso em 20 de Fevereiro de 2015.

COSTA, F. O. M.; PINHEIRO, O. S.; COSTA, A. O. S.; COSTA JR., E. F.;
Modelagem por Redes Neurais sem Entradas Atrasadas da Caustificação em Indústria de Celulose. p. 58-61 . In: Anais do VI Encontro Científico de Física Aplicada [Blucher Physics Proceedings, v.2, n.1]. São Paulo: Blucher, 2015.