

# Estudo do processo de obtenção celulose Kraft com ênfase no forno de cal<sup>1</sup>

Érica Daré Alves<sup>2</sup>  
Olivert Soares Pinheiro<sup>3</sup>  
Andréa Oliveira Souza da Costa<sup>4</sup>  
Esly Ferreira da Costa Junior<sup>5</sup>

## Resumo

O processo Kraft é a principal forma de produção de celulose por ser um processo com cozimento contínuo. Uma de suas vantagens é o sistema de recuperação dos produtos químicos que é associado ao processo. O sistema de caustificação objetiva a recuperação do licor branco, a partir de produtos químicos inorgânicos oriundos da caldeira de recuperação e do forno de cal. Esse forno de cal é um forno rotativo que pode ser utilizado na indústria de celulose e diversas outras. O forno de cal rotativo de fábrica de celulose objetiva: reduzir os custos de produtos químicos, através da conversão da lama de cal (carbonato de cálcio) para cal (óxido de cálcio) e resolver o problema do descarte da lama de cal. A energia do forno de cal é proveniente da queima de combustíveis fósseis, sendo que, nas fábricas mais modernas, aplica-se gás natural. Nos demais equipamentos das fábricas de celulose, fontes renováveis de energia são basicamente utilizadas. Nesse contexto, este trabalho objetiva apresentar um estudo sobre o processo de obtenção de celulose Kraft, com ênfase no forno de cal, já que a operação ótima do mesmo permite minimizar o consumo de combustível e os impactos ambientais desse processo.

**Palavras-chave:** Processo Kraft. Caustificação. Forno de cal.

## Abstract

*The Kraft process is the main way to cellulose production for being a process with continuous cooking. One of its advantages is the chemical product recovery system, which is associated to the process. The causticizing system aims the recovery of white liquor from inorganic chemical products derived from the recovery boiler and lime kiln. This lime kiln is a rotary kiln that can be used in the paper industry and various others. The rotary lime kiln of pulp mill aims to: reduce chemical costs by converting the lime mud (calcium carbonate) into quicklime (calcium oxide) and solve the problem of lime sludge disposal. The energy of the lime kiln is from the burning of fossil fuels, so that the most modern factories use natural gas. In other equipment from pulp mills, renewable energy sources are basically used. In this context, this paper aims to present a study on the Kraft pulp process with emphasis on the lime kiln, since the optimum operation of this equipment allows to minimize fuel consumption and environmental impact of this process.*

**Keywords:** Kraft process. Causticizing. Lime kiln.

<sup>1</sup> Artigo financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) e pelo Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora (DTI - CNPq).

<sup>2</sup> Acadêmica de Engenharia Química pelo curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Alegre, ES, Brasil. E-mail: erica\_dare2@hotmail.com.

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia Industrial pelo Centro Universitário do Leste de Minas Gerais (UNILESTE), Coronel Fabriciano, MG, Brasil. Professor na Faculdade Única de Ipatinga, Ipatinga, MG e especialista em Automação e Otimização de Processos na Celulose Nipo-Brasileira S.A. (CENIBRA), Belo Oriente, MG. E-mail: olivert.pinheiro@cenibra.com.br

<sup>4</sup> Doutora em Engenharia Química pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Professora da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Alegre. E-mail: andreaosc@yahoo.com.br

<sup>5</sup> Doutor em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Professor da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Alegre. E-mail: eslyfcjr@yahoo.com.br

## 1 Introdução

O Brasil, em 2012, teve um crescimento médio anual de 7,1%, na produção de celulose e 5,5%, na produção de papel. Isso tornou o País um dos líderes mundiais na produção de celulose e papel, ocupando respectivamente, a 4ª e 9ª colocação no *ranking* de mercado, como mostrado no Anexo A.

Para essa produção, o Brasil conta com a ajuda das condições climáticas e uma engenharia florestal desenvolvida. As indústrias de celulose alcançam, hoje, patamares elevados de produção e qualidade, competindo em níveis até mesmo superiores ao mercado mundial. Desde o plantio da madeira até o processo de cozimento e produto final, os sistemas automatizados têm sido amplamente utilizados, o que gera uma alta escala produtiva, com custos mais baixos.

Diante dessa estimativa de crescimento do setor de celulose, vale ressaltar que isso não significará impactos ambientais, pois as florestas ocuparão áreas já desmatadas e ainda por vários projetos de fomento florestal. No entanto, esse crescimento é uma grande oportunidade de novos desenvolvimentos tecnológicos nos processos de fabricação, para os sistemas que os controlam e ainda para o crescimento da economia do País.

O processo Kraft tem sido o processo dominante na produção de celulose por ser um processo com cozimento contínuo (CORREIA, 2010). Esse processo teve origem no final do século XIX. As primeiras patentes que tratam da deslignificação de madeira, através de uma solução de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio, foram obtidas por A.K. Eaton em 1870 e 1871 (SJOHOLM, 1999).

Acredita-se que o inventor do processo Kraft foi o químico pesquisador C.F. Dahl da Alemanha. Ele descobriu a possível substituição do carbonato de sódio por sulfato de sódio para reposição dos químicos de cozimento (CLAYTON, 1969).

O efeito positivo do novo método foi justificado com as melhorias das propriedades de resistência da polpa. Os primeiros processos de utilização industrial foram realizados com madeiras da Escandinávia, e o primeiro papel foi produzido na Suécia em 1885. O papel apresentou propriedades de maior resistência, sendo conhecido como processo Kraft, pela derivação da palavra sueca para o conceito de resistência (CORREIA, 2010).

A partir disso, o processo Kraft passou a competir com o processo sulfito. Com o desenvolvimento das operações unitárias, o processo teve avanço nas áreas de evaporação e queima do licor. O progresso aconteceu na década de 1930, através do Forno de Recuperação de Tomlinson, onde a evaporação final e a queima do licor preto, geração do vapor e recuperação dos químicos de cozimento foram incorporados em uma única unidade na caldeira de recuperação química. Continuando com o desenvolvimento no final das décadas de 30 e 40, passou-se a utilizar industrialmente o digestor contínuo, a lavagem por difusão de polpa dentro do digestor, os processos de recuperação do carbonato em fornos de cal, os processos de caustificação, tratamento de efluentes, etc. (CORREIA, 2010).

Uma vantagem do processo Kraft consiste em sua capacidade de ter mínimas perdas químicas e máxima eficiência energética. Cerca de 96 a 97% dos reagentes químicos utilizados na polpação são recuperados (FOELKEL, 2009).

Uma fábrica de celulose Kraft pode ser considerada capaz de gerar sua própria energia, a partir da fração da madeira dissolvida no licor preto (licor residual de cozimento), pois cerca da metade do peso da madeira é dissolvida nesse processo de separação das fibras, e essa madeira dissolvida e na forma líquida se converte em um biocombustível nas fábricas de celulose Kraft (FOELKEL, 2009).

A importância do reaproveitamento do licor preto influencia na redução do consumo de combustíveis fósseis, economizando energia na

diminuição de custos e na redução do impacto ambiental. Observa-se, no Anexo B, que o aumento da participação do licor preto na matriz energética está atingindo seu máximo. Além da energia renovável do licor preto, as fábricas de celulose geralmente empregam caldeiras de biomassa (folhas e galhos) que também geram parte da energia da fábrica. Entretanto, no forno de cal não se utiliza essa biomassa, sendo necessário o emprego de combustíveis fósseis como o óleo ou gás natural. Dessa forma, um aumento da eficiência energética no forno de cal, além de possibilitar o aumento da competitividade da empresa, é de extrema importância para a diminuição dos impactos ambientais do setor de produção de celulose. Isso porque o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), liberado na queima do licor preto ou da biomassa, é absorvido nas florestas da empresa, gerando uma emissão nula de gases de efeito estufa (INSTITUTO CARBONO BRASIL, 2014). A emissão nula de gases efeito estufa não ocorre com os combustíveis fósseis que são extraídos do subsolo, porque a liberação de gás carbônico para a atmosfera, na sua queima, não é compensada pela equivalente absorção de gás carbônico por florestas.

De acordo com Green e Hough (1992), a viabilidade econômica de uma fábrica depende da capacidade do sistema de caustificação, para converter produtos químicos recuperados em um licor branco de qualidade, assim atender à demanda de produção de celulose. Ressalta-se que a cal necessária à reação de caustificação é produzida no forno de cal.

Considerando-se a importância da produção de celulose na economia nacional e especificamente o papel do forno de cal nessa indústria, o objetivo deste trabalho é apresentar um estudo sobre o processo de obtenção de celulose Kraft com ênfase no forno de cal. A justificativa para este estudo é que a operação ótima do forno de cal permite minimizar o gasto com combustível fóssil na indústria, promovendo redução de custos e dos impactos ambientais.

## 2 Visão geral do processo Kraft

O processo Kraft é a principal rota para a obtenção de celulose (MAITAM; COSTA JR.; COSTA, 2012). Em uma moderna indústria de celulose há etapas como: descascamento da madeira, picagem de cavacos, cozimento, depuração, lavagem, branqueamento e secagem as quais são indicadas na figura 1 (CORREIA, 2010).

Basicamente, a função do processo Kraft é dissolver a lignina, agente ligante das fibras na madeira, com o objetivo de liberar as fibras com o mínimo de degradação dos carboidratos (celulose e hemicelulose). Na etapa de cozimento, são empregados o hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) e o sulfeto de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) como agentes ativos na reação (D'ALMEIDA, 1988).

A celulose é uma substância natural presente nos vegetais, dos quais é obtida por processos e tecnologias específicas. Essa substância caracteriza-se como um importante componente das células vegetais que é usualmente chamada de fibra, base para a produção de papel (AZZOLINI; FABRO, 2012).

A lignina é uma substância química que confere rigidez à parede celular, sendo responsável pela ligação entre as fibras da madeira.

Concluída a etapa de cozimento da madeira nos digestores, os residuais químicos e as substâncias dissolvidas formam a solução aquosa, que é chamada de licor preto, rica em lignina e reagentes químicos utilizados na polpação. O processo Kraft de recuperação processa o licor preto fraco e regenera os produtos químicos de cozimento, garantindo a viabilidade econômica e ambiental da indústria (MELO *et al.*, 2011).

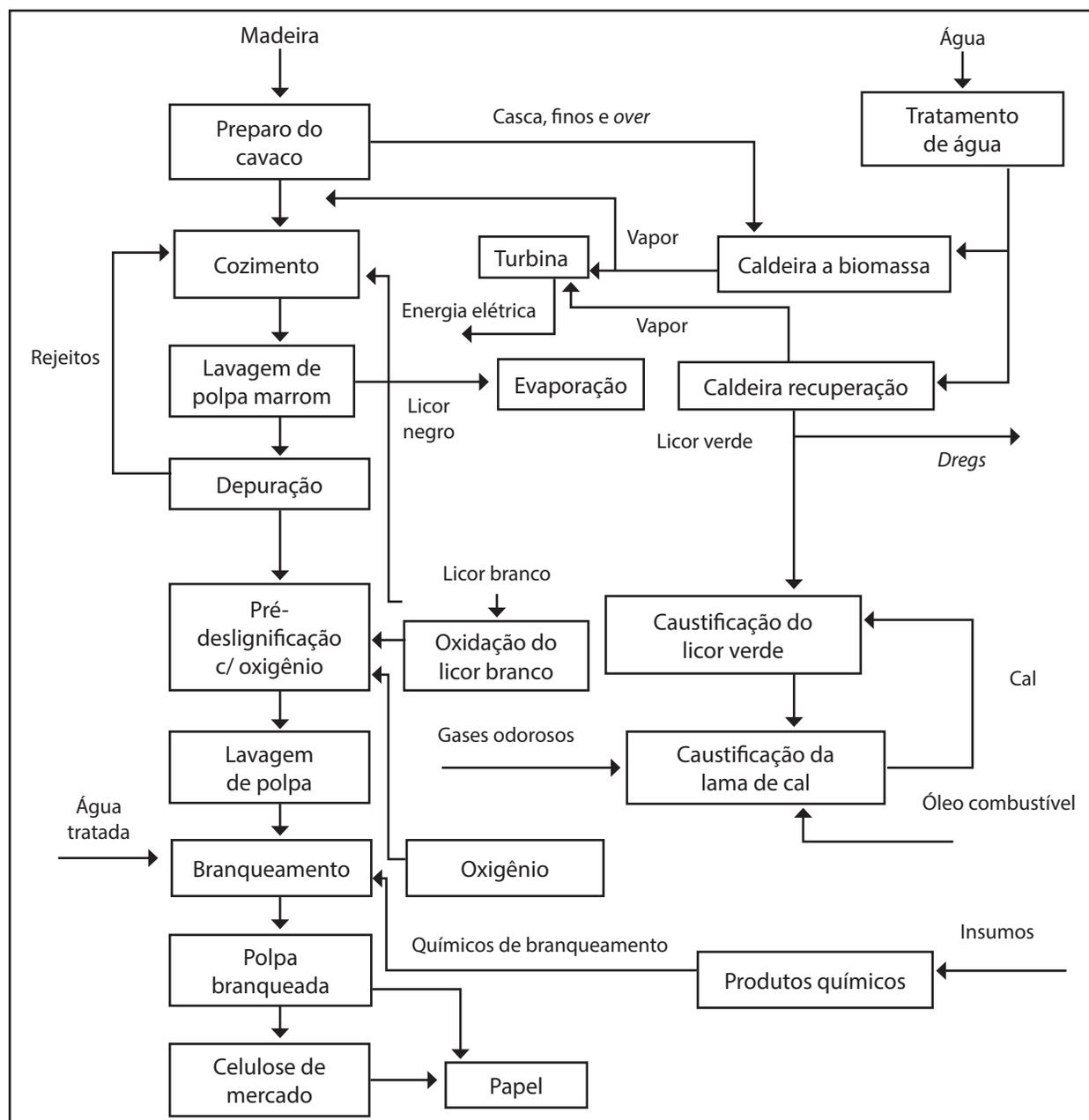
A evaporação é o primeiro passo para o processo de recuperação dos produtos químicos, na qual o licor preto que sai do digestor (conhecido por licor preto fraco) é enviado a um sistema de evaporadores de múltiplo efeito para elevação do seu teor de sólidos, gerando o licor preto forte (FIGUEIRÊDO, 2009).

O licor mais concentrado (licor preto forte) é, então, queimado em caldeiras de recuperação.

Nesse processo de queima, acontece a redução do sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) em sulfeto de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ), sendo assim recuperado um dos agentes ativos utilizados no processo de polpação. Para que a redução do sulfato a sulfeto aconteça, a parte inferior da caldeira é deficiente em oxigênio, e

o agente redutor é carbono proveniente da pirólise dos compostos orgânicos (SILVA et al., 2008). Os sais fundidos, resultantes desse processo de queima, constituem o *smelt* que é rico em sulfeto de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) e carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) (FIGUEIRÊDO, 2009).

Figura 1 - Processo Kraft

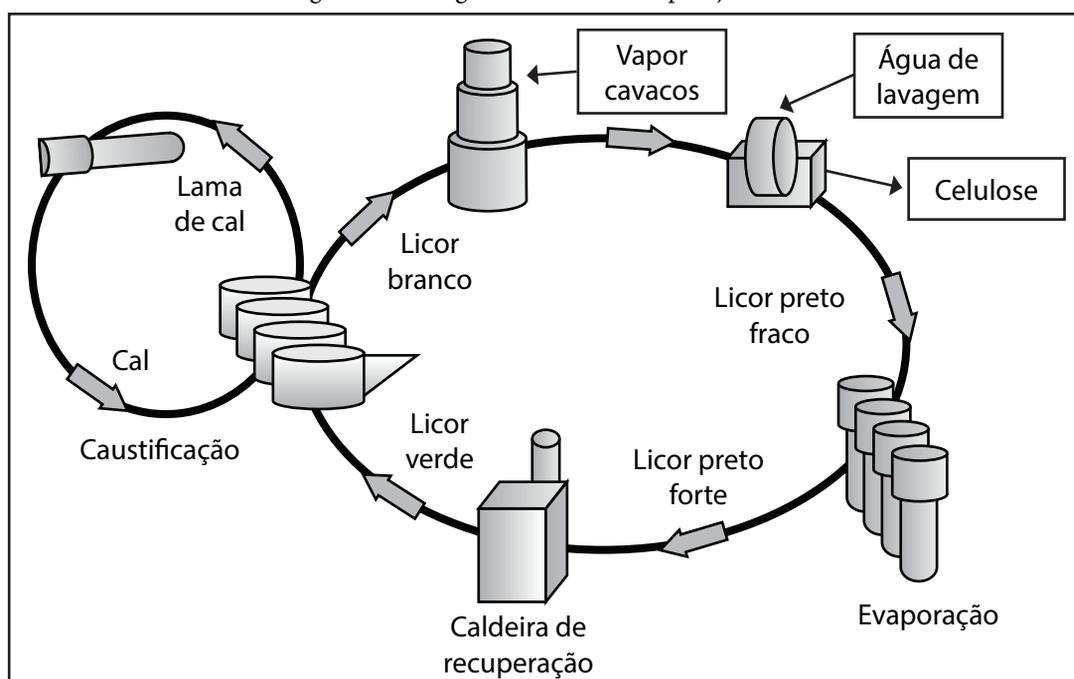


Fonte: Adaptado de Correia (2010).

O *smelt* dissolvido gera a solução denominada licor verde. Através da adição de cal nesse licor, acontece a reação de caustificação, onde o carbonato de sódio

( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), presente no licor verde, é convertido em hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), fechando assim o ciclo de recuperação dos produtos químicos. A figura 2 representa uma visão geral do ciclo de recuperação Kraft (FIGUEIRÊDO, 2009).

Figura 2 - Visão geral do ciclo de recuperação Kraft



Fonte: Figueirêdo (2009).

De acordo com Assumpção *et al.* (1988), o processo Kraft tem como principal vantagem, o sistema de recuperação dos produtos químicos a ele associado. E como desvantagens: o alto custo, as emissões de odores no ambiente, baixo rendimento entre 40 a 50%, baixa alvura, após o cozimento e, conseqüentemente, maior custo de branqueamento. Mesmo com essas desvantagens, esse ciclo de recuperação se torna o principal meio de geração de energia para a indústria, fazendo com que o processo seja ecologicamente correto (COSTA, 2000).

A polpa que deixa o digestor, após a etapa de cozimento, passa por uma lavagem de massa marrom. A mesma é branqueada, através de uma série de processos químicos que utilizam oxigênio, peróxido de hidrogênio, soda cáustica e dióxido de cloro, entre outros agentes de branqueamento. Após esses procedimentos, a polpa branqueada é enviada para as etapas de secagem e enfardamento (FIGUEIRÊDO, 2009).

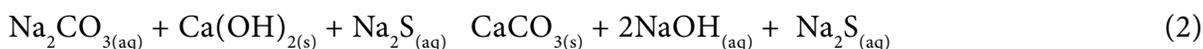
### 3 Processo de caustificação

O sistema de caustificação, cujo objetivo é a recuperação do licor branco, a partir de produtos químicos inorgânicos, oriundos da caldeira de recuperação e forno de cal, é de fundamental importância econômica e ambiental para o processo Kraft de produção de celulose. Esse processo envolve uma reação química simples, seguida de uma sequência de processos físicos que envolvem, basicamente, separação sólido/líquido.

Para ocorrer a reação química a cal ( $\text{CaO}$ ), é dissolvida em água, formando hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), promovendo liberação de energia, como apresentado na equação (1) (reação de extinção). Com isso, o produto formado reage com o carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), presente no licor verde, para produzir soda cáustica ( $\text{NaOH}$ ) e carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), conhecido por lama de cal (equação 2). A reação de

extinção ocorre rapidamente e com altas temperaturas, próximas a 100°C. As reações, descritas

pelas equações (1) e (2), ocorrem de maneira simultânea (FIGUEIRÊDO, 2009).



A equação (2) pode ser descrita de maneira simplificada, conforme equação (3),

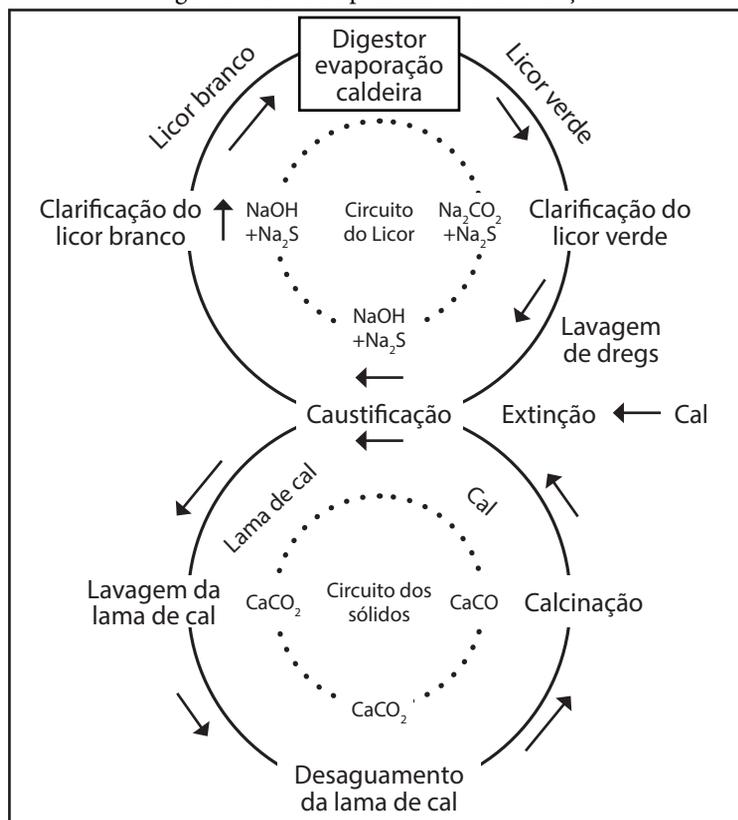
uma vez que o Na<sub>2</sub>S não tem participação ativa na reação:



Tais constituintes químicos, principalmente carbonato de sódio e sulfeto de sódio, são misturados com o licor fraco da área de caustificação para formar o licor verde. A cal é dosada à solução de *smelt* (licor verde), produzindo licor branco e carbonato de cálcio como subproduto (lama de cal). O licor branco é separado da lama de cal e enviado para o digestor, onde atuará como licor de cozimento. O carbonato de cálcio é calcinado no forno de cal para produzir cal (FIGUEIRÊDO, 2009).

A lama de cal é lavada para reduzir seus constituintes químicos, antes de ser calcinada para formar a cal e o licor fraco (resultado da lavagem da lama de cal) gerado é reciclado para dissolver o *smelt* e produzir o licor verde (FIGUEIRÊDO, 2009). Com isso, o sistema de caustificação funciona como uma operação em ciclo fechado, com os sólidos envolvidos em uma parte do ciclo e o licor em outra, conforme figura 3.

Figura 3 - Ciclo do processo de caustificação



Fonte: Adaptado de Green e Hough (1992).

O processo apresenta taxas relativamente altas de recuperação de químicos e as reposições ocorrem, através da soda cáustica e sulfato de sódio, nos tanques de licor branco, assim como a cal virgem e carbonato de cálcio, nos processos de caustificação (ALMEIDA, 2013).

O desempenho de um sistema de caustificação pode ser afetado por vários fatores como a qualidade e a quantidade de cal, a temperatura e a intensidade da mistura do licor e as concentrações dos componentes no licor verde (SETHURAMAN; KRISHNAGOPALAN; KRISHNAGOPALAN, 1995).

Para atingir o máximo possível de eficiência de caustificação, é importante o controle desse processo, produzindo licor branco com uma adequada concentração e pureza, evitando problemas associados a altas e baixas dosagens de cal (FIGUEIRÊDO, 2009).

### 3.1 Circuito de licor

O circuito de licor inicia com licor verde, composto de carbonato de sódio e

sulfeto de sódio e termina com licor branco, sendo esse o licor de cozimento, contendo hidróxido de sódio e sulfeto de sódio. O licor branco retorna para a operação de recaustificação, como licor verde, após uma série de etapas de processamento na fábrica (COHN; RIBEIRO, 2002).

### 3.2 Circuito de sólidos

O ciclo completo dentro da operação de recaustificação é o ciclo de óxido de cálcio (CaO). O óxido de cálcio, adicionado ao licor verde, para a caustificação, resulta na formação do carbonato de cálcio (lama de cal). A lama de cal é lavada para a remoção substancial de todo o licor cáustico e, após o desaguamento, é calcinado para produzir óxido de cálcio (cal) novamente para uso na caustificação (COHN; RIBEIRO, 2002). São denominados GRITS alguns dos elementos inertes e são removidos, após a operação de extinção da cal, pelo peneiramento ou classificação.

Tabela 1 - O circuito de licor

Etapas	Objetivo
Clarificação de licor verde	Para remoção substancial de todos sólidos suspensos chamados dregs.
Lavagem de dregs	Para remover a soda residual dos sólidos sedimentados, antes da descarga residual.
Extinção e caustificação	Para extinção de cal viva e sua reação para produção de licor branco.
Clarificação de licor branco	Para remoção substancial de todos os sólidos suspensos, proporcionando um licor de cozimento de clareza adequada (50 a 100 ppm de sólidos suspensos).
Acabamento no licor branco	Para maior remoção dos sólidos remanescentes, quando desejado.

Fonte: Cohn e Ribeiro (2002).

O circuito compreende basicamente a cal (carbonato de cálcio), ainda que existam impurezas sólidas introduzidas com o licor verde. Essas

são removidas a fim de prevenir a excessiva formação de elementos inertes no circuito de óxido de cálcio sólido (COHN; RIBEIRO, 2002).

Tabela 2 - O circuito de sólidos

Procedimentos	Objetivo
Extinção de cal	Para converter a cal viva à forma hidratada.
Peneiramento	Para remover a parte grossa inerte.
Caustificação	Para conversão do carbonato de sódio a hidróxido de sódio.
Engrossador	Para concentrar os sólidos suspensos (carbonato de cálcio e inativos).
Lavagem	Recuperar a soda para retorno ao ciclo de licor e reduzir o nível bastante baixo da caustificação.
Desaguamento	Concentrar a lama para alimentação do forno.
Calcinação	Produzir cal viva, a partir do carbonato.

Fonte: Cohn e Ribeiro (2002).

#### 4 Aplicação do forno rotativo

Um equipamento industrial utilizado para tratar termicamente materiais é o forno rotativo (figura 4). Os materiais podem ser processados sob várias formas: grãos, pós, pelotas,

lamas, líquidos ou qualquer mistura deles. Suas principais funções são: aquecer a carga até a temperatura desejada no processo térmico e promover a adequada mistura e homogeneização dela, para garantir a uniformidade de sua temperatura (HARTKE, 2007).

Figura 4 - Forno rotativo



Fonte: Celulose Riograndense (2014).

De acordo com Hartke (2007), as aplicações industriais mais comumente encontradas para fornos rotativos são em secadores, para o pré-processamento de matérias-primas industriais, em incineradores, cuja função primária é destruir resíduos sólidos e líquidos e convertê-los em gases inertes e em fornos para tratamento térmico de materiais em alta temperatura.

Os fornos rotativos são utilizados na produção de cal, produção de cimento, secagem e pré-processamento de minérios, extração e reciclagem de materiais metálicos presentes em resíduos por pirólise, redução direta de metais, processamento e gaseificação de combustíveis ricos em voláteis, processamento de coque de petróleo, entre outros. Sendo que, a maior parte dos processos industriais de calcinação ocorre em fornos rotativos (MARTINS; OLIVEIRA; FRANCA, 2001).

Em fornos rotativos, o regime de operação mais utilizado é o contínuo, com sistemas de alimentação e descarga automatizados, a fim de garantir um fluxo constante de material. Podem também ser projetados para operarem em regime semi-contínuo, com alimentação e descarga em intervalos curtos para não interferir nos perfis de temperatura do interior do forno ou, em regime intermitente, com alimentação e descarga em bateladas. Os fornos são operados com baixo nível de preenchimento, pois o volume ocupado pela carga tem forte influência sobre os processos de transferência de calor e de massa e sobre o tempo de residência da carga no interior do forno rotativo (HARTKE, 2007).

Segundo Hartke (2007), o aquecimento da carga processada no forno pode ser de forma direta, com queimadores para a injeção de gases quentes no interior do forno ou, de forma indireta, aquecendo o forno, a partir de suas paredes com a utilização de resistências elétricas ou convecção com gases quentes externamente. No caso de fornos para operação em temperaturas elevadas, o interior do mesmo deve ser revestido de material refratário para garantir a sua integridade estrutural.

## 5 Forno de cal

A indústria de papel dos Estados Unidos começou a usar fornos na década de 1920. Fornos tinham dois suportes e eram relativamente pequenos, 1,8 - 2,4 m de diâmetro e 30 - 40 m de comprimento. Eles também eram ineficientes de energia, as taxas de consumo de combustível era equivalente a  $2,10 \cdot 10^{10}$  J por tonelada de produto (GREEN; HOUGH, 1992).

A pioneira na utilização de fornos foi a indústria do cimento. Versões modernas com três ou mais apoios, mais eficientes energeticamente e mais longos, normalmente, com 3 m de diâmetro e 85 m de comprimento. O aumento dos custos de combustíveis fósseis levaram a eficiência de combustível de  $6,32 \cdot 10^9$  J por tonelada de produto (GREEN; HOUGH, 1992).

O forno de cal rotativo tem como finalidades: reduzir os custos de produtos químicos, através da conversão da lama de cal ( $\text{CaCO}_3$ ) para cal ( $\text{CaO}$ ), e resolver o problema do descarte da lama de cal.

A lama de cal é um resíduo sólido de coloração cinza claro, homogêneo e sem odor característico, gerado no processo de clarificação do licor verde, no qual é processada para a recuperação da cal (MAEDA; COSTA; SILVA, 2010).

Para um bom desempenho do forno de cal, a qualidade da lama de cal, enviada ao forno, torna-se um fator relevante. Uma das características da lama de cal é a drenabilidade da sua camada. A baixa drenabilidade pode causar problemas tais como: a limitação de produção do forno, o aumento de combustível e, consequentemente, o aumento de emissões atmosféricas (CONTESSOTO, 2011).

O forno de cal clássico consiste em uma extremidade aberta do cilindro, revestido de refratário, sendo inclinado, a partir da extremidade de alimentação para a extremidade de descarga e é rodado em torno do seu eixo longitudinal (WILLIAMS; HOLM, 1975).

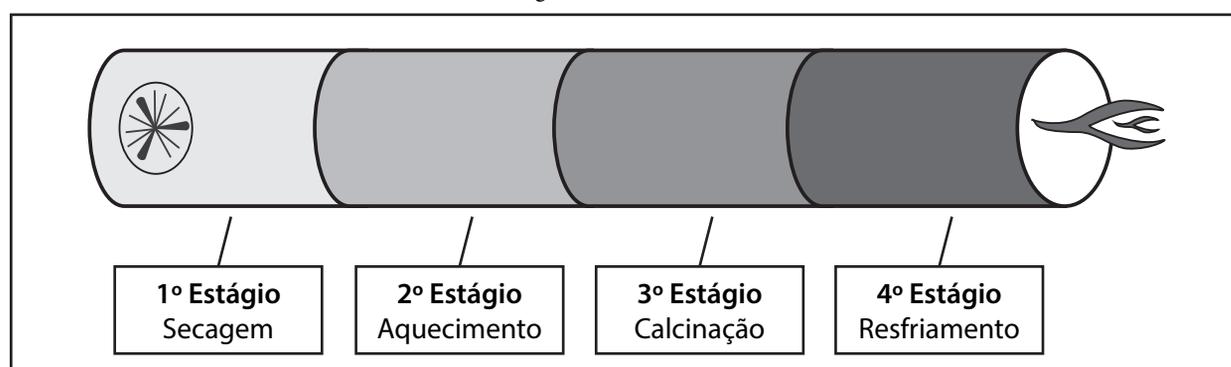
Gás natural (combustível) e ar são alimentados na extremidade do forno, e a lama de cal,

contendo 30 - 40% de umidade, é alimentada na zona de secagem ou extremidade superior da fornalha. Sendo assim, tem-se um fluxo em contracorrente entre o combustível e material. O carbonato de cálcio decompõe-se em óxido de cálcio e dióxido de carbono. Água e dióxido de carbono, juntamente com produtos gasosos

e particulados de combustão, são transportados para fora da extremidade de secagem. Portanto, o óxido de cálcio é estocado para reutilização (WILLIAMS; HOLM, 1975).

O forno de cal é dividido em quatro zonas funcionais (figura 5), as quais representam as etapas de conversão de lama de cal a óxido de cálcio (cal).

Figura 5 - Forno de cal



Fonte: Adaptado de Green e Hough (1992).

Na fase de secagem, a água presente na lama úmida, que entra no forno com um teor de 68% ou mais de sólidos, é evaporada. A secagem é realizada, quando a lama passa por uma série de correntes de metal fixadas no interior do forno, as quais são aquecidas pelos gases de combustão quentes. As correntes são utilizadas para secar a lama até aproximadamente 95% de sólidos. As correntes também atuam como cortinas de poeira, para minimizar a quantidade de poeira de cal perdida com os gases de combustão que saem do forno (GREEN; HOUGH, 1992).

Na segunda etapa, a lama seca é aquecida por dispositivos de transferência de calor, tais como agitadores que são ligados ao corpo do forno. Esses agitadores promovem uma boa mistura do material com os gases de combustão. Em alguns fornos, escudos e barras de aço estão incluídos na zona de aquecimento para melhorar a transferência de calor (GREEN; HOUGH, 1992).

A calcinação ocorre na terceira zona, onde o gás de dióxido de carbono é libertado e óxido de cálcio começa a ser formado. O sedimento

calcário ideal é de cerca de 2 cm de diâmetro. Se a lama não é bem seca e aquecida, esferas grandes de cal podem se formar no forno. A temperatura é um fator importante, durante a reação de calcinação, visto que, uma temperatura mínima de 815 °C é necessária para ocorrer a calcinação. Temperaturas acima de 1149 °C resultam em cal, queimada com propriedades de hidratação pobres e também danificam o revestimento refratário do forno (GREEN; HOUGH, 1992).

Na etapa final, o resfriamento ocorre, quando as pelotas passam sob o queimador e vão para a descarga do forno. As pelotas de cal quente vão esfriar, a partir da troca de calor com o fluxo de ar secundário da entrada, aumentando a eficiência do forno (GREEN; HOUGH, 1992).

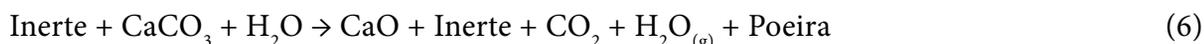
Os gases que saem do forno de cal passam por um precipitador eletrostático para retenção de material particulado, antes de serem lançados na atmosfera (MENELLI, 2013).

O conhecimento do balanço de calor é importante para a concepção de novos fornos e na análise dos já existentes (GREEN; HOUGH, 1992).

A reação básica em um forno rotativo é apresentada pela equação 4:



Se as impurezas da alimentação e CaCO<sub>3</sub> residual são consideradas inertes, uma nova equação (equação 5) descreve o processo de



## 6 Considerações finais

Com um crescimento na produção de celulose e papel, o processo Kraft tem sido o processo dominante na produção de celulose, por ser um processo com cozimento contínuo. As principais etapas do processo Kraft são: descascamento da madeira, picagem de cavacos, cozimento, depuração, lavagem, branqueamento e secagem.

O processo Kraft possui a vantagem de ter mínimas perdas químicas e máxima eficiência energética, sendo que 96 a 97% dos reagentes químicos utilizados na polpação são recuperados.

O forno de cal rotativo é utilizado para converter o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Tem como objetivo reduzir os custos de produtos químicos de uma indústria de celulose, através da conversão da lama de cal (CaCO<sub>3</sub>) para cal (CaO) e, com isso, resolver o problema do descarte da lama de cal. Outras indústrias utilizam forno rotativo, pois, ele trata termicamente materiais.

Assim, os fornos rotativos têm grande importância em projetos industriais, o que torna ainda mais incessante a busca pelo conhecimento desse processo e pelo aprimoramento do mesmo. No caso da fábrica de celulose, em que a maior parte da energia consumida, é proveniente de fontes renováveis, o interesse no forno rotativo de cal também é devido ao fato do mesmo empregar combustíveis fósseis.

forno rotativo como se segue:



O pó é descarregado no gás de combustão, a partir do forno e a lama de cal alimentada ao forno, contém água. Assim, a equação final (equação 6), para um balanço dos materiais é a seguinte:

## Referências

ALMEIDA, V. B. **Caracterização, análise e perspectivas da matriz energética do setor de papel e celulose**. 2013. 66 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) - Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2013.

ASSUMPCÃO, R. M. V. *et al.* Polpação química. In: SENAI; IPT. **Tecnologia de fabricação de pasta celulósica**. 2. ed. São Paulo: Escola SENAI Theobaldo de Nigris, 1988. v. 1, cap. 6.

AZZOLINI, J. C.; FABRO, L. F.; Controle da eficiência do sistema de tratamento de efluentes de uma indústria de celulose e papel da região Meio Oeste de Santa Catarina. **Unoesc & Ciência - ACET**, Joaçaba, v. 3, n. 1, p. 75-90. 2012.

BRACELPA. **Dados estatísticos**. 2014. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/booklet.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2014.

CELULOSE RIO GRANDENSE. **Exposição fotográfica virtual**. 2014. Disponível em: <<http://www.celuloseriograndense.com.br/exposicao40anos/>>. Acesso em: 19 mar. 2014.

CLAYTON, D. W. The chemistry of alkaline pulping. In: \_\_\_\_\_. **The pulping of wood**. New York: McGraw Hill, 1969. v. 1, cap. 8, p. 347-438.

COHN, P. E.; RIBEIRO, R. N. Medição *on line* do alcali total nos licores branco e verde empregando tecnologia FT-NIR. In: Congresso e Exposição Anual de Celulose e Papel, 35., São Paulo, 2002. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2002.

CONTESSOTO, V. C. **Efeito de elementos não processáveis (Si, Mg, Al, P) e dregs na drenabilidade da lama de cal**. 2011. 21 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de

- Celulose e Papel) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- CORREIA, F. M. **Análise de distúrbios de compactação de cavacos de eucalipto em digestores contínuos fase vapor.** 2010. 132 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Celulose e Papel) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2010.
- COSTA, A. O. S. **Alternativas para o controle de um sistema de evaporadores de múltiplo efeito.** 2000. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.
- D'ALMEIDA, M. L. O. Celulose e papel. In: SENAI; IPT. **Tecnologia de fabricação de pasta celulósica.** 2. ed. São Paulo: Escola SENAI Theobaldo de Nigris, 1988. v. 1, cap. 3.
- FIGUEIRÊDO, L. S. **Modelagem matemática do estado estacionário de um real sistema de caustificação em uma fábrica de celulose.** 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, 2009.
- FOELKEL, C. **Individualização das fibras da madeira do eucalipto para a produção de celulose kraft.** 2009. Disponível em: <[http://www.if.ufrj.br/biolig/art\\_citados/Individualiza%C3%A7%C3%A3o%20das%20fibras%20da%20madeira%20do%20Eucalipto%20para%20a%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20celulose%20Kraft.pdf](http://www.if.ufrj.br/biolig/art_citados/Individualiza%C3%A7%C3%A3o%20das%20fibras%20da%20madeira%20do%20Eucalipto%20para%20a%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20celulose%20Kraft.pdf)>. Acesso em: 19 mar. 2014.
- GREEN, R. P.; HOUGH, G. **Chemical recovery in the alkaline pulping processes.** 3. ed. Atlanta: Tappi, 1992. 208 p.
- HARTKE, R. F. **Modelagem e simulação térmica de um forno rotativo para a produção de agregado de argila calcinada.** 2007. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- INSTITUTO CARBONO BRASIL. **Biomassa.** 2014. <Disponível em <<http://www.institutocarbonobrasil.org.br/biocombustiveis/biomassa>>. Acesso em: 26 mar. 2014.
- MAEDA, S.; COSTA, E. R. O.; SILVA, H. D. **Uso de resíduos da fabricação de celulose e papel e da reciclagem de papel: dados eletrônicos.** Colombo: Embrapa Florestas, 2010.
- MAITAM, M. V. G.; COSTA JR., E. F.; COSTA, A. O. S. Modelagem fenomenológica e em regime estacionário do processo de recuperação Kraft. **Revista Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 8, n. 15, p. 2393-2402, 2012.
- MARTINS, M. A.; OLIVEIRA, L. S.; FRANCA, A. S. Modeling and simulation of petroleum coke calcination in rotary kilns. **Fuel**, v. 80, n. 11, p. 1545-1554, 2001.
- MELO, J. R. *et al.* Estudo das características do licor preto. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2011.
- MENELLI, J. C. **Gestão sistêmica dos processos industriais de uma fábrica de celulose.** 2013. 57 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Celulose e Papel) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.
- SETHURAMAN, J.; KRISHNAGOPALAN, J.; KRISHNAGOPALAN, G. Kinetic model for the causticizing reaction. **Tappi Journal**, v. 78, n. 1, p. 115-120, 1995.
- SILVA, W. L. *et al.* Reduction efficiency prediction of Cenibra's recovery boiler by direct minimization of gibbs free energy. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 25, n. 3, p. 603-611, 2008.
- SJOHOLM, E. **Characterisation of Kraft pulps by size-exclusion chromatography and Kraft lignin samples by capillary zone electrophoresis.** 1999. 82 p. Thesis (Chemical Engineering PhD) - Royal Institute of Technology, Stockholm, 1999.
- WILLIAMS, T. J.; HOLM, R. A. **Modeling and control of kraft production systems for pulp production, chemical recovery, and energy conservation.** Pittsburgh: Instrument Society of America, 1975. 294 p.

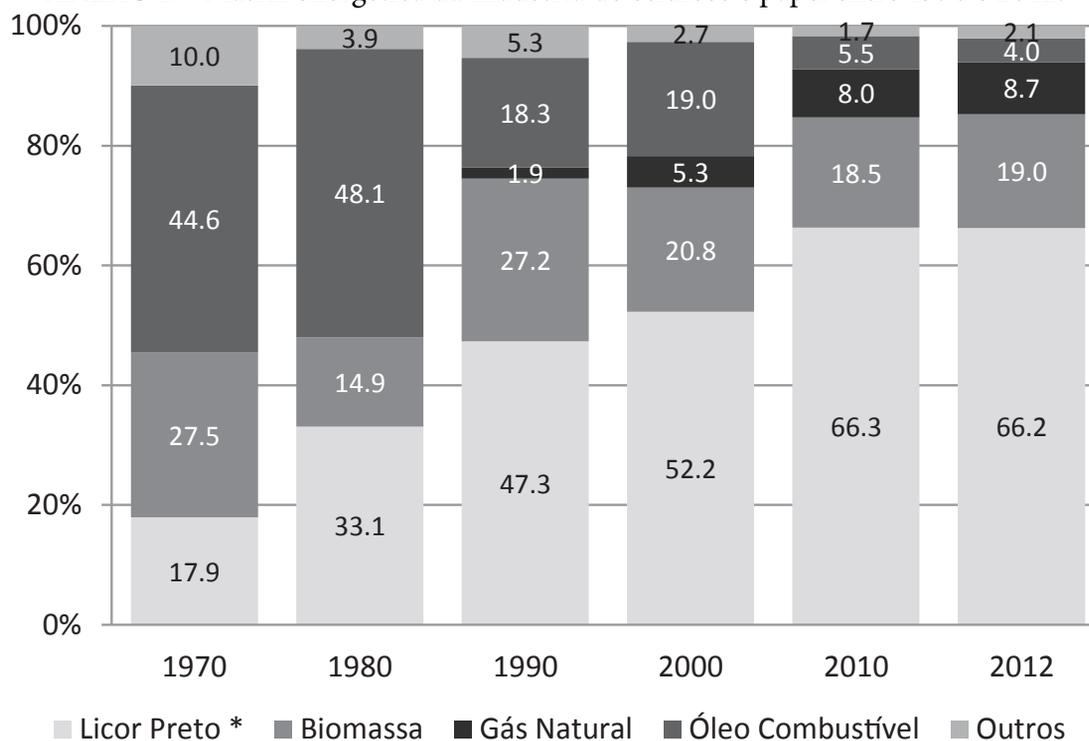
## ANEXOS

ANEXO A - Médias de produção de celulose e papel.

CELULOSE		PAPEL	
País	mil toneladas	País	mil toneladas
1. EUA	50.351	1. China	102.500
2. China	18.198	2. EUA	74.375
3. Canadá	17.073	3. Japão	26.083
4. Brasil *	13.977	4. Alemanha	22.630
5. Suécia	11.672	5. Suécia	11.417
6. Finlândia	10.237	6. Coreia do Sul	11.333
7. Japão	8.642	7. Canadá	10.751
8. Rússia	7.519	8. Finlândia	10.694
9. Indonésia	6.710	9. Brasil	10.260
10. Chile	5.155	10. Indonésia	10.247
11. Índia	4.095	11. Índia	10.242
12. Alemanha	2.636	12. Itália	8.664
Demais	10.376	Demais	90.789
<b>TOTAL MUNDO</b>	<b>166.641</b>	<b>TOTAL MUNDO</b>	<b>399.985</b>

Fonte: BRACELPA (2014).

ANEXO B - Matriz energética da indústria de celulose e papel entre 1970 e 2012.



Fonte: BRACELPA (2014).

